



Markus Schantl, BSc

**TE-Verhalten von Defekten in mit
synthetischer Luft isolierten
DC-Systemen**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur
Masterstudium Elektrotechnik

eingereicht an der
Technischen Universität Graz

Betreuer:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Schichler
Dipl.-Ing. Bernhard Schober, BSc

Institut für
Hochspannungstechnik und Systemmanagement

Graz, Juni 2022

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

Kurzfassung

In dieser Arbeit werden Teilentladungsmessungen (TE-Messungen) mit hoher Gleichspannung in gasisolierten Testzellen durchgeführt. Es werden typische Defekte von gasisolierten Schaltanlagen (GIS) bzw. gasisolierten Leitungen (GIL) nachgebildet. Die jeweiligen Defekte werden mit synthetischer Luft, als alternatives Isoliergas, und SF₆ durchgeführt. Um die aus den Messungen ermittelten Kenngrößen gezielt charakterisieren und darstellen zu können, werden NoDi*-Diagramme verwendet. Diese ermöglichen eine eindeutige Zuordnung der Defekte bei synthetischer Luft und SF₆.

Bei gleichem Betriebsdruck besitzt synthetische Luft als Isoliermedium eine geringere elektrische Festigkeit als SF₆. Zuerst werden die typischen Defekte bei gleichem Gasdruck untersucht und analysiert inwieweit sich die NoDi*-Diagramme unterscheiden. Anschließend wird ein Vergleich bei einer annähernd gleichen elektrischen Festigkeit von synthetischer Luft und SF₆ durchgeführt. Zum Schutz der Umwelt wird synthetische Luft bereits als Isoliergas in GIS- und GIL-Anlagen verwendet.

Diese Arbeit ist in mehrere Abschnitte unterteilt. Der erste Teil befasst sich mit den theoretischen Grundlagen von Teilentladungen, wie mögliche Ursachen von Teilentladungen und den Entladungsmechanismus. Das Auftreten von Teilentladungen hat unterschiedliche Gründe in Gasen, Flüssigkeiten und Feststoffen. Im nächsten Kapitel wird die Messung von Teilentladungen bei Gleichspannung beschrieben. Die gemessenen Kenngrößen können weiterverarbeitet und in graphischer Form als NoDi*-Diagramme dargestellt werden. Der darauffolgende Teil beschreibt typische Defekte von GIS- und GIL-Anlagen, wie die Spitze auf der Hochspannungselektrode und Spitze auf Erdpotential, freies Potential, springendes Partikel, Firefly-Effekt und Gleitentladungen. Das nächste Kapitel handelt von alternativen Isoliergasen, wobei ein Überblick über bekannte Alternativen zu SF₆ vermittelt wird.

Im letzten Teil werden die durchgeführten TE-Messungen der jeweiligen Defekte mit synthetischer Luft und SF₆ behandelt und die ermittelten Ergebnisse beschreiben. Es wird eine Gegenüberstellung der NoDi*-Diagramme der jeweiligen Defekte bei unterschiedlichem Gasdruck durchgeführt. Für die jeweiligen Defekte weisen die NoDi*-Diagramme von synthetischer Luft ähnliche Muster auf wie SF₆.

Schlüsselwörter:

- Teilentladung
- Schwefelhexafluorid SF₆
- Synthetische Luft O₂/N₂
- NoDi*-Diagramme
- Alternative Isoliergase

Abstract

This thesis deals with partial discharge (PD) measurements at high DC voltages in gas-insulated test cells. The typical defects from GIS and GIL will be simulated in special designed gas-insulated test cells. Each defect is measured with synthetic air and SF₆. Their parameters and derived values need to be represented in diagrams, such as NoDi* pattern. With this pattern the underlying defect can precise dedicated under synthetic air and SF₆.

At the same gas pressure, the electrical properties of the dielectric of synthetic air is lower than SF₆. First the typical defects will be examined and analyzed at the same gas pressure up to what extent the NoDi* pattern differentiate. Afterwards a comparing at almost the same electrical properties of the dielectric of synthetic air and SF₆. For protection of the environment synthetic air is already used in GIS and GIL.

This thesis is separated in several parts. The first part describes fundamental of partial discharges, like causes of PD and discharge mechanisms, also the reasons for PD in gases, liquids and solid insulating materials. The next section deals with the measurement of PD at DC voltage and the results of the measurement can be plotted as NoDi* pattern.

Another part describes typical defects from GIS and GIL, like protrusion, floating electrode, free metallic particle and sliding discharges. The next part gives an overview of alternatives insulated gases. The last section deals with PD measurements of each defect in synthetic air and SF₆, at several gas pressure and for each measurement associated NoDi* pattern. For each defect the NoDi* pattern for synthetic air display similar pattern like SF₆.

Keywords:

- Partial discharge
- Sulfur hexafluoride SF₆
- Synthetic air O₂/N₂
- NoDi* pattern
- Alternative insulating gases

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
2	THEORETISCHE GRUNDLAGEN ZU TEILENTLADUNGEN	3
2.1	Allgemeines	3
2.2	Ursachen für Teilentladungen.....	3
2.3	Koronaentladungen in Gasen.....	3
2.4	Teilentladungsquellen.....	5
2.4.1	TE-Quellen in Gasen	5
2.4.2	TE-Quellen in Flüssigkeiten.....	5
2.4.3	TE-Quellen in Feststoffen	6
3	TEILENTLADUNGEN BEI GLEICHSPANNUNG	8
3.1	Teilentladungsimpuls.....	8
3.2	Teilentladungsmessung bei Gleichspannung	8
3.3	Prüfkreis und Messsysteme	9
3.4	Darstellungen von Teilentladungen	10
3.4.1	Kenngrößen	10
3.4.2	Wechselspannung	11
3.4.3	Gleichspannung	11
3.4.4	NoDi*-Diagramme	13
4	TYPISCHE DEFEKTE IN GIS/GIL-SYSTEMEN.....	15
4.1	Allgemeines	15
4.2	Typische Defekte in gasisolierten Systemen	17
5	ALTERNATIVEN ZU SF₆ ALS ISOLIERMEDIUM.....	19
5.1	Allgemeines	19
5.2	Isoliergase für GIS/GIL-Systeme	19
5.2.1	Schwefelhexafluorid SF ₆	19
5.2.2	3M™ Novec™	20
5.2.3	Green gas for grid – g ³	21
5.2.4	AirPlus™	22
5.2.5	Synthetische Luft (Clean Air)	23
5.2.6	Elektrische Festigkeit von synthetischer Luft bei hohem Druck.....	23

6	TEILENTLADUNGSMESSUNGEN AN TYPISCHEN DEFECTEN VON GIS/GIL-SYSTEMEN	25
6.1	Messaufbau	25
6.2	Beschreibung der Defekte.....	26
6.3	Messprozedur.....	29
6.4	Ergebnisse für synthetische Luft und SF ₆ bis zu $p = 0,5$ MPa.....	30
6.4.1	Spitze auf der Hochspannungselektrode und Spitze auf Erdpotential	30
6.4.2	Freies Potential	54
6.4.3	Gleitentladungen.....	60
6.4.4	Springendes Partikel.....	66
6.5	Teilentladungsverhalten mit synthetischer Luft bei hohem Druck von $p = 0,95$ MPa	79
6.6	Automatische Klassifizierung der Defekte	83
7	ZUSAMMENFASSUNG.....	85
	LITERATURVERZEICHNIS	88
	ANHANG	91
	Abkürzungsverzeichnis	92
	Bilderverzeichnis.....	93
	Tabellenverzeichnis.....	97

1 Einleitung

Der Klimawandel ist ein wichtiges Thema in der Energieversorgung und benötigt daher ein umfangreiches Umdenken. Durch das Kyoto-Protokoll soll es zu einem weltweiten Wandel in der Energiewirtschaft kommen. Die Anzahl der erneuerbaren Energien steigt immer weiter an, während die Energieerzeugung aus fossilen Kraftwerken abnimmt. Dieser Wandel hat zur Folge, dass neue Herausforderungen entstehen, an z. B. die Energieübertragung, Verteilung und Speicherung elektrischer Energie. Die Energiebereitstellung und Stabilität des Netzes sollten weiterhin gesichert bleiben. Aufgrund des hohen Platzbedarfes von alternativen Energieerzeugern, müssen weite Strecken beim Transport in Kauf genommen werden, da z. B. Windanlagen nicht zentral bei den Verbrauchern errichtet werden können.

Die Übertragung mit Wechselspannung ist nur in bestimmten Grenzen durchführbar. Mit der Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ) sind Übertragungskapazität und Stabilität über weite Übertragungsstrecken möglich. Zu dem Vorteil der geringen Verluste ist die HGÜ-Energieübertragung auch wirtschaftlich und effizient. Zusätzlich zu den Übertragungsstrecken mit Freileitungen und Gleichspannungskabeln werden im Bereich von Umspannwerken und städtischen Gebieten gasisolierte Schaltanlagen (GIS) und gasisolierte Leistungen (GIL) eingesetzt. Für eine kompakte Bauweise sind GIS- und GIL-Anlagen mit dem Isoliergas Schwefelhexafluorid (SF_6) befüllt. Dies ist möglich, da SF_6 bereits bei einem Betriebsdruck von 0,5 MPa eine ähnliche Isolierfähigkeit aufweist wie bekannte Isolieröle. SF_6 zählt andererseits zu den stärksten bekannten Treibhausgasen. Um die Umwelt zu schonen, müssen alternative Isoliergase in den GIS- und GIL-Anlagen eingesetzt werden. Von 3M gibt es zwei alternative Isoliergase: Novec 4710 und Novec 5110. Beide Isoliergase besitzen eine höhere elektrische Festigkeit als SF_6 , jedoch wird ein Trägergas benötigt, um dem Zustand der Teilverflüssigung bei Raumtemperatur und Umgebungsdruck entgegen zu wirken. Es gibt ein weiteres Alternativgas von GE (Grid Solutions) das g^3 (green gas for grid), welches auf der Basis von Novec 4710 beruht und mit Kohlendioxid (CO_2) gemischt wird. Die Firma ABB bietet ebenfalls ein alternatives Isoliergas. AirPlus basiert auf dem Novec 5110 und wird kombiniert mit einer Mischung aus Kohlendioxid (CO_2) und Sauerstoff (O_2), oder wird mit synthetischer Luft (O_2/N_2) gemischt. Die Firmen Siemens und Hivoduct setzen bei der Wahl des Isoliergases auf synthetische Luft (O_2/N_2). Bei der Verwendung von synthetischer Luft ergibt sich ein Treibhauspotential (global warming potential, GWP) von Null, was ebenfalls bedeutet, dass kein Ozonzerstörungspotential besteht.

Die elektrischen Betriebsmittel einer Anlage, die für hohe Gleichspannung ausgelegt sind, werden einer genauen Prüfung unterzogen, damit ein sicherer und effizienter Betrieb gewährleistet werden kann. Mit einer Abnahmeprüfung der Betriebsmittel und einer Stück- und Typprüfung können Fehlstellen weitestgehend ausgeschlossen werden. Um sicherzustellen, dass im Betrieb Ausfälle vermieden werden können, ist ein kontinuierliches Monitoring wichtig.

Eine der wichtigsten und zuverlässigsten Diagnosemethoden ist die Teilentladungsmessung (TE-Messung). Bei dieser Diagnosemethode können Erscheinungen durch Alterung sowie Fehler in der Isolation bestimmt werden. Die konventionelle Prüfung bzw. Messung von Teilentladungen ist in der Norm IEC 60270 definiert [1].

Allerdings ist die Norm nicht ausreichend hilfreich bei der Messung von TE bei Gleichspannung. Für die Auswertung wird der genaue Zeitpunkt und die Amplitude des TE-Impulses durch moderne TE-Messsysteme aufgezeichnet. Es wurde in vorangegangenen Arbeiten am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement der TU Graz ein Verfahren entwickelt, welches zur Charakterisierung und Darstellung von Teilentladungen bei Gleichspannung geeignet ist. Die sogenannten NoDi*-Diagramme helfen bei der Analyse und Interpretation dieser Messdaten [2].

Ziel dieser Arbeit ist es, synthetische Luft als alternatives Isoliergas im Vergleich zu SF₆ zu untersuchen. Es werden Messungen mit hoher Gleichspannung durchgeführt und typische Defekte in gasisolierten Testzellen nachgebildet. Die Messung der Teilentladungen erfolgt mit dem Teilentladungsmesssystem MPD 600 der Firma Omicron. Zu Beginn wird eine direkte Gegenüberstellung bei gleichen Voraussetzungen und Prüfbedingungen durchgeführt. Dafür wird jeder Defekt bei gleichem Gasdruck untersucht. Dabei werden die dazugehörigen NoDi*-Diagramme dargestellt und verglichen, um etwaige Abweichungen aufzuzeigen. Anschließend wird eine Messung mit synthetischer Luft bei hohem Druck durchgeführt, um festzustellen bzw. abschätzen zu können, ob ein erhöhter Gasdruck die Isolierfähigkeit von Luft deutlich verbessert.

2 Theoretische Grundlagen zu Teilentladungen

2.1 Allgemeines

Teilentladungen sind ein wichtiges Kriterium für die Charakterisierung der Isolierfähigkeit und können in Gasen, Flüssigkeiten und Feststoffen auftreten. Eine Teilentladung führt nicht sofort zu einem Durchschlag, jedoch wird die elektrische Festigkeit kurzzeitig beeinträchtigt. Die Lebensdauer eines organischen Isolierstoffes wird durch Teilentladungen deutlich reduziert. Durch die wiederkehrende Beanspruchung durch Teilentladungen wird bei Feststoffen durch Erosion das Isoliermedium immer weiter beschädigt, was schlussendlich zum Durchschlag führt [3].

2.2 Ursachen für Teilentladungen

Grundsätzlich kann zwischen äußeren und inneren Teilentladungen unterschieden werden. Äußere Teilentladungen, die auch als Koronaentladungen bekannt sind, entstehen an metallischen Oberflächen. In einem gasisolierten Betriebsmittel kann es durch Verschmutzung oder Beschädigung der leitfähigen Oberflächen zu einem stark inhomogenen Feld kommen, wodurch Koronaentladungen einsetzen [2, 3].

Bei den Oberflächenentladungen bzw. Gleitentladungen handelt es sich ebenfalls um äußere Teilentladungen. An dem Übergang von fester zu gasförmiger Isolierung treten Teilentladungen in Tangentialrichtung des elektrischen Feldes an der Grenzschicht auf. Ist die Oberfläche des Isolators verschmutzt kommt es zur Ansammlung von Ladungsträgern durch die Beanspruchung mit Gleichspannung können sich Gleitentladungen leichter bilden. Durch freie metallische Partikel entstehen ebenfalls äußere Teilentladungen. Anhand der Bewegung und dem Kontakt mit der Elektrode, kommt es zu einem direkten Ladungsaustausch bei der Berührung [2, 3].

In Feststoffen finden im Inneren des Isolierstoffes in Hohlräumen, wie z. B. in Blasen, Rissen oder Ablösungen innere Teilentladungen statt. Hier ergibt sich die Problematik, dass diese nur schwer detektierbar sind und dabei im Isoliermedium irreparable Schäden verursachen [2, 3].

2.3 Koronaentladungen in Gasen

Für alle Gase gilt, dass in einem stark inhomogenen Feld Vorentladungen auftreten, die als Koronaentladungen bezeichnet werden. An einer stark gekrümmten Elektrode entstehen hohe Feldstärken. Ist nun die Ionisierungsbedingung erfüllt, kann nach der Zündbedingung ein selbstständiger Vermehrungsprozess der Elektronen eingeleitet werden. Es entsteht eine Anlagerung von freien Elektronen, da im feldschwachen Bereich der Ionisierungskoeffizient negativ ist. Dies führt vermehrt zu Vorentladungen, welche jedoch nicht unmittelbar zum Durchschlag führen [2 - 4].

Das weitere Vorwachsen des Streamers wird verhindert bzw. erlischt, sobald das elektrische Grundfeld nicht mehr ausreicht. Die Einsetzspannung U_E der Vorentladungen nimmt, bei zunehmender Inhomogenität des elektrischen Feldes, in dem Bereich von stark gekrümmten Elektroden ab (Bild 2-1 links). Die gekrümmte Elektrode wird durch die Entladungen und mit der daraus entstehenden Raumladungswolke abgeschirmt, wodurch sich die Durchschlagsspannung erhöht. Der Entladungsvorgang ist von der Polarität der Spannung abhängig. Beim Anlegen der Gleichspannung mit **positiver** Polarität beginnen Elektronenlawinen an der gekrümmten Elektrode im Gasvolumen zu starten (Bild 2-1a). Vor der Anode bildet sich eine Raumladungswolke aus positiven Ionen aufgrund von Glimmentladungen. Das elektrische Feld wird dadurch an der gekrümmten Elektrode verringert und im feldschwachen Bereich erhöht. Wird nun die Spannung erhöht, ergibt sich eine günstige Bedingung für das Vorwachsen von Streamern [2 - 4].

Wird Gleichspannung mit **negativer** Polarität angelegt, kann es zu einem Zündverzug kommen, da der Bereich für das Startelektron an der gekrümmten Elektrode mit der hohen Feldstärke sehr klein ist (Bild 2-1b). Kommt es zu Unregelmäßigkeiten des Einsetzens von Koronaimpulsen, ist das ein Indiz für die erschwerte Bedingung des Entstehens eines Startelektrons. Vor der gekrümmten Elektrode entsteht durch die Entladungen eine positive Raumladungswolke. Vor der Anode wird das elektrische Feld erhöht und im restlichen Bereich bildet sich das Feld gleichmäßig aus. Aus diesem Grund ist das Entstehen von Streamern im feldschwachen Bereich nur schwer möglich. Wird die angelegte Spannung erhöht, können nun auch im feldschwachen Bereich hohe Feldstärken auftreten. Das begünstigt das Vorwachsen von Streamern, die bis zur Gegenelektrode reichen und dann sogar zum Durchschlag führen. Diese Unterschiede der Vorentladungen mit Einsetz- und Durchschlagsspannung sind von großer Bedeutung bei der Diagnose und Messung von Teilentladungen [2 - 4].

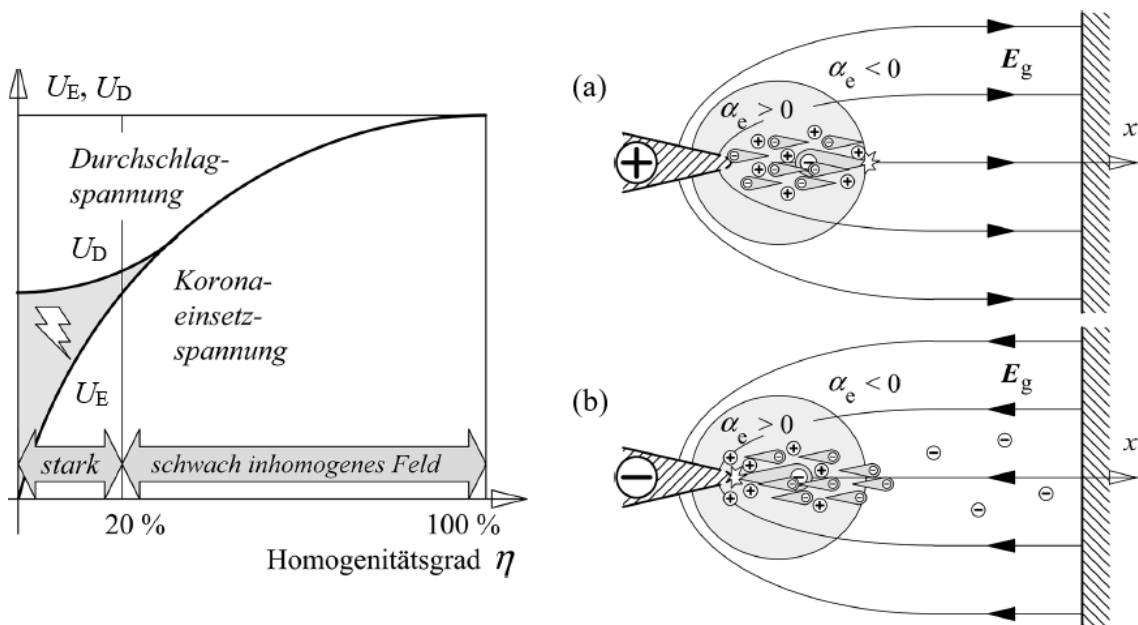


Bild 2-1: Einsetz- und Durchschlagsspannung in Abhängigkeit der Homogenität des elektrischen Feldes sowie (a) bei einer Spitze-Platte-Anordnung bei Gleichspannung mit positiver und (b) mit negativer Polarität [3].

2.4 Teilentladungsquellen

2.4.1 TE-Quellen in Gasen

In Gasen sind typische Quellen für Koronaentladungen Spitzen, Kanten und scharfkantige Partikel bzw. Leiter mit einem zu kleinen Durchmesser (Bild 2-2a). Meistens führen in der Praxis Beschädigungen wie Kratzer und Rauigkeiten bzw. Verschmutzungen an der Oberfläche der Leiter zu Koronaentladungen. Auch leitfähige Partikel wie z. B. metallische Späne und Drahtstücke führen zu unerwünschten Teilentladungen, weshalb bei der Fertigung und Montage von gasisolierten Schaltanlagen (GIS und GIL) besonders darauf geachtet werden muss. Eine Teilentladungsprüfung wird nach der Montage durchgeführt [3].

Gleitentladungen bzw. Oberflächenentladungen sind in der Hochspannungstechnik problematisch da diese die Oberfläche des Isolators beschädigen (Bild 2-2b). Diese können bei Isolatoren durch Kriechwegverlängerung und hydrophobe Oberflächen vermieden werden. Bei Durchführungen wird in der Praxis eine kapazitive Potentialsteuerung angewandt. Eine geometrische Feldsteuerung dient zur Begrenzung der Gleitentladungen bei Kabelendverschlüssen [3].

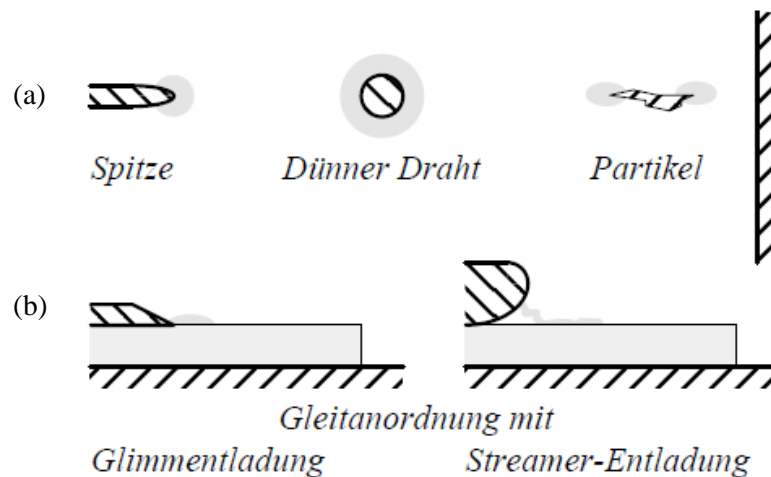


Bild 2-2: Teilentladungsquellen in Gasen durch (a) Spitzen, Kanten, dünne Drähte und freie metallische Partikel und (b) Oberflächenentladungen als Glimm- und Streamer-Entladungen [3].

2.4.2 TE-Quellen in Flüssigkeiten

Aufgrund der hohen elektrischen Festigkeit in Flüssigkeiten, sind kleine Krümmungsradien von Leitern, Spitzen und leitfähigen Partikeln weniger kritisch als bei gasförmigen Isolierstoffen. Problematisch für die elektrische Festigkeit von Flüssigkeiten sind die Absonderungen von Gasen wie Bläschen und Gasschichten (Bild 2-3a). Eine starke Beanspruchung der Gasblase erfolgt durch die Feldverdrängung. Durch die elektrisch schwache Gasblase setzen Teilentladungen schon bei niedrigen Feldstärken ein. Auch die Feuchtigkeit in flüssigen Isolierstoffen führt zu einer drastischen Absenkung der elektrischen Festigkeit, besonders bei einer tropfenförmigen Absonderung von Wasser [3].

Aus diesem Grund müssen ölisierte Geräte mit gut getrocknetem und entgastem Öl unter Vakuum befüllt werden. Die Oberflächen des Isolierstoffes stehen auch unter tangentialer Überbeanspruchung. Oberflächenentladungen entstehen durch Belagsränder in Kondensator-dielektrika und bei Transformatoren in den Pressspanbarriersystemen (Bild 2-3b). Teilentladungen entstehen in Pressspanbarriersystemen auch durch die Bildung von Faserbrücken [3].

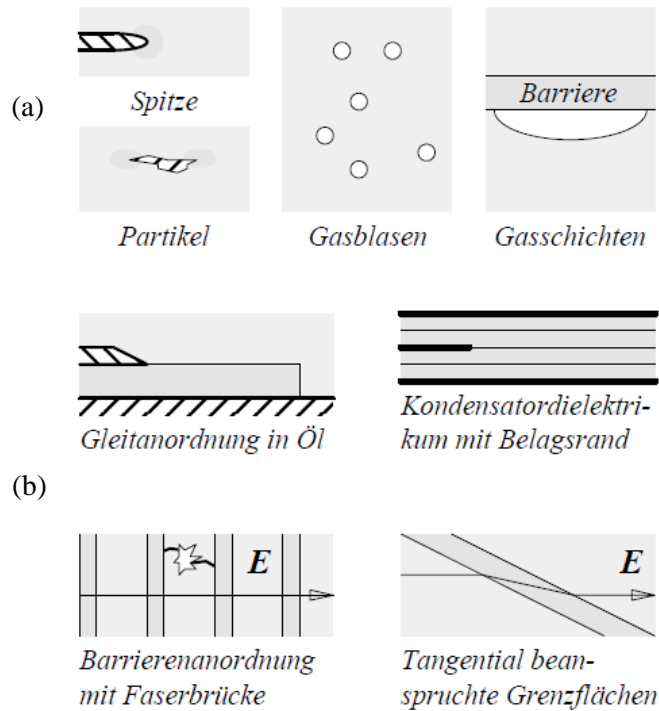


Bild 2-3: Teilentladungsquellen in Flüssigkeiten durch (a) Spitzen und freie metallische Partikel, Gasblasen und Gasschichten und (b) Gleitentladungen, Faserbrücken und tangentiale Überbeanspruchung [3].

2.4.3 TE-Quellen in Feststoffen

Feststoffe haben eine sehr hohe elektrische Festigkeit, weshalb Teilentladungen im Dielektrikum immer nur durch Fehlstellen verursacht werden. Bei diesen Fehlstellen handelt es sich um Hohlräume, die durch Diffusionsvorgänge entstehen und sich mit dem umgebenden Medium füllen. Deshalb wird auch oft von luftgefüllten Hohlräumen ausgegangen, die eine geringere elektrische Festigkeit besitzen und durch die Feldverdrängung stark beansprucht werden (Bild 2-4a) [3].

Eingeschlossene Hohlräume treten bei schlecht entgasten Gießharzen auf bzw. bei einer chemischen Nebenreaktion durch feuchtigkeitshaltige Polyurethanharze (Bild 2-4a). Bei mechanischer Beanspruchung und dem Reaktionsschwund des Materials entstehen Versprödungen und Ablösungen zwischen der Elektrode und dem Dielektrikum. Aus diesem Grund erscheinen im Dielektrikum diese Beschädigungen als Risse und Spalten (Bild 2-4b) [3].

Sind Schichtungen unvollständig imprägniert, tauchen ausgedehnte Hohlräume auf, welche sich zwischen den glatten Kunststofffolien in den Kondensatordielektrika ergeben. Eine besondere Gefährdung ergibt sich bei faserverstärkten Materialien, die Delamination. Da die Isolierung parallel zum elektrischen Feld ist, können große Isolationstrecken durch Gas oder eindiffundiertes Wasser überbrückt werden. Zum elektrischen Feld ergeben sich durch das Aufschieben auf das Kabeldielektrikum kritische Grenzflächen bei Kabelendverschlüssen (Bild 2-4c). Durch Alterung und Erosion entstehen in Kabelisolierungen mit Polyethylen die sogenannten „water trees“, welche schließlich zur Bildung von Hohlräumen führen (Bild 2-4d) [3].

Feststoffe haben, im Gegensatz zu flüssigen und gasförmigen Isolierstoffen, keine Regenerationsfähigkeit nach einer Entladung. Dies hat zur Folge, dass nach jeder Teilentladung die Erosion des Dielektrikums stetig voranschreitet und deshalb Teilentladungen unbedingt vermieden werden sollten. Um dies zu gewährleisten, gibt es eine große Anforderung an die Fertigungsqualität. Beispiele dafür sind der Vakuumverguss bei Gießharzen, eine Imprägnierung an den Grenzflächen, der Einsatz von Haftvermittlern bei faserverstärktem Material und die Anwendung von leitfähigen Schichten zwischen Elektroden und Isoliermedium [3].

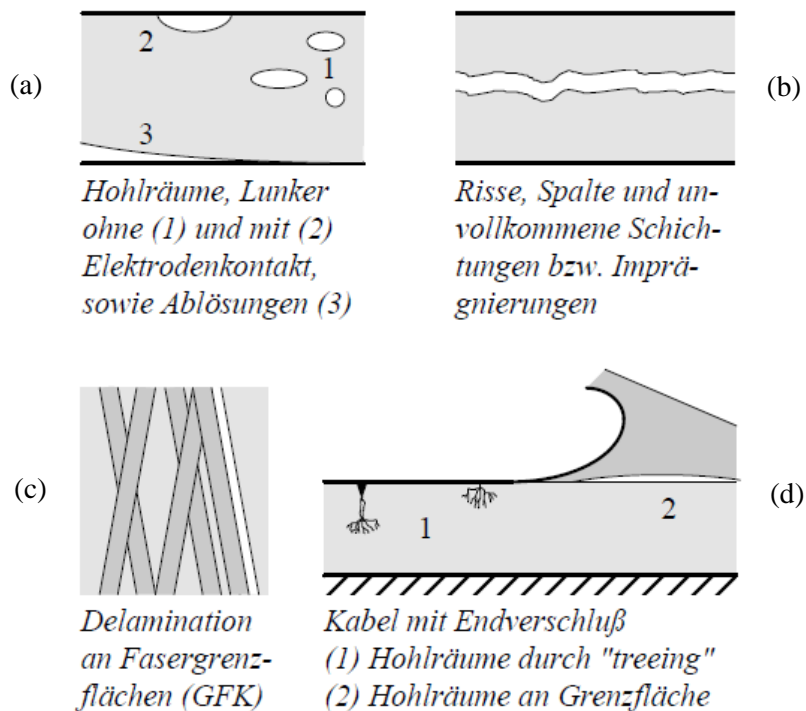


Bild 2-4: Teilentladungsquellen in Feststoffen durch (a) luftgefüllte Hohlräume mit und ohne Kontakt zur Elektrode, (b) Risse und Spalten, (c) Delamination an faserverstärktem Material, (d) „water trees“ und Hohlräume an Grenzflächen [3].

3 Teilentladungen bei Gleichspannung

3.1 Teilentladungsimpuls

An Störstellen äußern sich Teilentladungen in Form von kurzen, elektrischen Stromimpulsen. Die Kurvenform der Stromimpulse besitzt eine Anstiegszeit T_A und eine Rückenhalfwertszeit T_R . Das Auftreten der Teilentladung ist vom isolierenden Medium abhängig, wie auch die Anzahl der TE-Impulse und die Höhe der Amplitude. In gasisolierten Anlagen dauert die Entladung nur wenige zehn Pikosekunden [1 - 4].

An den Klemmen des Prüfobjektes können neben der Entladung in Form von Stromimpulse auch die elektromagnetische Welle der Photonen und die akustische Welle gemessen werden. Die auftretenden Kurvenformen der Impulse unterscheiden sich im Dielektrikum von der realen Form durch Verzerrung und Dämpfung. An einer realen Prüfanordnung besitzen Teilentladungen eine Anstiegszeit T_A von wenigen Nano- bis Mikrosekunden. Teilentladungen lassen sich als Überlagerung von zwei Exponentialfunktionen darstellen. Die Parameter der Zeit bis zum maximalen Anstieg T_A und der Rückenhalfwertszeit T_R sind im Bild 3-1a dargestellt. Im Bild 3-1b ist die Amplitudendichte $F(f) / F_0$ beschrieben, welche durch Transformation in den Frequenzbereich ermittelt wird. Es sind drei Beispiele für unterschiedliche Anstiegs- und Rückenhalfwertszeiten im Bild 3-1b eingezeichnet [1 - 4].

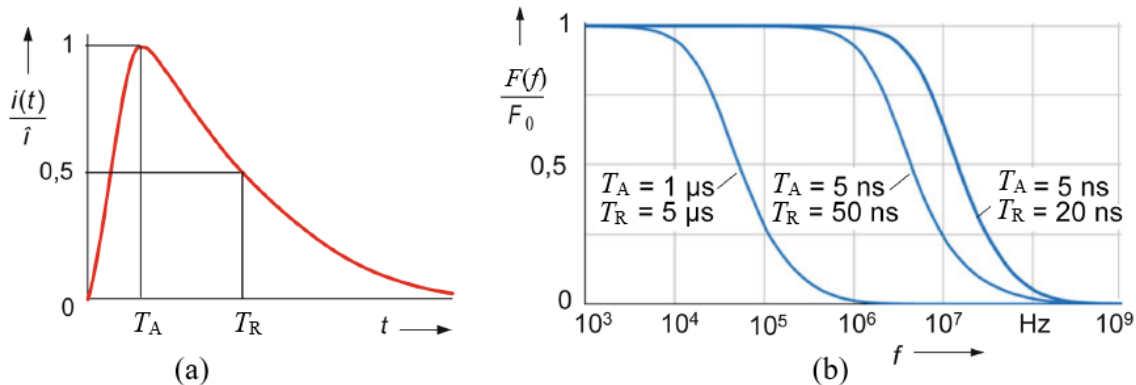


Bild 3-1: TE-Impuls im Zeit- und Frequenzbereich: (a) idealisierter Stromimpuls mit Anstiegszeit T_A und Rückenhalfwertszeit T_R und (b) Amplitudendichte $F(f) / F_0$ für drei verschiedene Werte [4].

3.2 Teilentladungsmessung bei Gleichspannung

Die Teilentladungsmessung ist in der Norm IEC 60270 definiert [1]. Die aus den Teilentladungssignalen erhaltenen Kenngrößen bei der Messung mit Gleichspannung sind im Bild 3-2 dargestellt. Die Ladung q_i bzw. Intensität der einzelnen Teilentladungsimpulse stellt die Amplitude dar, nach IEC 60270 entspricht das der scheinbaren Ladung. Bei Gleichspannung ist der Zeitpunkt t_i eine weitere wichtige Kenngröße von Teilentladungen [1, 2].

Beim Messen von Teilentladungen wird das zeitliche Auftreten des Teilentladungsimpulses bestimmt. Mit der Ladung q_i und dem Zeitpunkt t_i ergibt sich eine Pulssequenz für Gleichspannung wie in Bild 3-2 dargestellt [1, 2, 5].

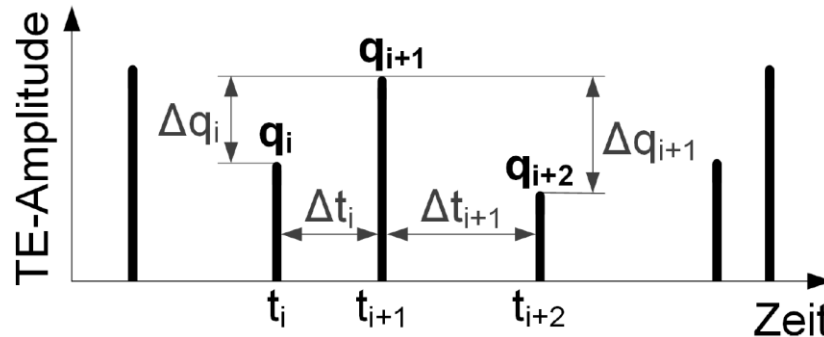


Bild 3-2: Teilentladungspulssequenz bei Gleichspannung mit der Amplitude q_i und dem zeitlichen Auftreten t_i [2].

3.3 Prüfkreis und Messsysteme

Der Prüfkreis nach IEC 60270 für die Messung von Teilentladungen bei Wechselspannung ist im Bild 3-3 dargestellt. Prinzipiell wird für die Messung von Teilentladungen bei Gleichspannung der gleiche Prüfkreis verwendet (Kapitel 6). Das zu messende Prüfobjekt wird in der Schaltung als Kapazität C_a beschrieben. Der Aufbau des Koppelkondensators C_k ist niederinduktiv und sollte möglichst teilentladungsfrei sein, wobei dies bedeutet, dass keine Teilentladungen oberhalb eines bestimmten Pegels auftreten dürfen. Für die Verwendung in der Messung sollte der Koppelkondensator über einen großen Spannungsbereich verfügen. Eine andere Möglichkeit für den Koppelkondensator ist die Verwendung eines zweiten Prüfobjekts C_{a1} , dieser muss ähnlich dem Prüfling C_a sein. Für die Messung ist ein geringer Grundstörpegel wichtig, der von den Verbindungselementen und der Hochspannungsquelle abhängig ist. Vor der Messung muss der Prüfkreis laut IEC 60270 kalibriert werden, dafür wird als Messgröße eine scheinbare Ladung herangezogen [1, 4].

In den Erdungspfad oder auf der Hochspannungsseite kann die Koppeleinheit hineingeschaltet werden. Dabei kann die Koppeleinheit C_k entweder in Serie zum Prüfobjekt C_a oder im Kreis des Prüfobjekt geschaltet werden. Wenn das Prüfobjekt einen Erdungsanschluss besitzt, kann die Koppeleinheit direkt im Erdungspfad angeschlossen werden. Hier müssen besondere Schutzmaßnahmen vorgesehen werden, da beim Versagen des Prüfobjekt das empfindliche Messsystem geschützt werden muss. Es gibt nach der Norm IEC 60270 auch noch die Möglichkeit einer Brückenschaltung, durch welche sich eine gute Störunterdrückung ergibt. Die Messempfindlichkeit wird vor allem durch das Teilverhältnis C_a/C_k bestimmt. Die größte Empfindlichkeit wird erreicht, wenn das Verhältnis $C_a \gg C_k$ ist. Eine meist ausreichende Genauigkeit wird erreicht, wenn der Kapazitätswert $C_k = 1 \text{ nF}$ beträgt [1, 4].

Der wichtigste Teil des Messsystems ist die Koppeleinheit (CD) bzw. der Ankoppelvierpol. Dieser ist auf die größtmögliche Empfindlichkeit ausgelegt. Der Ankoppelvierpol transformiert den impulsförmigen Eingangsstrom in eine Ausgangsspannung [1, 4].

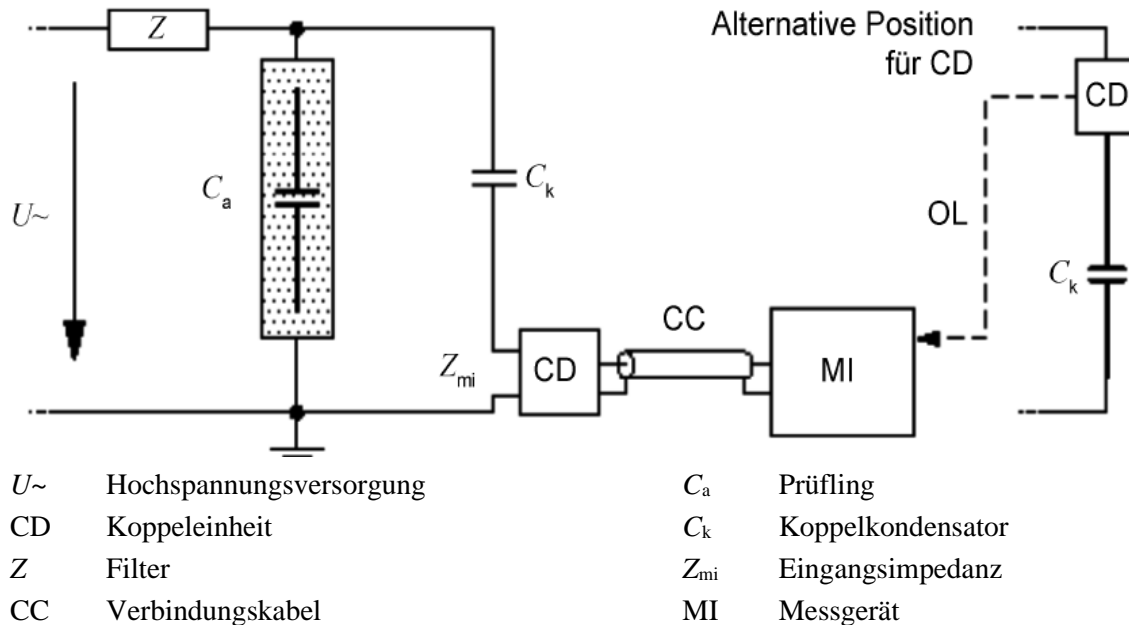


Bild 3-3: Prüfkreis für die Teilentladungsmessung bei Wechselspannung mit dem Koppelkondensator C_k und der Koppeleinheit CD in Serie nach IEC 60270 [1].

3.4 Darstellungen von Teilentladungen

3.4.1 Kenngrößen

Bei Teilentladungen treten sehr komplexe physikalische Effekte auf, deshalb ist es schwierig eine genaue Angabe diesbezüglich zu machen. Es gibt verschiedene Hilfsmittel, die gemessenen Kenngrößen in Form von Diagrammen darzustellen. Die Messwerte können weiterverarbeitet werden bzw. sind auch Rückschlüsse auf das Teilentladungsverhalten möglich. Bei der Darstellung von Teilentladungen bei Gleichspannung kommt erschwerend dazu, dass im Gegensatz zur Wechselspannung der Phasenbezug zur Prüfspannung fehlt. Eine Übersicht der Kenngrößen bei Gleich- und Wechselspannung ist in Tabelle 3-1 dargestellt.

Tabelle 3-1: Kenngrößen von Teilentladungen bei Gleich- und Wechselspannung [6]

Kenngrößen von Teilentladungen			
Gleichspannung		Wechselspannung	
$U_=$	Wert der Gleichspannung	$U_~$	Wert der Wechselspannung
q	scheinbare Ladung	q	scheinbare Ladung
t	Zeit	t	Zeit
		φ	Phasenlage

3.4.2 Wechselspannung

Es gibt eine Vielzahl von Darstellungsmöglichkeiten von Teilentladungen bei Wechselspannung. Diese sind jedoch sehr umfangreich und werden im Rahmen dieser Arbeit nicht beschrieben. Digitale Messgeräte, die eine schnelle Datenverarbeitung und Auswertung von Teilentladungen ermöglichen, können die Messergebnisse umfangreich visualisieren. Eine etablierte Darstellung der Teilentladungen stellen phasenaufgelöste Teilentladungsmuster dar. Bei dem sogenannten PRPD(Phase Resolved Partial Discharge)-Pattern wird die Anzahl n der Teilentladungsimpulse in Abhängigkeit der Phasenlage der Wechselspannung in Farb- bzw. Graustufen dargestellt. Durch Messgeräte, wie das Omicron MPD 600, lassen sich mit Hilfe eines Streaming-Files die aufgenommen Daten der aufgetretenen Teilentladungen jederzeit nachvollziehen und weiterverarbeiten. Der große Vorteil von PRPD-Pattern ist, dass durch die entstehenden Muster der Teilentladungen im Diagramm, einem konkreten Defekttyp zugeordnet werden können [1, 6]. Ein Beispiel eines PRPD-Patterns ist in dem folgenden Bild 3-4 dargestellt. Bei einer Spitze-Platte-Anordnung treten die Teilentladungen im Bereich des Spannungsmaximums auf [4].

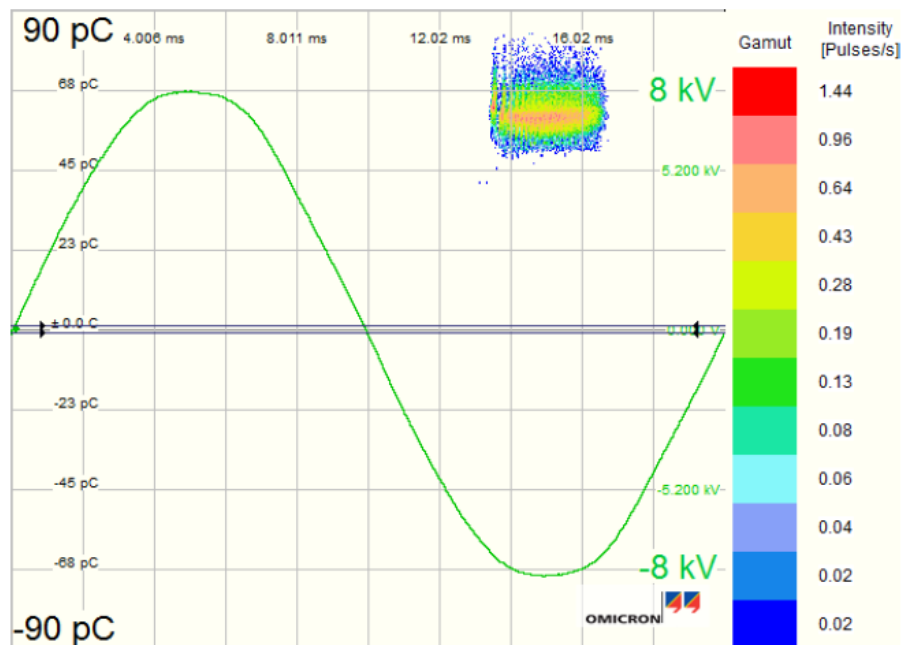


Bild 3-4: PRPD-Pattern einer Spitze-Platte-Anordnung bei N_2 gemessen bei $U_{AC} = 8 \text{ kV}$ über eine Dauer von 1 Minute bei $p = 0,5 \text{ MPa}$ relativem Druck [6].

3.4.3 Gleichspannung

Die große Herausforderung bei Gleichspannung ist, dass anhand der Darstellungsarten nach IEC 60270 keine konkrete Aussage über den auftretenden Fehler gemacht werden kann. Hierzu gibt es verschiedene Ansätze von Darstellungsarten, wie das $Q(t)$ -Diagramm, Diagramm der akkumulierten Ladungen und das Balkendiagramm [1].

Q(t)-Diagramm: Bei der Messung von Teilentladungen bei konstanter Gleichspannung fehlt der Phasenbezug zur Spannung, um den auftretenden Defekt eindeutig zuordnen zu können. Aus diesem Grund wird die Amplitude der scheinbaren Ladung q über der Zeit t aufgenommen und dargestellt. Anhand dieser Darstellung kann die Landungshöhe und die Anzahl der Teilentladungsimpulse in einem bestimmten Zeitintervall abgelesen werden, wie in Bild 3-5 dargestellt [1, 6].

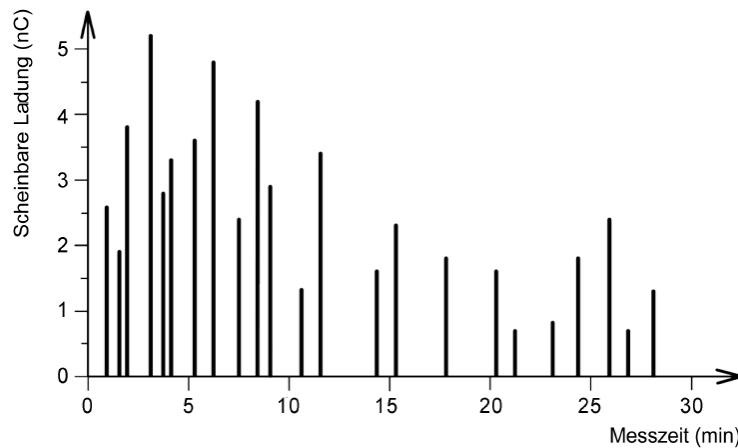


Bild 3-5: Q(t)-Diagramm der scheinbaren Ladung q der einzelnen Teilentladungsimpulse über eine Messzeit von 30 Minuten [1].

Akkumulierte Ladung: Basierend auf der Darstellung im Bild 3-5, werden die einzelnen Teilentladungsimpulse in Abhängigkeit über der Zeit als akkumulierte Ladung auf der y-Achse aufgetragen. Dabei wird die Summenladung der auftretenden Teilentladungen zum jeweiligen Zeitpunkt abgebildet (Bild 3-6). Die Art der Darstellung wird verwendet, um sicherzustellen, dass in einer bestimmten Zeitspanne ein festgelegter Grenzwert nicht überschritten wird [1, 6].

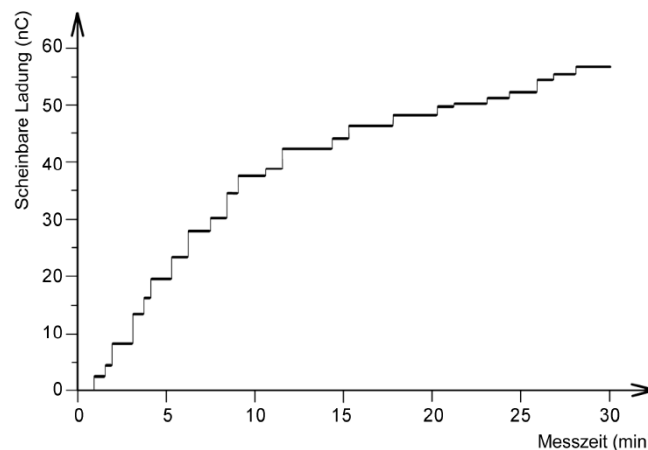


Bild 3-6: Akkumulierte, scheinbare Ladung über eine Messzeit von 30 Minuten [1].

Balkendiagramme: Als zusätzliche Information für das Verhalten von Teilentladungen gibt es die Darstellung der Anzahl der Teilentladungsimpulse m in einer bestimmten Messzeit als Balkendiagramm. Die Anzahl in Abhängigkeit der Größe der scheinbaren Ladung q_m , die einen festgelegten Wert überschreitet, ist in Bild 3-7 dargestellt [1].

Für die Bewertung der Aktivität von Teilentladungen ist die Darstellung der Teilentladungsimpulszahl m innerhalb festgelegter Grenzen bei der Gleichspannungsprüfung hilfreich [1].

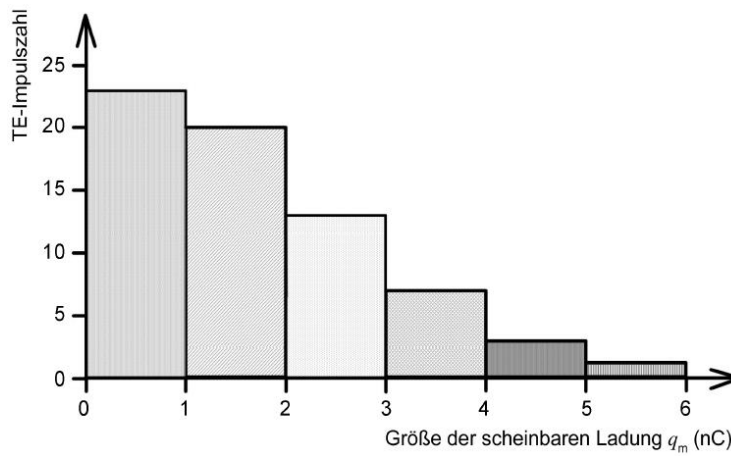


Bild 3-7: Balkendiagramm für die Teilentladungsimpulsanzahl m für die Größe der scheinbaren Ladung q_m , wenn ein bestimmter Grenzwert überschritten wird [1].

3.4.4 NoDi*-Diagramme

Bei den NoDi*-Diagrammen handelt es sich um eine graphische **Normierung** und **Korrelation** der **differenzierten** Werte einer Pulssequenz. Das entstehende Streudiagramm wird durch die Werte von Δq (Formel 3.1) und Δt (Formel 3.2) erzeugt. Durch die Korrelation von unterschiedlichen Werten ist eine graphische Einordnung möglich, welche die optische Erkennung der Häufigkeitsverteilung erleichtert. Bei der Auswertung durch NoDi*-Diagramme werden jeweils drei einzelne Streudiagramme betrachtet. Hierbei handelt es sich um das NoDi*-Q-, NoDi*-T- und NoDi*-QT-Diagramm. Es entstehen typische Muster, was eine Charakterisierung bzw. Interpretation der jeweiligen Defekte vereinfacht [2].

$$\Delta q_i = q_{i+1} - q_i \quad (3.1)$$

$$\Delta t_i = t_{i+1} - t_i \quad (3.2)$$

- **NoDi*-Q-Diagramm:** In diesem Diagramm werden die auftretenden Amplitudenunterschiede dargestellt. Dabei wird die Differenz der Ladungen zu dem vorherigen Teilentladungsimpuls Δq_i ermittelt und über der nachfolgende Ladungsträgerdifferenz Δq_{i+1} dargestellt (Bild 3-2) [2].
- **NoDi*-T-Diagramm:** Hier wird die Verteilung und Streuung der zeitlichen Abstände Δt_i der auftretenden Teilentladungsimpulse dargestellt (Bild 3-2) [2].
- **NoDi*-QT-Diagramm:** Bei dieser Darstellung wird der Zusammenhang der Amplitudenänderung Δq_i mit dem zeitlichen Abstand Δt_i der Teilentladungsimpulse veranschaulicht [2].

Die Diagrammachsen werden üblicherweise auf den maximal existierenden Wert angepasst. Dieser Werte kann bei Bedarf auch auf einen festgelegten Wert eingestellt werden, um z. B. großen Störsignalen entgegenzuwirken. Die Farbskala ermöglicht eine übersichtliche Darstellung der unterschiedlichen Stapelhöhen und wird dazu verwendet das Maximum und Minimum zu skalieren. Das Bild 3-8 zeigt eine Aufnahme von Teilentladungsimpulsen bei Gleichspannung in Form eines NoDi*-Diagramms, welches aus den Differenzen der Ladungen und den zeitlichen Abständen gebildet wird [2, 7].

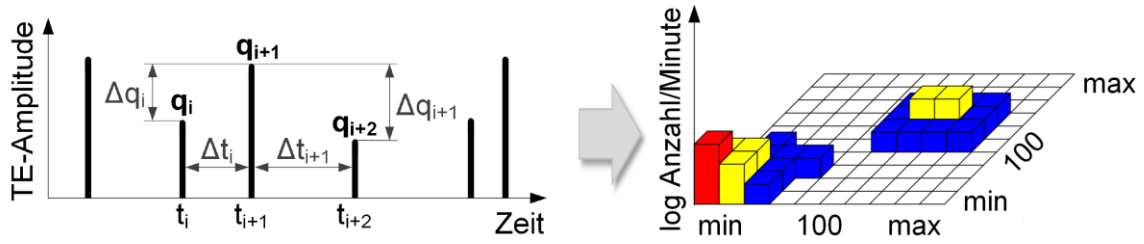
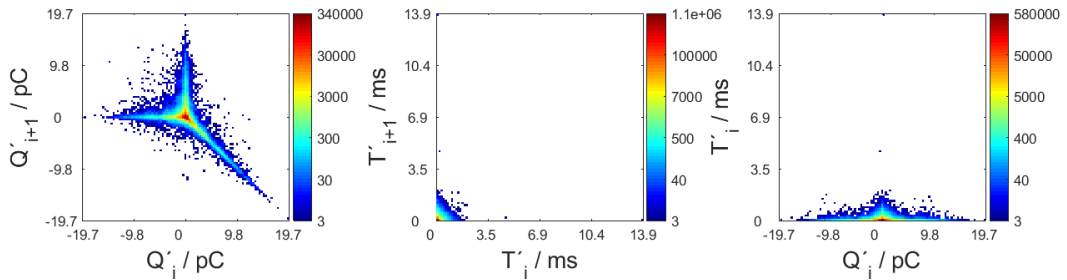
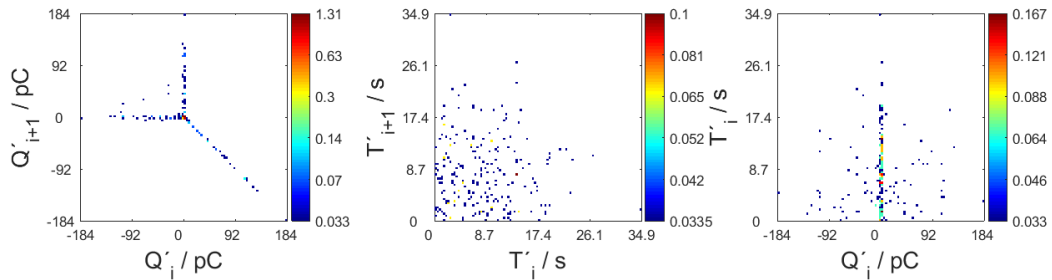


Bild 3-8: Erstellen eines NoDi*-Diagrammes aus den Amplitudenunterschieden der Ladungen und den zeitlichen Abständen der Impulse [2].

Als Beispiel für ein NoDi*-Diagramm ist im Bild 3-9a das Muster einer Spitze-Platte-Anordnung und im Bild 3-9b das Muster für ein freies Potential dargestellt.



(a) Spitze-Platte-Anordnung mit SF₆ bei $p = 0,5$ MPa und $U_{DC} = 27,2$ kV



(b) freies Potential mit synthetischer Luft bei $p = 0,1$ MPa und $U_{DC} = 20$ kV

Bild 3-9: NoDi*-Diagramme bei Gleichspannung mit positiver Polarität mit (a) einer Spitze-Platte-Anordnung mit SF₆ und (b) eines freien Potentials mit synthetischer Luft.

4 Typische Defekte in GIS/GIL-Systemen

4.1 Allgemeines

Gasisolierte Schaltanlagen (GIS) wurden bereits in den 1960er Jahren entwickelt. Heutzutage sind die gasisolierten Schaltanlagen bis zu einer Wechselspannung von 1100 kV in Betrieb und bei Gleichspannung bis zu 550 kV [8].

Im Gegensatz zu luftisolierten Schaltanlagen mit offener Bauweise, können GIS-Anlagen viel kompakter gebaut werden, da als Isoliermedium SF₆ verwendet wird. Die Durchschlagsfestigkeit von SF₆ ist dreimal höher als bei trockener Luft unter Normaldruck. Auch das Löschen des Lichtbogens von Funkenstrecken ist hundertmal schneller als in Luft. Ein weiterer Vorteil von GIS ist der geringe Wartungsaufwand und die modulare Bauweise. Auf der Basis und Technik der gasisolierten Schaltanlagen basieren die **gasisolierten Leitungen (GIL)**, welche die gleichen Vorteile besitzen. Das Bestreben ist diese Technologien weiter zu entwickeln [9].

Obwohl die gasisolierten Schaltanlagen nur einen geringen Wartungsaufwand haben, können bereits bei der Herstellung Fehler auftreten. Durch mangelnde Reinigung der Teile und Produktionsfehler entstehen im geschützten Innenbereich erhöhte Feldstärken und andere typische Defekte. Bei der Inbetriebnahme führen diese Defekte zu schweren Schäden und längeren Wartungszeiten [6, 10, 11].

Diese typischen Defekte von GIS- und GIL-Systemen sind:

- Spitze am Leiter bzw. am Gehäuse
- Freies Potential
- Freie, bewegliche, metallische Partikel
- Partikel auf dem Isolator
- Hohlräume im Isolator

Um mögliche Fehler rechtzeitig zu erkennen, können Monitoringsysteme vor Inbetriebnahme und auch während des Betriebs eingesetzt werden. Für die richtige Erkennung und Zuordnung dieser Fehler hat sich die Diagnosemethode der Teilentladungsmessung etabliert. In dem Bild 4-1a ist der grundsätzliche Aufbau einer gasisolierten Schaltanlage dargestellt und im Bild 4-1b sind die typischen Defekte veranschaulicht [6, 10, 11].

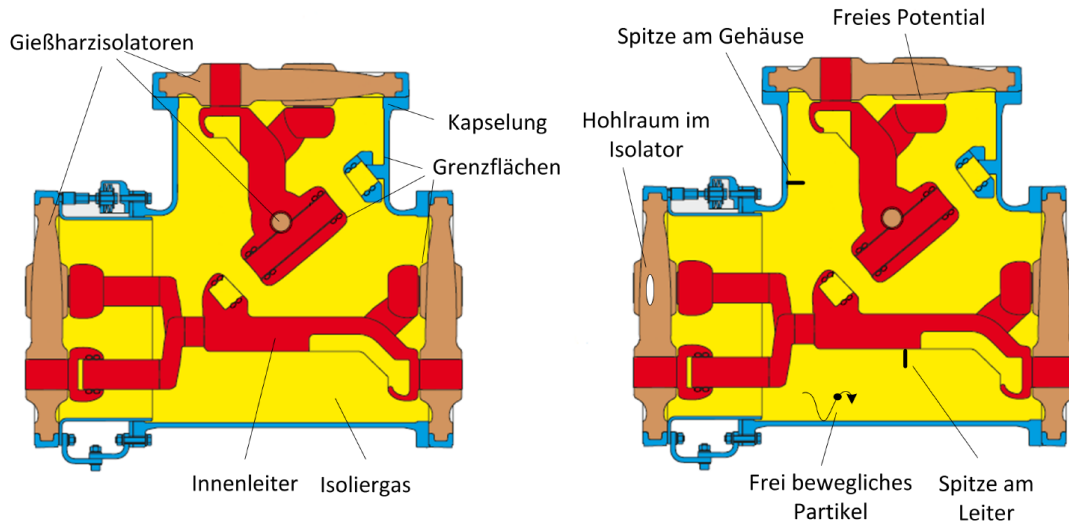


Bild 4-1: (a) Grundsätzlicher Aufbau einer gasisolierten Schaltanlage und (b) mögliche auftretende Defekte [6].

Eine aus dem Jahr 1998 stammende Fehlerstatistik zeigt, dass bei Wechselspannung die Quelle der meisten Fehler mit mehr als 50 % auf elektrische Defekte zurückzuführen sind. Diese wurden durch Monitoring-systeme und Teilentladungsmessungen ermittelt. Die Ursache für mehr als 20 % aller Fehler sind bewegliche Partikel und Fremdkörper. Durch unsachgemäße oder fehlerhafte Montage können sich Partikel bei der Verschraubung der Komponententeile lösen und somit Teilentladungen verursachen. Freie Potentiale sind mit 18 % vertreten und entstehen ebenfalls durch unsachgemäß befestigte metallische Teile. Hohlräume in der Isolierung entstehen durch Fehler bei der Herstellung und sind mit 10 % vertreten. Durch Unregelmäßigkeiten an der Oberfläche, wie kleine Spitzen oder Kanten, entstehen Koronaentladungen. Diese können an der Hochspannungselektrode oder an der Schirmung, die auf Erdpotential liegt, auftreten und kommen in der Statistik zu 5 % vor. Die verbleibenden 47 % setzen sich zusammen aus Fehlern durch Feuchtigkeit, mechanischen Fehlern oder Fehlern durch stromführende Kontakte. Weitere Fehler sind in der Fehlerstatistik im Bild 4-2 dargestellt [12].

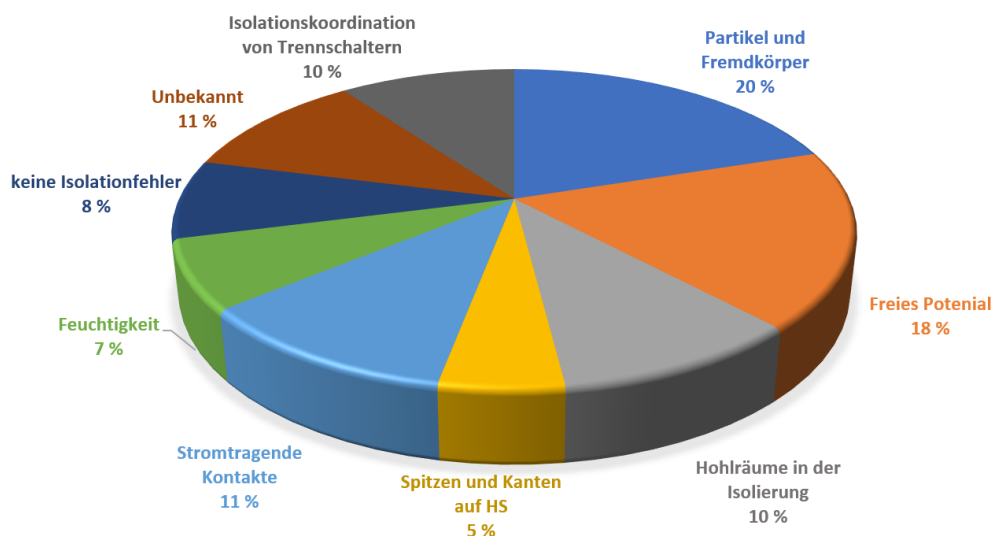


Bild 4-2: Fehlerstatistik von gasisolierten Schaltanlagen bei Wechselspannung nach [12].

4.2 Typische Defekte in gasisolierten Systemen

Im Bild 4-3 sind die typischen Defekte eingezeichnet, welche in gasisolierten Systemen in Erscheinung treten können.

Befindet sich eine **Spitze auf der Hochspannungselektrode** bzw. eine **Spitze auf Erdpotential**, führt diese zu einer lokalen Erhöhung der elektrischen Feldstärke. Die Spitze auf der Hochspannungselektrode wird in dieser Masterarbeit auch als Spitze-Platte-Anordnung bezeichnet. Überschreitet die elektrische Feldstärke an der Spitze einen bestimmten Wert, treten an dieser Stelle Koronaentladungen auf. Die Durchschlagsfestigkeit der Isolierstrecke wird dadurch verringert. Der Grund dafür sind freie Ladungsträger die Raumladungen im Gasraum erzeugen bzw. Oberflächenladungen auf dem Isolator aufbauen. Dieser Defekt tritt eher selten auf und kann durch intelligentes Design von gasisolierten Schaltanlagen vermieden werden. Eine mögliche Ursache für das Auftreten des Defekts sind Beschädigungen während der Montage [2, 13 - 15].

Als **freies Potential** wird ein leitfähiges Objekt bezeichnet, welches weder mit dem Hochspannungsleiter noch mit dem Gehäuse direkt verbunden ist. Dieses leitfähige Objekt ist auf ein unbekanntes elektrisches Potential geladen. Im Gasraum um diesen Defekt entstehen freie Ladungsträger, welche sich als Oberflächenladungen am Isolator anhäufen. Dies hat zur Folge, dass Gleitentladungen entstehen. Das freie Potential ist als Defekt im Betrieb unkritisch. Die Gründe für die Entstehung dieses Defekts ist die unsachgemäße Montage oder mechanische Spannung bei GIS-Anlagen [2, 13 - 15].

Durch die Herstellung und Montage können in das Gehäuse der GIS- und GIL-Anlagen **freie metallische Partikel** gelangen. Das Partikel wird im elektrischen Feld aufgeladen, wodurch eine Kraft einwirkt und somit das Partikel eine Bewegung durchführt. Dabei gibt es zwei unterschiedliche Mechanismen in der Bewegung. Das **springende Partikel**, welches sich zwischen dem Hochspannungsleiter und dem Gehäuse hin und her bewegt und dem **Firefly-Effekt**, bei dem das Partikel eine „tanzende“ Bewegung ausführt. Aufgrund der vielen erzeugten Ladungsträger kann es bei diesem Defekt zu einem vollständigen Durchschlag der Gasstrecke kommen. Selbst bei nichtmetallischen Partikeln kann es zum Springen des Partikels führen, da es zu einer Ansammlung von Ladungsträgern an der Oberfläche des Partikels kommt [2, 13 - 15].

Das Phänomen des **Firefly-Effekts** tritt bei freien metallischen Partikeln auf. In der Ausgangssituation befindet sich ein zylinderförmiges Partikel zwischen einem negativ geladenen Innenleiter und einer positiv geladenen Kapselung. Ist das Partikel positiv geladen, so bewegt sich das Partikel in Richtung Innenleiter. Sobald das Partikel Kontakt zum Innenleiter hat, wird seine Ladung abgegeben und nimmt dabei die negative Ladung des Innenleiters an. An der Seite des Partikels, die der Kapselung zugewandt ist, kommt es zu einer Erhöhung der elektrischen Feldstärke, wodurch eine lokale Ionisation mit dem Isoliergas ausgelöst wird. Freie Elektronen bewegen sich nun in Richtung positive Kapselung. Da das Partikel noch negativ geladen ist, beginnt das Partikel sich vom Innenleiter weg zu bewegen. Durch den Kontaktverlust mit dem Innenleiter können keine weiteren negativen Ladungsträger aufgenommen werden [2, 13 - 15].

Die entstandene positive Raumladungswolke ist träge und bewegt sich nur langsam in Richtung des negativen Innenleiters. Sobald sich das negativ geladene Partikel im Bereich der positiven Raumladungswolke befindet, kommt es erneut zu einem Ladungsaustausch und das Partikel wird positiv geladen. Dieser Vorgang ruft erneut eine Bewegung in Richtung des negativ geladenen Innenleiters hervor und der gesamte Vorgang wiederholt sich. Der Firefly-Effekt ist auch bei positiven Innenleitern zu beobachten, jedoch tritt der Effekt häufiger bei negativer Innenelektrode auf [6, 13 - 15].

Durch Fehler bei der Herstellung entstehen Hohlräume in Isolatoren und verursachen dadurch die **inneren Defekte**. Sie können auch durch Risse und Delamination an Oberflächen entstehen. Bei konstanter Gleichspannung ist dieser Defekt wegen der geringen Häufigkeit von Entladungen eher unkritisch, im Gegensatz zur Wechselspannung. Die Feststoffe erleiden dadurch, bei einer langen Betriebszeit, eine beschleunigte Materialermüdung. Dieser Defekt kann weitestgehend ausgeschlossen werden, wenn eine ausführliche Stückprüfung bei Wechselspannung mit Teilentladungsmessung durchgeführt wird. Eine Optimierung der Produktion und ein entsprechendes Design verhindern ebenfalls innere Defekte [2, 13 - 15].

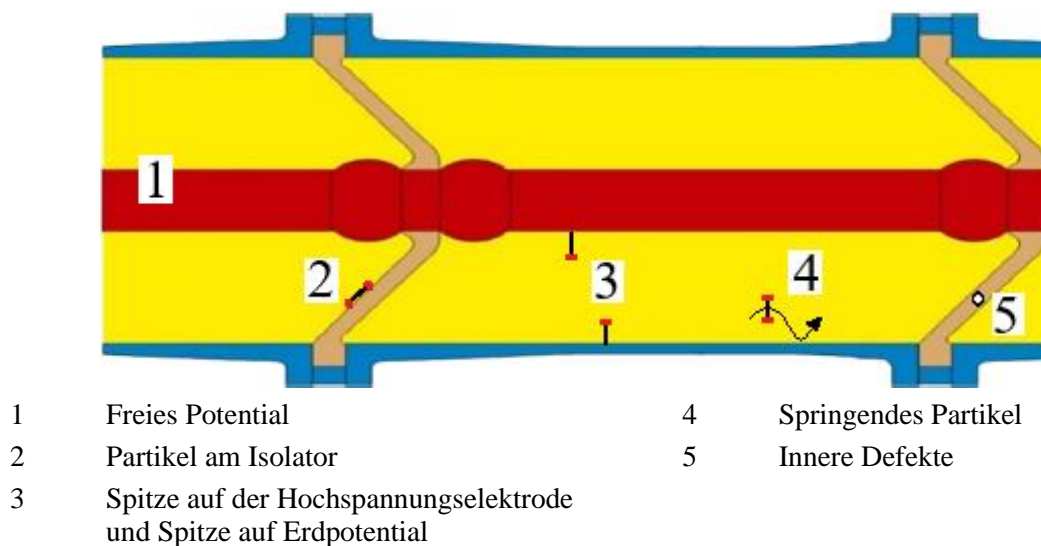


Bild 4-3: Querschnitt eines gasisolierten Systems mit den eingezeichneten typischen Defekten nach [16].

5 Alternativen zu SF₆ als Isoliermedium

5.1 Allgemeines

Für die Energietechnik hat das Isoliergas SF₆ eine zentrale Bedeutung in gasisolierten Schaltanlagen. Es ergeben sich zahlreiche technische Vorteile SF₆ als Isoliermedium zu verwenden, jedoch besitzt dieses Isoliergas ein sehr hohes Treibhauspotential. Der Treibhauseffekt wird durch die Treibhausgase verursacht, die als gasförmige Bestandteile in der Atmosphäre verbleiben. Aufgrund dessen werden langwellige Wärmestrahlungen absorbiert, die von der Erdoberfläche, den Wolken und der Atmosphäre selbst abgestrahlt werden. Unter normalen Umständen würde diese Strahlung in den Weltraum abgegeben werden, jedoch kann wegen der Treibhausgase die Wärmestrahlung nicht mehr in Richtung Weltall abstrahlen. Somit kommt es zu einer zusätzlichen Erwärmung der Atmosphäre. Unter den Treibhausgasen bildet SF₆ das stärkste bekannte Treibhausgas [17].

Im Jahr 1997 wurden im Rahmen des Kyoto-Protokolls Maßnahmen diskutiert, die darauf abzielen, die Emissionen durch SF₆ zu reduzieren. Seit 2014 wird die Verfügbarkeit von alternativen Isoliergasen zu SF₆-betriebenen Schaltanlagen überprüft. Die größte Herausforderung alternativer Isoliergase ist der Einsatzbereich in Mittel- und Hochspannungsanlagen und, ob in den bereits bestehende GIS- und GIL-Anlagen SF₆-Alternativen eingesetzt werden können [17].

5.2 Isoliergase für GIS/GIL-Systeme

5.2.1 Schwefelhexafluorid SF₆

Das Isoliergas Schwefelhexafluorid (SF₆) ist eine anorganische Verbindung, die aus den Elementen Schwefel und Fluor synthetisiert wird. SF₆ ist bei Temperaturen über -64 °C gasförmig und unter Normalbedingungen ungiftig, nicht entflammbar und chemisch untätig bzw. träge. Einer der Vorteile bei der Verwendung von SF₆ liegt darin, dass beim Einsatz in elektrischen Betriebsmitteln mit einem Arbeitsdruck von bis zu 0,7 MPa (7 bar) das Isoliergas gasförmig vorliegt, selbst bei tiefen Temperaturen. SF₆ besitzt auch ein hohes elektrisches Isoliervermögen, eine gute Schalldämpfung und eine geringe Wärmeleitfähigkeit. Im Vergleich zu Luft ist SF₆ fünfmal schwerer und die Lichtbogenlöschung ist um das hundertfache schneller. Das Isoliervermögen oder das kritische elektrische Feld von SF₆ liegt bei ca. 88 kV/cm, bei einem Druck von 0,1 MPa. Mit diesem Wert ist das Isolierverhalten von SF₆ rund dreimal größer als bei Luft, welche eine Durchschlagsfestigkeit von 30 kV/cm bei einem Druck von 0,1 MPa erreicht. Der größte Nachteil von Schwefelhexafluorid ist sein hohes Treibhauspotential (**global warming potential, GWP**). SF₆ besitzt den höchsten Wert aller bekannten Treibhausgase mit 23500, der festgelegt bzw. berechnet wurde nach der IPCC AR5. Die atmosphärische Lebensdauer beträgt 3200 Jahre, ebenfalls nach IPCC AR5 bestimmt [17 - 20]. Eine Übersicht der beschriebenen Werte ist in Tabelle 5-1 dargestellt.

Tabelle 5-1: Zusammenfassung der Werte von Schwefelhexafluorid nach [20]

	Schwefelhexafluorid
Summenformel	SF₆
Siedepunkt	-64 °C
Einsatzgebiet	Mittel- und Hochspannung
Isoliervermögen	88 kV/cm
Atmosphärische Lebensdauer	3200 Jahre
GWP	23500
Minimale Betriebstemperatur	-40 °C



5.2.2 3M™ Novec™

Von der Firma 3M gibt es zwei Alternativen zu SF₆, Novec™ 4710 und Novec™ 5110. Beide weisen eine gute elektrische Festigkeit auf, sowie eine breite Anwendung für unterschiedliche Betriebstemperaturen. Außerdem besitzen die beiden Isoliergase ein deutlich geringeres Treibhauspotential im Gegensatz zu SF₆. Novec™ ist nicht entflammbar und kann in Kombination mit einem Trägergas in GIS- und GIL-Anlagen in der Mittel- und Hochspannungsebene eingesetzt werden [21 - 23].

Unter normalen Umgebungsbedingungen liegen SF₆ und synthetische Luft im gasförmigen Zustand vor. Diese Beschaffenheit wird als homogener Zustand bezeichnet, wenn ein Medium nur einen Aggregatzustand (fest, flüssig oder gasförmig) aufweist. Die Gase Novec™ 4710 und Novec™ 5110 liegen unter Normaldruck und Raumtemperatur in einem Zustand der Teilverflüssigung vor. Das bedeutet, dass es in einem geschlossenen Gasraum bei Erhöhung des Druckes oder Verringerung der Temperatur zu einer Teilverflüssigung kommt. Novec™ 5110 ist bereits bei Atmosphärendruck teilverflüssigt und Novec™ 4710 liegt ebenfalls teilverflüssigt vor, sobald der Umgebungsdruck um mehr als 0,25 MPa erhöht wird. Somit können die beiden Isoliergase nicht in ihrer Reinform verwendet werden. Um dieses Problem zu lösen, ist eine Gasmischung notwendig. Es wird ein Trägergas beigemischt, welches bei Raumtemperatur im gasförmigen Zustand vorhanden ist. Mögliche Trägergase sind Stickstoff (N₂), Sauerstoff (O₂) und Kohlendioxid (CO₂). Sind die beiden Novec™-Isoliergase mit einem oder mehreren Trägergasen gemischt, ergeben sich neue Grenzwerte der Verflüssigung. Durch die Vermischung ist ein Betrieb bei höherem Druck und niedrigeren Temperaturen möglich. Ist das Gasgemisch einmal homogenisiert, ergibt sich ein stabiler Zustand in den Betriebsmitteln bei konstanten Umgebungsbedingungen. Es sei noch erwähnt, sollte die Temperatur weiter reduziert werden als die minimal angegebene Arbeitstemperatur, so kommt es wieder zu einer Teilverflüssigung einzelner Komponenten. Es besteht somit kein einheitliches Mischverhältnis mehr, was das Isoliervermögen folglich ebenfalls reduziert [21].

Novec™ 4710 ist ein fluoriertes Nitril (C_4F_7N), reduziert die Treibhausemissionen als Gasmisch um 99 % und hat in der Reinform eine elektrische Festigkeit die 2-mal größer ist als bei SF_6 . Eine Übersicht ist in der nachfolgenden Tabelle 5-2 aufgelistet [22].

Tabelle 5-2: Übersicht der Werte von Novec™ 4710 nach [20]

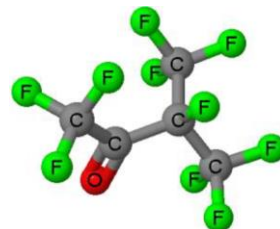
	3M™ Novec™ 4710
Summenformel	C_4F_7N
Siedepunkt	-4,7 °C
Einsatzgebiet	Mittel- und Hochspannung
Isoliervermögen	176 kV/cm
Atmosphärische Lebensdauer	32 Jahre
GWP	2100
Minimale Betriebstemperatur	-25 °C



Novec™ 5110 ist ein fluoriertes Keton ($C_5F_{10}O$) und besitzt als Gasmisch eine noch höhere Reduzierung der Treibhausemission, diese liegt bei 99,99 % im Verhältnis zu SF_6 . In der Reinform ist die elektrische Festigkeit um das 1,4-fache größer als bei SF_6 , ein genauer Überblick ist in der Tabelle 5-3 zu finden [23].

Tabelle 5-3: Zeigt einen Überblick der Werte vom Novec™ 5110 nach [20]

	3M™ Novec™ 5110
Summenformel	$C_5F_{10}O$
Siedepunkt	+27 °C
Einsatzgebiet	Mittel- und Hochspannung
Isoliervermögen	123 kV/cm
Atmosphärische Lebensdauer	16 Tage
GWP	< 1
Minimale Betriebstemperatur	-15 °C

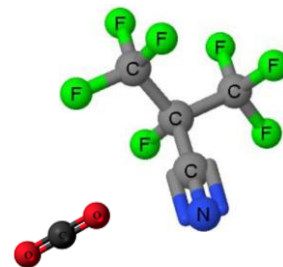


5.2.3 Green gas for grid – g³

Ein weiteres Alternativgas zu SF_6 ist g³ (**green gas for grid**), das auf der Basis des Isoliergases 3M™ Novec™ 4710 beruht, dafür wird das fluorierte Nitril (C_4F_7N) mit einem Anteil von < 10 % mit Kohlendioxid (CO_2) gemischt. Dieses Gasmisch reduziert die Treibhausemissionen um 98 % und ist für den Einsatz in der Mittel- und Hochspannungsebene geeignet. Der Anwendungsbereich liegt zwischen -20 °C und -30 °C. Das Gasmisch hat eine ähnliche elektrische Festigkeit wie SF_6 , welche bezogen auf SF_6 zwischen 84 % und 100 % liegt. Ein weiterer Vorteil ist, dass das Gasmisch nicht entflammbar ist, somit ermöglicht es auch eine annähernd gleiche Dimensionierung wie bei bisherigen GIS/GIL-Anlagen. Eine genau Auflistung der jeweiligen Werte ist in der Tabelle 5-4 dargestellt [19, 20, 24].

Tabelle 5-4: Auflistung der Werte von g³ nach [20, 24]

	g³ (green gas for grid)
Summenformel	< 10 % von C₄F₇N mit CO₂
Siedepunkt	-4,7 °C
Einsatzgebiet	Mittel- und Hochspannung
Isoliervermögen	74 bis 88 kV/cm
Atmosphärische Lebensdauer	11 Jahre
GWP	< 760
Minimale Betriebstemperatur	-30 °C

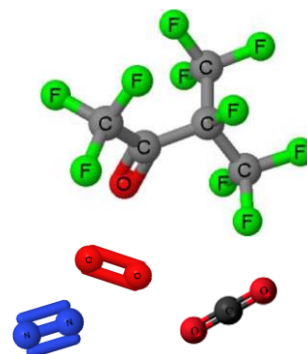


5.2.4 AirPlus™

Von der Firma ABB wird ebenfalls eine Alternative angeboten. Diese basiert auf dem Isoliergas 3M™ Novec™ 5110 und nennt sich AirPlus™. Das fluorierte Keton (C₅F₁₀O) wird mit einem Anteil von < 15 % in Kombination mit Kohlendioxid (CO₂) und Sauerstoff (O₂) gemischt, oder mit synthetischer Luft (O₂/N₂). Für die GIS- und GIL-Anlagen wird die Variante Fluorketon, Kohlendioxid und Sauerstoff in der Hochspannungsebene eingesetzt und für die Mittelspannung die Kombination aus Fluorketon, Sauerstoff und Stickstoff. Das Gasgemisch zerfällt sehr schnell unter der Einwirkung von ultraviolettem Licht in der Atmosphäre und hat daher auch nur eine kurze atmosphärische Lebensdauer. AirPlus hat mit 15 Tagen in der Atmosphäre eine deutlich kürzere Lebensdauer gegenüber von SF₆, welche 3200 Jahre beträgt. Nach dem Zerfall in der Atmosphäre bleibt nur CO₂ übrig, die anderen Moleküle werden ausgewaschen. Die Mengen sind jedoch so gering, dass der Anteil zur globalen Erwärmung vernachlässigbar klein ist. Aus diesem Grund ist das GWP < 1 und zusätzlich ist das Gasgemisch ungiftig, nicht entflammbar, noch sind die Zerfallsprodukte schädlich für die Ozonschicht. Die Leistungskriterien, wie das Isolierverhalten und die Lichtbogenlöschung, sind ähnlich wie bei SF₆ [25]. Eine Übersicht der beschriebenen Eigenschaften sind in der Tabelle 5-5 aufgelistet.

Tabelle 5-5: Zusammenfassung der Werte von AirPlus nach [20, 24]

	AirPlus™ (ABB)
	< 15 % von C₅F₁₀O mit CO₂/O₂ oder mit O₂/N₂
Summenformel	
Siedepunkt	+27 °C
Einsatzgebiet	Mittel- und Hochspannung
Isoliervermögen	88 kV/cm
Atmosphärische Lebensdauer	15 Tage
GWP	< 1
Minimale Betriebstemperatur	-5 °C



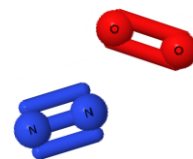
5.2.5 Synthetische Luft (Clean Air)

Die Firma Siemens verwendet als Isoliermedium synthetische Luft, die auch als Clean Air bekannt ist und aus der Mischung von Sauerstoff (O_2) und Stickstoff (N_2) besteht. Das Mischverhältnis ist 20 % O_2 und 80 % N_2 . Die elektrische Festigkeit von Luft beträgt unter Normaldruck ca. 30 kV/cm, bei synthetischer Luft liegt die elektrische Festigkeit bei ca. 35 kV/cm. Unter der Verwendung von Clean Air als Isoliermedium können GIS-Anlagen bis 145 kV betrieben werden, ein Beispiel dafür stellt die Blue GIS 8VN1 der Firma Siemens. Um annähernd gleiche Isolationseigenschaften im Vergleich zu SF_6 zu erhalten, wird die 8VN1 mit einem Betriebsdruck von 0,8 MPa (8 bar) beaufschlagt [26]. Ein weiteres Beispiel für synthetische Luft als Isoliermedium bietet die Firma Hivoduct mit z. B. der G10-Serie von 72 kV bis 145 kV und einem Betriebsdruck von 1 MPa (10 bar) [27].

Bei der Anwendung von Clean Air ergibt sich ein Treibhauspotential von Null, was ebenfalls bedeutet, dass kein Ozonzerstörungspotential besteht. Clean Air ist ebenfalls nicht toxisch und auch nicht entflammbar, was die Anwendung sehr stabil macht. Bei Tiefsttemperaturen kommt es zu keiner Verflüssigung und synthetische Luft besitzt einen niedrigen Siedepunkt. Da in synthetischer Luft keine F-Gase vorkommen, ist eine gesonderte Anforderung wie Training, Transport, Installation, Betrieb und Recycling nicht notwendig. In den Schalt- und Isolationsgasräumen besteht kein Risiko von Kohlenstoffzerfallsprodukten. Da weder C-Gase noch F-Gase enthalten sind, gibt es keine Dokumentations- und Berichterstattungspflicht. Auch mögliche Steuer oder Kompensationskosten für CO_2 entfallen bei der Verwendung von Clean Air, ebenso ist ein Gas-Recycling nicht mehr notwendig [28]. Eine kurze Zusammenfassung der beschriebenen Eigenschaften ist in der Tabelle 5-6 dargestellt.

Tabelle 5-6: Auflistung der Werte von synthetischer Luft (Clean Air) nach [20, 24]

	Clean Air (Siemens)
Summenformel	O_2/N_2
Siedepunkt	-196 °C
Einsatzgebiet	Mittel- und Hochspannung
Isoliervermögen	35 kV/cm
Atmosphärische Lebensdauer	0
GWP	0
Minimale Betriebstemperatur	-50 °C



5.2.6 Elektrische Festigkeit von synthetischer Luft bei hohem Druck

In der Hochspannungstechnik wird seit den 1960er Jahren bei den gasisolierten Schaltanlagen SF_6 als Isoliergas verwendet, da aufgrund der guten Isolierfähigkeit eine kompakte Bauweise ermöglicht wird. Bei einem Gasdruck von 0,5 MPa (5 bar) erreicht SF_6 vergleichbare Isoliereigenschaften wie Isolieröle. Durch Erhöhung des Drucks kann die elektrische Festigkeit von alternativen Isoliergasen gesteigert werden [29].

In der Literatur gibt es nicht ausreichend detaillierte Angaben zu alternativen Isoliergasen im Druckbereich von 0,5 bis 1,1 MPa. Im Normalzustand wirken Gase als Isolatoren, deshalb befinden sich im Gas nur wenige freie Ladungsträger. Damit es zu einer Ladungsträgervermehrung kommt, muss die nötige kinetische Energie durch einen ionisierenden Stoß von einem freien Ladungsträger aufgenommen werden. Ist nach Townsend, Reather die Zündbedingung erfüllt, setzt ein Gasdurchschlag ein. Die Townsend-Generationslawine geht bei hohem Druck in die Kanal- bzw. Streamerentladung über. Die Streamerentladungen verzerren das äußere elektrische Feld wegen ihrer hohen Raumladungsdichte. Das Isoliervermögen des Gases wird dadurch negativ beeinflusst. Im Hochdruckbereich ist der Streamer hauptsächlich für den Gasdurchschlag verantwortlich. Die Gültigkeit des Paschen-Gesetzes gilt nur für ein raumladungsfreies, homogenes elektrisches Feld. In der Praxis lassen sich ideale homogene Felder nur schwer realisieren. Nach Paschen ist die Durchschlagsspannung U_d im homogenen elektrischen Feld (Formel 5.1) das Produkt aus dem Druck p , der Schlagweite d und den spezifischen Gasparametern A , B [29].

$$U_{d, \text{homogen}}(pd) = \frac{B \cdot pd}{\ln\left(\frac{A \cdot pd}{k}\right)} \quad (5.1)$$

Bei einer inhomogenen Anordnung kann kein geschlossener mathematischer Ausdruck formuliert werden. Mit der Paschen-Darstellung ist es möglich die Durchschlagsspannungen über dem Druck darzustellen. Im Bild 5-1 ist die berechnete elektrische Durchschlagfeldstärke E_d in Abhängigkeit des Drucks p abgebildet. Mit dem Schwaigerschen-Ausnutzungsfaktor wurde die elektrische Festigkeit korrigiert und die Durchschlagsspannung von SF_6 und synthetischer Luft berechnet [29].

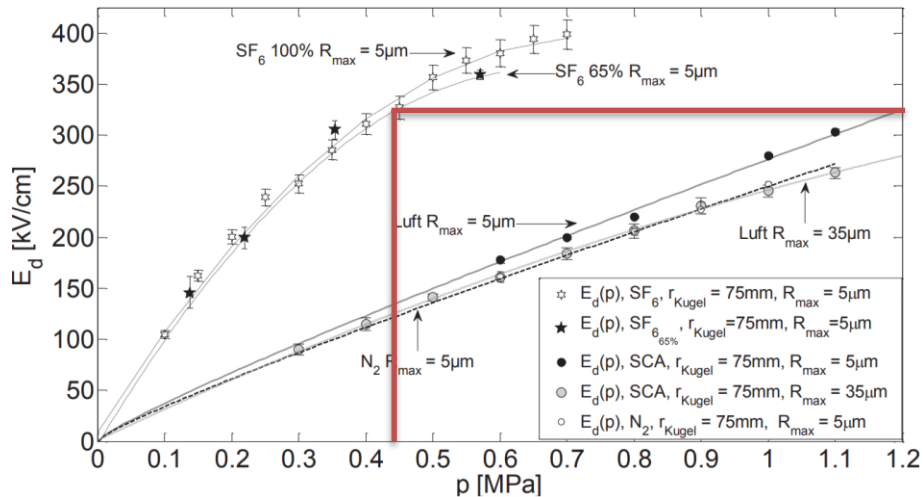


Bild 5-1: Elektrische Festigkeit E_d von synthetischer Luft und SF_6 in Abhängigkeit des Drucks p in einem quasihomogenen Feld [29]

Wie im Bild 5-1 ersichtlich ist, steigt die elektrische Festigkeit von synthetischer Luft stetig linear an. Anhand der in Rot eingezeichneten Linie, kann aus dem Bild 5-1 abgelesen werden, dass sich eine annähernd gleiche elektrische Festigkeit bei 1,2 MPa von synthetischer Luft und ca. 0,45 MPa bei SF_6 ergibt.

6 Teilentladungsmessungen an typischen Defekten von GIS/GIL-Systemen

6.1 Messaufbau

Für die Teilentladungsmessung bei Gleichspannung wurde der Aufbau verwendet, der schematisch im Bild 6-1 dargestellt ist. Der reale Aufbau im Labor ist im Bild 6-2 abgebildet. Bei dem Transformator handelt es sich um einen MWB TEO 100/10. Zur Erzeugung der Gleichspannung wurde direkt nach dem Transformator eine Einweggleichrichtung geschaltet. Diese besteht aus einer Diode D_1 und einem Serienwiderstand mit $R_D = 500 \text{ k}\Omega$. Da für die Messung beide Spannungspolaritäten benötigt wurden, konnte für einen Polaritätswechsel die Diode umgedreht werden. Um die Welligkeit der Gleichspannung nach der Gleichrichtung so gering wie möglich zu halten, wurde ein Glättungskondensator mit $C_1 = 10 \text{ nF}$ verwendet. Ein paralleler ohmscher Spannungsteiler dient zur Spannungsmessung. Das Spannungssignal ist mit dem V-Eingang des MPD 600 verbunden. Die maximale Spannung am V-Eingang ist auf $U_{\text{eff}} = 60 \text{ V}$ begrenzt, deshalb wurde ein Spannungsteilerverhältnis von $140 \text{ M}\Omega/120 \text{ k}\Omega$ (R_2/R_3) gewählt. Für den Fall, dass es zu einem Kurzschluss kommt, wurde zur Strombegrenzung der Widerstand mit $R_1 = 10 \text{ M}\Omega$ in Serie geschaltet, dieser dient auch zur Dämpfung externer leitungsgebundener Störsignale. Der Ankoppelvierpol (AKV CPL 542) befindet sich im Zweig des Koppelkondensators mit $C_2 = 1,2 \text{ nF}$ zur Auskopplung der Teilentladungsimpulse. In der Testzelle werden die typischen Defekte der GIS/GIL-Anlagen nachgebildet.

Das verwendete Teilentladungsmesssystem ist von der Firma Omicron, dazu gehört der Ankoppelvierpol (AKV CLP 542), MCU 502 und MPD 600 sowie das Programm *Omicron Software for MPD an MI* (Version 1.6.7.1).

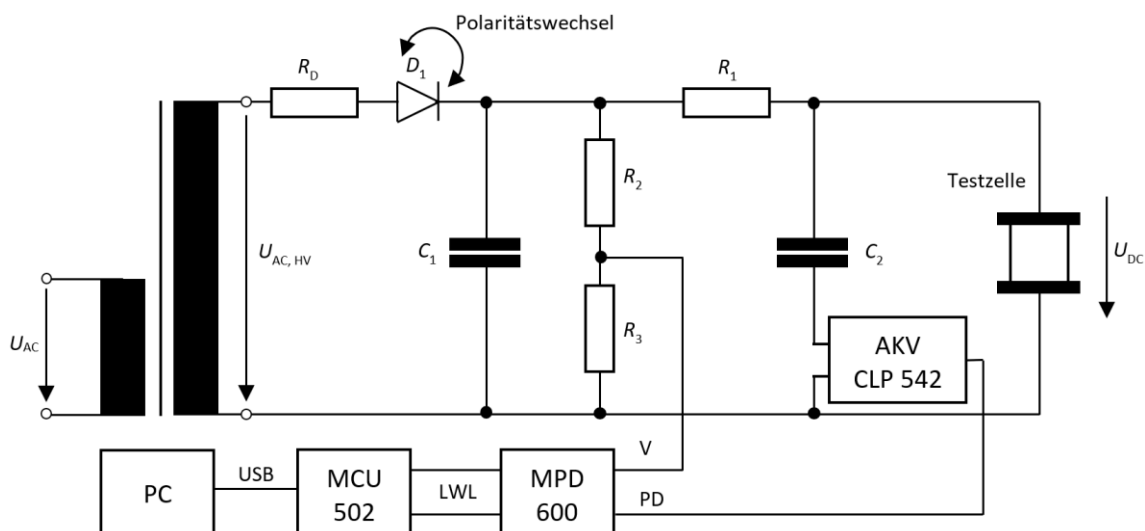


Bild 6-1: Messschaltung für die TE-Messung bei Gleichspannung mit positiver und negativer Polarität nach IEC 60270.



Bild 6-2: Realer Aufbau der Messschaltung im Labor mit Hochspannungstransformator, Einweggleichrichter, Glättungskondensator, ohmschem Spannungsteiler mit dem TE-Messsystem, Koppelkondensator und einer Testzelle (von rechts nach links).

Die Messschaltung wird mit einem TE-Kalibrator der Firma Power Diagnostix (CAL1A/DP) vor jeder Messung kalibriert. Der TE-Kalibrator wird parallel zur Testzelle geschaltet und die Kalibrierung erfolgt mit $q = 10$ pC. In der Software von Omicron wurde eine TE-Triggerschwelle von $q = 1$ pC eingestellt. Bei der Verstärkereinstellung muss beachtet werden, wie hoch die auftretenden Impulse sind, da sich bei der Änderung der Verstärkerstufe auch der Grundstörpegel verändert und die TE-Triggerschwelle entsprechend angepasst werden muss [10].

Um die richtige Polarität der TE-Impulse zu erfassen, wurde der Filter breitbandig gewählt, mit einer Bandbreite von $\Delta f = 3$ MHz und einer Mittenfrequenz von $f_c = 1,6$ MHz. Der Störpegel bzw. das Grundrauschen betrug im Labor $q = 0,08$ pC.

6.2 Beschreibung der Defekte

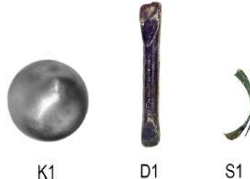
Die typischen Defekte in GIS- und GIL-Anlagen sind „Spitze auf der Hochspannungselektrode“ bzw. „Spitze auf Erdpotential“, „freies Potential“, „freie metallische Partikel“ und „Gleitentladungen“. Zu den Defekten gehören auch noch „Hohlräume im Isolator“ und „Partikel am Isolator“, welche im Rahmen dieser Masterarbeit nicht untersucht wurden. In unterschiedlichen Testzellen wurden diese Defekte nachgebildet und mit unterschiedlichem Druck p (relativem Druck) beaufschlagt. Zur Untersuchung der Defekte kam als Isoliermedium SF₆ und synthetische Luft zum Einsatz.

Für den Defekt der **Spitze auf der Hochspannungselektrode** (Spitze-Platte-Anordnung) wurde in der Testzelle eine Nadel mit einem Winkel der Spitze von $\alpha = 14^\circ$ und einem Spitzenradius $r = 50 \mu\text{m}$ verwendet, wobei die Schlagweite s in der Testzelle variiert werden kann. Für diese Messung wurde ein Abstand zur Platte mit $s = 10 \text{ mm}$ gewählt. Für die **Spitze auf Erdpotential** wurde der gleiche Abstand eingehalten. Der Aufbau der Testzelle ist im Bild 6-3 abgebildet sowie die dazugehörigen Abmessungen der Spitze-Platte-Anordnung. Eine mögliche Veränderung des Spitzenwinkels auf die Einsetzspannung U_E durch Teilentladungen wurde nicht näher untersucht.

Das **freie Potential** wurde als Defekt in der Testzelle mit einer metallischen Elektrode, die elektrisch isoliert ist, nachgebildet. Diese Elektrode befindet sich zwischen einem Stab auf Erdpotential und einer Platte auf Hochspannung. Die isolierte Elektrode besteht aus einer M6-Schraube mit einer spitzen und einer flachen Seite. Über eine zylinderförmige Aufhängung aus Polyethylen ist die spitze Seite der isolierten Elektrode mit dem Stab auf der Erdungsseite verbunden. Die Abmessungen der Testzelle sind im Bild 6-4 eingezeichnet, sowie der realisierte Aufbau.

Der TE-Defekt des **freien metallischen Partikels** wird mit der Testzelle im Bild 6-5 reproduziert. Die Testzelle besteht aus einer abgerundeten zylindrischen Hochspannungselektrode und einer schalenförmigen Gegenelektrode, die auf Erdpotential liegt. Das zu untersuchende Partikel wird direkt unter der Hochspannungselektrode positioniert. Ist die elektrische Feldstärke ausreichend, wird das Partikel in Bewegung versetzt. In der Realität ist der TE-Defekt mit dem Span am realistischsten, da dieser bei Fehlern während der Montage der GIS- und GIL-Anlagen vorkommen kann. Die anderen Partikel, die Kugel und das zylinderförmige Partikel, sind als ideale Defekte einzustufen für die Untersuchung im Labor. Es wurden drei unterschiedliche Partikel untersucht. Die Kugel (K1) aus Stahl hat einen Durchmesser von $d = 2 \text{ mm}$ und ein Gewicht von $m = 33 \text{ mg}$. Das Drahtstück (D1) aus Stahl hat eine Länge von $l = 1,4 \text{ mm}$, einen Durchmesser von $d = 0,5 \text{ mm}$ und ein Gewicht von $m = 3,8 \text{ mg}$. Das dritte Partikel ist ein Span (S1) aus Stahl mit der Länge von $l = 3,7 \text{ mm}$ und einem Gewicht von $m = 3,9 \text{ mg}$. Eine kurze Übersicht der gemessenen Partikel ist in der Tabelle 6-1 ersichtlich.

Tabelle 6-1: Zusammenfassung der untersuchten freien metallischen Partikel.

Freie metallische Partikel			
Art des Partikels	Abmaße in mm	Gewicht in mg	
Kugel (K1)	$d = 2$	33	 K1 D1 S1
Draht (D1)	$l = 1,4$ und $d = 0,5$	3,8	
Span (S1)	$l = 3,7$	3,9	

Zur Nachbildung des Defektes **Gleitentladungen** wurden zwei verschiedene Oberflächen untersucht. Eine Gießharzplatte mit einem Durchmesser von $d = 84 \text{ mm}$ und einer Plattendicke von $h = 2 \text{ mm}$, sowie eine Hartpapierplatte mit $d = 84 \text{ mm}$ und einer Plattendicke von $h = 2 \text{ mm}$. Die Platten wurden zwischen der Hochspannungselektrode ($d = 24 \text{ mm}$) auf der Oberseite und der Erdelektrode ($d = 78 \text{ mm}$) auf der Unterseite eingeklemmt. Der Aufbau der Anordnung ist im Bild 6-6 abgebildet.

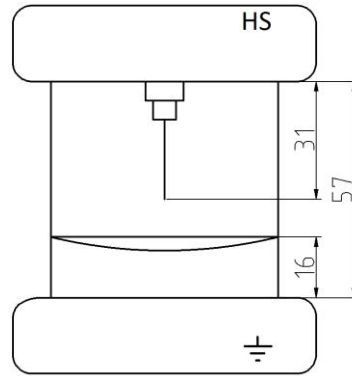
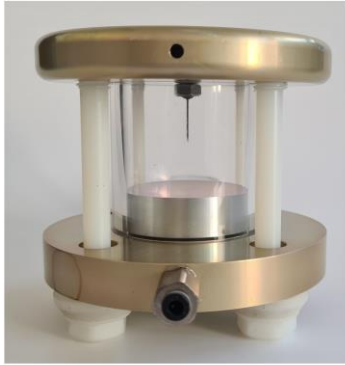


Bild 6-3: Spitze-Platte-Anordnung in der gasisolierten Testzelle mit der eingestellten Schlagweite von $s = 10$ mm.

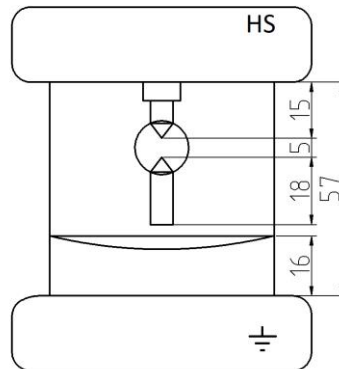
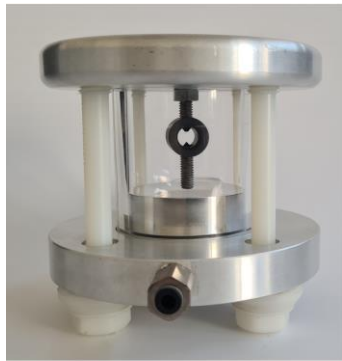


Bild 6-4: Anordnung des freien Potentials in der gasisolierten Testzelle. Für die Messung wurde die Testzelle umgedreht (Bild 6-30).

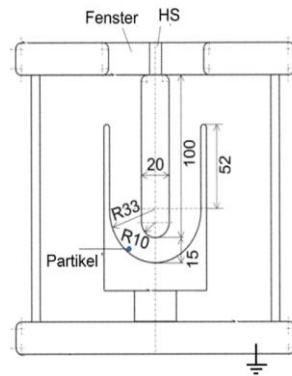


Bild 6-5: Gasisolierte Testzelle für die Messung des springenden Partikels.

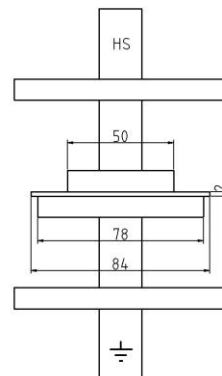


Bild 6-6: Testzellen-Anordnung für Gleitentladungen mit einer Gießharz- und Hartpapierplatte.

6.3 Messprozedur

Zu Beginn wurde eine Leerlaufmessung des Prüfkreises durchgeführt, um zu vermeiden, dass bereits im Leerlauf mögliche Teilentladungsquellen die Messung beeinflussen. Diese Überprüfung wurde ohne die Testzelle durchgeführt und dabei traten bis $U_{DC} = 65 \text{ kV}$ keine Teilentladungen auf. Um etwaige Abweichungen der verschiedenen Testzellen entgegenzuwirken, wurde vor jeder Messung die Messschaltung mit dem TE-Kalibrator (CAL1A/DP) abgeglichen, indem der Prüfkreis mit $q = 10 \text{ pC}$ kalibriert wurde. Da das Grundrauschen des Aufbaus ca. $q = 0,08 \text{ pC}$ betrug, konnte die TE-Triggerschwelle auf $q = 1 \text{ pC}$ eingestellt werden. Die Verstärkerstufe konnte für die meisten TE-Defekte auf der automatischen Einstellung belassen werden. Außer bei der Messung des freien Potentials, da hier zu den kleinen TE-Impulsen im fC-Bereich auch große TE-Impulse bis $q = 800 \text{ pC}$ aufgetreten sind und der Regler daher manuell nachjustiert werden musste, um den Grundstörpegel nicht zu verstärken. Die Testzellen wurden vor jeder Messung mit Isopropanol gereinigt, um Verunreinigungen und Staub als mögliche TE-Quelle auszuschließen. Nach dem Zusammenbau und der Verschraubung konnte mit der Vakuumpumpe die eingeschlossene, verbleibende Luft entzogen werden. Anschließend wurden die Testzellen mit dem jeweiligen Isoliergas beaufschlagt. Alle TE-Defekte wurden mit SF_6 und synthetischer Luft untersucht. Für die eindeutige Unterscheidung der elektrischen Eigenschaften von SF_6 und synthetischer Luft wurden die Testzellen mit einem Druck von $p = 0,1 \text{ MPa}$, $p = 0,3 \text{ MPa}$ und $p = 0,5 \text{ MPa}$ (relativem Druck) befüllt. Von besonderem Interesse war die Spannung, bei der die Teilentladungen einsetzen. Die Teilentladungseinsetzspannung U_E wurde ermittelt, indem die Spannung langsam erhöht wurde, bis Teilentladungen aufgetreten sind. Für die Reproduzierbarkeit der Einsetzspannung wurde die Spannungsfahrt bis zur Einsetzspannung für jede Messung zweimal durchgeführt. Sobald die Spannung U_E ermittelt war und ausreichend Messdaten aufgezeichnet wurden, konnte die Gleichspannung auf das 1,1-fache der Einsetzspannung erhöht werden. Dieser Vorgang wurde bis zur 1,3-fachen Einsetzspannung durchgeführt (Bild 6-7) um für jede Messung vier Messpunkte auf zu zeichnen. Die Dauer der Spannungsstufen wurden für jeden Defekt separat angepasst, um ausreichend Messdaten zu generieren betrug die Messzeit zwischen $t_i = 10 \text{ Sekunden}$ und bis zu $t_i = 45 \text{ Minuten}$. Alle zu untersuchenden Defekte wurden mit SF_6 und synthetischer Luft, bei allen drei Druckverhältnissen durchgeführt. Hierfür wurde jeweils ein Messfile erstellt und ausgewertet. Aus den gemessenen Werten konnte mit der Matlab-Software *PDDC-Analyzer 3.0* das dazugehörige NoDi*-Diagramm konstruiert werden.

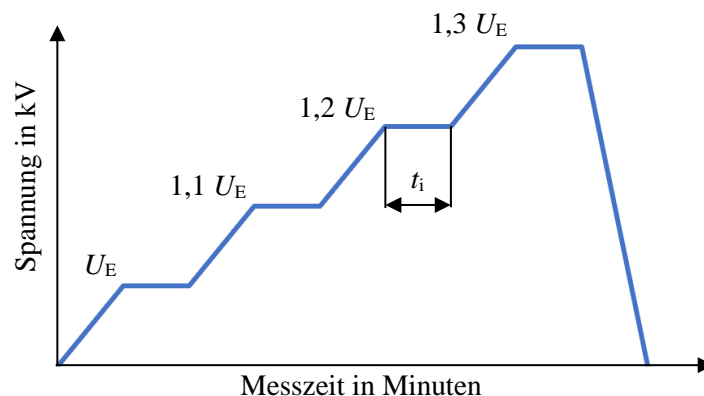


Bild 6-7: Spannungsfahrt der TE-Messung mit angepasster Messzeit je nach Defektyp.

6.4 Ergebnisse für synthetische Luft und SF₆ bis zu $p = 0,5$ MPa

6.4.1 Spitze auf der Hochspannungselektrode und Spitze auf Erdpotential

Allgemeines

Diese Anordnung wird in vier verschiedene Varianten unterteilt. An der Nadel wird Gleichspannung mit positiver und negativer Polarität angelegt. Anschließend wird die Testzelle umgedreht und an der Plattenseite Gleichspannung mit positiver bzw. negativer Polarität angeschlossen. Die Testzelle (Bild 6-3) wird bei allen vier Varianten mit einem Gasdruck von $p = 0,1$ MPa, $p = 0,3$ MPa und $p = 0,5$ MPa (relativer Druck) beaufschlagt. Zudem wird jede Variante mit dem Isoliergas SF₆ und dem Alternativgas synthetische Luft durchgeführt.

Zuerst wird ein Vergleich des Entladungsverhaltens über der Zeit und den daraus konstruierten NoDi*-Diagrammen von SF₆ und synthetischer Luft bei gleichem Druck und gleicher Polarität durchgeführt. Es soll veranschaulicht werden, ob die NoDi*-Diagramme bei unterschiedlicher elektrischer Festigkeit ähnliche Formen bzw. Muster aufweisen. Anschließend wird noch ein Vergleich der aufgetretenen Ladungen und der NoDi*-Diagramme durchgeführt, bei dem die elektrische Festigkeit von SF₆ und synthetischer Luft annähernd gleich ist.

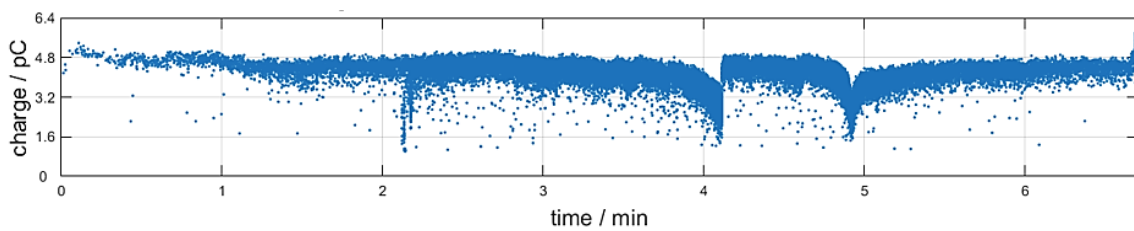
Spitze auf der Hochspannungselektrode bei Gleichspannung mit positiver Polarität und $p = 0,1$ MPa

Für die Messung von Koronaentladungen sollte ein möglichst inhomogenes Feld erzeugt werden. Dies wurde durch eine Spitze-Platte-Anordnung realisiert und dabei Gleichspannung mit positiver Polarität an der Nadel angelegt. Der Abstand der Nadelspitze zur Platte betrug $s = 10$ mm, dieser wurde für alle weiteren Messungen nicht mehr verändert. Zur Bestimmung der Einsetzspannung U_E wurde die Spannung schrittweise erhöht, bis vom TE-Messsystem (Omicron MPD 600) Teilentladungen erfasst werden konnten. Um zu verhindern, dass Teilentladungen aus anderen Gründen in der Messung miterfasst werden, musste zu Beginn eine Leerlaufmessung des Prüfkreises nach IEC 60270 (Bild 6-1) und der leeren Testzelle durchgeführt werden.

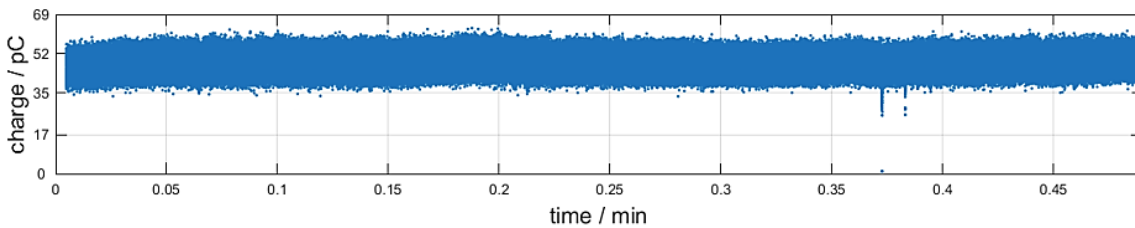
Die Einsetzspannung bei SF₆ und einen Druck von $p = 0,1$ MPa konnte mit $U_{E, \text{SF}_6} = 8,3$ kV bestimmt werden, dabei sind Teilentladungen mit einer maximalen Amplitude von $|q_{\text{max}}| = 5,8$ pC aufgetreten. Im Durchschnitt ergab sich eine Ladung von $|\bar{q}| = 3,8$ pC, bei einer Messzeit von 6,5 Minuten. Der Verlauf der aufgetretenen Ladungen ist im Bild 6-8a dargestellt. Zu Beginn wurden weniger TE-Impulse detektiert, welche mit zunehmender Messzeit kontinuierlicher aufgetreten sind. Die maximale und die durchschnittliche Ladung liegen nahe beieinander.

Bei synthetischer Luft mit $p = 0,1$ MPa betrug die Einsetzspannung $U_{E, O_2/N_2} = 6$ kV. Die maximale Amplitude der Teilentladungen wurde bestimmt mit $|q_{\max}| = 63,1$ pC und es ergab sich eine durchschnittliche Ladung von $|\bar{q}| = 46,3$ pC, bei einer Messzeit von ca. 30 Sekunden (Bild 6-8b). Im Gegensatz zu SF_6 treten die Entladungen beim Erreichen der Einsetzspannung kontinuierlicher auf und mit einer höheren Amplitude der Ladungen, weshalb die Messzeit reduziert wurde.

Nach der Bestimmung der Einsetzspannung und ausreichenden Messdaten für die Auswertung, konnte die Spannung weiter erhöht werden. Dabei wurde die Einsetzspannung mit dem Faktor 1,1 multipliziert und mit der 1,1-fachen U_E konnte ein weiterer Messpunkt aufgenommen werden. Dies wurde bis zur 1,3-fachen Einsetzspannung durchgeführt. Mit steigender Spannung nahm die Anzahl der Entladungen zu, wodurch die Messzeit verringert werden konnte.



(a) SF_6 mit einer Einsetzspannung von $U_E = 8,3$ kV und einer Messzeit von 6,5 Minuten



(b) Synthetische Luft mit einer Einsetzspannung von $U_E = 6$ kV und einer Messzeit von ca. 30 Sekunden

Bild 6-8: Ladung q in Abhängigkeit der Messzeit t einer Spitze auf der Hochspannungselektrode bei Gleichspannung mit positiver Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,1$ MPa bei (a) SF_6 und (b) synthetischer Luft.

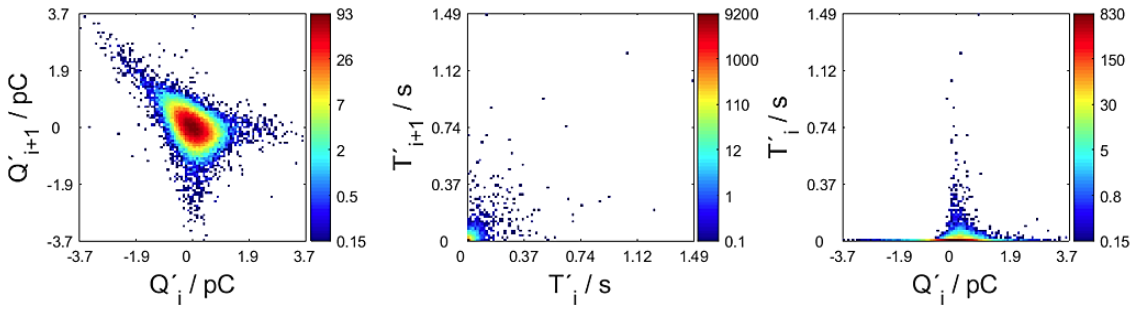
Entladungsmechanismus der Nadel bei Gleichspannung mit positiver Polarität

Ist an der Nadel Gleichspannung mit positiver Polarität angelegt, treten unterschiedliche Formen von Koronaentladungen auf. In der ersten Stufe ist zu beobachten, dass intermittierende Impulse mit sehr kleiner Amplitude und hoher Frequenz auftreten. Diese Impulse lassen sich, wegen ihrer geringen Ladung, nicht vom Messsystem erfassen [30, 31]. Die elektrische Feldstärke steigt im Bereich der gekrümmten Oberfläche der Nadelspitze, aufgrund der hohen Inhomogenität, an. Es starten Elektronenlawinen an der gekrümmten Oberfläche, wodurch Glimmentladungen entstehen und eine Raumladungswolke aus positiven Ionen gebildet wird. Ein Wachstum der Streamer in den feldschwachen Bereich wird erst durch das Erhöhen der angelegten Spannung ermöglicht. Ist eine ausreichend hohe Feldstärke erreicht, so ist ein Vorwachsen der Streamer bis zur Gegenelektrode möglich, was zum vollständigen Durchschlag führt [3, 4].

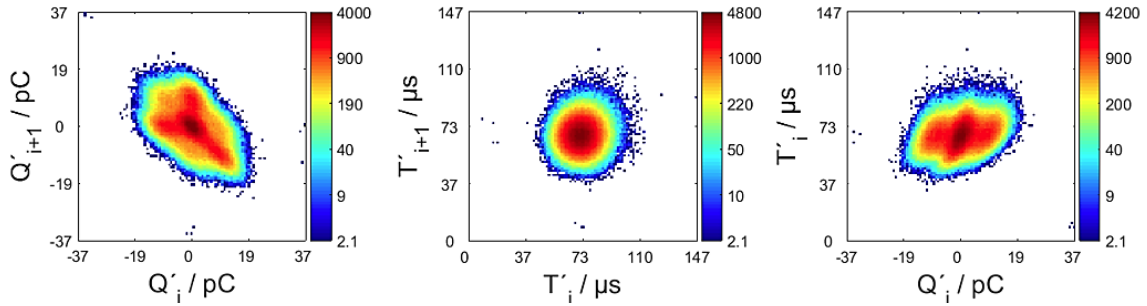
NoDi*-Diagramme einer Spitze auf der Hochspannungselektrode bei Gleichspannung mit positiver Polarität und $p = 0,1$ MPa

Für SF_6 ist im NoDi*-Q-Diagramm (Bild 6-9a) das typische Muster, die Form eines Dreiecks, einer Spitze-Platte-Anordnung zu erkennen. Ebenfalls markant für diesen Defekt sind die kurzen zeitlichen Abstände der TE-Impulse im NoDi*-T-Diagramm.

Bei synthetischer Luft im Bild 6-9b ist das Muster einer Ellipse bzw. eines Sechsecks im NoDi*-Q-Diagramm dargestellt, allerdings besitzt der Häufigkeitspunkte in der Mitte ansatzweise die Form eines Dreiecks. Die Impulswiederholrate ist deutlich höher und die Streuung der Amplituden der Ladungen größer.



(a) SF_6 und $U_E = 8,3$ kV



(b) Synthetische Luft und $U_E = 6$ kV

Bild 6-9: NoDi*-Diagramme einer Spitze auf der Hochspannungselektrode bei Gleichspannung mit positiver Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,1$ MPa bei Einsatzspannung bei (a) SF_6 und (b) synthetischer Luft.

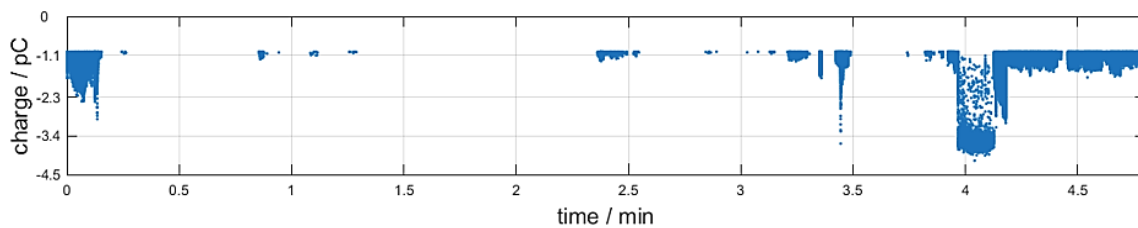
Spitze auf der Hochspannungselektrode bei Gleichspannung mit negativer Polarität und $p = 0,1$ MPa

Bei dieser Anordnung wurde an der Nadel eine Gleichspannung mit negativer Polarität angelegt. Die Testzelle wurde mit SF_6 und einem Druck von $p = 0,1$ MPa beaufschlagt und anschließend mit synthetischer Luft und $p = 0,1$ MPa befüllt.

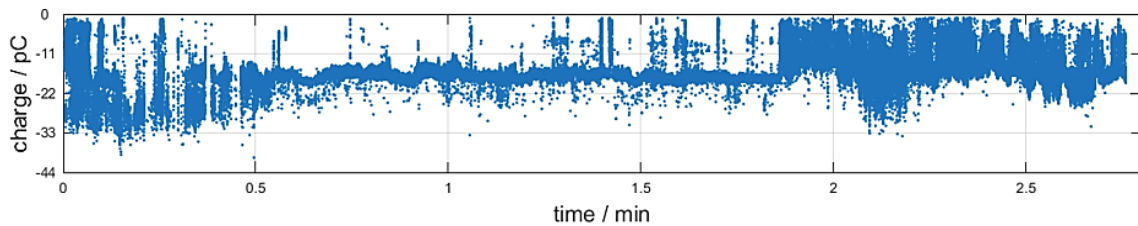
Bei der Messung mit SF_6 ergab sich eine Einsatzspannung von $U_{E, \text{SF}_6} = -6,9$ kV. Die maximale Amplitude der Teilentladungen konnte mit $|q_{\text{max}}| = 4,1$ pC bestimmt werden. Im Durchschnitt ergab sich eine Ladung von $|\bar{q}| = 1,3$ pC, bei einer Messzeit von ca. 5 Minuten. Neben der schwankenden Amplitude der Ladungen ist ein Aussetzen der TE-Impulse zu erkennen, welche mehrere Sekunden andauert (Bild 6-10a).

In einer annähernd gleichen Messzeit wurden bei Gleichspannung mit negativer Polarität mehr Impulse detektiert als bei Gleichspannung mit positiver Polarität. Hingegen ist die Amplitude der Ladungen bei Gleichspannung mit positiver Polarität größer als bei Gleichspannung mit negativer Polarität.

Die Einsetzspannung bei synthetischer Luft betrug $U_{E, O_2/N_2} = -4,4$ kV. Für die aufgetretenen Teilentladungen ergab sich eine maximale Amplitude von $|q_{\max}| = 39,9$ pC. Bei einer Messzeit von ca. 3 Minuten betrug die durchschnittliche Ladung $|\bar{q}| = 15$ pC. Die Amplituden der Ladungen sind breiter gestreut und es sind weniger TE-Impulse aufgetreten als bei Gleichspannung mit positiver Polarität (Bild 6-10b).



(a) SF₆ mit einer Einsetzspannung von $U_E = -6,9$ kV und einer Messzeit von ca. 5 Minuten



(b) Synthetische Luft mit einer Einsetzspannung von $U_E = -4,4$ kV und einer Messzeit von ca. 3 Minuten

Bild 6-10: Ladung q in Abhängigkeit der Messzeit t einer Spitze auf der Hochspannungselektrode bei Gleichspannung mit negativer Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,1$ MPa bei (a) SF₆ und (b) synthetischer Luft.

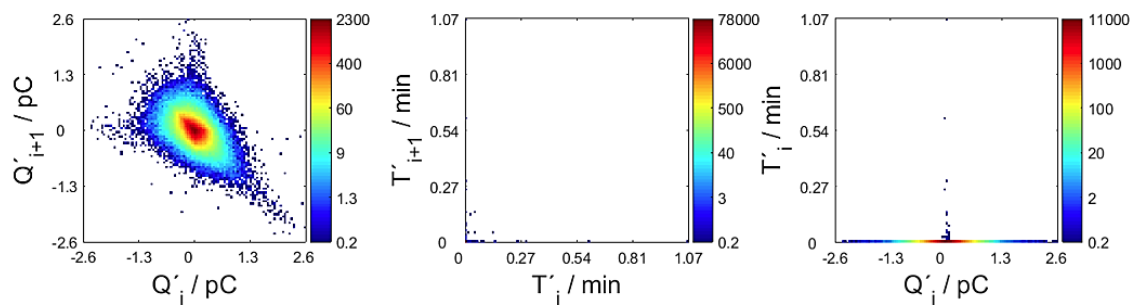
Entladungsmechanismus der Nadel bei Gleichspannung mit negativer Polarität

Liegt an der Nadel Gleichspannung mit negativer Polarität an, kann es zu einem Zündverzug kommen. Trotz hoher Feldstärke für das Startelektron an der gekrümmten Elektrodenoberfläche ist der Bereich sehr klein. Daher kommt es zu Unregelmäßigkeiten des Einsetzens von Koronaimpulsen. Das ist ein Indiz für die erschwerten Bedingungen des Entstehens eines Startelektrons (Bild 6-10a). An der Nadelspitze entsteht, durch die Entladungen, eine positive Raumladungswolke. Vor der Anode wird das elektrische Feld erhöht und im restlichen Bereich bildet sich das Feld gleichmäßig aus. Aus diesem Grund bilden sich Streamer im feldschwachen Bereich nur schwer aus. Wird die angelegte Spannung erhöht, können nun auch im feldschwachen Bereich hohe Feldstärken auftreten. Das begünstigt das Vorwachen von Streamern, die bis zur Gegenelektrode reichen und anschließend zum Durchschlag führen [3, 4].

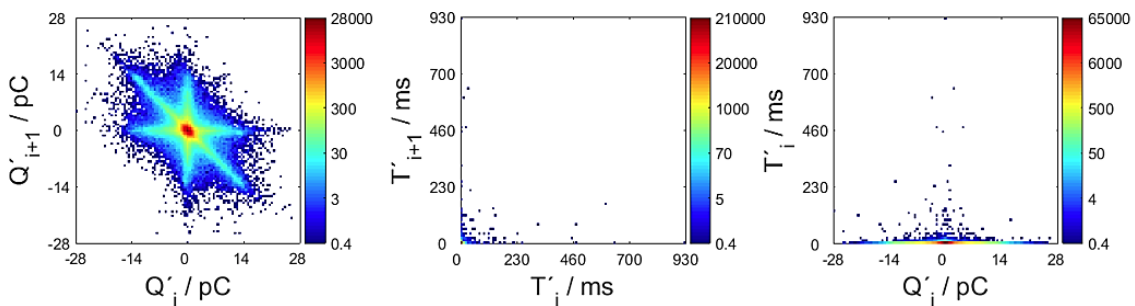
NoDi*-Diagramme einer Spitze auf der Hochspannungselektrode bei Gleichspannung mit negativer Polarität und $p = 0,1$ MPa

Das NoDi*- Q -Diagramm für SF_6 zeigt im Bild 6-11a das typische Muster von Koronaentladungen in Form eines Dreiecks. Im Gegensatz zum Bild 6-9a (bei Gleichspannung mit positiver Polarität) haben sich die Häufigkeitspunkte weiter nach außen verteilt, aufgrund der höheren Anzahl und breiten Streuung der TE-Impulse. Die Differenzen der zeitlichen Abstände der Teilentladungen liegen nahe beieinander. Das Dreieck in dem NoDi*- Q -Diagramm hat sich um 180 Grad gedreht. Dies erklärt sich wegen der umgekehrten Polarität.

Bei synthetischer Luft lässt sich das typische Sechseck- bzw. Ellipsen-Muster in dem NoDi*- Q -Diagramm nicht mehr erkennen. Bei diesem Muster handelt es sich um eine Überlagerung. Wobei es sich um keine Überlagerung unterschiedlicher Pulssequenzen handelt, sondern um eine zeitliche Veränderung der Pulssequenz selbst (ersichtlich im Bild 6-10b).



(a) SF_6 und $U_E = -6,9$ kV



(b) Synthetische Luft und $U_E = -4,4$ kV

Bild 6-11: NoDi*-Diagramme einer Spitze auf der Hochspannungselektrode bei Gleichspannung mit negativer Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,1$ MPa bei Einsetzspannung bei (a) SF_6 und (b) synthetischer Luft

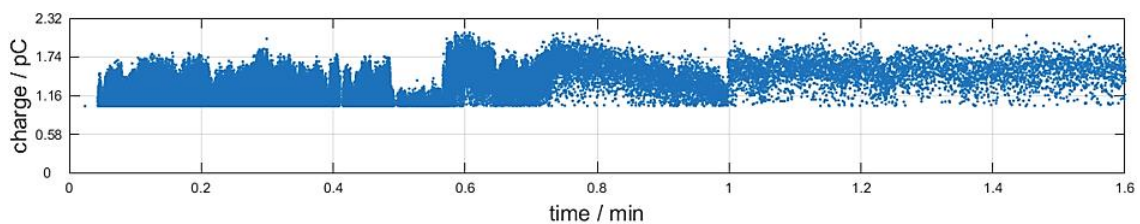
Spitze auf Erdpotential bei Gleichspannung mit positiver Polarität an der Plattenseite und $p = 0,1$ MPa

Für diese Messung wurde die Testzelle mit $p = 0,1$ MPa SF_6 und danach mit $p = 0,1$ MPa synthetischer Luft beaufschlagt. Die Spitze wird auf Erdpotential und die Plattenseite auf Hochspannung gelegt, wobei Gleichspannung mit positiver Polarität verwendet wurde.

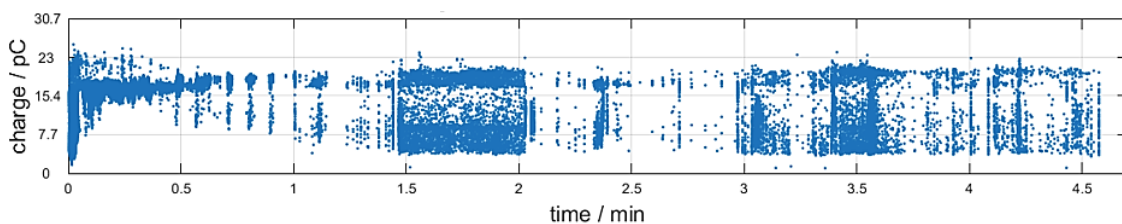
Die Einsetzspannung für SF_6 konnte auf $U_{\text{E, SF}_6} = 7 \text{ kV}$ bestimmt werden. Für die maximale Amplitude der Teilentladungen ergab sich ein Wert von $|q_{\text{max}}| = 4,5 \text{ pC}$. Bei einer Messzeit von 1,6 Minuten wurde eine Ladung im Durchschnitt von $|\bar{q}| = 1,9 \text{ pC}$ ermittelt (Bild 6-12a). Die TE-Impulse treten zu Beginn häufiger und in Wellen auf und werden zum Ende der Messzeit hin weniger. Die Amplituden der Ladungen liegen nahe beieinander.

Die Einsetzspannung von synthetischer Luft betrug $U_{\text{E, O}_2/\text{N}_2} = 4,3 \text{ kV}$. Die maximale Amplitude der TE-Impulse wurde mit $|q_{\text{max}}| = 27,9 \text{ pC}$ ermittelt. Im Durchschnitt ergab sich eine Ladung von $|\bar{q}| = 14,5 \text{ pC}$, bei einer Messzeit von ca. 4,6 Minuten (Bild 6-12b).

Es kommt regelmäßig zum Aussetzen der TE-Impulse, auch Amplituden der auftretenden Ladungen sind breiter gestreut im Gegensatz zum Bild 6-8b, bei der die Spitze auf der Hochspannungselektrode liegt.



(a) SF_6 mit einer Einsetzspannung von $U_{\text{E}} = 7 \text{ kV}$ und einer Messzeit von 1,6 Minuten



(b) Synthetische Luft mit einer Einsetzspannung von $U_{\text{E}} = 4,3 \text{ kV}$ und einer Messzeit von ca. 4,6 Minuten

Bild 6-12: Ladung q in Abhängigkeit der Messzeit t einer Spitze auf Erdpotential bei Gleichspannung mit positiver Polarität an der Plattenseite und einem Gasdruck von $p = 0,1 \text{ MPa}$ bei (a) SF_6 und (b) synthetische Luft.

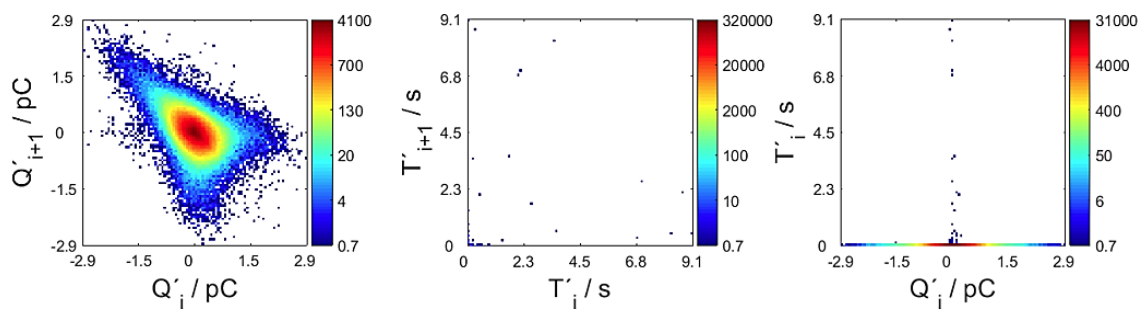
Entladungsmechanismus der Spitze auf Erdpotential bei Gleichspannung mit positiver Polarität

Die Entladungsmechanismen bei dieser Konfiguration sind ähnlich wie bei Gleichspannung mit negativer Polarität an der Nadel. Der Unterschied der Einsetzspannung und dem Entladungsausmaß, liegt an der Differenz der elektrischen Feldstärke. In unmittelbarer Nähe an der Spitze der Nadel ist die elektrische Spannung geringer, als wenn die Nadel auf Hochspannung liegt. Die dadurch entstehende Reduzierung der elektrischen Feldstärke führt somit auch zu einer geringeren Anzahl der Entladungen. Der Entladungsmechanismus ist der Konfiguration bei Gleichspannung mit negativer Polarität an der Nadel gleichzusetzen [30 - 32].

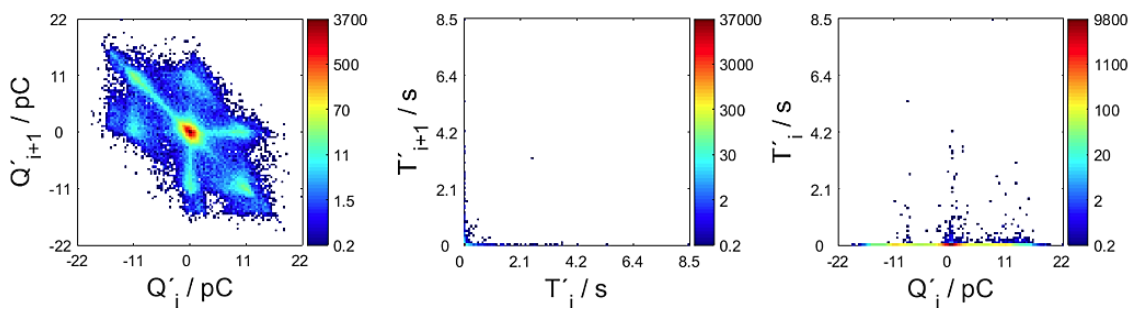
NoDi*-Diagramme einer Spitze auf Erdpotential bei Gleichspannung mit positiver Polarität und $p = 0,1 \text{ MPa}$

Für SF_6 ergibt sich im NoDi*-Q-Diagramm (Bild 6-13a) das typische Muster eines Dreiecks und ist mit dem Bild 6-9a vergleichbar, bei dem an der Spitze Gleichspannung mit positiver Polarität angelegt war. In dieser Konfiguration sind in einer kurzen Messzeit mehr TE-Impulse aufgetreten. Die Häufigkeitspunkte sind ebenfalls breiter um den Ursprung nach außen gestreut.

Bei synthetischer Luft ist im NoDi*-Q-Diagramm eine Überlagerung zu erkennen, aufgrund der zeitlichen Änderung der Pulssequenz (Bild 6-12b). Trotz der Streuung der TE-Impulse lässt sich eine Ähnlichkeit zu der Form eines Dreiecks feststellen. Es ergibt sich ein ausgeprägter Häufigkeitspunkt im NoDi*-T-Diagramm.



(a) SF_6 und $U_E = 7 \text{ kV}$



(b) Synthetische Luft und $U_E = 4,3 \text{ kV}$

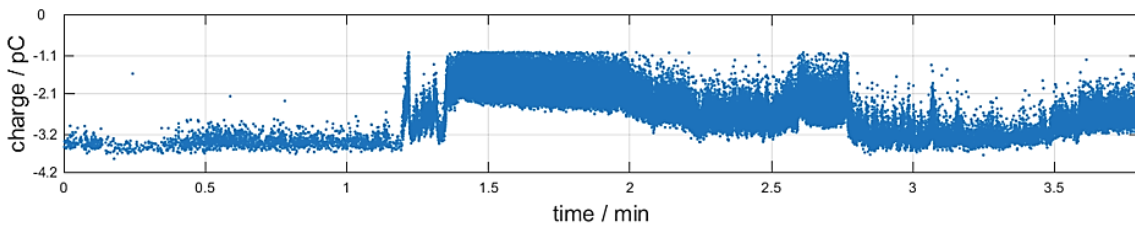
Bild 6-13: NoDi*-Diagramme einer Spitze auf Erdpotential bei Gleichspannung mit positiver Polarität an der Plattenseite und einem Gasdruck von $p = 0,1 \text{ MPa}$ bei Einsatzspannung bei (a) SF_6 und (b) synthetischer Luft

Spitze auf Erdpotential bei Gleichspannung mit negativer Polarität an der Plattenseite und $p = 0,1 \text{ MPa}$

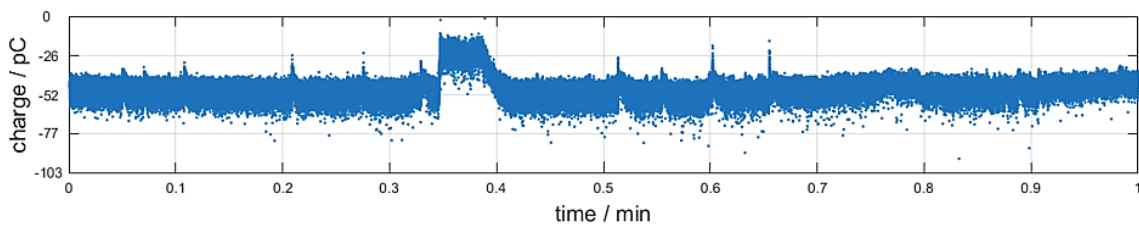
Bei dieser Anordnung wird die Spitze auf Erdpotential gelegt und die Plattenseite auf Hochspannung, wobei Gleichspannung mit negativer Polarität verwendet wird. Für die Messung wurde die Testzelle mit $p = 0,1 \text{ MPa}$ SF_6 und danach mit $p = 0,1 \text{ MPa}$ synthetischer Luft beaufschlagt.

Die Einsetzspannung für SF_6 wurde mit $U_{\text{E, SF}_6} = -7,6 \text{ kV}$ bestimmt. Für die Ladungen ergab sich eine maximale Amplitude von $|q_{\text{max}}| = 3,8 \text{ pC}$. Daraus konnte eine durchschnittliche Ladung von $|\bar{q}| = 2,2 \text{ pC}$ ermittelt werden, bei einer Messzeit von ca. 4 Minuten. Im Bild 6-14a ist der Verlauf der TE-Impulse dargestellt. Zu Beginn sind weniger TE-Impulse mit höherer Amplitude aufgetreten, nach ca. 1 Minute konnten die TE-Impulse wieder wellenförmige detektiert werden (Bild 6-14a).

Für synthetische Luft betrug die Einsetzspannung $U_{\text{E, O}_2/\text{N}_2} = -5,5 \text{ kV}$. Die maximale Amplitude der Ladungen wurde mit $|q_{\text{max}}| = 93,8 \text{ pC}$ bestimmt. Im Durchschnitt ergab sich eine Ladung von $|\bar{q}| = 46,2 \text{ pC}$, bei einer Messzeit von 1 Minute (Bild 6-14b). Die Teilentladungen treten kontinuierlicher auf, die Anzahl der Entladungen ist höher im Vergleich zur positiven Polarität an der Plattenseite, weshalb eine geringere Messzeit ausreichend war.



(a) SF_6 mit einer Einsetzspannung von $U_{\text{E}} = -7,6 \text{ kV}$ und einer Messzeit von ca. 4 Minuten



(b) Synthetische Luft mit einer Einsetzspannung von $U_{\text{E}} = -5,5 \text{ kV}$ und einer Messzeit von 1 Minute

Bild 6-14: Ladung q in Abhängigkeit der Messzeit t einer Spitze auf Erdpotential bei Gleichspannung mit negativer Polarität an der Plattenseite und einem Gasdruck von $p = 0,1 \text{ MPa}$ bei (a) SF_6 und (b) synthetischer Luft.

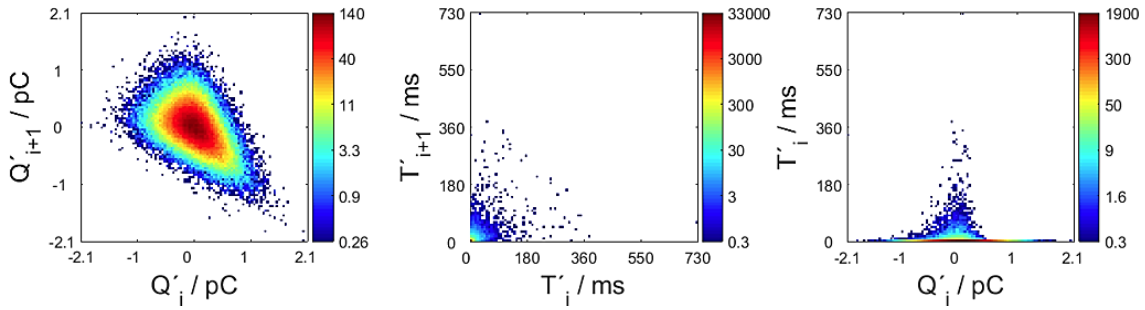
Entladungsmechanismus der Spitze auf Erdpotential bei Gleichspannung mit negativer Polarität

Das Verhalten der Entladungen ist bei dieser Anordnung ähnlich wie bei Gleichspannung mit positiver Polarität an der Nadel. Für diese Anordnung ist die Nadel auf Erdpotential und somit die Anode. Es treten intermittierend Koronaentladungen an der Nadelspitze auf, welche eine positiv geladene Raumladungswolke erzeugen. Es werden freie Elektronen durch Stoßionisation an der Kathode (Platte auf Hochspannung) gebildet. Die freien Elektronen neutralisieren kontinuierlich die positive Raumladungswolke. Wird die Spannung nun weiter erhöht, bilden sich Streamer-Entladungen bis zur Gegenelektrode aus, die einen Durchschlag einleiten können [30 - 32].

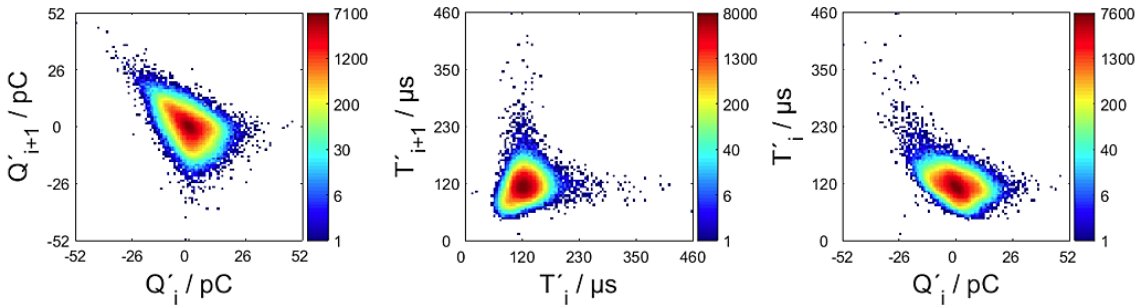
Bei dieser Konfiguration entstehen Streamer-Entladungen bereits bei kleineren Spannungswerten und es kommt zu einer größeren Anzahl an TE-Impulsen. Wird das Auftreten der Koronaentladungen nicht rechtzeitig erkannt, hat dies unweigerlich einen Durchschlag zur Folge [30 - 32].

NoDi*-Diagramme einer Spitze auf Erdpotential bei Gleichspannung mit negativer Polarität und $p = 0,1$ MPa

Das typische Muster eines Dreiecks ist sowohl bei SF₆ (Bild 6-15a) als auch bei synthetischer Luft (Bild 6-15b) eindeutig zu erkennen. Die NoDi*-Q-Diagramme unterscheiden sich in ihrem Muster kaum, allerdings ist im NoDi*-T-Diagramm ein eindeutiger Unterschied erkennbar. Bei synthetischer Luft ist in dem NoDi*-T-Diagramm und NoDi*-QT-Diagramm jeweils ein ausgeprägter Häufungspunkt mit breiter Streuung eingezeichnet.



(a) SF₆ und $U_E = -7,6$ kV



(b) Synthetische Luft und $U_E = -5,5$ kV

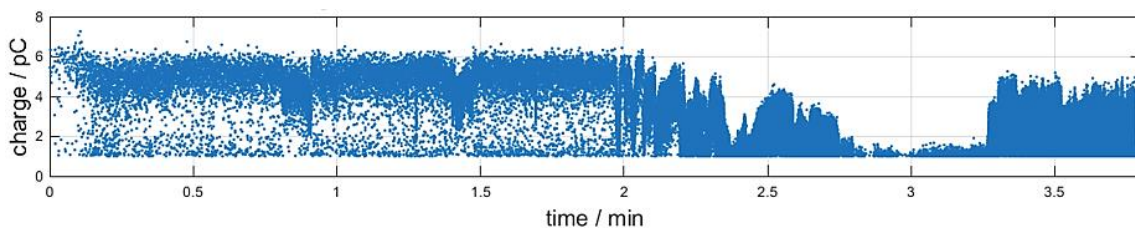
Bild 6-15: NoDi*-Diagramme einer Spitze auf Erdpotential bei Gleichspannung mit negativer Polarität an der Plattenseite und einem Gasdruck von $p = 0,1$ MPa bei Einsetzspannung bei (a) SF₆ und (b) synthetischer Luft

Spitze auf der Hochspannungselektrode bei Gleichspannung mit positiver und negativer Polarität mit 0,3 MPa

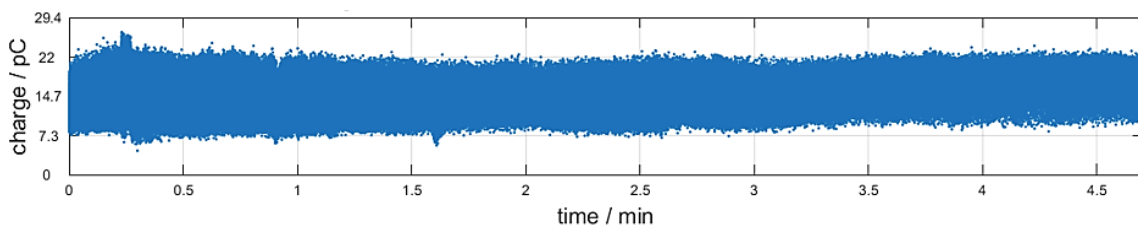
Die Spitze liegt auf Hochspannung bei Gleichspannung mit positiver bzw. negativer Polarität. Die gasisolierte Testzelle wird mit $p = 0,3$ MPa SF₆ und anschließend mit $p = 0,3$ MPa synthetischer Luft beaufschlagt.

Für SF_6 wurde eine Einsetzspannung bei positiver Polarität von $U_{E, \text{SF}_6} = 16,4 \text{ kV}$ bestimmt. Anhand der aufgenommen Teilentladungen betrug die maximale Amplitude der Ladungen $|q_{\max}| = 7,2 \text{ pC}$. Daraus konnte eine durchschnittliche Ladung von $|\bar{q}| = 2,3 \text{ pC}$ bestimmt werden, bei einer Messzeit von ca. 4 Minuten. Der zeitliche Verlauf der TE-Impulse ist im Bild 6-16a dargestellt. Es gibt im Verlauf der Messzeit einen geringen Unterschied in der Amplitudenhöhe der Ladungen. Die Anzahl der TE-Impulse hat im Verlauf der Messzeit zugenommen.

Die Einsetzspannung von synthetischer Luft betrug bei positiver Polarität $U_{E, \text{O}_2/\text{N}_2} = 7,5 \text{ kV}$. Es wurde eine maximale Amplitude der Ladungen von $|q_{\max}| = 26,7 \text{ pC}$ detektiert. Im Durchschnitt ergab sich eine Ladung von $|\bar{q}| = 14,7 \text{ pC}$, bei einer Messzeit von ca. 4,6 Minuten (Bild 6-16b). Im Vergleich zu SF_6 sind mehr TE-Impulse aufgetreten und wurden mit einer höheren Amplitude der Ladungen detektiert. Dies ist aufgrund der geringeren elektrischen Festigkeit von synthetischer Luft zu erklären.



(a) SF_6 mit einer Einsetzspannung von $U_E = 16,4 \text{ kV}$ und einer Messzeit von ca. 4 Minuten



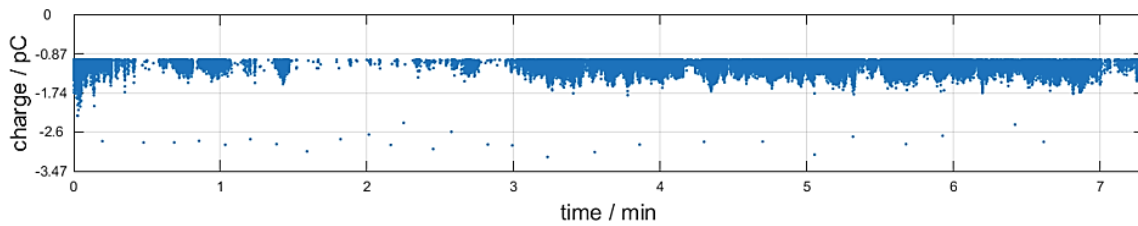
(b) Synthetische Luft mit einer Einsetzspannung von $U_E = 7,5 \text{ kV}$ und einer Messzeit von ca. 4,6 Minuten

Bild 6-16: Ladung q in Abhängigkeit der Messzeit t einer Spitze auf der Hochspannungselektrode bei Gleichspannung mit positiver Polarität an der Nadelspitze und einem Gasdruck von $p = 0,3 \text{ MPa}$ bei (a) SF_6 und (b) synthetischer Luft.

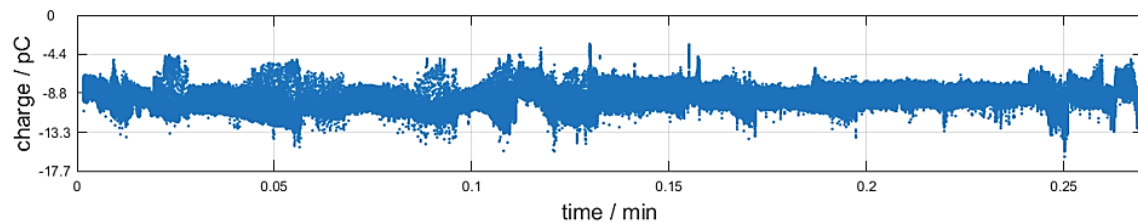
Bei Gleichspannung mit negativer Polarität ergab sich eine Einsetzspannung bei SF_6 von $U_{E, \text{SF}_6} = -15 \text{ kV}$. Über der Messzeit von ca. 7 Minuten trat eine maximale Amplitude der Ladung von $|q_{\max}| = 3,2 \text{ pC}$ auf. Daraus konnte eine durchschnittliche Ladung von $|\bar{q}| = 1,2 \text{ pC}$ bestimmt werden. Im Bild 6-17a ist der zeitliche Verlauf der TE-Impulse abgebildet. Es sind minimal höhere Ladungen aufgetreten, auch kam es kurzzeitig zum Aussetzen der Impulse.

Für synthetische Luft wurde eine Einsetzspannung von $U_{E, \text{O}_2/\text{N}_2} = -7,4 \text{ kV}$ bestimmt. Im Bild 6-17b ist der zeitliche Verlauf der TE-Impulse dargestellt und es ergab sich eine maximale Amplitude der Ladungen von $|q_{\max}| = 16,1 \text{ pC}$. Im Durchschnitt konnte eine Ladung von $|\bar{q}| = 9,5 \text{ pC}$ bestimmt werden, bei einer Messzeit von ca. 20 Sekunden.

Die TE-Impulse sind wellenförmig und kontinuierlich aufgetreten. Im Gegensatz zur synthetischen Luft, bei Gleichspannung mit positiver Polarität (Bild 6-16b), ist der Amplitudenunterschied der Ladungen geringer.



(a) SF₆ mit einer Einsetzspannung von $U_E = -15$ kV und einer Messzeit von ca. 7 Minuten



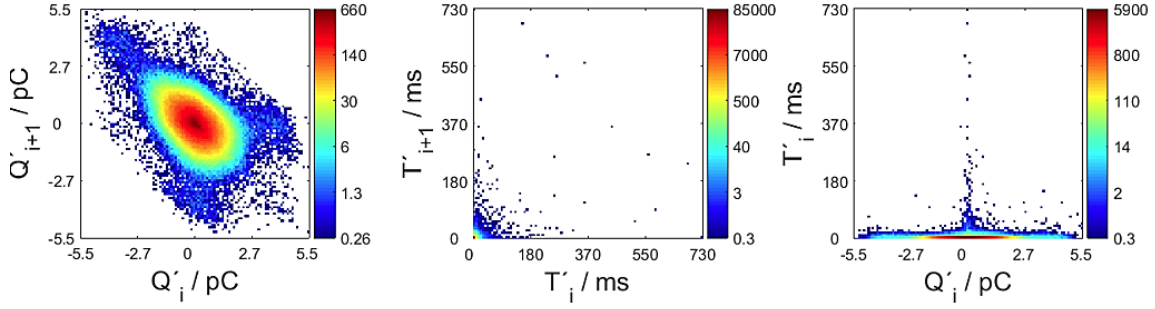
(b) Synthetische Luft mit einer Einsetzspannung von $U_E = -7,4$ kV und einer Messzeit von ca. 20 Sekunden

Bild 6-17: Ladung q in Abhängigkeit der Messzeit t einer Spitze auf der Hochspannungselektrode bei Gleichspannung mit negativer Polarität an der Nadelspitze und einem Gasdruck von $p = 0,3$ MPa bei (a) SF₆ und (b) synthetischer Luft.

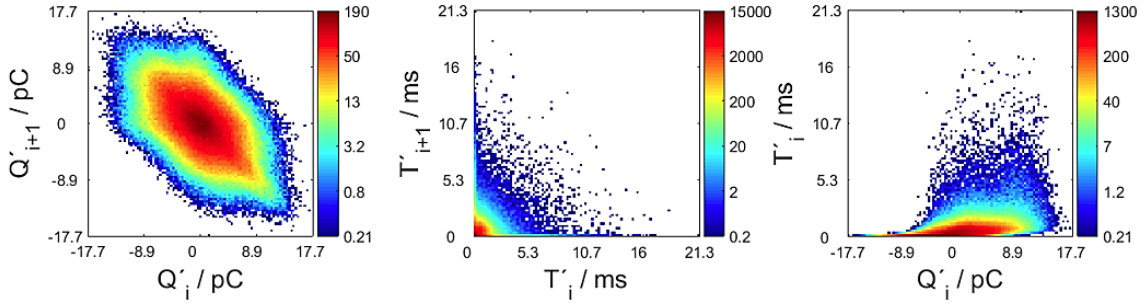
NoDi*-Diagramme einer Spitze auf der Hochspannungselektrode bei Gleichspannung mit positiver Polarität und $p = 0,3$ MPa

Das NoDi*-_Q- und NoDi*-_T-Diagramm bei SF₆ lassen das typische Muster des Dreiecks und die kurzen zeitlichen Abstände der TE-Impulse erkennen (Bild 6-18a). Die Impulsfolge weist eine verteilte Streuung der zeitlichen Abstände (Bild 6-16a) auf, die Amplitudendifferenzen der Ladungen ergeben bei den Häufigkeitspunkten im NoDi*-_Q-Diagramm eine breitere Streuung um den Ursprung.

Für synthetische Luft ergibt sich das Muster eines Sechsecks bzw. einer Ellipse im NoDi*-_Q-Diagramm (Bild 6-18b). Die Häufigkeitspunkte sind breit verteilt, da alle übrigen Bereiche des NoDi*-Diagrammes gefüllt werden, mit Ausnahme der monoton steigenden und fallenden Bereiche der Impulsfolge.



(a) SF₆ und $U_E = 16,4$ kV



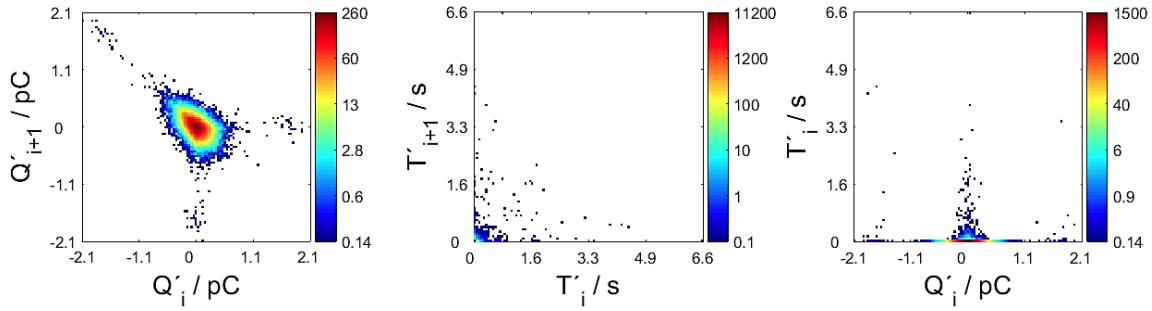
(b) Synthetische Luft und $U_E = 7,5$ kV

Bild 6-18: NoDi*-Diagramme einer Spitze auf der Hochspannungselektrode bei Gleichspannung mit positiver Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,3$ MPa bei Einsatzspannung bei (a) SF₆ und (b) synthetischer Luft.

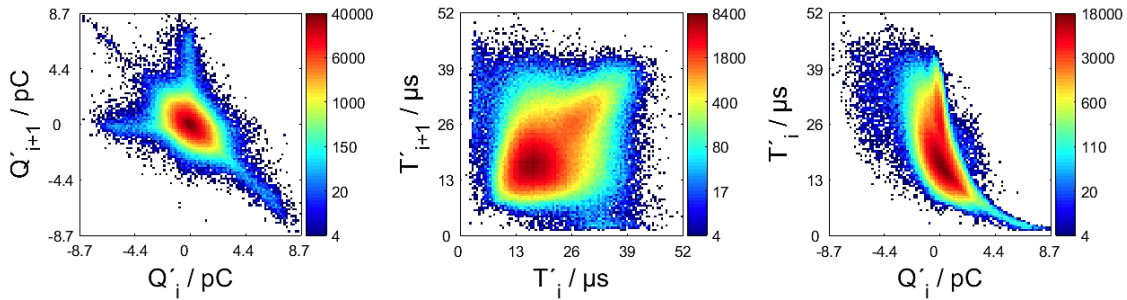
NoDi*-Diagramme einer Spitze auf der Hochspannungselektrode bei Gleichspannung mit negativer Polarität und $p = 0,3$ MPa

Für SF₆ ist das Muster eines Dreiecks (Bild 6-19a) im NoDi*-Q-Diagramm ersichtlich und die Differenz der zeitlichen Änderung der TE-Impulse im NoDi*-T-Diagramm dargestellt.

Das NoDi*-Q-Diagramm bei synthetischer Luft lässt auf das Muster eines Dreiecks schließen (Bild 6-19b). Das NoDi*-T-Diagramm weist auf unterschiedliche zeitliche Abstände der TE-Impulse hin und füllt einen breiten Bereich im NoDi*-T-Diagramm aus.



(a) SF₆ und $U_E = -15$ kV



(b) Synthetische Luft und $U_E = -7,4$ kV

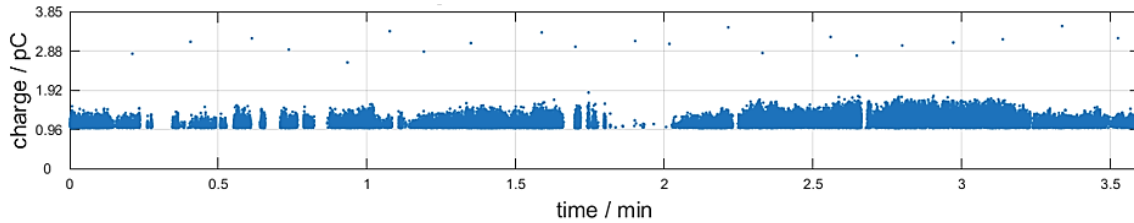
Bild 6-19: NoDi*-Diagramme einer Spitze auf der Hochspannungselektrode bei Gleichspannung mit negativer Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,3$ MPa bei Einsetzspannung, bei (a) SF₆ und (b) synthetischer Luft.

Spitze auf Erdpotential bei Gleichspannung mit positiver und negativer Polarität und $p = 0,3$ MPa

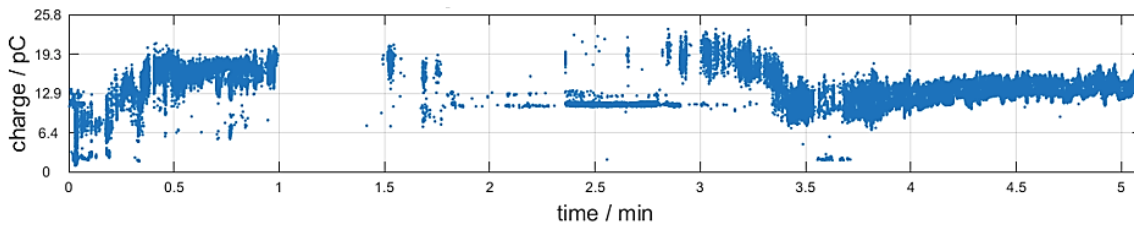
Die gasisierte Testzelle wurde mit $p = 0,3$ MPa SF₆ und danach mit $p = 0,3$ MPa synthetischer Luft gefüllt. Für die Messung liegt nun die Plattenseite auf Hochspannung und die Nadelspitze hat Erdpotential zunächst wurde Gleichspannung mit positiver und anschließend mit negativer Polarität angelegt.

Die Einsetzspannung für SF₆ betrug $U_{E, \text{SF}_6} = 16,7$ kV, dabei ist eine maximale Amplitude der Ladungen von $|q_{\text{max}}| = 3,5$ pC aufgetreten. Über der Messzeit von ca. 3,6 Minuten ergab sich eine durchschnittliche Ladung von $|\bar{q}| = 1,2$ pC. Die aufgenommenen Ladungen sind im Bild 6-20a dargestellt. Neben vereinzelt Ladungen mit höherer Amplitude, ist die Streuung der Ladungspegel gering. Ebenfalls sind kurzzeitige Aussetzer der TE-Impulse festzustellen.

Bei synthetischer Luft wurde eine Einsetzspannung von $U_{E, \text{O}_2/\text{N}_2} = 6,8$ kV bestimmt. Bei einer Messzeit von ca. 5 Minuten konnte eine maximale Amplitude der Ladung von $|q_{\text{max}}| = 23,4$ pC detektiert werden. Im Durchschnitt konnte eine Ladung von $|\bar{q}| = 12,8$ pC ermittelt werden. Im zeitlichen Verlauf der detektierten Ladungen (Bild 6-20b), kam es zum Aussetzen der TE-Impulse über mehrere Sekunden. Die Pulssequenz hat sich im Verlauf der Messzeit verändert.



(a) SF₆ mit einer Einsetzspannung von $U_E = 16,7$ kV und einer Messzeit von ca. 3,6 Minuten

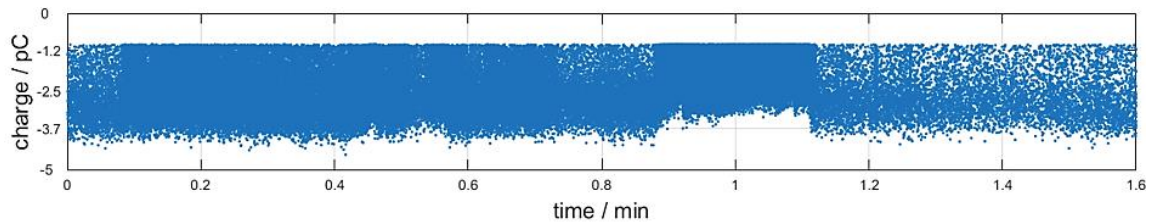


(b) Synthetische Luft mit einer Einsetzspannung von $U_E = 6,8$ kV und einer Messzeit von ca. 5 Minuten

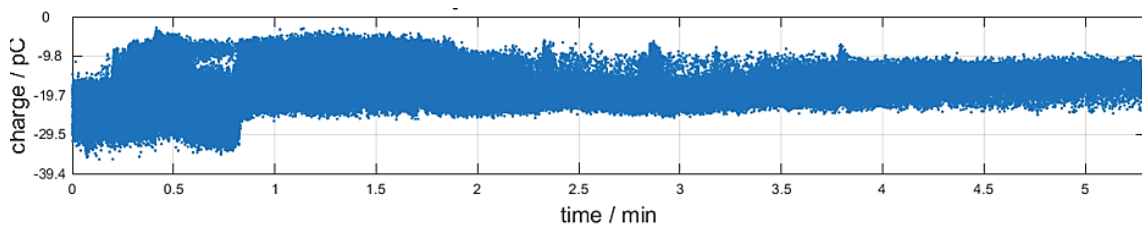
Bild 6-20: Ladung q in Abhängigkeit der Messzeit t einer Spitze auf Erdpotential bei Gleichspannung mit positiver Polarität an der Plattenseite und einem Gasdruck von $p = 0,3$ MPa bei (a) SF₆ und (b) synthetischer Luft.

Bei Gleichspannung mit negativer Polarität betrug bei SF₆ die Einsetzspannung $U_{E, \text{SF}_6} = -15,1$ kV. Dabei ist eine maximale Amplitude der Ladung von $|q_{\text{max}}| = 4,5$ pC aufgetreten. Es ergab sich eine durchschnittliche Ladung von $|\bar{q}| = 2,2$ pC, über der Messzeit von 1,6 Minuten (Bild 6-21a). Die TE-Impulse sind kontinuierlich und relativ gleichmäßig über der Messzeit aufgetreten. Die Streuung der Amplituden der Ladungen ist gering.

Für synthetische Luft konnte eine Einsetzspannung von $U_{E, \text{O}_2/\text{N}_2} = -7,4$ kV bestimmt werden. Die Messzeit betrug ca. 5,2 Minuten und eine maximale Amplitude der Ladung von $|q_{\text{max}}| = 35,8$ pC wurde detektiert. Im Durchschnitt konnte eine Ladung von $|\bar{q}| = 17,8$ pC bestimmt werden (Bild 6-21b). Die Anzahl und die Amplituden der Ladungen ist über den Verlauf der Messzeit gleichmäßig aufgetreten, im Vergleich zum Bild 6-20b bei synthetischer Luft und Gleichspannung mit positiver Polarität.



(a) SF₆ mit einer Einsetzspannung von $U_E = -15,1$ kV und einer Messzeit von 1,6 Minuten



(b) Synthetische Luft mit einer Einsetzspannung von $U_E = -7,4$ kV und einer Messzeit von ca. 5,2 Minuten

Bild 6-21: Ladung q in Abhängigkeit der Messzeit t einer Spitze auf Erdpotential bei Gleichspannung mit negativer Polarität an der Plattenseite und einem Gasdruck von $p = 0,3$ MPa bei (a) SF₆ und (b) synthetischer Luft.

NoDi*-Diagramme einer Spitze auf Erdpotential bei Gleichspannung mit positiver Polarität und $p = 0,3$ MPa

Das NoDi*-Q-Diagramm für SF₆ (Bild 6-22a) ähnelt sehr dem Muster aus dem Bild 6-19a, allerdings um 180 Grad gedreht, aufgrund der umgekehrten Polarität der Gleichspannung.

Für synthetische Luft weist das NoDi*-Q-Diagramm (Bild 6-22b) auf eine Überlagerung hin. Im Bild 6-20b ist zu erkennen, dass sich die Pulssequenz über der Messzeit verändert hat.

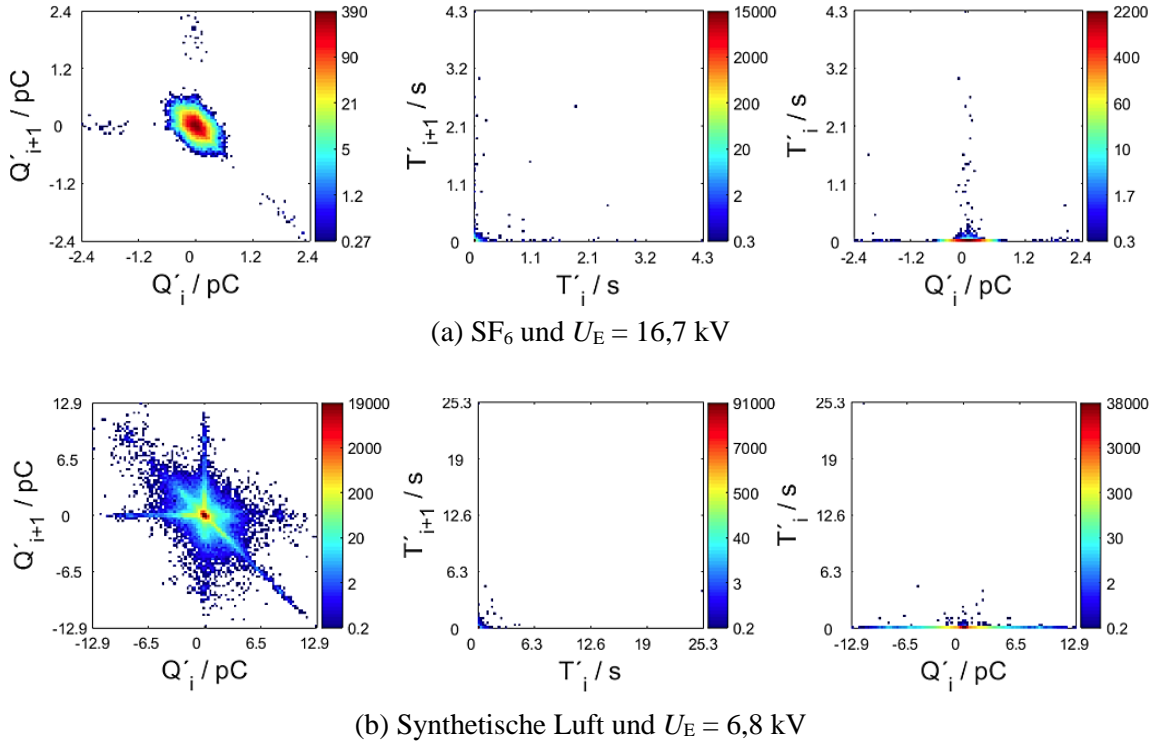


Bild 6-22: NoDi*-Diagramme einer Spitze auf Erdpotential bei Gleichspannung mit positiver Polarität an der Plattenseite und einem Gasdruck von $p = 0,3 \text{ MPa}$ bei Einsatzspannung bei (a) SF_6 und (b) synthetischer Luft.

NoDi*-Diagramme einer Spitze auf Erdpotential für Gleichspannung bei negativer Polarität und $p = 0,3 \text{ MPa}$

Das NoDi*_Q-Diagramm für SF_6 stellt ein Muster eines Sechsecks bzw. einer Ellipse mit breiter Streuung der Häufigkeitspunkte dar (Bild 6-23a). Die Impulssequenz im Bild 6-21a zeigt eine gleichverteilte Streuung der Amplitudendifferenzen und der Differenz der zeitlichen Abstände. Das NoDi*_T-Diagramm weist auf die kurzen zeitlichen Abstände der TE-Impulse hin.

Für synthetische Luft ergibt sich das Muster eines Sechsecks bzw. einer Ellipse im NoDi*_Q-Diagramm (Bild 6-23b). Die Häufigkeitspunkte sind breit verteilt, da alle übrigen Bereiche des NoDi*-Diagrammes gefüllt werden, mit Ausnahme der monoton steigenden und fallenden Bereiche der Impulsfolge. Im NoDi*_T-Diagramm liegt die Differenz der zeitlichen Abstände der TE-Impulse nahe beieinander, wodurch sich ein ausgeprägter Häufigkeitspunkt ausbildet.

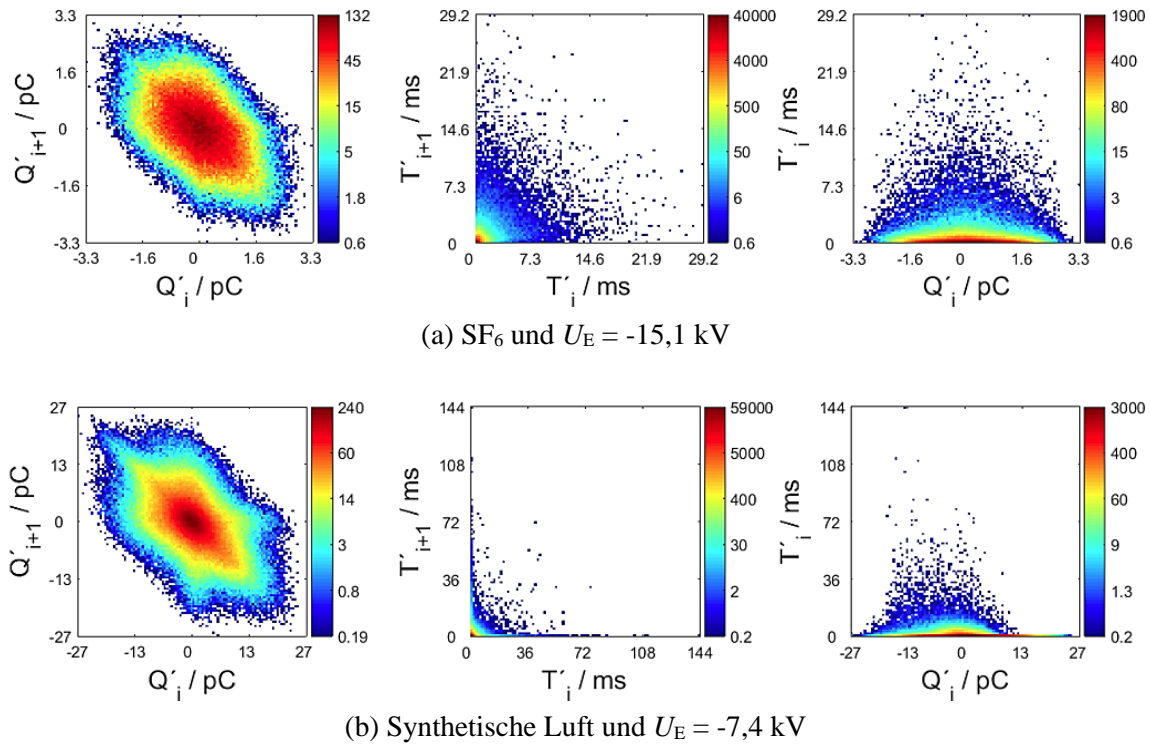


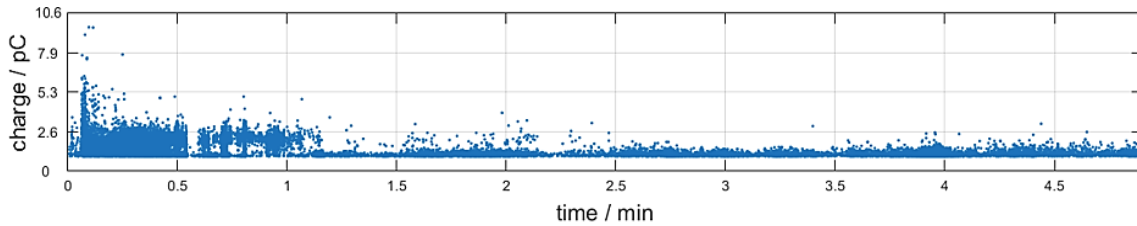
Bild 6-23: NoDi*-Diagramme einer Spitze auf Erdpotential bei Gleichspannung mit negativer Polarität an der Plattenseite und einem Gasdruck von $p = 0,3$ MPa bei Einsatzspannung bei (a) SF₆ und (b) synthetischer Luft.

Spitze auf der Hochspannungselektrode bei Gleichspannung mit positiver und negativer Polarität bei $p = 0,5$ MPa

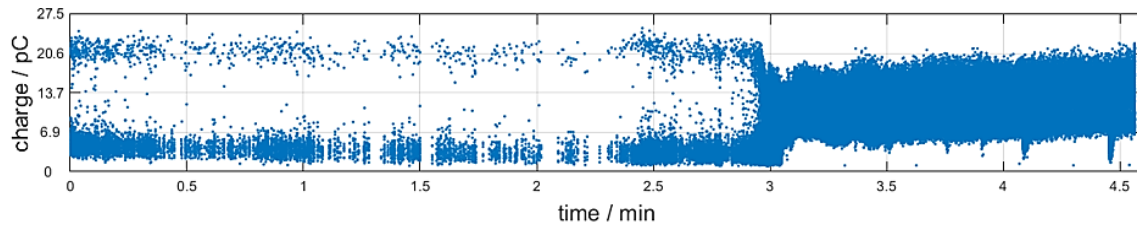
Die Spitze wird auf Hochspannung gelegt, wobei Gleichspannung mit positiver bzw. negativer Polarität angelegt wurde. Die gasisierte Testzelle wird mit $p = 0,5$ MPa SF₆ und danach mit $p = 0,5$ MPa synthetischer Luft befüllt.

Die Einsatzspannung bei SF₆ betrug $U_{E, SF6} = 22,5$ kV, dabei ist eine maximale Amplitude der Ladungen von $|q_{max}| = 9,6$ pC aufgetreten. Über der Messzeit von ca. 5 Minuten ergab sich eine durchschnittliche Ladung von $|\bar{q}| = 1,4$ pC. Die detektierten Ladungen sind im Bild 6-24a dargestellt. Beim Einsetzen der TE-Impulse sind zu Beginn höher Amplituden aufgetreten, im späteren Verlauf der Messung wurden vermehrt Glimmentladungen detektiert.

Für synthetischer Luft konnte eine Einsatzspannung von $U_{E, O2/N2} = 10,1$ kV bestimmt werden. Die maximale Amplitude der Ladungen betrug $|q_{max}| = 25$ pC. Im Durchschnitt sind Ladungen mit $|\bar{q}| = 8,2$ pC aufgetreten, bei einer Messzeit von ca. 4,5 Minuten (Bild 6-24b). Die TE-Impulse sind zu Beginn unregelmäßig mit kurzzeitigen Unterbrechungen aufgetreten. Nach ca. 3 Minuten hat die Anzahl der Entladungen deutlich zugenommen und die Impulse konnten kontinuierlich detektiert werden.



(a) SF₆ mit einer Einsetzspannung von $U_E = 22,5$ kV und einer Messzeit von ca. 5 Minuten

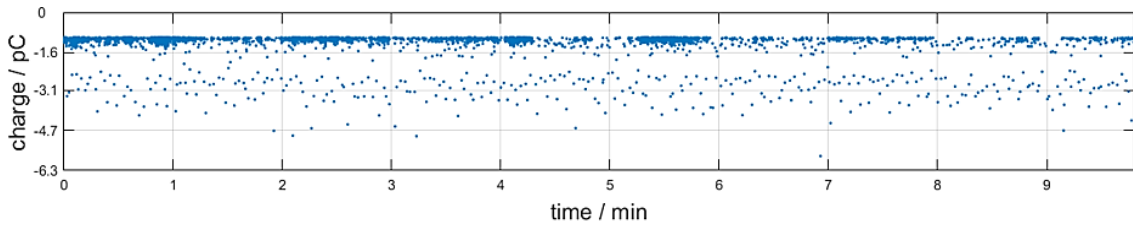


(b) Synthetische Luft mit einer Einsetzspannung von $U_E = 10,1$ kV und einer Messzeit von ca. 4,5 Minuten

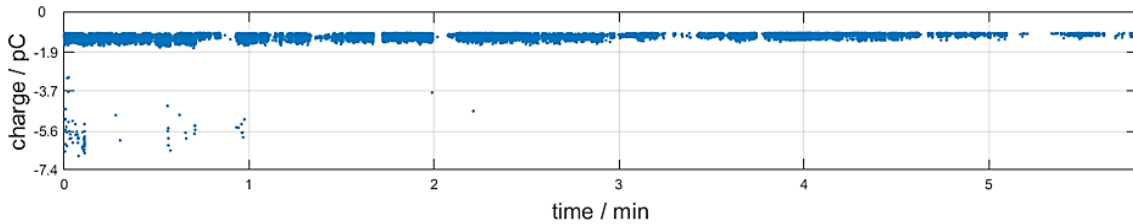
Bild 6-24: Ladung q in Abhängigkeit der Messzeit t einer Spitze auf der Hochspannungselektrode bei Gleichspannung mit positiver Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,5$ MPa bei (a) SF₆ und (b) synthetischer Luft.

Bei Gleichspannung mit negativer Polarität an der Nadelspitze wurde die Einsetzspannung bei SF₆ mit $U_{E, \text{SF}_6} = -24,3$ kV bestimmt. Die maximale Amplitude der Ladung betrug $|q_{\text{max}}| = 5,7$ pC. Bei einer Messzeit von ca. 10 Minuten konnte eine durchschnittliche Ladung $|\bar{q}| = 1,2$ pC ermittelt werden. Der Verlauf der TE-Impulse ist im Bild 6-25a dargestellt. Die meisten Entladungen sind Glimmentladungen mit niedriger Amplitude. Vereinzelt treten auch Ladungen mit höherer Amplitude auf.

Die Einsetzspannung von synthetischer Luft wurde mit $U_{E, \text{O}_2/\text{N}_2} = -8,1$ kV ermittelt. Über eine Messzeit von ca. 6 Minuten ergab sich eine maximale Amplitude der Ladungen von $|q_{\text{max}}| = 6,7$ pC, daraus konnte im Durchschnitt eine Ladung von $|\bar{q}| = 1,1$ pC bestimmt werden (Bild 6-25b). Zu Beginn der Messung konnten TE-Impulse mit höherer Amplitude detektiert werden, im weiteren Verlauf sind vermehrt Glimmentladungen aufgetreten.



(a) SF₆ mit einer Einsetzspannung von $U_E = -24,3$ kV und einer Messzeit von ca. 10 Minuten



(b) Synthetische Luft mit einer Einsetzspannung von $U_E = -8,1$ kV und einer Messzeit von ca. 6 Minuten

Bild 6-25: Ladung q in Abhängigkeit der Messzeit t einer Spitze auf der Hochspannungselektrode bei Gleichspannung mit negativer Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,5$ MPa bei (a) SF₆ und (b) synthetischer Luft.

NoDi*-Diagramme einer Spitze auf der Hochspannungselektrode bei Gleichspannung mit positiver Polarität und $p = 0,5$ MPa

Das NoDi*_Q-Diagramm mit dem Muster eines Dreiecks bei SF₆ ist im Bild 6-26a zu erkennen. Im NoDi*_T-Diagramm ist ein ausgeprägter Häufigkeitspunkt vorhanden, aufgrund der minimalen Differenz der zeitlichen Abstände.

Für synthetische Luft lässt das NoDi*_Q-Diagramm das Muster eines Dreiecks erkennen, obwohl die Häufigkeitspunkte breiter um den Ursprung gestreut sind (Bild 6-26b).

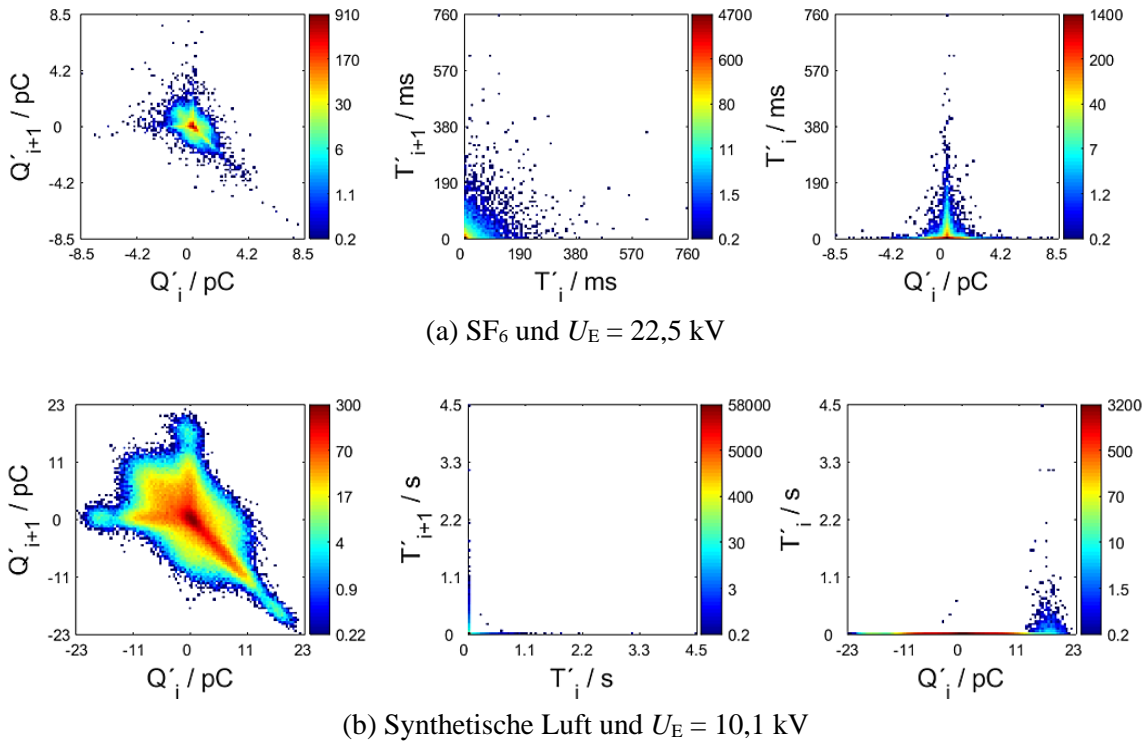


Bild 6-26: NoDi*-Diagramme einer Spitze auf der Hochspannungselektrode bei Gleichspannung mit positiver Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,5 \text{ MPa}$ bei Einsatzspannung bei (a) SF_6 und (b) synthetischer Luft.

NoDi*-Diagramme einer Spitze auf der Hochspannungselektrode bei Gleichspannung mit negativer Polarität und $p = 0,5 \text{ MPa}$

Das NoDi*-Q-Diagramm im Bild 6-27a bei SF_6 zeigt ein schmales Dreieck, welches dem Muster von SF_6 bei positiver Polarität (Bild 6-26a) ähnelnd. Die Häufigkeitspunkte liegen nahe um den Ursprung.

Bei synthetischer Luft ist das NoDi*-Q-Diagramm (Bild 6-27b) im Vergleich zu synthetischer Luft bei positiver Polarität (Bild 6-26b) mit der Aufteilung der Häufigkeitspunkte deutlich verschieden. Bei einem Vergleich der TE-Impulse bei positiver Polarität (Bild 6-24b) und negativer Polarität (Bild 6-25b), ist ein deutlicher Unterschied zu erkennen. Die Pulssequenz hat sich bei positiver Polarität im Verlauf der Messung verändert, während bei negativer Polarität hauptsächlich Glimmentladungen detektiert wurden.

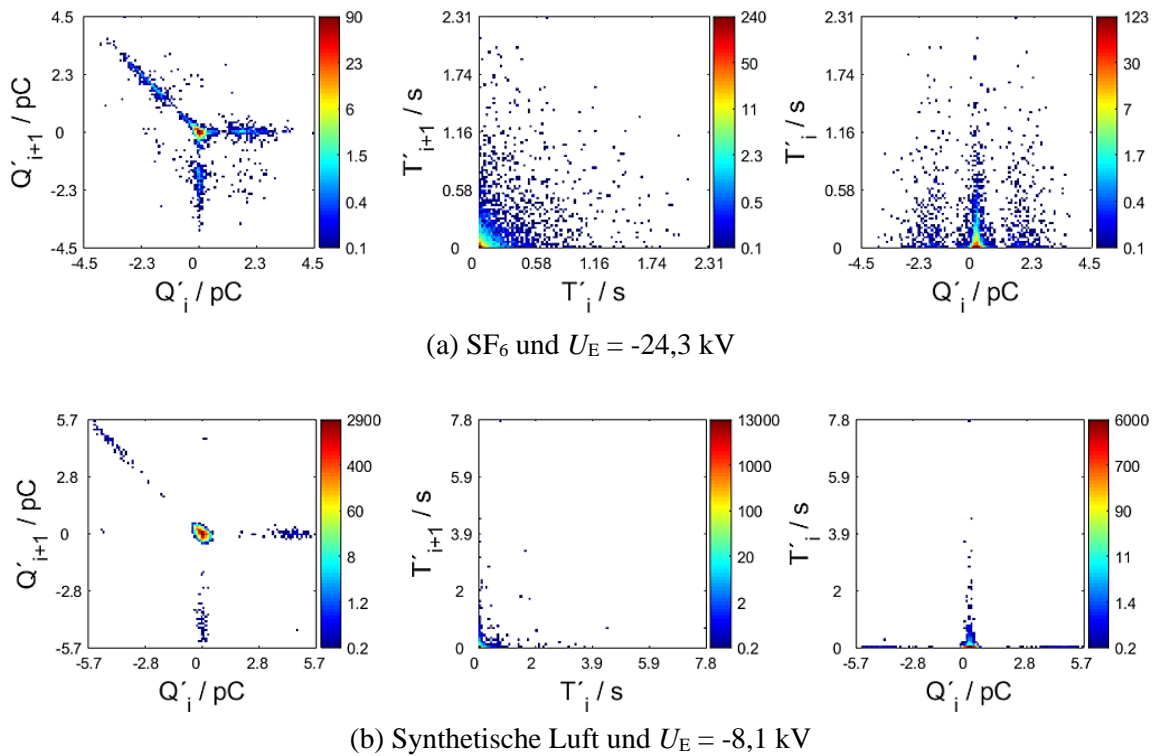


Bild 6-27: NoDi*-Diagramme einer Spitze auf der Hochspannungselektrode bei Gleichspannung mit negativer Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,5$ MPa bei Einsetzspannung bei (a) SF₆ und (b) synthetischer Luft.

Spitze auf Erdpotential bei Gleichspannung mit positiver und negativer Polarität und $p = 0,5$ MPa

Die Spitze liegt auf Erdpotential, an der Plattenseite wird Gleichspannung mit positiver bzw. negativer Polarität angelegt. Die gasisolierte Testzelle wird mit $p = 0,5$ MPa SF₆ und anschließend mit $p = 0,5$ MPa synthetischer Luft beaufschlagt.

Die Aufzeichnung der TE-Impulse und die dazugehörigen NoDi*-Diagramme sind den bisherigen Ausführungen (Spitze auf der Hochspannungselektrode mit Gleichspannung bei positiver bzw. negativer Polarität) sehr ähnlich. Die Werte der Ladungen und Einsetzspannung sind in der Tabelle 6-2 und Tabelle 6-3 zu finden.

Zusammenfassung und Diskussion der Messergebnisse

In den nachfolgenden Tabellen sind die Ergebnisse der „Spitze auf der Hochspannungselektrode“ und „Spitze auf Erdpotential“ bei Gleichspannung mit positiver und negativer Polarität für SF₆ in Tabelle 6-2 und Tabelle 6-3 und für synthetische Luft in Tabelle 6-4 sowie Tabelle 6-5 aufgelistet.

Die Einsetzspannungen sind mit steigendem Gasdruck gestiegen. Die durchschnittlichen Ladungen haben mit Steigerung des Gasdrucks abgenommen, hingegen sind die maximalen Ladungen bei SF₆ geringfügig angestiegen und bei synthetischer deutlich kleiner geworden. Zwischen der Anordnung der Spitze auf der Hochspannungselektrode und Spitze auf Erdpotential sind bei den Amplituden der Ladungen und Einsetzspannungen nur geringfügige Unterschiede bei SF₆ und synthetische Luft aufgetreten.

Tabelle 6-2: Auflistung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen und der Einsetzspannungen der Spitze auf der Hochspannungselektrode für SF₆ bei unterschiedlichem Gasdruck.

Spitze auf der Hochspannungselektrode								
SF ₆	Gleichspannung mit positiver Polarität				Gleichspannung mit negativer Polarität			
Druck	$ q_{\min} $	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	U_E	$ q_{\min} $	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	U_E
MPa	pC	pC	pC	kV	pC	pC	pC	kV
0,1	1,0	3,8	5,8	8,3	1,0	1,3	4,1	-6,9
0,3	1,0	2,3	7,2	16,4	1,0	1,2	3,2	-15
0,5	1,0	1,4	9,6	22,5	1,0	1,2	5,7	-24,3

Tabelle 6-3: Auflistung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen und der Einsetzspannungen der Spitze auf Erdpotential für SF₆ bei unterschiedlichem Gasdruck.

Spitze auf Erdpotential								
SF ₆	Gleichspannung mit positiver Polarität				Gleichspannung mit negativer Polarität			
Druck	$ q_{\min} $	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	U_E	$ q_{\min} $	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	U_E
MPa	pC	pC	pC	kV	pC	pC	pC	kV
0,1	1,0	1,9	4,5	7	1,0	2,2	3,8	-7,6
0,3	1,0	1,2	3,5	16,7	1,0	2,2	4,5	-15,1
0,5	1,0	1,1	5,2	24,4	1,0	1,1	5,8	-20,2

Tabelle 6-4: Auflistung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen und der Einsetzspannungen der Spitze auf der Hochspannungselektrode für synthetischer Luft bei unterschiedlichem Gasdruck.

Spitze auf der Hochspannungselektrode								
O ₂ /N ₂	Gleichspannung mit positiver Polarität				Gleichspannung mit negativer Polarität			
Druck	$ q_{\min} $	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	U_E	$ q_{\min} $	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	U_E
MPa	pC	pC	pC	kV	pC	pC	pC	kV
0,1	1,0	46,3	63,1	6	1,0	15,0	39,9	-4,4
0,3	1,0	14,7	26,7	7,5	3,2	9,5	16,1	-7,4
0,5	1,0	8,2	25,0	10,1	1,0	1,1	6,7	-8,1

Tabelle 6-5: Auflistung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen und der Einsetzspannungen der Spitze auf Erdpotential für synthetischer Luft bei unterschiedlichem Gasdruck.

Spitze auf Erdpotential								
O_2/N_2	Gleichspannung mit positiver Polarität				Gleichspannung mit negativer Polarität			
Druck	$ q_{\min} $	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	U_E	$ q_{\min} $	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	U_E
MPa	pC	pC	pC	kV	pC	pC	pC	kV
0,1	1,0	14,5	27,9	4,3	1,2	46,2	93,8	-5,5
0,3	1,0	12,8	23,4	6,8	2,7	17,8	35,8	-7,4
0,5	1,4	6,8	9,0	8,3	1,0	9,7	19,4	-9,5

Vergleich von SF_6 und synthetischer Luft bei annähernd gleicher elektrischer Festigkeit

Die elektrische Festigkeit von SF_6 ist dreimal höher als bei Luft. Aus diesem Grund wurde ein Vergleich der aufgetretenen Ladungen und der NoDi*-Diagramme bei unterschiedlichem Gasdruck durchgeführt. In der Literatur gibt es Angaben der elektrischen Festigkeit bei quasi-homogener Feldverteilung [11, 29, 33, 34]. Im Bild 6-28a ist der Gasdruck in Abhängigkeit der 50 % Durchschlagsspannung (U_{d50}) mit negativer Blitzstoßspannung und im Bild 6-28b bei Gleichspannung mit positiver Polarität dargestellt. Aus den beiden Diagrammen kann entnommen werden, dass eine annähernd gleiche elektrische Festigkeit von synthetischer Luft bei ca. $p = 0,5$ MPa mit SF_6 bei ca. $p = 0,15$ MPa besteht.

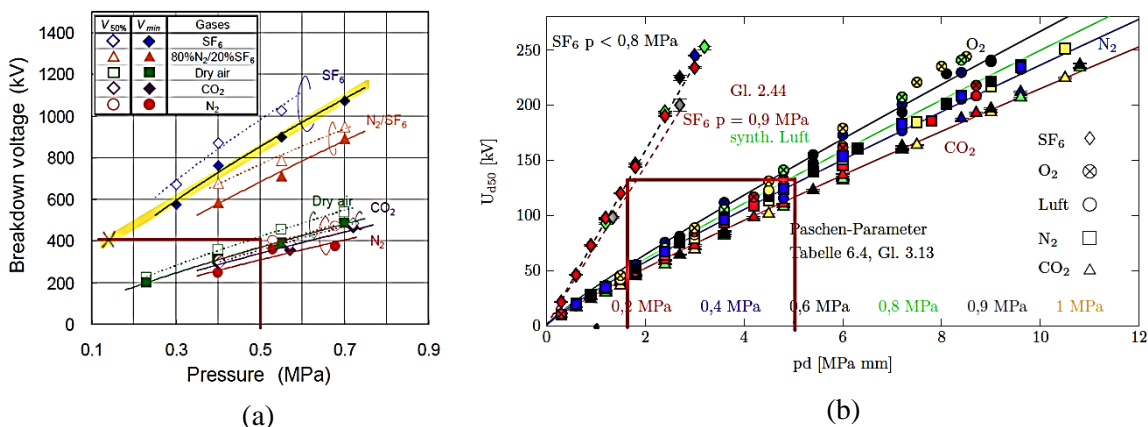


Bild 6-28: Gasdruck in Abhängigkeit der 50 % Durchschlagsspannung (U_{d50}) mit SF_6 , O_2 , Luft, N_2 und CO_2 bei (a) negativer Blitzstoßspannung [33] und (b) Gleichspannung mit positiver Polarität [34].

Es wird ein Vergleich durchgeführt von synthetischer Luft ($p = 0,5$ MPa) und SF_6 ($p = 0,1$ MPa) für eine Beanspruchung bei Gleichspannung mit positiver bzw. negativer Polarität. Die NoDi*-Diagramme ergeben bei Gleichspannung mit positiver Polarität das typische Muster eines Dreiecks (Bild 6-29). Die Pulssequenzen der beiden Isoliergase weisen ebenfalls ähnliche Verläufe auf. Die jeweiligen Einsetzspannungen und die durchschnittlichen Ladungen in der jeweiligen Messzeit liegen ebenfalls nahe beieinander.

Einen Unterschied weisen die maximal aufgetretenen Ladungen bei synthetischer Luft auf, da diese deutlich höher sind, trotz erhöhtem Gasdruck. Eine genaue Übersicht der Ladungen bei den jeweiligen Anordnungen und unterschiedlichen Polaritäten ist in der Tabelle 6-6 und Tabelle 6-7 dargestellt.

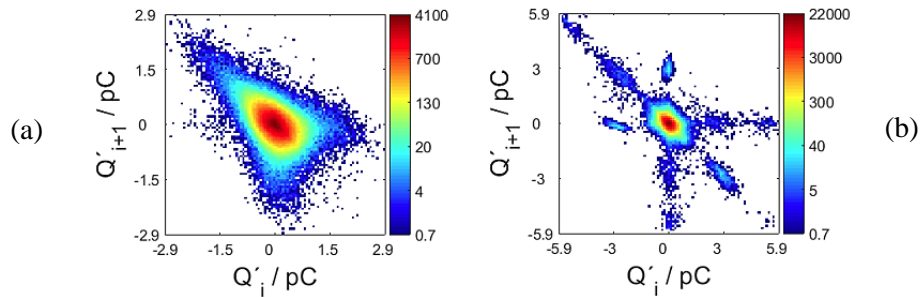


Bild 6-29: Vergleich der NoDi*Q-Diagramme einer Spitze-Platte-Anordnung bei Gleichspannung mit positiver Polarität bei (a) SF₆ mit $p = 0,1$ MPa und $U_E = 7$ kV und bei (b) synthetischer Luft mit $p = 0,5$ MPa und $U_E = 8,3$ kV.

Tabelle 6-6: Gegenüberstellung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen der Spitze auf der Hochspannungselektrode und Einsetzspannung bei $p = 0,5$ MPa synthetischer Luft und $p = 0,1$ MPa SF₆.

Spitze auf der Hochspannungselektrode								
Gas	Gleichspannung mit positiver Polarität				Gleichspannung mit negativer Polarität			
	$ q_{\min} $	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	U_E	$ q_{\min} $	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	U_E
	pC	pC	pC	kV	pC	pC	pC	kV
SF ₆ mit 0,1 MPa	1,0	3,8	5,8	8,3	1,0	1,3	4,1	-6,9
O ₂ /N ₂ mit 0,5 MPa	1,0	8,2	25,0	10,1	1,0	1,1	6,7	-8,1

Tabelle 6-7: Gegenüberstellung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen der Spitze auf Erdpotential und Einsetzspannung bei $p = 0,5$ MPa synthetischer Luft und $p = 0,1$ MPa SF₆.

Spitze auf Erdpotential								
Gas	Gleichspannung mit positiver Polarität				Gleichspannung mit negativer Polarität			
	$ q_{\min} $	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	U_E	$ q_{\min} $	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	U_E
	pC	pC	pC	kV	pC	pC	pC	kV
SF ₆ mit 0,1 MPa	1,0	1,9	4,5	7	1,0	2,2	3,8	-7,6
O ₂ /N ₂ mit 0,5 MPa	1,4	6,8	9,0	8,3	1,0	9,7	19,4	-9,5

6.4.2 Freies Potential

Allgemeines

Für das freie Potential wurde die Anordnung, wie im Bild 6-4 dargestellt, verwendet. Die isolierte Elektrode befindet sich zwischen einem Stab auf Erdpotential und einer Platte auf Hochspannung. Mit Hilfe einer M6-Schraube wird die isolierte Elektrode simuliert, wobei die Schraube eine Spitze und eine abgeflachte Seite besitzt. Über eine zylinderförmige Aufhängung aus Polyethylen ist die spitze Seite der isolierten Elektrode mit dem Stab auf Erdpotential befestigt.

Zu Beginn wurde versucht die Hochspannung auf der Stabseite (Bild 6-4) anzulegen, jedoch konnte der typische Defekt mit dieser Anordnung nicht nachgebildet werden. Es wurden zahlreiche Variationen des Abstandes der inhomogenen Seite (Stab und der über der zylinderförmigen Aufhängung aus Polyethylen verbundenen spitzen Seite der M6-Schraube) und homogenen Seite (Platte der Testzelle und die flache Seite der M6-Schraube) ausprobiert. Abhilfe für das Problem war, die Testzelle umzudrehen und an der Platte der Testzelle Hochspannung anzulegen (Bild 6-30a). Mit dieser Veränderung konnten die typischen Pulssequenzen für das freie Potential nachgebildet werden.

Charakteristisch für diesen Defekt sind viele kleine TE-Impulse mit Amplituden im fC-Bereich mit zeitweisen hohen TE-Impulsen mit Amplituden bis in den nC-Bereich. Ein Beispiel für so eine Impulsfolge ist im Bild 6-30b dargestellt. Für die Messung des freien Potentials wurde ein TE-Triggerschwelle von $q = 0,5 \text{ pC}$ in der Omicron-Software eingestellt. Da zwischen den NoDi*-Diagrammen und den Pulssequenzen bei Gleichspannung mit positiver und negativer Polarität eine große Ähnlichkeit besteht, werden die Diagramme nur für die positive Polarität dargestellt.

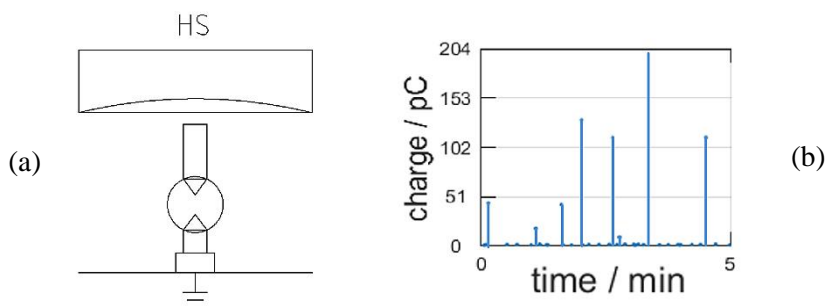


Bild 6-30: (a) Elektrodenanordnung in der Testzelle für die Nachbildung des freien Potentials und (b) eine typische Pulssequenz dieses Defektes.

Freies Potential bei Gleichspannung mit positiver und negativer Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,1 \text{ MPa}$

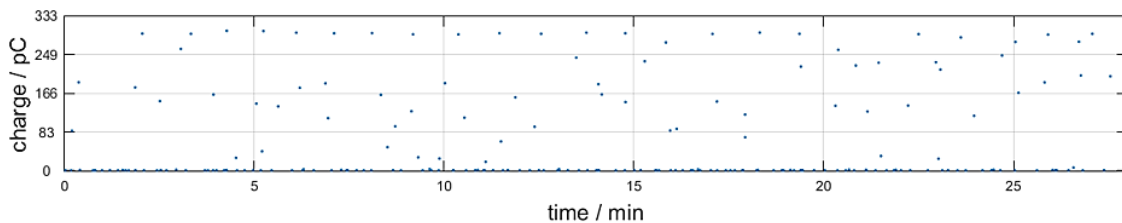
Für das freie Potential wird auf der Plattenseite Gleichspannung mit positiver bzw. negativer Polarität angelegt. Die Testzelle wird mit $p = 0,1 \text{ MPa}$ SF_6 und anschließend mit $p = 0,1 \text{ MPa}$ synthetischer Luft befüllt.

Die Einsetzspannung von SF_6 konnte bei Gleichspannung mit positiver Polarität mit $U_{\text{E, SF}_6} = 30 \text{ kV}$ bestimmt werden. Die maximale Amplitude der Ladung betrug $|q_{\text{max}}| = 300,7 \text{ pC}$. Bei einer Messzeit von ca. 30 Minuten konnte eine durchschnittliche Ladung von $|\bar{q}| = 67,3 \text{ pC}$ bestimmt werden (Bild 6-31a). Für negative Polarität betrug die Einsetzspannung $U_{\text{E, SF}_6} = -30 \text{ kV}$.

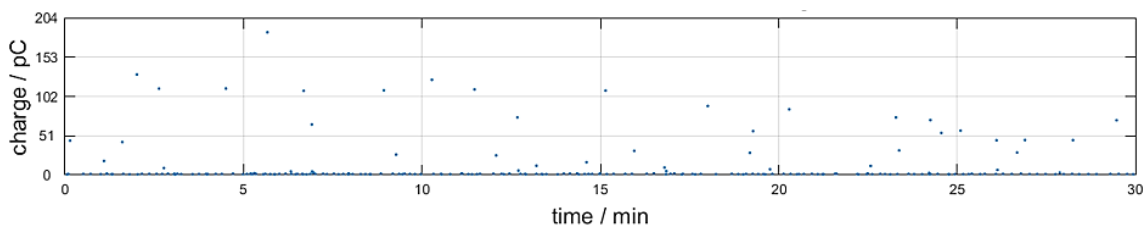
Bei einer Messzeit von ca. 30 Minuten ist eine maximale Amplitude der Ladungen mit $|q_{\max}| = 294,7 \text{ pC}$ aufgetreten. Im Durchschnitt ergab sich somit eine Ladung von $|\bar{q}| = 7,5 \text{ pC}$.

Für synthetische Luft bei Gleichspannung mit positiver Polarität wurde eine Einsetzspannung von $U_{E, O_2/N_2} = 20 \text{ kV}$ ermittelt. Dabei ist eine maximale Amplitude der Ladungen von $|q_{\max}| = 185,5 \text{ pC}$ aufgetreten, bei einer Messzeit von 30 Minuten. Die durchschnittliche Ladung betrug $|\bar{q}| = 11,3 \text{ pC}$ (Bild 6-31b). Bei Gleichspannung mit negativer Polarität konnte eine Einsetzspannung von $U_{E, O_2/N_2} = -20 \text{ kV}$ bestimmt werden, allerdings ist nach kurzer Zeit ein Durchschlag aufgetreten.

Beide Pulssequenzen weisen das typische Muster eines freien Potentials auf, wobei zwischen SF_6 und synthetischer Luft die Einsetzspannungen unterschiedlich sind, wegen der höheren elektrischen Festigkeit von SF_6 . Aufgrund der höheren Einsetzspannung bei SF_6 ergeben sich höhere Amplituden, sowie eine höhere Anzahl der TE-Impulse.



(a) SF_6 mit einer Einsetzspannung von $U_E = 30 \text{ kV}$ und einer Messzeit von ca. 30 Minuten



(b) Synthetische Luft mit einer Einsetzspannung von $U_E = 20 \text{ kV}$ und einer Messzeit von 30 Minuten

Bild 6-31: Ladung q in Abhängigkeit der Messzeit t eines freien Potentials bei Gleichspannung mit positiver Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,1 \text{ MPa}$ bei (a) SF_6 und (b) synthetischer Luft.

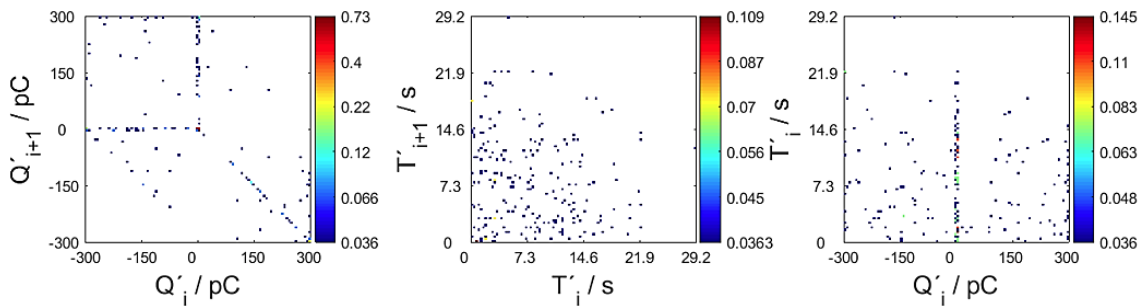
Entladungsmechanismus beim freien Potential

Die Teilentladungen eines freien Potentials hängen von der Polarität der Gleichspannung, sowie der Geometrie der isolierten Elektrode ab. Wird ein ungeladenes freies Potential in einem elektrischen Feld platziert, wird die isolierte Elektrode mit einem einzigen TE-Impuls geladen. Dieser TE-Impuls überbrückt die kleine Gasstrecke zwischen Hochspannung und dem freien Potential (flache Seite der Schraube und der Plattenseite auf Hochspannung, siehe Bild 6-30a). Ist das freie Potential geladen, gibt es keine sofortige Entladung. Grund dafür ist, dass das freie Potential mit der gleichen Polarität geladen ist, die auch an der Hochspannungsseite anliegt. Die elektrische Feldstärke in der kleinen Gasstrecke zwischen der Hochspannungselektrode und dem freien Potential, ist ebenfalls reduziert [35].

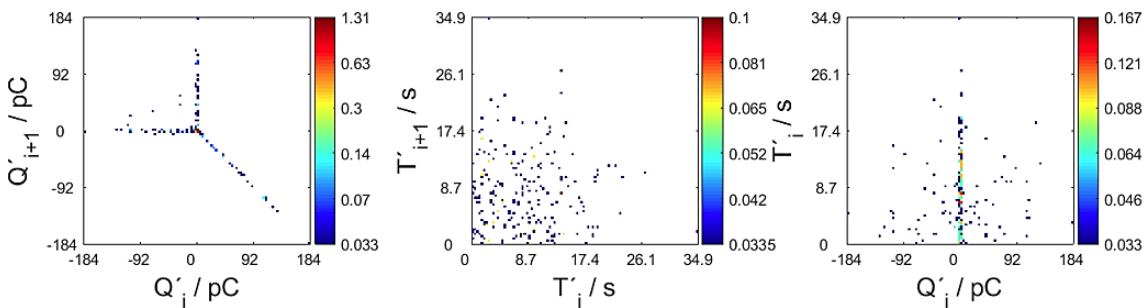
Über die große Gasstrecke treten Teilentladungen im fC-Bereich auf (spitze Seite der Schraube und Erdpotential), wodurch sich das freie Potential immer weiter entlädt. Durch die ständige Entladung der isolierten Elektrode nimmt die elektrische Feldstärke in der oberen Gasstrecke immer weiter zu. Mit einer Verzögerung zwischen 1 – 2 Minuten wird das freie Potential wieder mit einem einzigen Teilentladungsimpuls (TE-Impuls im nC-Bereich) erneut geladen [35].

NoDi*-Diagramme eines freien Potentials bei Gleichspannung mit positiver Polarität und $p = 0,1 \text{ MPa}$

Die NoDi*-Diagramme von SF_6 (Bild 6-32a) und synthetischer Luft (Bild 6-32b) bei Gleichspannung mit positiver Polarität zeigen feine Strukturen bzw. Linien, welche durch einen gleichmäßigen Wechsel des Amplitudenunterschiedes zwischen den Impulsen hervorgerufen wird. Die Amplituden bilden eine breite Streuung, wodurch ein begrenzter Häufigkeitspunkt im Ursprung der Diagramme entsteht.



(a) SF_6 und $U_E = 30 \text{ kV}$



(b) Synthetische Luft und $U_E = 20 \text{ kV}$

Bild 6-32: NoDi*-Diagramme eines freien Potentials mit der Plattenseite auf Hochspannung bei Gleichspannung mit positiver Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,1 \text{ MPa}$ bei Einsatzspannung bei (a) SF_6 und (b) synthetischer Luft.

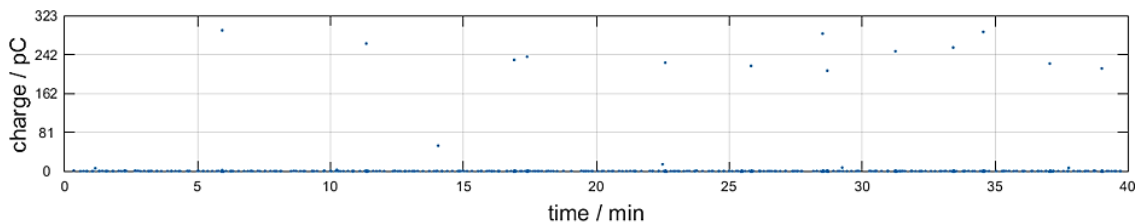
Freies Potential bei Gleichspannung mit positiver und negativer Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,5 \text{ MPa}$

Für das freie Potential wird auf der Plattenseite Gleichspannung mit positiver bzw. negativer Polarität angelegt. Die Testzelle wird mit $p = 0,5 \text{ MPa}$ SF_6 und anschließend mit $p = 0,5 \text{ MPa}$ synthetischer Luft beaufschlagt.

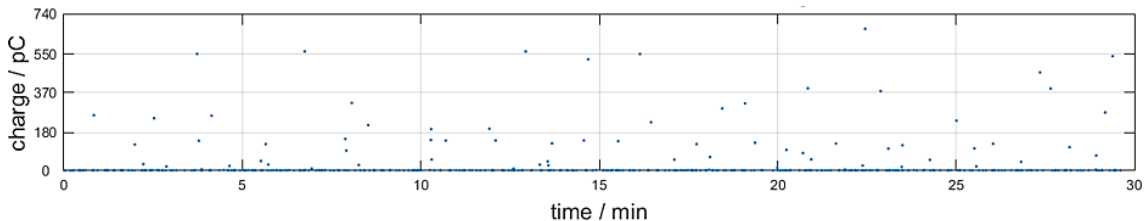
Die Einsetzspannung von SF_6 betrug bei Gleichspannung mit positiver Polarität $U_{E, \text{SF}_6} = 30 \text{ kV}$. Bei einer Messzeit von 40 Minuten ist eine maximale Amplitude der Ladung von $|q_{\max}| = 292,9 \text{ pC}$ aufgetreten. Im Durchschnitt wurde eine Ladung von $|\bar{q}| = 4,1 \text{ pC}$ ermittelt (Bild 6-33a). Bei negativer Polarität konnte eine Einsetzspannung von $U_{E, \text{SF}_6} = -30 \text{ kV}$ ermittelt werden. Eine maximale Amplitude der Ladungen wurde ermittelt mit $|q_{\max}| = 588,2 \text{ pC}$. Über der Messzeit von 30 Minuten ergab sich eine durchschnittliche Ladung von $|\bar{q}| = 33,2 \text{ pC}$.

Für synthetische Luft bei Gleichspannung mit positiver Polarität wurde eine Einsetzspannung von $U_{E, \text{O}_2/\text{N}_2} = 30 \text{ kV}$ bestimmt. Bei einer Messzeit von 30 Minuten ist eine maximale Amplitude der Ladungen von $|q_{\max}| = 670,4 \text{ pC}$ aufgetreten. Im Verlauf der Messung konnte eine durchschnittliche Ladung $|\bar{q}| = 29,2 \text{ pC}$ ermittelt werden (Bild 6-33b). Bei Gleichspannung mit negativer Polarität betrug die Einsetzspannung $U_{E, \text{O}_2/\text{N}_2} = -28 \text{ kV}$ und die maximale Amplitude der Ladung betrug $|q_{\max}| = 522,1 \text{ pC}$. Bei einer Messzeit von 30 Minuten konnte eine durchschnittliche Ladung von $|\bar{q}| = 24,7 \text{ pC}$ bestimmt werden.

Die Impulsfolgen von SF_6 (Bild 6-33a) und synthetischer Luft (Bild 6-33b) unterscheiden sich nur in der Anzahl und der Amplituden der auftretenden TE-Impulse.



(a) SF_6 mit einer Einsetzspannung von $U_E = 30 \text{ kV}$ und einer Messzeit von 40 Minuten

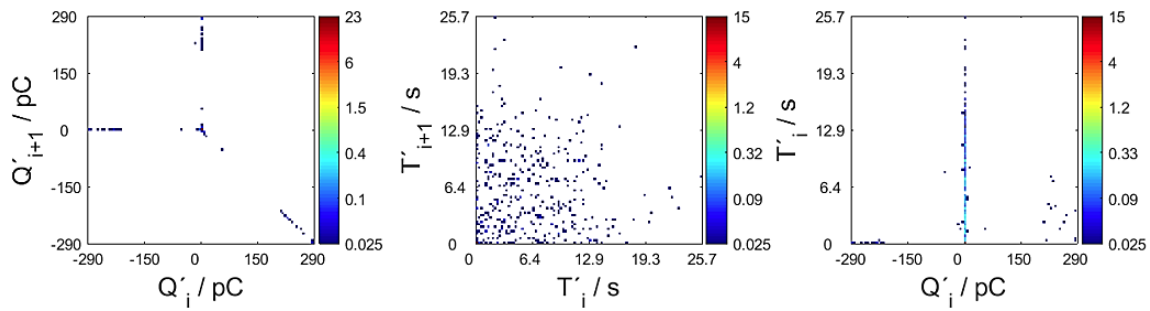


(b) Synthetische Luft mit einer Einsetzspannung von $U_E = 30 \text{ kV}$ und einer Messzeit von 30 Minuten

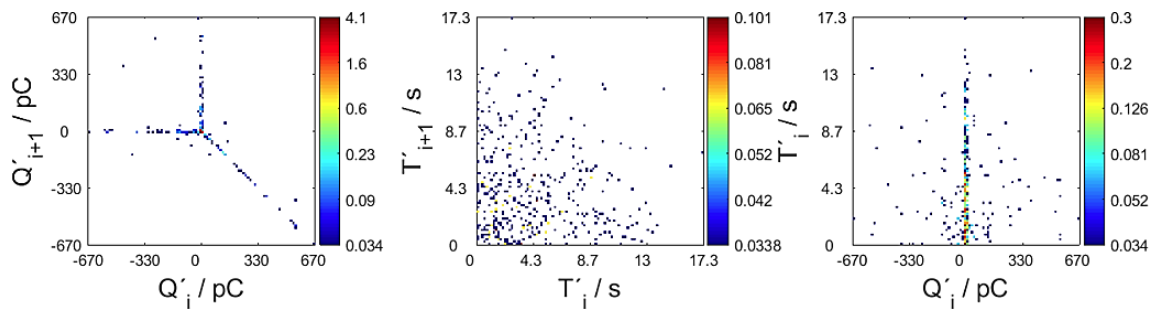
Bild 6-33: Ladung q in Abhängigkeit der Messzeit t eines freien Potentials bei Gleichspannung mit positiver Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,5 \text{ MPa}$ bei (a) SF_6 und (b) synthetischer Luft.

NoDi*-Diagramme eines freien Potentials bei Gleichspannung mit positiver Polarität und $p = 0,5 \text{ MPa}$

Das NoDi*- Q -Diagramm von SF_6 (Bild 6-34a) bei Gleichspannung mit positiver Polarität zeigt feine Strukturen bzw. Linien, ebenso das NoDi*- Q -Diagramme von synthetischer Luft (Bild 6-34b). Durch den gleichmäßigen Wechsel des Amplitudenunterschiedes zwischen den Impulsen (Bild 6-33) ergibt sich dieses Muster.



(a) SF₆ und $U_E = 30$ kV



(b) Synthetische Luft und $U_E = 30$ kV

Bild 6-34: NoDi*-Diagramme eines freien Potentials mit der Plattenseite auf Hochspannung bei Gleichspannung mit positiver Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,5$ MPa bei Einsatzspannung bei (a) SF₆ und (b) synthetischer Luft.

Zusammenfassung und Diskussion der Messergebnisse

Beim freien Potential ergaben sich annähernd gleiche Einsatzspannung auch bei unterschiedlichem Gasdruck. Die NoDi*-Diagramme weisen bei unterschiedlichem Gasdruck und Polarität deutliche Ähnlichkeiten auf. Eine Übersicht der Ladungen und Einsatzspannungen sind in der Tabelle 6-8 und aufgelistet.

Tabelle 6-8: Auflistung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen und der Einsatzspannungen des freien Potentials für SF₆ bei unterschiedlichem Gasdruck.

Freies Potential								
SF ₆	Gleichspannung mit positiver Polarität				Gleichspannung mit negativer Polarität			
Druck	$ q_{\min} $	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	U_E	$ q_{\min} $	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	U_E
MPa	pC	pC	pC	kV	pC	pC	pC	kV
0,1	0,5	67,3	300,7	30	0,5	7,5	294,7	-30
0,3	0,5	26,8	704,6	31	0,5	10,9	303,6	-32
0,5	0,5	4,0	292,9	30	0,7	33,2	588,2	-30

Tabelle 6-9: Auflistung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen und der Einsetzspannungen des freien Potentials für synthetische Luft bei unterschiedlichem Gasdruck.

Freies Potential								
O_2/N_2	Gleichspannung mit positiver Polarität				Gleichspannung mit negativer Polarität			
Druck	$ q_{\min} $	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	U_E	$ q_{\min} $	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	U_E
MPa	pC	pC	pC	kV	pC	pC	pC	kV
0,1	0,5	11,3	185,5	20	0,5	188,8	796,8	-20
0,3	0,5	34,5	555,9	28	0,5	19,6	599,5	-28
0,5	0,5	29,2	670,4	30	0,5	24,7	522,1	-28

Vergleich von $p = 0,1$ MPa SF_6 und $p = 0,5$ MPa synthetischer Luft bei annähernd gleicher elektrischer Festigkeit

Beim Vergleich der aufgetretenen Ladungen im Verlauf der Messzeit von $p = 0,1$ MPa SF_6 im Bild 6-31a und von $p = 0,5$ MPa synthetischer Luft im Bild 6-34b unterscheiden sich die beiden Pulssequenzen kaum voneinander. Die Einsetzspannung ist bei Gleichspannung mit positiver und negativer Polarität ebenfalls fast identisch. Allerdings sind die Ladungen, die das freie Potential über die obere Gasstrecke aufladen, deutlich höher bei synthetischer Luft (Tabelle 6-10). Die NoDi*Q-Diagramme von SF_6 (Bild 6-32a) und synthetischer Luft (Bild 6-34b) unterschieden sich beim Muster ebenfalls kaum voneinander.

Tabelle 6-10: Gegenüberstellung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen des freien Potentials und der Einsetzspannung bei $p = 0,5$ MPa synthetischer Luft und $p = 0,1$ MPa SF_6 .

Freies Potential								
	Gleichspannung mit positiver Polarität				Gleichspannung mit negativer Polarität			
Gas	$ q_{\min} $	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	U_E	$ q_{\min} $	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	U_E
	pC	pC	pC	kV	pC	pC	pC	kV
SF_6 mit 0,1 MPa	0,5	67,3	300,7	30	0,5	7,5	294,7	-30
O_2/N_2 mit 0,5 MPa	0,5	29,2	670,4	30	0,5	24,7	522,1	-28

6.4.3 Gleitentladungen

Allgemeines

Für die Messung von Gleitentladungen wurde die Anordnung, wie im Bild 6-6 abgebildet, verwendet. Zur Nachbildung des Defektes wurden zwei verschiedene Oberflächen untersucht, eine Gießharz- und eine Hartpapierplatte. Die Platten wurden zwischen der Hochspannungselektrode auf der Oberseite und der Erdelektrode auf der Unterseite eingeklemmt. Der Prüfkessel wurde mit dem Isoliergas SF_6 und im Anschluss mit dem Alternativgas synthetische Luft befüllt. Dabei wurde der Prüfkessel mit einem Gasdruck von $p = 0,1 \text{ MPa}$, $p = 0,3 \text{ MPa}$ und $p = 0,5 \text{ MPa}$ beaufschlagt. An der Hochspannungselektrode wurde Gleichspannung mit positiver bzw. negativer Polarität angelegt. Da zwischen den NoDi*-Diagrammen und den Pulssequenzen bei Gleichspannung mit positiver und negativer Polarität eine große Ähnlichkeit besteht, werden die Diagramme nur für die positive Polarität dargestellt.

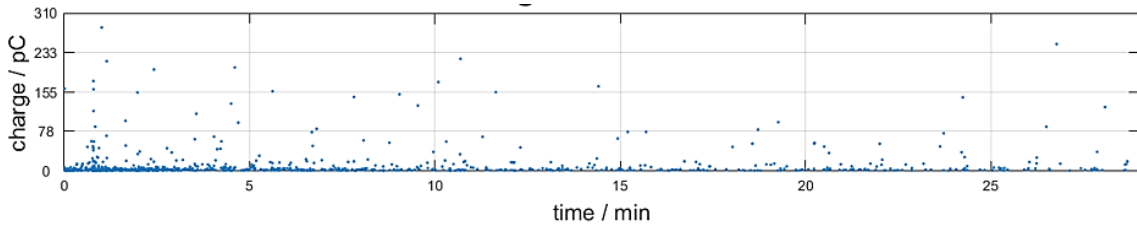
Gießharzplatte bei Gleichspannung mit positiver und negativer Polarität und $p = 0,1 \text{ MPa}$

Für die Messung der Gleitentladungen an einer Gießharzplatte wurde der Prüfkessel mit $p = 0,1 \text{ MPa}$ SF_6 befüllt und Gleichspannung mit positiver bzw. negativer Polarität angelegt. Anschließend wurde der Prüfkessel mit $p = 0,1 \text{ MPa}$ synthetischer Luft beaufschlagt und Gleichspannung mit positiver bzw. negativer Polarität angelegt.

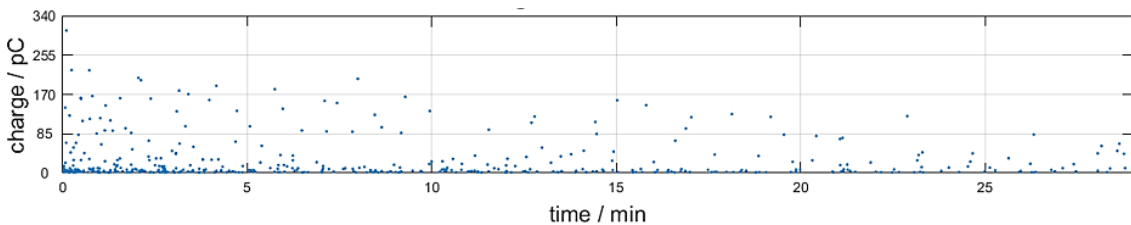
Die Einsetzspannung von SF_6 wurde mit $U_{\text{E, SF}_6} = 14 \text{ kV}$ bei Gleichspannung mit positiver Polarität bestimmt. Bei einer Messzeit von ca. 30 Minuten ist eine maximale Amplitude der Ladungen mit $|q_{\text{max}}| = 282,1 \text{ pC}$ aufgetreten. Im Durchschnitt ergab sich somit eine Ladung von $|\bar{q}| = 12,1 \text{ pC}$. Die aufgezeichneten TE-Impulse sind im Bild 6-35a dargestellt. Bei Gleichspannung mit negativer Polarität betrug die Einsetzspannung $U_{\text{E, SF}_6} = -14 \text{ kV}$. Die maximale Amplitude der Ladungen wurde mit $|q_{\text{max}}| = 196,3 \text{ pC}$ bestimmt. Im Durchschnitt ergab sich eine Ladung von $|\bar{q}| = 12,3 \text{ pC}$, bei einer Messzeit von ca. 30 Minuten.

Für synthetische Luft bei Gleichspannung mit positiver Polarität wurde eine Einsetzspannung von $U_{\text{E, O}_2/\text{N}_2} = 11 \text{ kV}$ bestimmt. Die Messzeit betrug ca. 30 Minuten und dabei ist eine maximale Amplitude der Ladungen von $|q_{\text{max}}| = 308,6 \text{ pC}$ aufgetreten. Die durchschnittliche Ladung wurde mit $|\bar{q}| = 26,6 \text{ pC}$ bestimmt (Bild 6-35b). Bei Gleichspannung mit negativer Polarität konnte eine Einsetzspannung bestimmt werden von $U_{\text{E, O}_2/\text{N}_2} = -11 \text{ kV}$. Im Verlauf der Messzeit von ca. 30 Minuten ist eine maximale Amplitude der Ladungen von $|q_{\text{max}}| = 294,4 \text{ pC}$ aufgetreten. Im Durchschnitt ergab sich eine Ladung von $|\bar{q}| = 19,3 \text{ pC}$.

Beide Diagramme (Bild 6-35) zeigen eine stetige Abnahme der TE-Impulse im Verlauf der Messzeit. Die Höhe der Amplituden der Ladungen und die Anzahl der TE-Impulse sind bei beiden Isoliergasen annähernd gleich.



(a) SF₆ mit einer Einsetzspannung von $U_E = 14$ kV und einer Messzeit von ca. 30 Minuten



(b) Synthetische Luft mit einer Einsetzspannung von $U_E = 11$ kV und einer Messzeit von ca. 30 Minuten

Bild 6-35: Ladung q in Abhängigkeit der Messzeit t von Gleitentladungen an einer Gießharzplatte bei Gleichspannung mit positiver Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,1$ MPa, bei (a) SF₆ und (b) synthetischer Luft.

Entladungsmechanismus von Gleitentladungen

Es gibt eine Ungleichheit in der Anzahl der Entladungen bei Gleichspannung mit positiver und negativer Polarität, da die Entladungshäufigkeit bei negativer Polarität höher ist als bei positiver Polarität. Um die Teilentladungen aufrecht zu erhalten, ist an der Hochspannungselektrode eine Versorgung mit Wechselspannung notwendig. Bei der negativen Halbwelle ist die Hochspannungselektrode negativer geladen als die Oberfläche der Gießharzplatte. Die Gegenelektrode auf Erdpotential übernimmt die Rolle der Kathode während der Teilentladung. Ist die Potentialdifferenz ausreichend groß, kann die Hochspannungselektrode Elektronen emittieren. Die Teilentladungen enden entlang der isolierten Oberfläche, an der Oberfläche verbleiben Ladungsträger, wodurch das Auftreten von weiteren Teilentladungen entgegengewirkt wird. Das Einsetzen der Teilentladungen kann nur durch das kontinuierliche Erhöhen der angelegten Spannung wieder erfolgen. Das Verhalten der Teilentladungen ist bei der positiven Halbwelle ähnlich [36]. Auf der Oberfläche fließt ein Elektronenstrom während der negativen Halbwelle der Wechselspannung. Die TE-Impulse bei der positiven Halbwelle bewirken eine Umkehr des Stromes (an den deponierten Elektronen) an der Oberfläche. Somit ergibt sich eine höhere Anzahl von Entladungen bei Gleichspannung mit negativer Polarität und eine geringere Häufigkeit von TE-Impulsen bei Gleichspannung mit positiver Polarität [32, 36, 37].

NoDi*-Diagramme von Gleitentladungen an einer Gießharzplatte bei Gleichspannung mit positiver Polarität und $p = 0,1$ MPa

Die NoDi*-Q-Diagramme von SF₆ (Bild 6-36a) und synthetischer Luft (Bild 6-36b) bei Gleichspannung mit positiver Polarität zeigen Ähnlichkeiten zum Muster von feinen Strukturen bzw. Linien, welche durch einen gleichmäßigen Wechsel des Amplitudenunterschiedes zwischen den Impulsen hervorgerufen wird. Die Amplituden bilden eine breite Streuung (Bild 6-35), wodurch ein begrenzter Häufigkeitspunkt im Ursprung der Diagramme entsteht.

Die Streuung ist jedoch breiter um den Ursprung verteilt als beim Defekt des freien Potentials. Die NoDi*- T - und NoDi*- Q_T -Diagramme weisen Analogien mit dem Defekt einer Spitze-Platte-Anordnung auf, mit kurzen zeitlichen Abständen der TE-Impulse, allerdings mit einer wesentlich niedrigeren Anzahl der TE-Impulse verglichen zur Spitze-Platte-Anordnung.

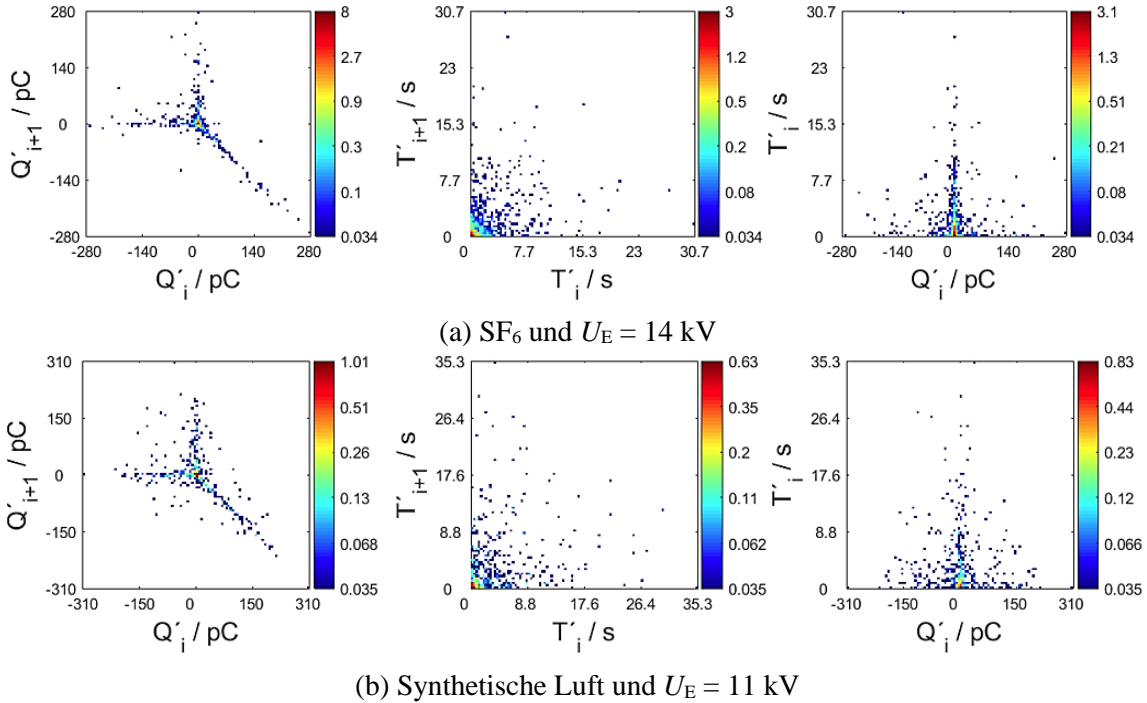


Bild 6-36: NoDi*-Diagramme von Gleitentladungen an einer Gießharzplatte bei Gleichspannung mit positiver Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,1$ MPa bei Einsetzspannung bei (a) SF₆ und (b) synthetischer Luft.

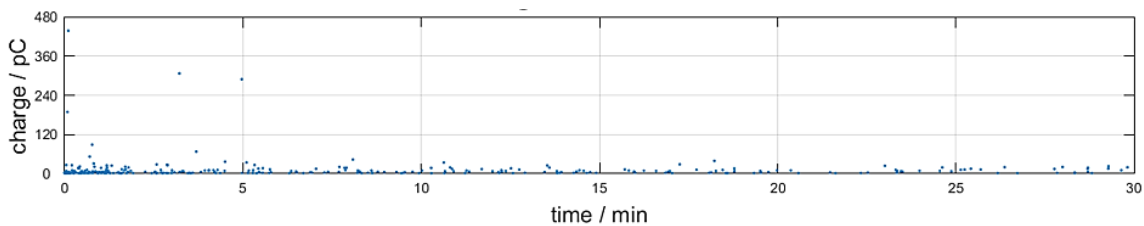
Gießharzplatte bei Gleichspannung mit positiver und negativer Polarität und $p = 0,5$ MPa

Für Gleitentladungen an einer Gießharzplatte wurde der Prüfkessel mit $p = 0,5$ MPa SF₆ befüllt und Gleichspannung mit positiver bzw. negativer Polarität angelegt. Danach wurde der Prüfkessel mit $p = 0,5$ MPa synthetischer Luft beaufschlagt und an der Elektrode Gleichspannung mit positiver bzw. negativer Polarität angelegt.

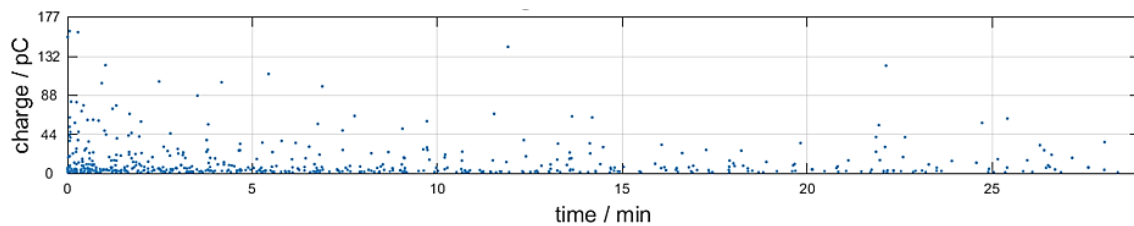
Für Gleichspannung mit positiver Polarität konnte die Einsetzspannung bei SF₆ von $U_{E, SF_6} = 24$ kV bestimmt werden. Bei einer Messzeit von 30 Minuten ist eine maximale Amplitude der Ladungen mit $|q_{\max}| = 438,2$ pC aufgetreten. Im Durchschnitt ergab sich somit eine Ladung von $|\bar{q}| = 11,8$ pC (Bild 6-37a). Für einen Gasdruck von $p = 0,5$ MPa SF₆ hat sich die Anzahl der Ladungen mit höherer Amplitude deutlich verringert. Bei Gleichspannung mit negativer Polarität betrug die Einsetzspannung $U_{E, SF_6} = -24$ kV. Die maximale Amplitude der Ladungen wurde mit $|q_{\max}| = 122,3$ pC bestimmt. Bei einer Messzeit von 30 Minuten ergab sich eine durchschnittliche Ladung von $|\bar{q}| = 14,5$ pC.

Für synthetische Luft bei Gleichspannung mit positiver Polarität wurde eine Einsetzspannung von $U_{E, O_2/N_2} = 12 \text{ kV}$ bestimmt. Die Messzeit betrug ca. 30 Minuten und dabei ist eine maximale Amplitude der Ladungen von $|q_{\max}| = 160,5 \text{ pC}$ aufgetreten. Die durchschnittliche Ladung wurde mit $|\bar{q}| = 13,8 \text{ pC}$ bestimmt (Bild 6-37b). Bei Gleichspannung mit negativer Polarität konnte eine Einsetzspannung von $U_{E, O_2/N_2} = -12 \text{ kV}$ bestimmt werden. Im Verlauf der Messzeit von ca. 30 Minuten ist eine maximale Amplitude der Ladungen von $|q_{\max}| = 161,9 \text{ pC}$ aufgetreten. Im Durchschnitt ergab sich eine Ladung von $|\bar{q}| = 13,1 \text{ pC}$.

Die Anzahl der TE-Impulse ist im Verlauf der Messung bei Gleichspannung mit negativer bzw. negativer Polarität zurückgegangen.



(a) SF_6 mit einer Einsetzspannung von $U_E = 24 \text{ kV}$ und einer Messzeit von 30 Minuten



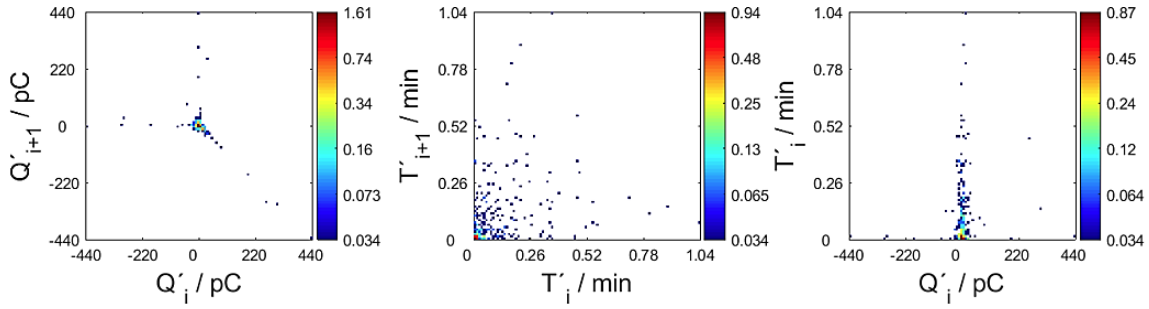
(b) Synthetische Luft mit einer Einsetzspannung von $U_E = 12 \text{ kV}$ und einer Messzeit von ca. 30 Minuten

Bild 6-37: Ladung q in Abhängigkeit der Messzeit t von Gleitentladungen an einer Gießharzplatte bei Gleichspannung mit positiver Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,5 \text{ MPa}$ bei (a) SF_6 und (b) synthetischer Luft.

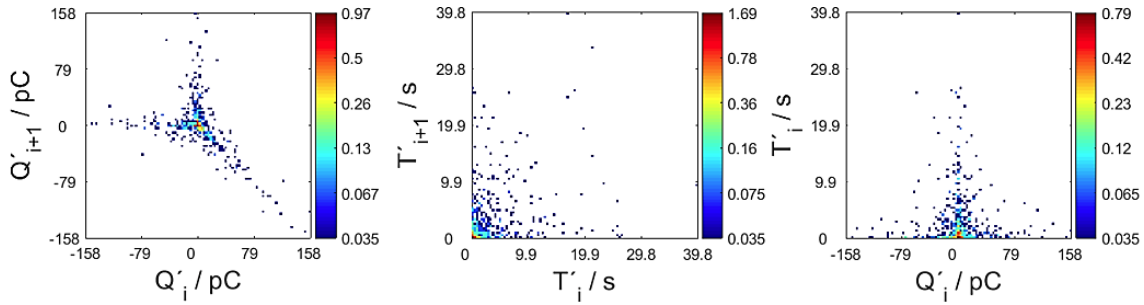
NoDi*-Diagramme von Gleitentladungen an einer Gießharzplatte bei Gleichspannung mit positiver Polarität und $p = 0,5 \text{ MPa}$

Das NoDi*-Diagramm von SF_6 (Bild 6-38a) bildet feine Strukturen bzw. Linien mit einer breiteren Streuung um den Ursprung. Grund dafür ist ein ungleichmäßiger Wechsel des Amplitudenunterschiedes zwischen den Impulsen (Bild 6-37a), da viele TE-Impulse mit kleiner Amplitude und selten mit hoher Amplitude aufgetreten sind.

Bei synthetischer Luft (Bild 6-38b) und Gleichspannung mit positiver Polarität zeigt das Muster des NoDi*-Diagramms Ähnlichkeiten zu feinen Strukturen bzw. Linien mit einer breiten Streuung um den Ursprung. Bei einer wesentlich höheren Anzahl von TE-Impulsen würde sich das Muster eines Dreiecks ergeben, wie bei der Spitze-Platte-Anordnung. Die NoDi*-_T- und NoDi*-_{QT}-Diagramme von SF_6 und synthetischer Luft weisen wieder Analogien mit dem Defekt einer Spitze-Platte-Anordnung auf.



(a) SF₆ und $U_E = 24$ kV



(b) Synthetische Luft und $U_E = 12$ kV

Bild 6-38: NoDi*-Diagramme von Gleitentladungen an einer Gießharzplatte bei Gleichspannung mit positiver Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,5$ MPa bei Einsatzspannung bei (a) SF₆ und (b) synthetischer Luft.

Zusammenfassung und Diskussion der Messergebnisse

Bei dem Defekt Gleitentladungen sind wechselnd TE-Impulse mit hohen und kleinen Amplituden aufgetreten, wodurch sich bei den NoDi*-Q-Diagrammen feine Strukturen und Linien ergeben haben. Mit zunehmendem Gasdruck lassen sich Ähnlichkeiten zum Muster eines Dreiecks ableiten. Bei der Hartpapierplatte ergaben sich niedrigere Einsatzspannungen als bei der Geißharzplatte und höhere Amplituden der Teilentladungen. Eine Übersicht der Ladungen und Einsatzspannungen sind in der Tabelle 6-11 und Tabelle 6-12 aufgelistet

Tabelle 6-11: Auflistung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen und der Einsetzspannungen von Gleitentladungen an einer Gießharz- und Hartpapierplatte für SF₆ bei unterschiedlichem Gasdruck.

Gleitentladungen - Gießharzplatte								
SF ₆	Gleichspannung mit positiver Polarität				Gleichspannung mit negativer Polarität			
Druck	$ q_{\min} $	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	U_E	$ q_{\min} $	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	U_E
MPa	pC	pC	pC	kV	pC	pC	pC	kV
0,1	1,0	12,1	282,1	14	1,0	12,3	196,3	-14
0,3	1,0	13,0	275,8	14	1,0	16,9	315,5	-14
0,5	1,0	11,8	438,2	24	1,0	14,5	122,3	-24
Gleitentladungen - Hartpapierplatte								
0,1	1,0	6,9	214,4	7	1,0	10,0	382,6	-4,6
0,5	1,0	4,6	237,7	14	1,0	2,8	63,1	-9

Tabelle 6-12: Auflistung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen und der Einsetzspannungen von Gleitentladungen an einer Gießharz- und Hartpapierplatte für synthetische Luft bei unterschiedlichem Gasdruck.

Gleitentladungen - Gießharzplatte								
O ₂ /N ₂	Gleichspannung mit positiver Polarität				Gleichspannung mit negativer Polarität			
Druck	$ q_{\min} $	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	U_E	$ q_{\min} $	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	U_E
MPa	pC	pC	pC	kV	pC	pC	pC	kV
0,1	1,0	26,6	308,6	11	1,0	19,3	294,4	-11
0,3	1,0	15,5	222,6	11	1,0	15,7	296,1	-11
0,5	1,0	13,8	160,5	12	1,0	13,1	161,9	-12
Gleitentladungen - Hartpapierplatte								
0,1	1,0	7,3	354,9	4,1	1,0	11,7	459,5	-4,5
0,5	1,0	8,0	255,5	7	1,0	8,9	174,7	-5,5

Vergleich von $p = 0,1$ MPa SF₆ und $p = 0,5$ MPa synthetischer Luft bei annähernd gleicher elektrischer Festigkeit

Es ergeben sich annähernd gleiche Einsetzspannungen bei SF₆ und synthetischer Luft. Die Einsetzspannung von synthetischer Luft ist bei diesem Defekt geringer als bei SF₆. Im Vergleich der durchschnittlichen Ladungen ergibt sich kein nennenswerter Unterschied. Die maximale Amplitude der Ladungen ist bei synthetischer Luft ebenfalls geringer als bei SF₆. Eine genaue Gegenüberstellung ist in der Tabelle 6-13 sowie Tabelle 6-14 ersichtlich.

Tabelle 6-13: Gegenüberstellung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen und Einsetzspannung von Gleitentladungen an einer Gießharzplatte bei $p = 0,5$ MPa synthetischer Luft und $p = 0,1$ MPa SF₆.

Gleitentladungen - Gießharzplatte								
Gas	Gleichspannung mit positiver Polarität				Gleichspannung mit negativer Polarität			
	$ q_{\min} $	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	U_E	$ q_{\min} $	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	U_E
	pC	pC	pC	kV	pC	pC	pC	kV
SF ₆ mit 0,1 MPa	1,0	12,1	282,1	14	1,0	12,3	196,3	-14
O ₂ /N ₂ mit 0,5 MPa	1,0	13,8	160,5	12	1,0	13,1	161,9	-12

Tabelle 6-14: Gegenüberstellung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen und Einsetzspannung von Gleitentladungen an einer Hartpapierplatte bei $p = 0,5$ MPa synthetischer Luft und $p = 0,1$ MPa SF₆.

Gleitentladungen - Hartpapierplatte								
Gas	Gleichspannung mit positiver Polarität				Gleichspannung mit negativer Polarität			
	$ q_{\min} $	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	U_E	$ q_{\min} $	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	U_E
	pC	pC	pC	kV	pC	pC	pC	kV
SF ₆ mit 0,1 MPa	1,0	6,9	214,4	7	1,0	10,0	382,6	-4,6
O ₂ /N ₂ mit 0,5 MPa	1,0	8,0	255,5	7	1,0	8,9	174,7	-5,5

6.4.4 Springendes Partikel

Allgemeines

Für die Nachbildung des Defekts von freien metallischen Partikeln wird die Testzelle, welche im Bild 6-5 dargestellt ist, verwendet. Das Partikel wird direkt unterhalb der Hochspannungselektrode in der Schale platziert. Die Testzelle wird mit einem Gasdruck von $p = 0,1$ MPa, $p = 0,3$ MPa und $p = 0,5$ MPa beaufschlagt. Die Partikel „Kugel“ und „Drahtstück“ kommen in realen GIS- und GIL-Anlagen nicht vor, diese dienen als idealisierte Laboruntersuchung. Die Kugel führt im elektrischen Feld eine springende Bewegung aus, sobald die Coulomb-Kraft die Erdanziehungskraft überwunden hat. Der Span bzw. das Drahtstück wird im elektrischen Feld aufgeladen, wodurch eine Kraft einwirkt und somit das Partikel eine Bewegung durchführt. Dabei gibt es zwei unterschiedliche Mechanismen in der Bewegung. Das springende Partikel, welches sich zwischen der Hochspannungselektrode und dem Gehäuse hin und her bewegt und dem Firefly-Effekt, bei dem das Partikel eine „tanzende“ Bewegung ausführt.

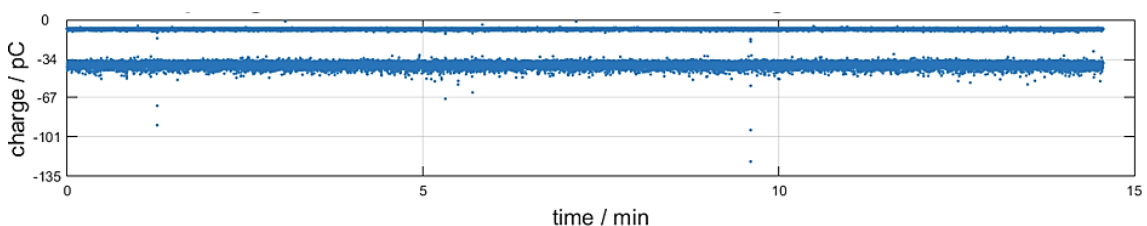
Kugel bei Gleichspannung mit positiver und negativer Polarität und $p = 0,3 \text{ MPa}$

Da bei einem Gasdruck von $p = 0,1 \text{ MPa}$ bei allen Partikeln bei synthetischer Luft und bei Gleichspannung mit positiver bzw. negativer Polarität ein Durchschlag aufgetreten ist, sind die nachfolgenden Diagramme und Ergebnisse für $p = 0,3 \text{ MPa}$ synthetische Luft und $p = 0,3 \text{ MPa}$ SF_6 veranschaulicht. In der gasisolierten Testzelle (Bild 6-5) wird eine Kugel mit einem Durchmesser von $d = 2 \text{ mm}$ platziert und mit $p = 0,3 \text{ MPa}$ SF_6 befüllt. An der Hochspannungselektrode wird Gleichspannung mit positiver bzw. negativer Polarität angelegt. Anschließend wird die Testzelle mit $p = 0,3 \text{ MPa}$ synthetischer Luft beaufschlagt.

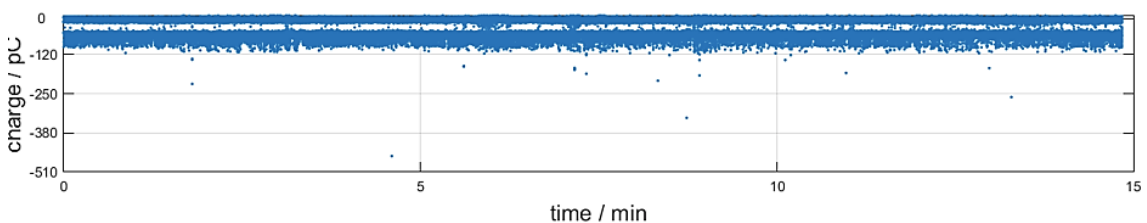
Die Einsetzspannung von SF_6 konnte bei Gleichspannung mit positiver Polarität mit $U_{\text{E, SF}_6} = 38 \text{ kV}$ bestimmt werden. Die maximale Amplitude der Ladungen betrug $|q_{\text{max}}| = 240,9 \text{ pC}$. Im Durchschnitt ergab sich somit eine Ladung von $|\bar{q}| = 23,3 \text{ pC}$, bei einer Messzeit von 15 Minuten. Bei Gleichspannung mit negativer Polarität betrug die Einsetzspannung $U_{\text{E, SF}_6} = -37 \text{ kV}$. Bei einer Messzeit von 15 Minuten ist eine maximale Amplitude der Ladungen von $|q_{\text{max}}| = 122,3 \text{ pC}$ aufgetreten. Im Durchschnitt ergab sich eine Ladung von $|\bar{q}| = 23,3 \text{ pC}$ (Bild 6-39a).

Bei Gleichspannung mit positiver Polarität wurde für synthetische Luft eine Einsetzspannung von $U_{\text{E, O}_2/\text{N}_2} = 39 \text{ kV}$ bestimmt. Die Messzeit betrug 15 Minuten und dabei ist eine maximale Amplitude der Ladungen von $|q_{\text{max}}| = 335,4 \text{ pC}$ aufgetreten. Die durchschnittliche Ladung wurde mit $|\bar{q}| = 27,8 \text{ pC}$ bestimmt. Für Gleichspannung mit negativer Polarität betrug die Einsetzspannung $U_{\text{E, O}_2/\text{N}_2} = -38 \text{ kV}$. Im Verlauf der Messzeit von 15 Minuten ist eine maximale Amplitude der Ladungen von $|q_{\text{max}}| = 457,2 \text{ pC}$ aufgetreten. Im Durchschnitt ergab sich eine Ladung von $|\bar{q}| = 28,6 \text{ pC}$ (Bild 6-39b).

Bei beiden Diagrammen sind zwei kontinuierliche Bänder von TE-Impulsen mit unterschiedlichen Amplituden zu erkennen.



(a) SF_6 mit einer Einsetzspannung von $U_{\text{E}} = -37 \text{ kV}$ und einer Messzeit von 15 Minuten



(b) Synthetische Luft mit einer Einsetzspannung von $U_{\text{E}} = -38 \text{ kV}$ und einer Messzeit von 15 Minuten

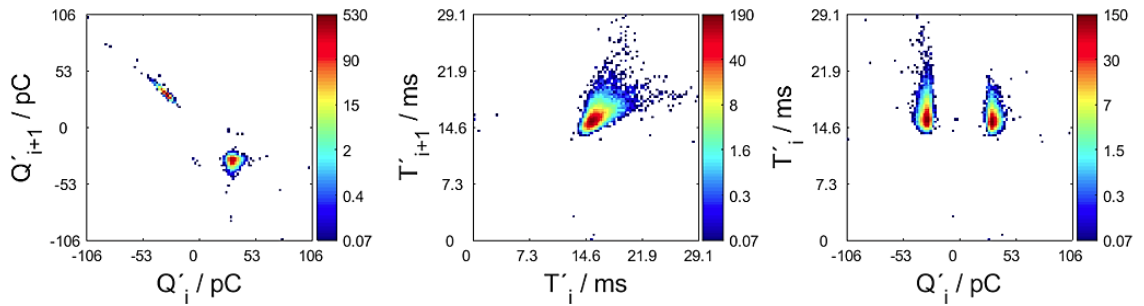
Bild 6-39: Ladung q in Abhängigkeit der Messzeit t eines springenden Partikels (Kugel) bei Gleichspannung mit negativer Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,3 \text{ MPa}$, bei (a) SF_6 und (b) synthetischer Luft.

Entladungsmechanismus und springende Bewegung der Kugel

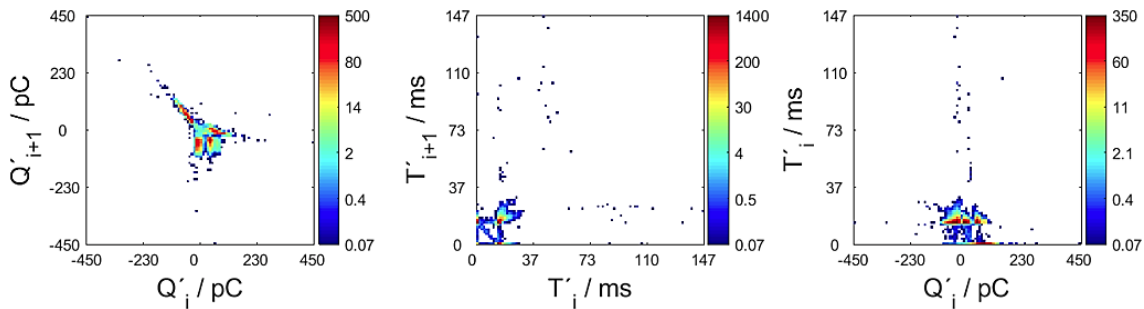
Die frei metallische Kugel vollzieht eine springende Bewegung beim Erreichen der Einsetzspannung, welche auch als Abhebespannung bezeichnet wird. Die Kugel liegt zu Beginn der Messung am tiefsten Punkt der Schale, direkt unter der Hochspannungselektrode. Beim Anlegen der Gleichspannung lädt sich die Oberfläche der Kugel mit der Ladung q auf. Überschreitet diese Ladung mit der wirkenden Coulomb-Kraft die Erdanziehungskraft der Kugel, so wird die Kugel in Richtung der Hochspannungselektrode bewegt bzw. beschleunigt. Die Kugel springt zwischen Hochspannungselektrode und Gegenelektrode hin und her. Dabei ändert sich die Polarität der Ladung der Kugel bei jeder Berührung mit der Elektrode [2, 38, 39].

NoDi*-Diagramme eines springenden Partikels (Kugel) bei Gleichspannung mit negativer Polarität und $p = 0,3$ MPa

In den NoDi*-Diagrammen von SF_6 sind ausgeprägte und abgegrenzte Häufigkeitspunkte zu erkennen (Bild 6-40a). Diese abgegrenzten Häufigkeitspunkte sind vor allem in den NoDi*-T- und NoDi*-QT-Diagrammen festzustellen. Diese deuten auf ein periodisches Auf- und Entladen der Kugel hin. Die Häufigkeitspunkte sind dabei nicht immer punktförmig ausgebildet, auch ausgeprägte Linien in einem bestimmten Bereich sind ein Indiz, so wie es in den NoDi*-Diagrammen bei synthetischer Luft (Bild 6-40b) der Fall ist.



(a) SF_6 und $U_E = -37$ kV



(b) Synthetische Luft und $U_E = -38$ kV

Bild 6-40: NoDi*-Diagramme eines springenden Partikels (Kugel) bei Gleichspannung mit negativer Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,3$ MPa bei Einsetzspannung bei (a) SF_6 und (b) synthetischer Luft.

Zusammenfassung und Diskussion der Messergebnisse

Für das springende Partikel (Kugel) ergaben sich bei SF₆ und synthetischer Luft ähnliche Einsetzspannungen, da die Einsetzspannung auch die Abhebespannung ist bei der das Partikel beginnt eine springende Bewegung auszuführen. Für synthetische Luft bei $p = 0,1$ MPa konnten keine Pulssequenzen und NoDi*-Diagramme erstellt werden, da es bei Gleichspannung mit positiver bzw. negativer Polarität ab einem Spannungspegel von $|U_{DC}| = 20$ kV zu einem Durchschlag kam. Die benötigte Abhebespannung von $U_{DC} = 37$ kV konnte somit nicht erreicht werden. Im Vergleich der maximal aufgetretenen Ladungen sind die Pegel bei SF₆ bei allen Gasdrücken niedriger als bei synthetischer Luft. Bei den NoDi*-Diagrammen weisen die Häufigkeitspunkte bei SF₆ ($p = 0,1$ MPa, $p = 0,3$ MPa und $p = 0,5$ MPa) ausgeprägte und abgegrenzte punktförmige Muster auf. Für synthetische Luft bei $p = 0,3$ MPa und $p = 0,5$ MPa ergaben sich ausgeprägte Linien in bestimmten Bereichen. Eine genaue Auflistung der Ladungen und Einsetzspannungen sind in der Tabelle 6-15 und Tabelle 6-16 aufgelistet.

Tabelle 6-15: Auflistung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen und der Einsetzspannungen eines springenden Partikels (Kugel) für SF₆ bei unterschiedlichem Gasdruck.

Springendes Partikel - Kugel								
SF ₆	Gleichspannung mit positiver Polarität				Gleichspannung mit negativer Polarität			
Druck	$ q_{min} $	$ \bar{q} $	$ q_{max} $	U_E	$ q_{min} $	$ \bar{q} $	$ q_{max} $	U_E
MPa	pC	pC	pC	kV	pC	pC	pC	kV
0,1	1,0	21,1	130,3	37	1,0	21,6	155,4	-37
0,3	1,1	23,4	241,0	38	1,4	23,3	122,3	-37
0,5	1,1	24,6	80,0	40	1,0	24,9	73,9	-40

Tabelle 6-16: Auflistung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen und der Einsetzspannungen eines springenden Partikels (Kugel) für synthetische Luft bei unterschiedlichem Gasdruck.

Springendes Partikel - Kugel								
O ₂ /N ₂	Gleichspannung mit positiver Polarität				Gleichspannung mit negativer Polarität			
Druck	$ q_{min} $	$ \bar{q} $	$ q_{max} $	U_E	$ q_{min} $	$ \bar{q} $	$ q_{max} $	U_E
MPa	pC	pC	pC	kV	pC	pC	pC	kV
0,1	-	-	-	-	-	-	-	-
0,3	1,0	27,8	335,4	39	1,0	28,6	457,2	-38
0,5	1,0	30,2	344,8	41	1,0	24,2	258,1	-41

Vergleich von $p = 0,1$ MPa SF_6 und $p = 0,5$ MPa synthetischer Luft bei annähernd gleicher elektrischer Festigkeit

Bei einem Vergleich bei annähernd gleicher elektrischer Festigkeit, ergab sich eine höhere Einsetzspannung bei synthetischer Luft. Die maximale Amplitude der Ladungen von SF_6 entspricht etwa der Hälfte der aufgetretenen Ladungen bei synthetischer Luft (Tabelle 6-17). Bei den NoDi*-Diagrammen zeigen sich die Unterschiede in Form der ausgeprägten und abgegrenzten punktförmigen Häufigkeitspunkte bei SF_6 und bei synthetischer Luft in Form von ausgeprägten Linien in bestimmten Bereichen.

Tabelle 6-17: Gegenüberstellung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen und Einsetzspannungen eines springenden Partikels (Kugel) bei $p = 0,5$ MPa synthetischer Luft und $p = 0,1$ MPa SF_6 .

Springendes Partikel - Kugel								
Gas	Gleichspannung mit positiver Polarität				Gleichspannung mit negativer Polarität			
	$ q_{\min} $	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	U_E	$ q_{\min} $	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	U_E
	pC	pC	pC	kV	pC	pC	pC	kV
SF_6 mit 0,1 MPa	1,0	21,1	130,3	37	1,0	21,6	155,4	-37
O_2/N_2 mit 0,5 MPa	1,0	30,2	344,8	41	1,0	24,2	258,1	-41

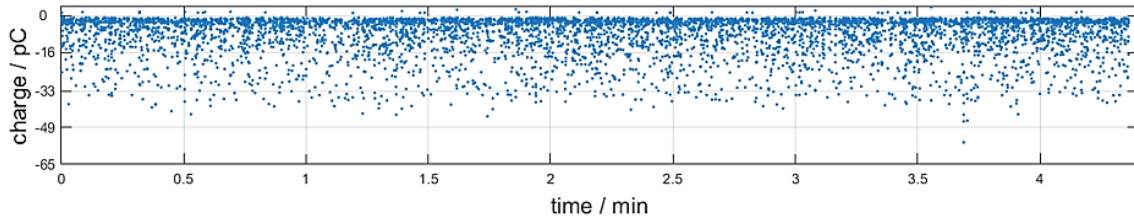
Drahtstück bei Gleichspannung mit positiver und negativer Polarität und $p = 0,5$ MPa

Für den Defekt des springenden Partikels mit einem Drahtstück wurde in der gasisolierten Testzelle (Bild 6-5) ein $l = 1,4$ mm langes Drahtstück platziert und mit $p = 0,5$ MPa SF_6 beaufschlagt. An der Hochspannungselektrode wird Gleichspannung mit positiver bzw. negativer Polarität angelegt. Danach wird die Testzelle mit $p = 0,5$ MPa synthetischer Luft befüllt.

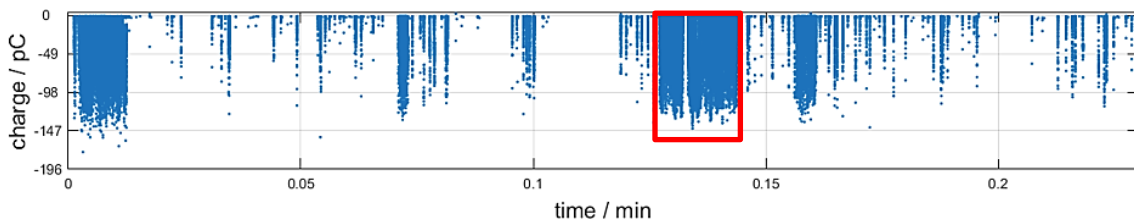
Die Einsetzspannung bei Gleichspannung mit positiver Polarität und SF_6 betrug $U_{E, \text{SF}_6} = 34$ kV. Die maximale Amplitude der Ladungen wurde mit $|q_{\max}| = 281$ pC bestimmt. Im Durchschnitt ergab sich somit eine Ladung von $|\bar{q}| = 8,9$ pC, bei einer Messzeit von ca. 1,5 Minuten. Bei Gleichspannung mit negativer Polarität betrug die Einsetzspannung $U_{E, \text{SF}_6} = -33$ kV. Bei einer Messzeit von ca. 4,5 Minuten ist eine maximale Amplitude der Ladungen von $|q_{\max}| = 55,5$ pC aufgetreten. Im Durchschnitt ergab sich eine Ladung von $|\bar{q}| = 8,8$ pC. Der Verlauf der TE-Impulse ist im Bild 6-41a dargestellt. Im Verlauf der Messung sind die Teilentladungen relative gleichmäßig aufgetreten, wegen der springenden Bewegung. Es konnte kein Firefly-Effekt beobachtet werden.

Bei Gleichspannung mit positiver Polarität und synthetischer Luft wurde eine Einsetzspannung von $U_{E, \text{O}_2/\text{N}_2} = 34$ kV bestimmt. Die Messzeit betrug ca. 1,6 Minuten und dabei ist eine maximale Amplitude der Ladungen von $|q_{\max}| = 392,3$ pC aufgetreten. Die durchschnittlichen Ladungen wurde mit $|\bar{q}| = 13,2$ pC bestimmt. Für Gleichspannung mit negativer Polarität betrug die Einsetzspannung $U_{E, \text{O}_2/\text{N}_2} = -33$ kV.

Im Verlauf der Messzeit von ca. 15 Sekunden ist eine maximale Amplitude der Ladungen von $|q_{\max}| = 174,2 \text{ pC}$ aufgetreten. Im Durchschnitt ergab sich eine Ladung von $|\bar{q}| = 26,4 \text{ pC}$. Im Bild 6-41b hat das Partikel nicht nur eine springende, sondern auch kurzzeitig eine tanzende Bewegung (Firefly-Effekt ist rot markiert) ausgeführt. Während des Firefly-Effektes treten in kürzester Zeit eine hohe Anzahl von TE-Impulsen auf.



(a) SF_6 mit einer Einsetzspannung von $U_E = -33 \text{ kV}$ und einer Messzeit von ca. 4,5 Minuten



(b) Synthetische Luft mit einer Einsetzspannung von $U_E = -33 \text{ kV}$ und einer Messzeit von ca. 15 Sekunden

Bild 6-41: Ladung q in Abhängigkeit der Messzeit t eines springenden Partikels (Drahtstück) bei Gleichspannung mit negativer Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,5 \text{ MPa}$, bei (a) SF_6 und (b) synthetischer Luft.

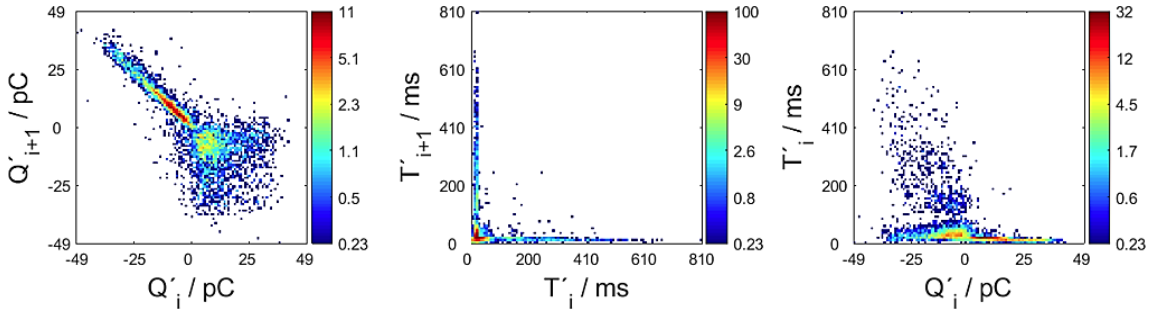
Entladungsmechanismus und springende Bewegung des Drahtstücks

Das Drahtstück als springendes Partikel gibt seine Ladung auf dem Weg zur Gegenelektrode ab. Beim Erreichen der Abhebespannung wird durch die Coulomb-Kraft die Erdanziehungskraft auf das Drahtstück überwunden und dieses in Richtung der negativen Hochspannungselektrode beschleunigt. Wegen der scharfen Kanten des Drahtstücks wird die kritische Feldstärke lokal erhöht und das Partikel gibt seine Ladung in Form von Koronaentladungen ab. Je näher das Partikel der Hochspannungselektrode kommt, desto höher wird die kritische Feldstärke im Bereich der scharfen Kanten. Eine hohe Anzahl von TE-Impulsen ist die Folge, jedoch mit stetig abnehmender Amplitude. Bei Kontakt mit der Hochspannungselektrode wirkt das Partikel wie eine Spitze auf der Hochspannungselektrode und es kommt neben dem Kontaktrauschen auch zu einer hohen Anzahl von Teilentladungen auf der abgewandten Seite des Drahtstücks. Vor der Spitze des Drahtstücks bildet sich eine Raumladungswolke, die elektrische Feldstärke wird an der Spitze erhöht, aufgrund der Ansammlung von positiven Ionen. Dieser Vorgang ruft wieder erneut eine hohe Anzahl von TE-Impulsen hervor, wodurch freie Elektronen entstehen. Die Elektronen rekombinieren mit den positiven Ionen und es entstehen negative Ionen, die dem elektrischen Feld im Bereich des Partikels entgegenwirken. Die einwirkende Kraft auf das Drahtstück sinkt und es entsteht ein Gleichgewichtszustand. Kommt es zu einer Störung des Gleichgewichtes wird das Partikel von der Elektrode abgestoßen [2, 38, 39].

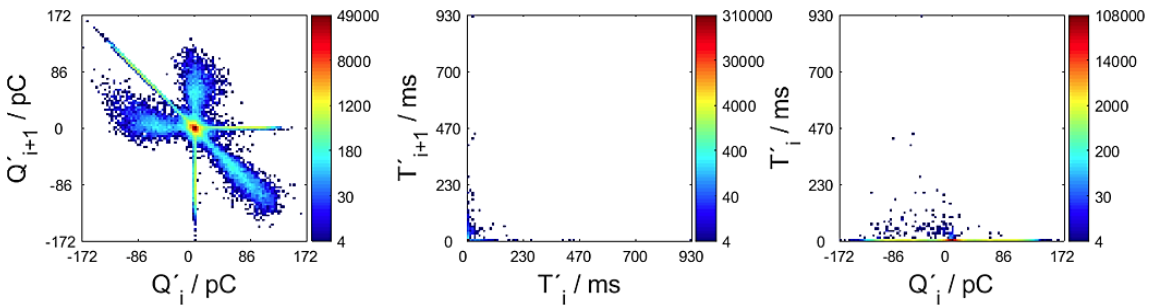
Die infolgedessen auftretenden Teilentladungen nehmen in der Höhe der Amplitude wieder zu und die zeitlichen Abstände der TE-Impulse werden ebenfalls größer. Die Ladung des Drahtstücks nimmt immer weiter ab, sowie auch die einwirkende Kraft. Das Partikel bewegt sich weiter in Richtung Gegenelektrode und der periodische Vorgang, mit der Bewegung in Richtung Hochspannungselektrode, kann erneut stattfinden [2, 38, 39].

NoDi*-Diagramme eines springenden Partikels (Drahtstück) bei Gleichspannung mit negativer Polarität und $p = 0,5$ MPa

Für SF_6 (Bild 6-42a) ergibt sich ein Muster von feinen Linien bzw. Strukturen mit einer sehr breiten Streuung. Aufgrund der unregelmäßigen Geometrie des Drahtstücks kommt es zum ungleichen Abstoßen des Partikels an der Hochspannungselektrode (im Vergleich zur Kugel). Das NoDi*-Q-Diagramm von synthetischer Luft (Bild 6-42b) hat aufgrund der hohen Anzahl von TE-Impulsen ein sehr ausgeprägtes Diagramm. Das Muster besitzt die Charakteristik eines Dreiecks (wie bei der Spitze-Platte-Anordnung) und von feinen Linien bzw. Strukturen (wie bei dem freien Potential).



(a) SF_6 und $U_E = -33$ kV



(b) Synthetische Luft und $U_E = -33$ kV

Bild 6-42: NoDi*-Diagramme eines springenden Partikels (Drahtstück) bei Gleichspannung mit negativer Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,5$ MPa bei Einsatzspannung, bei (a) SF_6 und (b) synthetischer Luft.

Zusammenfassung und Diskussion der Messergebnisse

Das Drahtstück als springendes Partikel weist für SF_6 und synthetische Luft verschiedene Impulsfolgen bei allen Gasdrücken auf. Für SF_6 ergab sich ein regelmäßiges Auftreten von TE-Impulsen im Verlauf der Messung. Bei synthetischer Luft hat sich die Pulssequenz während der Messung verändert und es sind wesentlich mehr Impulse aufgetreten.

Problematisch bei der Messung war, dass unabhängig vom Isoliergas das Drahtstück ständig aus der Anordnung gesprungen ist, wodurch die Messungen mehrfach wiederholt werden mussten. Die Einsetzspannungen bzw. Abhebespannungen liegen knapp beieinander. Bei synthetischer Luft mit $p = 0,1$ MPa konnten keine Daten bei Gleichspannung mit positiver Polarität ermittelt werden. Grund dafür war ein Durchschlag, bevor die Einsetzspannung erreicht werden konnte. Die maximalen Amplituden der Ladungen bei SF_6 sind mit steigendem Gasdruck kleiner geworden. Bei der Messung von synthetischer Luft sind Ladungen im nC-Bereich aufgetreten. Die genauen Werte der Ladungen und Einsetzspannungen sind in Tabelle 6-18 und Tabelle 6-19 aufgelistet.

Tabelle 6-18: Auflistung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen und der Einsetzspannungen eines springenden Partikels (Drahtstück) für SF_6 bei unterschiedlichem Gasdruck.

Springendes Partikel - Drahtstück								
SF_6	Gleichspannung mit positiver Polarität				Gleichspannung mit negativer Polarität			
Druck	$ q_{\min} $	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	U_E	$ q_{\min} $	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	U_E
MPa	pC	pC	pC	kV	pC	pC	pC	kV
0,1	1,0	9,6	167,6	37	1,0	16,6	118,8	-35
0,3	1,0	8,8	75,3	35	1,0	11,7	63,4	-34
0,5	1,0	8,9	281,0	34	1,0	8,8	55,5	-33

Tabelle 6-19: Auflistung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen und der Einsetzspannungen eines springenden Partikels (Drahtstück) für synthetische Luft bei unterschiedlichem Gasdruck.

Springendes Partikel - Drahtstück								
O_2/N_2	Gleichspannung mit positiver Polarität				Gleichspannung mit negativer Polarität			
Druck	$ q_{\min} $	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	U_E	$ q_{\min} $	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	U_E
MPa	pC	pC	pC	kV	pC	pC	pC	kV
0,1	-	-	-	-	1,0	5,4	3235,8	-32
0,3	1,0	1,7	1540,9	38	1,0	34,6	632,0	-35
0,5	1,0	13,2	392,3	34	1,0	26,4	174,2	-33

Vergleich von $p = 0,1$ MPa SF_6 und $p = 0,5$ MPa synthetischer Luft bei annähernd gleicher elektrischer Festigkeit

Bei den NoDi*-Q-Diagrammen gibt es deutliche Unterschiede der Muster, welche auf die Pulssequenzen zurückzuführen sind. Für SF_6 hat sich eine gleichbleibende Pulssequenz eingestellt. Die Pulssequenz hat sich im Verlauf der Messzeit bei synthetischer Luft verändert (mit steigender und abfallender Anzahl von TE-Impulsen). Die Einsetzspannungen liegen nahe beieinander, jedoch unterscheiden sich die Höhe der Ladungen und die Anzahl der TE-Impulse deutlich voneinander. Eine Übersicht des Vergleichs ist in der Tabelle 6-20 dargestellt.

Tabelle 6-20: Gegenüberstellung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen und Einsetzspannungen eines springenden Partikels (Drahtstück) bei $p = 0,5$ MPa synthetischer Luft und $p = 0,1$ MPa SF₆.

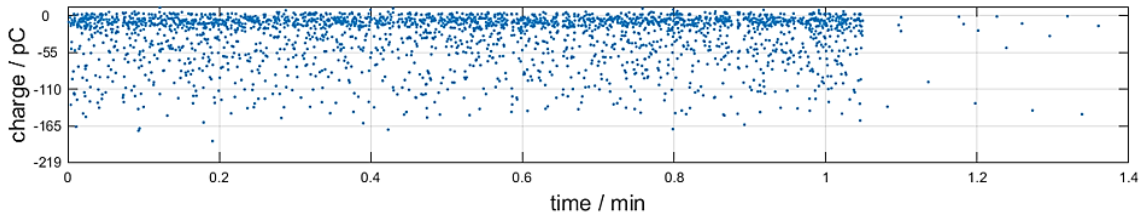
Springendes Partikel - Drahtstück								
Gas	Gleichspannung mit positiver Polarität				Gleichspannung mit negativer Polarität			
	$ q_{\min} $	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	U_E	$ q_{\min} $	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	U_E
	pC	pC	pC	kV	pC	pC	pC	kV
SF ₆ mit 0,1 MPa	1,0	9,6	167,6	37	1,0	16,6	118,8	-35
O ₂ /N ₂ mit 0,5 MPa	1,0	13,2	392,3	34	1,0	26,4	174,2	-33

Span bei Gleichspannung mit positiver und negativer Polarität und $p = 0,3$ MPa

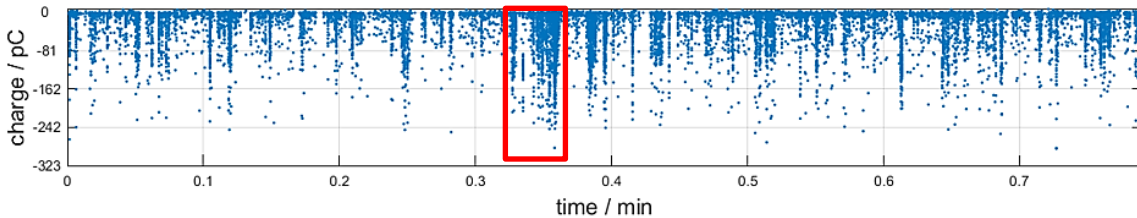
Das springende Partikel in Form eines Spans wurde in der gasisolierten Testzelle (Bild 6-5) realisiert. Dafür wird ein $l = 3,7$ mm langer Span unter der Hochspannungselektrode platziert und die Testzelle mit $p = 0,3$ MPa SF₆ beaufschlagt. An der Hochspannungselektrode wird Gleichspannung mit positiver bzw. negativer Polarität angelegt. Anschließend wird die Testzelle mit $p = 0,3$ MPa synthetischer Luft befüllt. Der Firefly-Effekt tritt eher selten auf und konnte deshalb nur bei SF₆ mit einem Gasdruck von $p = 0,1$ MPa beobachtet werden.

Es konnte eine Einsetzspannung bei Gleichspannung mit positiver Polarität bei SF₆ von $U_{E, \text{SF}_6} = 20$ kV ermittelt werden. Die maximale Amplitude der Ladungen wurde mit $|q_{\max}| = 464$ pC bestimmt. Bei einer Messzeit von ca. 1 Minuten ergab sich im Durchschnitt eine Ladung von $|\bar{q}| = 26,3$ pC. Bei Gleichspannung mit negativer Polarität betrug die Einsetzspannung $U_{E, \text{SF}_6} = -20$ kV. Bei einer Messzeit von 1,4 Minuten ist eine maximale Amplitude der Ladungen von $|q_{\max}| = 187,6$ pC aufgetreten. Es ergab sich im Durchschnitt eine Ladung von $|\bar{q}| = 31,6$ pC. Der Verlauf der TE-Impulse ist im Bild 6-43a dargestellt. Bei der Messung sind die Teilentladungen durch die springende Bewegung gleichmäßig aufgetreten, es konnte bei diesem Gasdruck kein Firefly-Effekt beobachtet werden. Der Span ist nach ca. 1 Minute Messzeit aus der Anordnung gesprungen.

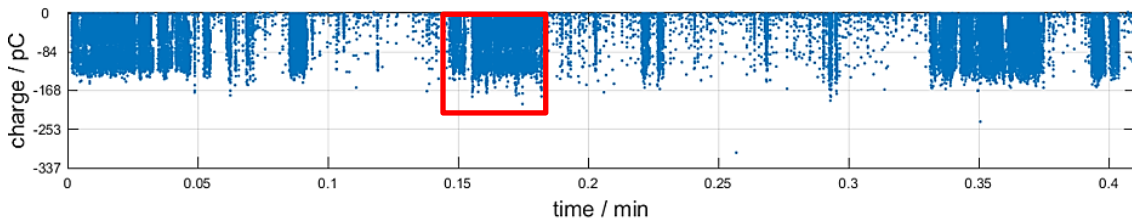
Für Gleichspannung mit positiver Polarität wurde für synthetische Luft eine Einsetzspannung von $U_{E, \text{O}_2/\text{N}_2} = 27$ kV bestimmt. Die Messzeit betrug ca. 15 Sekunden und dabei konnte eine maximale Amplitude der Ladungen von $|q_{\max}| = 747$ pC detektiert werden. Die durchschnittlichen Ladungen wurde mit $|\bar{q}| = 40,8$ pC bestimmt. Die Einsetzspannung bei Gleichspannung mit negativer Polarität betrug $U_{E, \text{O}_2/\text{N}_2} = -23$ kV. Im Verlauf der Messzeit von ca. 45 Sekunden ist eine maximale Amplitude der Ladungen von $|q_{\max}| = 287,2$ pC aufgetreten. Im Durchschnitt ergab sich eine Ladung von $|\bar{q}| = 15,8$ pC. Im Bild 6-43b hat das Partikel nicht nur eine springende, sondern kurzzeitig auch eine tanzende Bewegung (Firefly-Effekt) ausgeführt (rote Markierung). Für $p = 0,1$ MPa SF₆ (Bild 6-43c) bei Gleichspannung mit negativer Polarität konnte der Firefly-Effekt (rote Markierung) ebenfalls beobachtet werden. Dabei sind in kürzester Zeit eine hohe Anzahl von TE-Impulsen aufgetreten.



(a) SF₆ mit einer Einsetzspannung von $U_E = -20$ kV und einer Messzeit von 1,4 Minuten



(b) Synthetische Luft mit einer Einsetzspannung von $U_E = -23$ kV und einer Messzeit von ca. 45 Sekunden



(c) SF₆ mit einer Einsetzspannung von $U_E = -20$ kV und einer Messzeit von ca. 25 Sekunden mit Firefly-Effekt

Bild 6-43: Ladung q in Abhängigkeit der Messzeit t eines springenden Partikels (Span) bei Gleichspannung mit negativer Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,3$ MPa bei (a) SF₆ und (b) synthetischer Luft und (c) SF₆ bei $p = 0,1$ MPa (Firefly-Effekt im Rot eingezeichneten Bereich).

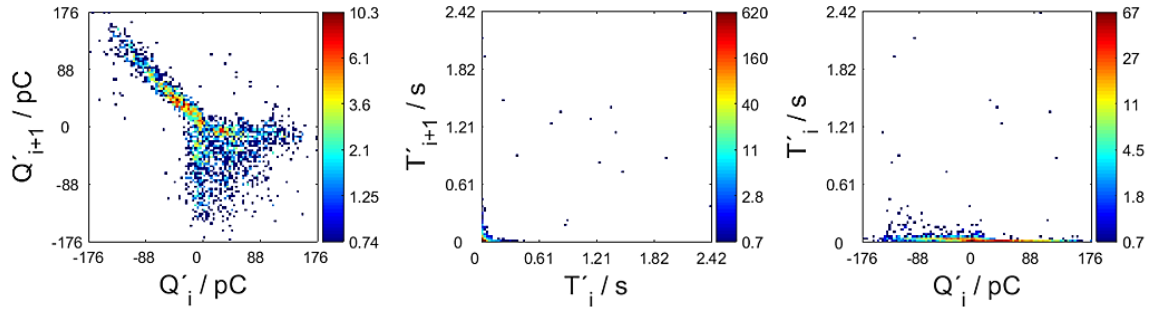
Entladungsmechanismus und springende Bewegung des Spans

Die Bewegung und das Verhalten des Spans ist mit der des Drahtstücks vergleichbar. Prinzipiell ist die Bewegungsrichtung des Spans aufgrund der Geometrie chaotischer als bei der Kugel. Dies hat zur Folge, dass die auftretenden Amplituden der TE-Impulse und deren zeitliche Abstände eine breitere Streuung aufweisen. Das Auftreten des Firefly-Effekts ist bei einem Gasdruck bis $p = 0,1$ MPa und Gleichspannung mit negativer Polarität am stabilsten. Für Gleichspannung mit positiver Polarität tritt der Firefly-Effekt erst bei höheren Spannungen auf und es ergibt sich ein ständiger Wechsel zwischen dem Springen des Partikels und einem kurzzeitigen Auftreten des Firefly-Effekts. Der Firefly-Effekt ist charakterisiert durch eine hohe Anzahl von TE-Impulsen in kurzen zeitlichen Abständen mit einer abklingenden Amplitude der Impulse (rote Markierung im Bild 6-43b und Bild 6-43c) [2, 38, 39].

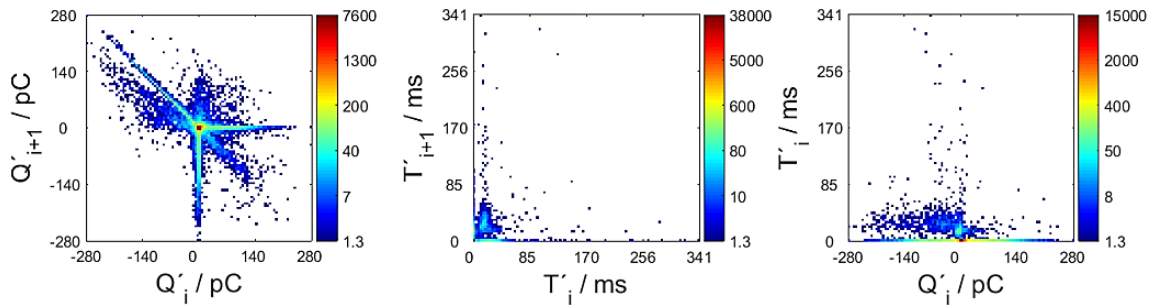
NoDi*-Diagramme eines springenden Partikels (Span) bei Gleichspannung mit negativer Polarität und $p = 0,3$ MPa

In den NoDi*-Diagrammen von SF_6 (Bild 6-44a und Bild 6-44c) und synthetischer Luft (Bild 6-44b) ist die springende Bewegung bzw. der Firefly-Effekt zu erkennen, obwohl es zu einer starken Streuung der Amplituden und zeitlichen Abstände kommt.

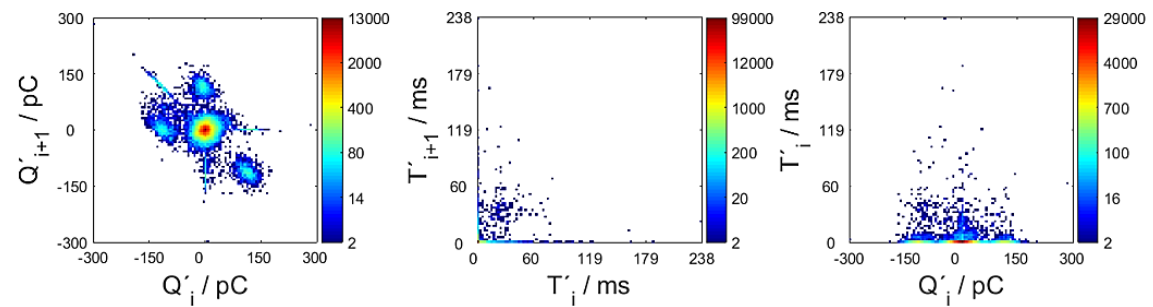
Die Muster der NoDi*-Diagramme entsprechen derselben Charakteristik wie bereits beim Drahtstück beschrieben wurde (Bild 6-42a und Bild 6-42b). Auch beim Auftreten des Firefly-Effekts sind die Muster der NoDi*-Diagramme ähnlich.



(a) SF_6 und $U_E = -20$ kV



(b) Synthetische Luft und $U_E = -23$ kV



(c) SF_6 bei $p = 0,1$ MPa und $U_E = -20$ kV

Bild 6-44: NoDi*-Diagramme eines springenden Partikels (Span) bei Gleichspannung mit negativer Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,3$ MPa bei Einsatzspannung bei (a) SF_6 und (b) synthetischer Luft und (c) SF_6 bei $p = 0,1$ MPa

Zusammenfassung und Diskussion der Messergebnisse

Der Span als springendes Partikel weist bei SF₆ und synthetischer Luft verschiedene Impulsfolgen bei allen Gasdrücken auf. Wie schon beim Drahtstück sind bei SF₆ die TE-Impulse im Verlauf der Messung regelmäßiger aufgetreten. Bei synthetischer Luft hat sich die Pulssequenz während der Messung verändert und es kam zu einem Wechsel zwischen dem Springen des Partikels und dem Firefly-Effekt. Der Span ist bei der Messung regelmäßig aus der Anordnung gesprungen, wodurch die Messungen mehrfach wiederholt werden mussten. Dieser Vorgang war unabhängig vom Isoliergas und dem Gasdruck. Die Einsetzspannungen bei $p = 0,1$ MPa synthetischer Luft konnte weder für Gleichspannung mit positiver noch negativer Polarität bestimmt werden, da es bereits zuvor zum Durchschlag gekommen ist. Die jeweiligen Werte der Einsetzspannungen und der Ladungen sind in Tabelle 6-21 und Tabelle 6-22 aufgelistet.

Tabelle 6-21: Auflistung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen und der Einsetzspannungen eines springenden Partikels (Span) für SF₆ bei unterschiedlichem Gasdruck.

Springendes Partikel - Span								
SF ₆	Gleichspannung mit positiver Polarität				Gleichspannung mit negativer Polarität			
Druck	$ q_{\min} $	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	U_E	$ q_{\min} $	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	U_E
MPa	pC	pC	pC	kV	pC	pC	pC	kV
0,1	1,0	13,2	184,1	20	1,0	50,4	303,5	-20
0,3	1,0	26,3	464,0	20	1,0	31,6	187,6	-20
0,5	1,0	31,7	349,4	21	1,0	34,6	182,6	-21

Tabelle 6-22: Auflistung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen und der Einsetzspannungen eines springenden Partikels (Span) für synthetische Luft bei unterschiedlichem Gasdruck.

Springendes Partikel - Span								
O ₂ /N ₂	Gleichspannung mit positiver Polarität				Gleichspannung mit negativer Polarität			
Druck	$ q_{\min} $	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	U_E	$ q_{\min} $	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	U_E
MPa	pC	pC	pC	kV	pC	pC	pC	kV
0,1	-	-	-	-	-	-	-	-
0,3	1,0	40,8	747	27	1,0	15,8	287,2	-23
0,5	1,0	20,0	159,3	21	1,0	21,7	323,3	-21

Vergleich von $p = 0,1$ MPa SF₆ und $p = 0,5$ MPa synthetischer Luft bei annähernd gleicher elektrischer Festigkeit

Die NoDi*_Q-Diagramme von SF₆ und synthetischer Luft unterscheiden sich in ihrem Muster, wegen der unterschiedlichen Pulssequenzen. Die Pulssequenzen sind mit den Impulsfolgen des springenden Drahtstücks vergleichbar. Für SF₆ hat sich eine gleichbleibende Pulssequenz eingestellt, im Gegensatz zu synthetischer Luft, bei der sich die Pulssequenz im Verlauf der Messzeit verändert hat. Grund dafür ist der Wechsel zwischen der springenden Bewegung des Spans und dem Firefly-Effekt. Die Einsetzspannungen und die Höhe der Ladungen, sowie die Anzahl der TE-Impulse sind beinahe gleich. Eine Übersicht des Vergleichs ist in der Tabelle 6-23 aufgelistet.

Tabelle 6-23: Gegenüberstellung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen und Einsetzspannung eines springenden Partikels (Span) bei $p = 0,5$ MPa synthetischer Luft und $p = 0,1$ MPa SF₆.

Springendes Partikel - Span								
Gas	Gleichspannung mit positiver Polarität				Gleichspannung mit negativer Polarität			
	$ q_{\min} $	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	U_E	$ q_{\min} $	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	U_E
	pC	pC	pC	kV	pC	pC	pC	kV
SF₆ mit 0,1 MPa	1,0	13,2	184,1	20	1,0	50,4	303,5	-20
O₂/N₂ mit 0,5 MPa	1,0	20,0	159,3	21	1,0	21,7	323,3	-21

6.5 Teilentladungsverhalten mit synthetischer Luft bei hohem Druck von $p = 0,95$ MPa

Allgemeines

Die Untersuchung der typischen TE-Defekte hat gezeigt, dass sich die größten Abweichungen zwischen SF_6 und synthetischer Luft bei der Einsetzspannung und der Höhe der Amplituden der Ladungen bei der Spitze-Platte-Anordnung ergaben. Aus diesem Grund wurde eine Messung bei hohem Gasdruck und synthetischer Luft durchgeführt. Da der Defekt Spitze auf der Hochspannungselektrode und Spitze auf Erdpotential näherungsweise identische Ergebnisse aufwiesen, wurde nur die Anordnung mit der Spitze auf der Hochspannungselektrode untersucht. Dafür wurde die Anordnung der Nadel und Platte aus der Testzelle (Bild 6-3) in einen Prüfkessel eingebaut. Der Abstand zwischen Spitze und Platte wurde auf die gleiche Schlagweite ($s = 10$ mm) eingestellt. Der Prüfkessel und die Anordnung sind im Bild 6-45 dargestellt.

Der Prüfkessel kann bis 1,5 MPa betrieben werden [40, 41]. Für die Messung wurde der Prüfkessel mit einem Druck von 0,95 MPa (relativen Druck) beaufschlagt. Der verwendete Druckminderer von Air Liquide (Unicontrol 500, Sauerstoff) ist für einen maximalen Arbeitsdruck von 1 MPa ausgelegt.

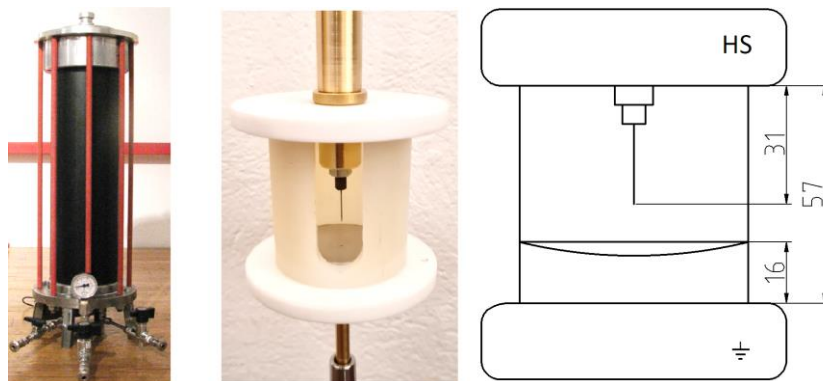
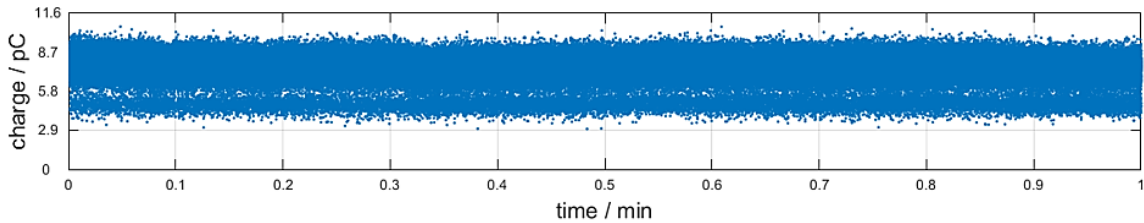


Bild 6-45: Prüfkessel für $p = 0,95$ MPa mit der Spitze auf der Hochspannungselektrode und einer eingestellten Schlagweite von $s = 10$ mm.

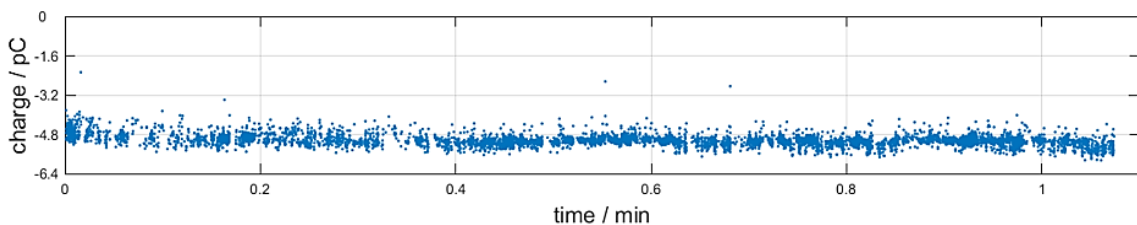
Spitze auf der Hochspannungselektrode bei Gleichspannung mit positiver bzw. negativer Polarität bei einem Gasdruck von $p = 0,95$ MPa

Für Gleichspannung mit positiver Polarität hat sich eine Einsetzspannung von $U_{E, O_2/N_2} = 12$ kV ergeben. Im Bild 6-46a sind die detektierten Ladungen in Abhängigkeit der Messzeit dargestellt. Die zeitlichen Abstände der aufgetreten TE-Impulse sind deutlich niedriger und die Impulswiederholrate um ein Vielfaches höher als bei Gleichspannung mit negativer Polarität (Bild 6-46b).

Bei Gleichspannung mit negativer Polarität sind vereinzelt Teilentladungen bereits bei $U_{E, O_2/N_2} = -11$ kV aufgetreten. Erst bei einer Spannung von $U_{E, O_2/N_2} = -13$ kV konnten ausreichend Messdaten aufgenommen werden, um die NoDi*-Diagramme zu konstruieren. Im Bild 6-46b treten die TE-Impulse seltener und mit niedrigerer Amplitude der Ladungen auf.



(a) Gleichspannung mit positiver Polarität mit einer Einsetzspannung von $U_E = 12$ kV und einer Messzeit von 1 Minute



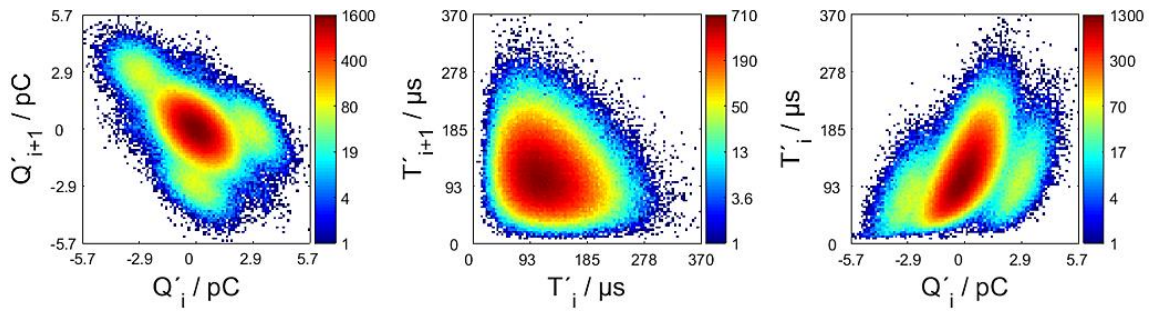
(b) Gleichspannung mit negativer Polarität mit einer Einsetzspannung von $U_E = -13$ kV und einer Messzeit von ca. 1,1 Minuten

Bild 6-46: Ladung q in Abhängigkeit der Messzeit t mit der Spitze auf der Hochspannungselektrode bei synthetischer Luft mit einem Gasdruck von $p = 0,95$ MPa bei (a) Gleichspannung mit positiver Polarität und (b) Gleichspannung mit negativer Polarität.

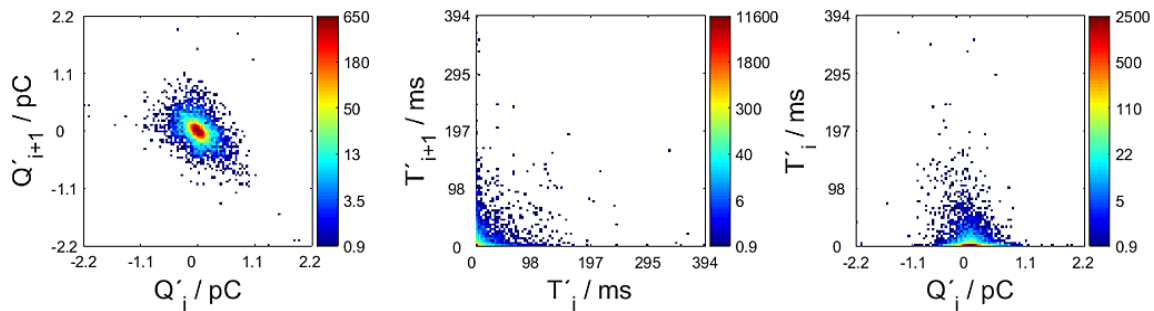
NoDi*-Diagramme einer Spitze auf der Hochspannungselektrode bei $p = 0,95$ MPa

Im NoDi*_Q-Diagramm lässt sich bei synthetischer Luft und Gleichspannung mit positiver Polarität das Muster eines Sechsecks bzw. einer Ellipse erkennen, mit dem Ansatz eines Dreiecks (Bild 6-47a). Die Häufigkeitspunkte sind breit verteilt, da alle übrigen Bereiche des NoDi*-Diagrammes gefüllt werden, mit Ausnahme der monoton steigenden und fallenden Bereiche der Impulsfolge. Die Häufigkeitspunkte im NoDi*_T- und NoDi*_QT-Diagramm sind ebenfalls breit gestreut.

Für Gleichspannung bei negativer Polarität zeigt das Muster im NoDi*_Q-Diagramm eine Ähnlichkeit zur Form eines Dreiecks (Bild 6-47b). Das NoDi*_T-Diagramm besitzt einen konzentrierten Häufigkeitspunkt.



(a) Gleichspannung mit positiver Polarität mit einer Einsetzspannung von $U_E = 12$ kV und einer Messzeit von 1 Minute



(b) Gleichspannung mit negativer Polarität mit einer Einsetzspannung von $U_E = -13$ kV und einer Messzeit von ca. 1,1 Minuten

Bild 6-47: NoDi*-Diagramme Spitze auf der Hochspannungselektrode mit synthetischer Luft bei einem Gasdruck von $p = 0,95$ MPa bei (a) Gleichspannung mit positiver Polarität und (b) Gleichspannung mit negativer Polarität.

Zusammenfassung und Diskussion der Messergebnisse

Die aufgenommenen Ergebnisse sind in der Tabelle 6-24 aufgelistet. Für synthetische Luft wurde der Gasdruck verdoppelt, jedoch sind die Einsetzspannungen nur geringfügig gestiegen. Der Verlauf der Einsetzspannung mit steigendem Gasdruck für SF_6 und synthetische Luft ist im Bild 6-48 dargestellt. Zu erkennen ist der flache Anstieg der Einsetzspannungen von synthetischer Luft bei erhöhtem Gasdruck. Auch die maximale Amplitude der Ladungen und die im Durchschnitt aufgetretenen Ladungen sind nur unwesentlich geringer als bei einem Gasdruck von $p = 0,5$ MPa.

Tabelle 6-24: Auflistung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen bei Einsetzspannung und weitere Spannungspegel der Spitze-Platte-Anordnungen für synthetische Luft und einem Gasdruck von $p = 0,95$ MPa.

Spitze auf der Hochspannungselektrode bei hohem Druck								
Gleichspannung mit positiver Polarität				Gleichspannung mit negativer Polarität				O ₂ /N ₂
U_E	$ q_{\min} $	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	U_E	$ q_{\min} $	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	Druck
kV	pC	pC	pC	kV	pC	pC	pC	MPa
12	3,0	7,6	10,6	-13	2,3	5,0	5,9	0,95
13	2,9	7,7	11,0	-14	2,6	5,3	6,4	0,95
14	2,4	8,3	12,3	-15	2,9	6,4	9,1	0,95
15	2,2	8,3	13,3	-16	2,1	6,7	10,4	0,95

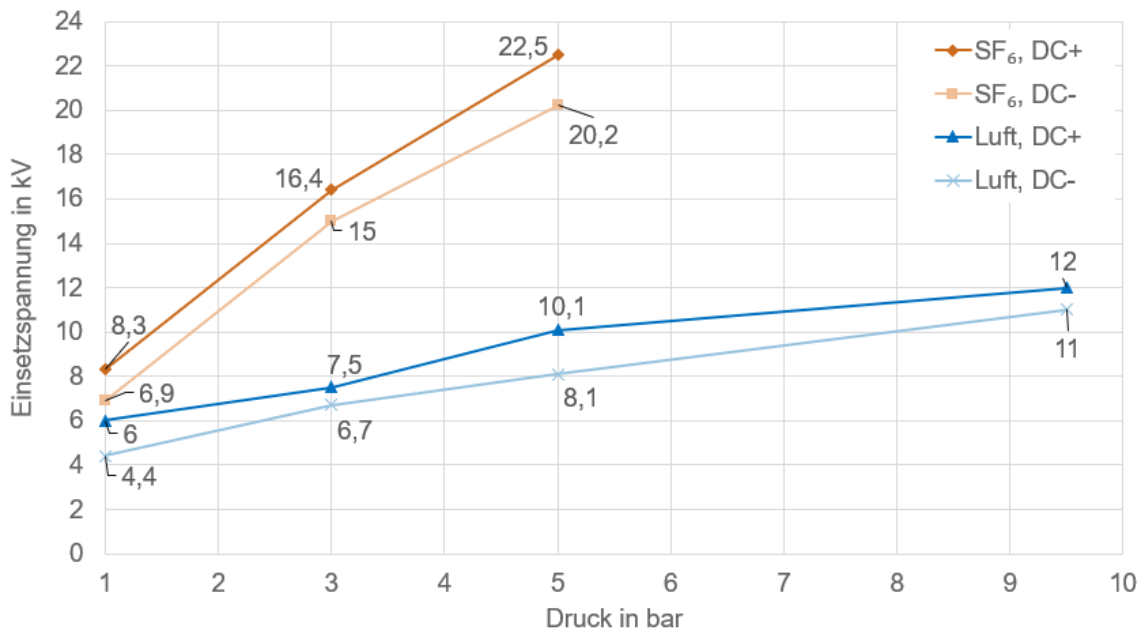


Bild 6-48: Aufgenommene Einsetzspannungen bei Gleichspannung mit positiver bzw. negativer Polarität bei SF₆ und synthetischer Luft in Abhängigkeit des Gasdrucks.

6.6 Automatische Klassifizierung der Defekte

Allgemeines

In einer weiteren Masterarbeit am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement der TU Graz geht es um die automatische Klassifizierung der TE-Defekte mit *Machine Learning* [42]. Die verwendeten Algorithmen wurden mit Messdaten, aufgenommen bei dem Isoliergas SF₆, trainiert. In dieser Masterarbeit soll überprüft werden, ob die Algorithmen bei synthetischer Luft als Isoliergas ebenfalls den richtigen Defekt zuordnen können. Es wurden zufällig ausgewählte Pulssequenzen von jedem Defekt bei unterschiedlichem Gasdruck und ermittelter Einsetzspannung untersucht. Die Messdateien des TE-Messsystems Omicron MPD 600 mussten hierzu an die Algorithmen angepasst werden. Dafür wurden die Daten (z. B. Freies_Potential_Gleichspannung-_Luft_0,3MPa.txt) in Teilstücke mit je 500 Impulsen aufgeteilt. Das letzte Teilstück mit einer Größe < 500 Impulse wurde ebenfalls verwendet, da ansonsten beispielsweise beim Defekt „Freies Potential“ keine auswertbare Datei vorhanden ist. Der Grund dafür liegt an der geringen Anzahl der aufgetretenen TE-Impulse. Die Aufteilung der Teildatensätze sind in der Tabelle 6-25 dargestellt. Diese Messdaten wurden zufällig ausgewählt und beinhalten Prüfdrücke von $p = 0,3 \text{ MPa}$ und $p = 0,5 \text{ MPa}$.

Tabelle 6-25: Untersuchte TE-Defekte mit der Aufteilung der Datensätze.

TE-Defekt	Messdateien	Teildatensätze
Freies Potential	2	2
Gleitentladungen	2	3
Springende Partikel (Kugel)	1	164
Springende Partikel (Draht und Span)	3	437
Spitze-Platte-Anordnung	4	2553

Auswertung der Klassifikationsgenauigkeit

Die oben beschriebenen Teildatensätze wurden mit Hilfe der SF₆-trainierten Algorithmen ausgewertet. Es erfolgte eine Auswertung mit einer linearen Support Vector Machine (SVM) sowie einem mit Tensorflow-trainierten Neuronalen Netz (NN). Es wird angegeben mit welcher Wahrscheinlichkeit der Teildatensatz dem richtigen Defekt zugeordnet werden konnte. Die Ergebnisse der Zuordnungen für die lineare Support Vector Machine ist im Bild 6-49 und für das Neuronale Netz im Bild 6-50 dargestellt.

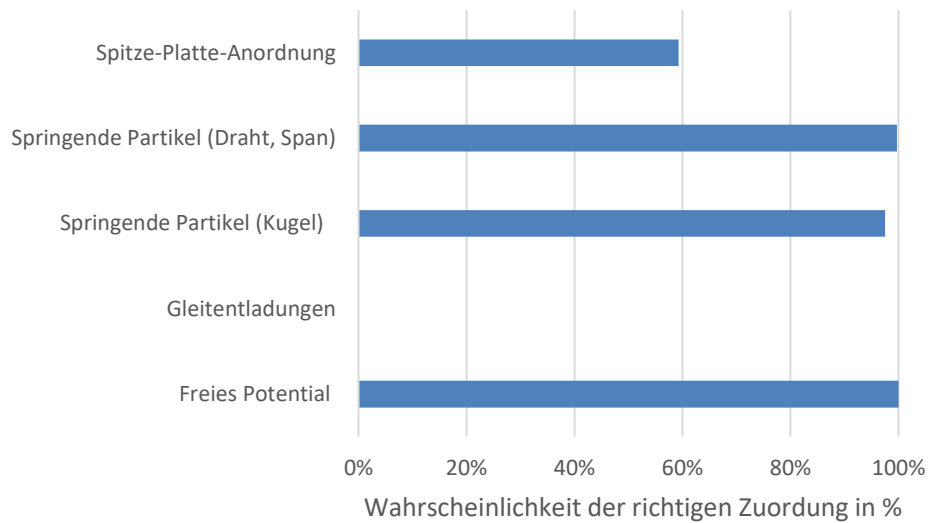


Bild 6-49: Auswertung der Teildatensätze der jeweiligen Defekte mit einer linearen Support Vector Machine (SVM).

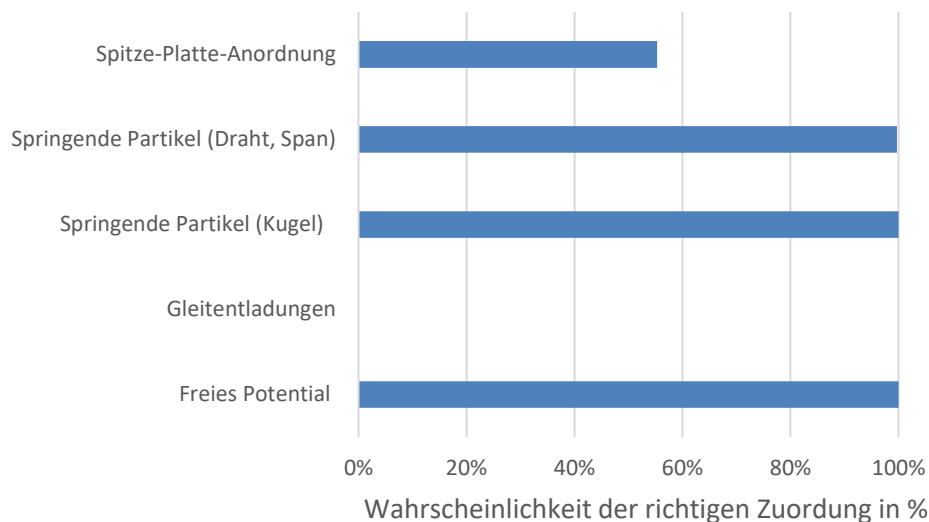


Bild 6-50: Auswertung der Teildatensätze der jeweiligen Defekte mit einem Tensorflow-trainierten Neuronalen Netz (NN).

Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Die Auswertung mit SVM bei synthetischer Luft im Bild 6-49 zeigt, dass die springenden Partikel und das freie Potential eindeutig zugeordnet werden können. Die Spitze-Platte-Anordnung wird mit ca. 60 % ebenfalls korrekt erkannt. Der Defekt Gleitentladungen konnte nicht zugeordnet werden.

Bei der Auswertung der Defekt bei synthetischer Luft mit NN (Bild 6-50) konnten ebenfalls die springenden Partikel und das freie Potential eindeutig erkannt werden. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 55 % konnte ebenso die Spitze-Platte-Anordnung richtig identifiziert werden. Die Messdaten für Gleitentladungen waren ebenfalls nicht zuordbar.

7 Zusammenfassung

Die Nachfrage nach elektrischer Energie spielt in der heutigen Zeit eine große Rolle. Dabei entstehen neue Herausforderungen an die Übertragung der Energie über weite Strecken, für die HGÜ-Anlagen und deren Betriebsmittel bei hoher Gleichspannung. Die Teilentladungsmessung spielt eine zentrale Rolle in der Beurteilung von elektrischen Betriebsmitteln, um einen zuverlässigen Betrieb zu gewährleisten. Zum Schutz der Umwelt müssen alternative Isoliergase für den Betrieb von GIS- und GIL-Anlagen zum Einsatz kommen.

Alternative Isoliergase für GIS- und GIL-Systeme

- Novec 4710 und Novec 5110 erreichen eine höhere elektrische Festigkeit als SF₆. Beide Isoliergase weisen ein deutlich geringeres Treibhauspotential auf. Für den Betrieb bei tiefen Umgebungstemperaturen und erhöhtem Druck müssen die Novec-Gase mit einem Trägergas gemischt werden.
- Beim Gasmisch g³ wird Novec 4710 mit dem Trägergas CO₂ gemischt. Es wird abhängig vom Mischungsverhältnis eine etwa 85 % bis 100 % elektrische Festigkeit von SF₆ erreicht bei einem GWP von < 760.
- Air Plus ist eine Kombination aus Novec 5110 mit CO₂ und O₂ oder mit synthetischer Luft (O₂/N₂). Mit dieser Gasmischung wird eine gleichwertige elektrische Festigkeit wie SF₆ erreicht bei einem GWP von < 1.
- Synthetische Luft hat eine elektrische Festigkeit von ca. 40 % verglichen mit SF₆. Das Treibhauspotential ist Null und es sind im Gegensatz zu den anderen Alternativgasen weder C-Gase noch F-Gase enthalten. Auch mögliche Steuer- oder Kompensationskosten für CO₂ entfallen bei der Verwendung von synthetischer Luft, sowie ein Gas-Recycling ist nicht notwendig

Teilentladungsverhalten von typischen Defekten in mit synthetischer Luft isolierten DC-Systemen:

Für die Messung von typischen TE-Defekten wurden TE-Messungen an Testzellen mit SF₆ und synthetischer Luft gemäß der Norm IEC 60270 durchgeführt. Die dabei aufgetretenen TE-Impulse wurden mit dem Messsystem MPD 600 der Firma Omicron aufgezeichnet und mit der Software *PDDC-Analyzer 3.0*, in Form von Pulssequenzen und NoDi*-Diagrammen, ausgewertet. Für die unterschiedlichen Defekte konnten die charakteristischen Muster für SF₆ und synthetische Luft in Form der NoDi*-Diagramme dargestellt werden.

Spitze-Platte-Anordnung

- Die Einsetzspannungen von SF₆ und synthetischer Luft sind mit steigendem Gasdruck angestiegen. Die ermittelten Einsetzspannungen waren bei SF₆ deutlich höher als bei synthetischer Luft.
- Ein Polaritätswechsel oder die Anordnung umzudrehen (Spitze auf Erdpotential), ergab nur eine minimale Änderung der Einsetzspannungen. Es wurden deutlich mehr TE-Impulse bei synthetischer Luft detektiert verglichen mit SF₆ und unabhängig vom Gasdruck.

- Die Amplituden der aufgetretenen Ladungen waren bei synthetischer Luft deutlich höher als bei SF₆. Obwohl es zu einer beträchtlichen Reduzierung der Amplituden der Ladungen bei erhöhtem Gasdruck gekommen ist.
- Die NoDi*-Diagramme bei SF₆ zeigen über alle Gasdrücke das Muster eines Dreiecks auf. Bei synthetischer Luft hat sich die Form des Musters, durch die breite Streuung der Amplituden im NoDi*-Q-Diagramm mit dem Anstieg des Gasdrucks verändert. Das Muster eines Sechsecks bzw. einer Ellipse ($p = 0,1$ MPa) hat sich mit steigendem Gasdruck zu einem Dreieck ($p = 0,5$ MPa) entwickelt.
- Bei annähernd gleicher elektrischer Festigkeit und einem Vergleich der Diagramme bei unterschiedlichem Gasdruck (SF₆ bei $p = 0,1$ MPa und synthetische Luft bei $p = 0,5$ MPa), sind die Muster im NoDi*-Q-Diagramme (mit der Form eines Dreiecks) näherungsweise übereinstimmend. Die Pegel der Einsetzspannungen und TE-Impulse besitzen einen ähnlichen Wertebereich.

Freies Potential

- Die Einsetzspannungen von SF₆ ist mit steigendem Gasdruck bei positiver und negativer Polarität konstant. Für synthetische Luft hat sich bei $p = 0,5$ MPa die gleiche Einsetzspannung eingestellt wie bei $p = 0,5$ MPa SF₆.
- Typisch für diesen Defekt sind die vielen TE-Impulse mit Amplituden im fC-Bereich mit vereinzelt Entladungen bis $q = 800$ pC.
- Für die NoDi*-Diagramme ergibt sich bei beiden Isoliergasen das Muster von feinen Linien und Strukturen. Das Muster von feinen Strukturen bzw. Linien konnte bei allen Gasdrücken bestimmt werden.
- Beim Vergleich bei annähernd gleicher elektrischer Festigkeit konnte bei den NoDi*-Diagrammen kein nennenswerter Unterschied festgestellt werden. Die maximale Amplitude der Ladungen war bei synthetischer Luft doppelt so groß wie bei SF₆.

Gleitentladungen

- Die Einsetzspannungen der Gießharzplatte bei SF₆ und synthetischer Luft liegen im gleichen Bereich. Für die Hartpapierplatte haben sich die Einsetzspannungen bei SF₆ deutlich reduziert.
- Die Entladungshäufigkeit ist bei Gleichspannung mit negativer Polarität höher als bei positiver Polarität.
- Die NoDi*-Diagramme weisen für SF₆ und synthetische Luft für alle Gasdrücke feine Strukturen bzw. Linien mit einer breiteren Streuung um den Ursprung auf.
- Beim Vergleich bei annähernd gleicher elektrischer Festigkeit ergab sich näherungsweise eine gleiche Einsetzspannungen und ähnliche Werte der durchschnittlichen Ladungen bei Gleichspannung mit positiver und negativer Polarität für die Gießharz- und Hartpapierplatte.

Freie metallische Partikel

- Die Einsetzspannung, welche für diesen Defekt auch als Abhebespannung bezeichnet wird, konnte für SF₆ bei allen Gasdrücken bestimmt werden. Bei synthetischer Luft und $p = 0,1$ MPa ist es bei der Kugel, dem Drahtstück und dem Span zum Durchschlag gekommen.

- Es konnten zwei Effekte beobachten werden: das Springen des Partikels zwischen den Elektroden und dem Firefly-Effekt bei Gleichspannung mit negativer Polarität, bei dem das Partikel eine „tanzende“ Bewegung an der Elektrode vollführt.
- Die springende Bewegung oder das Auftreten des Firefly-Effekts ist von der Geometrie des Partikels und dem Gasdruck abhängig. Der Firefly-Effekt konnte nur bei einem scharfkantigen Partikel und einem Gasdruck von $p = 0,1$ MPa bei Gleichspannung mit negativer Polarität beobachtet werden.
- Die NoDi*-Diagramme weisen ausgeprägte Häufigkeitspunkte in bestimmten Bereichen auf. Beim Firefly-Effekt ergibt sich eine Überlagerung der feinen Linien bzw. Strukturen wie beim freien Potential und dem Dreieck einer Spitze-Platte-Anordnung.
- Der Vergleich bei näherungsweise gleicher elektrischer Festigkeit zeigt, dass die Ladungspegel der TE-Impulse im Durchschnitt bei SF₆ und synthetischer Luft nahe beieinander liegen. Die maximalen Amplituden der Ladungen sind bei synthetischer deutlich höher als bei SF₆.

Bei den untersuchten typischen Defekten ergab sich der größte Unterschied zwischen synthetischer Luft und SF₆ bei den Ladungspegeln und NoDi*-Diagrammen beim Defekt der Spitze-Platte-Anordnung. Aus diesem Grund wurde eine Messung mit synthetischer Luft und hohem Druck $p = 0,95$ MPa durchgeführt.

TE-Verhalten mit synthetischer Luft bei hohem Druck

- Es konnte nur eine unwesentlich höhere Einsetzspannung beim doppelten Gasdruck bei synthetischer Luft bestimmt werden.
- Eine Änderung des Musters im NoDi*-Q-Diagramm vom Sechseck bzw. einer Ellipse zu einem Dreieck.
- Reduzierung der maximalen Amplituden der Ladungen bei der Einsetzspannung.

Das Monitoring der auftretenden Teilentladungen spielt bei HVDC GIS- und GIL-Anlagen eine große Rolle. Die Aufgabe der Überwachung und Analysierung von Teilentladungen wird in naher Zukunft vollautomatisiert auch bei Gleichspannung stattfinden. Es gibt bereits auf SF₆-trainierte Algorithmen, die diese Aufgabe übernehmen können. Es stellt sich die Frage, ob die Defekte bei der Verwendung von synthetischer Luft mit dem SF₆-trainierten Algorithmus richtig zugeordnet werden können.

Automatische Klassifizierung der Defekte bei synthetischer Luft

- Die Messergebnisse von synthetischer Luft wurden mit dem auf SF₆-trainierten Algorithmen SVM (Support Vector Machine) und NN (Neuronalen Netz) klassifiziert.
- Die Defekte freies Potential und springende Partikel (Kugel, Drahtstück und Span) konnten mit mehr als 97 % exakt zugeordnet werden. Mit einer Wahrscheinlichkeit von mehr als 55 % konnte ebenfalls die Spitze-Platte-Anordnung (wegen der breiten Streuung der TE-Impulse) richtig erkannt werden.
- Der Defekt Gleitentladungen konnte weder mit dem SVM- noch mit dem NN-Algorithmus erkannt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] DIN EN 60270: *Hochspannungs-Prüftechnik – Teilentladungsmessung*. 2016
- [2] Pirker: *Messung und Darstellung von Teilentladungen bei Gleichspannung zur Identifikation von Defekten gasisolierter Systeme*. Dissertation, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, Technische Universität Graz, 2020
- [3] Küchler: *Hochspannungstechnik – Grundlagen – Technologie – Anwendungen*. Springer-Verlag, 4. Auflage, 2017
- [4] Schon: *Hochspannungsmesstechnik – Grundlagen – Messgeräte – Messverfahren*. Springer-Verlag, 2016
- [5] Fromm: *Partial Discharge and Breakdown Testing at High DC-Voltage*. Dissertation, Delft University of Technology, 1995
- [6] Schober: *Software zur Erstellung von Live NoDi*-Diagrammen bei Teilentladungsmessungen mit Gleichspannung*. Masterarbeit, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, Technische Universität Graz, 2018
- [7] Pirker, Schichler: *Partial Discharges at DC Voltage – Measurement and Pattern Recognition*. International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Xi'an, China, 2016
- [8] Siemens Energy: *Gleichspannungsschaltanlagen für bis zu 550 kV, 5000 A: 8DQ1 Gleichspannung: Maximale Leistung, minimaler Platzbedarf*. Produktbeschreibung, 2019
- [9] Oeding, Oswald: *Elektrische Kraftwerke und Netze*. Springer Verlag, 7. Auflage, 2011
- [10] Schober, Schichler: *HVDC GIS/GIL – Classification of PD Defects using NoDi* Pattern and Machine Learning*. International Symposium on High Voltage Engineering, Xi'an, China, 2020
- [11] Schober, Schichler: *Feature Analysis for Classification of Partial Discharge at DC Voltage with Machine Learning*. International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Phuket, Thailand, 2020
- [12] CIGRE JWG 33/23.12: *Insulation Co-ordination of GIS: Return of Experience – On Site Test and Diagnostic Techniques*. Electra No. 176, 1998
- [13] Pirker, Schichler: *Partial Discharges of Defects in Different Insulating Gases: N₂, CO₂, Dry Air, and SF₆*. International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials, Xi'an, China, 2018
- [14] Pirker, Schichler: *Partial Discharge Measurement at DC Voltage – Evaluation and Characterization by NoDi* Pattern*. Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 25, No. 3, 2018
- [15] CIGRE WG D1.03: *Risk Assessment on Defects in GIS based on PD Diagnostics*. CIGRE Technical Brochure 525, 2013
- [16] CIGRE WG D1.37: *Guidelines for Partial Discharge Detection using Conventional (according IEC 60270) and Unconventional Methods*, Cigre Technical Brochure 662, 2016
- [17] Franck, Rabie, Burges, Döring, Hussy, Rhiemeier: *Konzept zur SF₆-freien Übertragung und Verteilung elektrischer Energie*. Ecofys, 2018

- [18] Diessner, Trump: *Free Conducting Particles in a Coaxial Compressed-Gas-Insulated System*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-89, No. 8, pp. 1970-1978, 1970
- [19] Priebe: *Einsatz von alternativen Isoliergasen in Hochspannungsschaltanlagen*. <https://www.strommarkttreffen.org/2016-1-Priebe-Einsatz-von-alternativen-Gasen-in-Hochspannungsschaltanlagen.pdf> [Stand: 03.06.2022]
- [20] Rabie, Hussy: *Einordnung von Alternativen zum Einsatz von SF₆ in der elektrischen Energieversorgung*. Ecofys, 2016
- [21] Glomb, Göppel, Pilzecker: *Gasmischungen und Gase mischen*. DILO White Paper, Deutschland, 2020
- [22] 3M Company: *Technische Daten, 3MTM NovecTM 4710 Isoliergas*, Datenblatt, 2021
- [23] 3M Company: *Technische Daten, 3MTM NovecTM 5110 Isoliergas*, Datenblatt, 2021
- [24] Schichler: *Application of SF₆-free High Voltage Circuit Breakers*. Omicron Diagnostic Forum, online, 2021
- [25] Diggelmann, Tehlar, Chang, Zache: *Air PlusTM – Eine Alternative zu SF₆ als Isolations- und Schaltmedium in elektrischen Schaltanlagen*. ABB Review 2, 2016
- [26] Siemens Energy: *Siemens Energy Blue High-Voltage Products, Sustainable switchgear technology for a CO₂ neutral future*. Produktbeschreibung, 2021
- [27] Hivoduct: *Technische Daten, Druckluftkabel Baureihe G10-Serie für 2500 A*. Datenblatt, 2021
- [28] Köhler: *Spreewind – Blue Portfolie SF₆-freie Hochspannungstechnik*. Siemens AG, 2018
- [29] Rossner, Hopf: *Elektrische Festigkeit von alternativen Isoliergasen bei hohem Druck*. Power and Energy Student Summit (PESS), Dortmund, Deutschland, 2015
- [30] Trichel: *The Mechanism of the Positive Point-to-Plane Corona in Air at Atmospheric Pressure*. Physical Review, Vol. 55, No. 4, pp. 382-390, 1939
- [31] Trichel: *The Mechanism of the Negative Point to Plane Corona Near Onset*. Physical Review, Vol. 55, No. 12, pp. 1078-1084, 1938
- [32] Madhar: *Defect Identification through Partial Discharge Analysis on HVDC: Partial Discharge Fingerprinting*. Dissertation, Delft University of Technology, 2021
- [33] CIGRE WG D1.51: *Dry Air, N₂, CO₂ and N₂/SF₆ Mixtures for Gas-Insulated Systems*. CIGRE Technical Brochure 730, 2018
- [34] Hopf: *Elektrische Festigkeit von SF₆ und alternativen Isoliergasen (Luft, CO₂, N₂, O₂ und C₃F₇CN-Gemisch) bis 2,6 MPa*. Dissertation, Universitätsverlag Ilmenau, 2020
- [35] Wenger, Madhar, Beltle: *Simultaneous electrical, UHF, current and optical PD measurement on floating potential under DC stress*. IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Richland, WA, USA, 2019
- [36] Enloe, McLaughlin, Vandyken, Kachner: *Mechanisms and Responses of a Single Dielectric barrier Plasma Actuator: Geometric Effects*. AIAA Journal 42.3, pp. 595-604, 2004
- [37] Madhar, Mor, Mraz, Ross: *Study of DC partial discharge on dielectric surfaces – Mechanism and similarities to AC*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 126, Part B, 2021
- [38] Asano, Anno, Higashiyama: *The Behavior of Charged Conducting Particles in Electric Fields*. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, No. 3, pp. 679-686, 1997

- [39] Cooke, Wootton, Cookson: *Influence of Particles on AC and DC Electrical Performance of Gas Insulated Systems at Extra-High-Voltage*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 96, No. 3, pp. 768-777, 1977
- [40] Imamovic: *Umweltfreundliche Isoliergase für gasisolierte Leitungen zur Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung*. Dissertation, Technische Universität Graz, 2012
- [41] Straka: *Alternative Isoliergase für Anwendungen bei Gleichspannungsbeanspruchung*. Masterarbeit, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, Technische Universität Graz, 2013
- [42] Brandl: *Anwendung innovativer Klassifikationsalgorithmen für die online TE-Identifikation bei Gleichspannung*. Masterarbeit, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, Technische Universität Graz, 2022

Anhang

Abkürzungsverzeichnis

AC	Wechselspannung (alternating current)
AKV	Ankoppelvierpol
CD	Coupling Device
CO ₂	Kohlendioxid
DC	Gleichspannung (direct current)
GIL	Gasisolierte Leitung (gas insulated line)
GIS	Gasisolierte Schaltanlage (gas insulated switchgear)
HGÜ	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung
HVDC	Hochspannungs-Gleichstrom (high voltage direct current)
N ₂	Stickstoff
NoDi	Normalisiert Differenziert
O ₂ /N ₂	Synthetische Luft
PD	Partial Discharge
PRPD	Phase Resolved Partial Discharge
SF ₆	Schwefelhexafluorid
TE	Teilentladung(en)

Bilderverzeichnis

Bild 2-1: Einsetz- und Durchschlagsspannung in Abhängigkeit der Homogenität des elektrischen Feldes sowie (a) bei einer Spitze-Platte-Anordnung bei Gleichspannung mit positiver und (b) mit negativer Polarität [3].	4
Bild 2-2: Teilentladungsquellen in Gasen durch (a) Spitzen, Kanten, dünne Drähte und freie metallische Partikel und (b) Oberflächenentladungen als Glimm- und Streamer-Entladungen [3].	5
Bild 2-3: Teilentladungsquellen in Flüssigkeiten durch (a) Spitzen und freie metallische Partikel, Gasblasen und Gasschichten und (b) Gleitentladungen, Faserbrücken und tangentielle Überbeanspruchung [3].	6
Bild 2-4: Teilentladungsquellen in festen Isolierstoffen durch (a) luftgefüllte Hohlräume mit und ohne Kontakt der Elektrode, (b) Risse und Spalten, (c) Delamination an faserverstärktem Material, (d) „water trees“ und Hohlräume an Grenzflächen [3].	7
Bild 3-1: TE-Impuls im Zeit- und Frequenzbereich: (a) idealisierter Stromimpuls mit Anstiegszeit T_A und Rückenhalbwertszeit T_R und (b) Amplitudendichte $F(f)$ für drei verschiedene Werte [4].	8
Bild 3-2: Teilentladungspulssequenz bei Gleichspannung mit der Amplitude q_i und dem zeitlichen Auftreten t_i [2].	9
Bild 3-3: Prüfkreis für die Teilentladungsmessung bei Wechselspannung mit dem Koppelkondensator C_k und der Koppeleinheit CD in Serie nach IEC 60270 [1].	10
Bild 3-4: PRPD-Pattern einer Spitze-Platte-Anordnung bei N_2 gemessen bei $UAC = 8 \text{ kV}$ über eine Dauer von 1 Minute bei $p = 0,5 \text{ MPa}$ relativem Druck [6].	11
Bild 3-5: $Q(t)$ -Diagramm der scheinbaren Ladung q der einzelnen Teilentladungsimpulse über eine Messzeit von 30 Minuten [1].	12
Bild 3-6: Akkumulierte, scheinbare Ladung über eine Messzeit von 30 Minuten [1].	12
Bild 3-7: Balkendiagramm für die Teilentladungsimpulsanzahl m für die Größe der scheinbaren Ladung q_m , wenn ein bestimmter Grenzwert überschritten wird [1].	13
Bild 3-8: Erstellen eines NoDi*-Diagrammes aus den Amplitudenunterschieden der Ladungen und den zeitlichen Abständen der Impulse [2].	14
Bild 3-9: NoDi*-Diagramme bei Gleichspannung mit positiver Polarität mit (a) SF_6 und (b) synthetischer Luft.	14
Bild 4-1: (a) Grundsätzlicher Aufbau einer gasisolierten Schaltanlage und (b) mögliche auftretende Defekte [6].	16
Bild 4-2: Fehlerstatistik in gasisolierten Schaltanlagen nach [12].	16
Bild 4-3: Querschnitt eines gasisolierten Systems mit den eingezeichneten typischen Defekten nach [16].	18
Bild 5-1: Elektrische Festigkeit E_d von synthetischer Luft und SF_6 in Abhängigkeit des Drucks p in einem quasihomogenen Feld [29].	24
Bild 6-1: Messschaltung für die TE-Messung bei Gleichspannung mit positiver und	

negativer Polarität nach IEC 60270.....	25
Bild 6-2: Realer Aufbau der Messschaltung im Labor mit Hochspannungstransformator, Einweggleichrichter, Glättungskondensator, ohmschem Spannungsteiler mit dem TE-Messsystem, Koppelkondensator und einer Testzelle (von rechts nach links).....	26
Bild 6-3: Spitze-Platte-Anordnung in der gasisolierten Testzelle mit der eingestellten Schlagweite von $s = 10 \text{ mm}$	28
Bild 6-4: Anordnung des freien Potentials in der gasisolierten Testzelle. Für die Messung wurde die Testzelle umgedreht (Bild 6-30).....	28
Bild 6-5: Gasisolierte Testzelle für die Messung des springenden Partikels.....	28
Bild 6-6: Testzellen-Anordnung für Gleitentladungen mit einer Gießharz- und Hartpapierplatte.	28
Bild 6-7: Spannungsfahrt der TE-Messung mit variabler Messzeit ($t_i = 10 \text{ Sekunden bis } 45 \text{ Minuten}$) pro Spannungsstufe je nach Defektyp.	29
Bild 6-8: Ladung q in Abhängigkeit der Messzeit t einer Spitze auf der Hochspannungselektrode bei Gleichspannung mit positiver Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,1 \text{ MPa}$ bei (a) SF ₆ und (b) synthetischer Luft.....	31
Bild 6-9: NoDi*-Diagramme einer Spitze auf der Hochspannungselektrode bei Gleichspannung mit positiver Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,1 \text{ MPa}$ bei Einsetzspannung bei (a) SF ₆ und (b) synthetischer Luft.....	32
Bild 6-10: Ladung q in Abhängigkeit der Messzeit t einer Spitze auf der Hochspannungselektrode bei Gleichspannung mit negativer Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,1 \text{ MPa}$ bei (a) SF ₆ und (b) synthetischer Luft.....	33
Bild 6-11: NoDi*-Diagramme einer Spitze auf der Hochspannungselektrode bei Gleichspannung mit negativer Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,1 \text{ MPa}$ bei Einsetzspannung bei (a) SF ₆ und (b) synthetischer Luft.....	34
Bild 6-12: Ladung q in Abhängigkeit der Messzeit t einer Spitze auf Erdpotential bei Gleichspannung mit positiver Polarität an der Plattenseite und einem Gasdruck von $p = 0,1 \text{ MPa}$ bei (a) SF ₆ und (b) synthetische Luft.	35
Bild 6-13: NoDi*-Diagramme einer Spitze auf Erdpotential bei Gleichspannung mit positiver Polarität an der Plattenseite und einem Gasdruck von $p = 0,1 \text{ MPa}$ bei Einsetzspannung bei (a) SF ₆ und (b) synthetischer Luft.....	36
Bild 6-14: Ladung q in Abhängigkeit der Messzeit t einer Spitze auf Erdpotential bei Gleichspannung mit negativer Polarität an der Plattenseite und einem Gasdruck von $p = 0,1 \text{ MPa}$ bei (a) SF ₆ und (b) synthetischer Luft.	37
Bild 6-15: NoDi*-Diagramme einer Spitze auf Erdpotential bei Gleichspannung mit negativer Polarität an der Plattenseite und einem Gasdruck von $p = 0,1 \text{ MPa}$ bei Einsetzspannung bei (a) SF ₆ und (b) synthetischer Luft.....	38
Bild 6-16: Ladung q in Abhängigkeit der Messzeit t einer Spitze auf der Hochspannungselektrode bei Gleichspannung mit positiver Polarität an der Nadelspitze und einem Gasdruck von $p = 0,3 \text{ MPa}$ bei (a) SF ₆ und (b) synthetischer Luft.	39
Bild 6-17: Ladung q in Abhängigkeit der Messzeit t einer Spitze auf der Hochspannungselektrode bei Gleichspannung mit negativer Polarität an der	

Nadelspitze und einem Gasdruck von $p = 0,3$ MPa bei (a) SF ₆ und (b) synthetischer Luft.	40
Bild 6-18: NoDi*-Diagramme einer Spitze auf der Hochspannungselektrode bei Gleichspannung mit positiver Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,3$ MPa bei Einsetzspannung bei (a) SF ₆ und (b) synthetischer Luft.	41
Bild 6-19: NoDi*-Diagramme einer Spitze auf der Hochspannungselektrode bei Gleichspannung mit negativer Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,3$ MPa bei Einsetzspannung, bei (a) SF ₆ und (b) synthetischer Luft.	42
Bild 6-20: Ladung q in Abhängigkeit der Messzeit t einer Spitze auf Erdpotential bei Gleichspannung mit positiver Polarität an der Plattenseite und einem Gasdruck von $p = 0,3$ MPa bei (a) SF ₆ und (b) synthetischer Luft.	43
Bild 6-21: Ladung q in Abhängigkeit der Messzeit t einer Spitze auf Erdpotential bei Gleichspannung mit negativer Polarität an der Plattenseite und einem Gasdruck von $p = 0,3$ MPa bei (a) SF ₆ und (b) synthetischer Luft.	44
Bild 6-22: NoDi*-Diagramme einer Spitze auf Erdpotential bei Gleichspannung mit positiver Polarität an der Plattenseite und einem Gasdruck von $p = 0,3$ MPa bei Einsetzspannung bei (a) SF ₆ und (b) synthetischer Luft.	45
Bild 6-23: NoDi*-Diagramme einer Spitze auf Erdpotential bei Gleichspannung mit negativer Polarität an der Plattenseite und einem Gasdruck von $p = 0,3$ MPa bei Einsetzspannung bei (a) SF ₆ und (b) synthetischer Luft.	46
Bild 6-24: Ladung q in Abhängigkeit der Messzeit t einer Spitze auf der Hochspannungselektrode bei Gleichspannung mit positiver Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,5$ MPa bei (a) SF ₆ und (b) synthetischer Luft.	47
Bild 6-25: Die Ladung q in Abhängigkeit der Messzeit t einer Spitze auf der Hochspannungselektrode bei Gleichspannung mit negativer Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,5$ MPa bei (a) SF ₆ und (b) synthetischer Luft.	48
Bild 6-26: NoDi*-Diagramme einer Spitze auf der Hochspannungselektrode bei Gleichspannung mit positiver Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,5$ MPa bei Einsetzspannung bei (a) SF ₆ und (b) synthetischer Luft.	49
Bild 6-27: NoDi*-Diagramme einer Spitze auf der Hochspannungselektrode bei Gleichspannung mit negativer Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,5$ MPa bei Einsetzspannung bei (a) SF ₆ und (b) synthetischer Luft.	50
Bild 6-28: Gasdruck in Abhängigkeit der 50 % Durchschlagsspannung (U_{d50}) bei SF ₆ , O ₂ , Luft, N ₂ und CO ₂ [33, 34]	52
Bild 6-29: Vergleich der NoDi*-Q-Diagramme einer Spitze-Platte-Anordnung bei Gleichspannung mit positiver Polarität bei (a) SF ₆ mit $p = 0,1$ MPa und $U_E = 7$ kV und bei (b) synthetischer Luft mit $p = 0,5$ MPa und $U_E = 8,3$ kV.	53
Bild 6-30: (a) Elektrodenanordnung in der Testzelle für die Nachbildung des freien Potentials und (b) eine typische Pulssequenz dieses Defektes.	54
Bild 6-31: Die Ladung q in Abhängigkeit der Messzeit t eines freien Potentials bei Gleichspannung mit positiver Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,1$ MPa bei (a) SF ₆ und (b) synthetischer Luft.	55
Bild 6-32: NoDi*-Diagramme eines freien Potentials mit der Plattenseite auf Hochspannung bei Gleichspannung mit positiver Polarität und einem Gasdruck	

von $p = 0,1$ MPa bei Einsetzspannung bei (a) SF6 und (b) synthetischer Luft.	56
Bild 6-33: Die Ladung q in Abhängigkeit der Messzeit t eines freien Potentials bei Gleichspannung mit positiver Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,5$ MPa bei (a) SF6 und (b) synthetischer Luft.	57
Bild 6-34: NoDi*-Diagramme eines freien Potentials mit der Plattenseite auf Hochspannung bei Gleichspannung mit positiver Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,5$ MPa bei Einsetzspannung bei (a) SF6 und (b) synthetischer Luft.	58
Bild 6-35: Die Ladung q in Abhängigkeit der Messzeit t von Gleitentladungen an einer Gießharzplatte bei Gleichspannung mit positiver Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,1$ MPa, bei (a) SF6 und (b) synthetischer Luft.	61
Bild 6-36: NoDi*-Diagramme von Gleitentladungen an einer Gießharzplatte bei Gleichspannung mit positiver Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,1$ MPa bei Einsetzspannung bei (a) SF6 und (b) synthetischer Luft.	62
Bild 6-37: Die Ladung q in Abhängigkeit der Messzeit t von Gleitentladungen an einer Gießharzplatte bei Gleichspannung mit positiver Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,5$ MPa bei (a) SF6 und (b) synthetischer Luft.	63
Bild 6-38: NoDi*-Diagramme von Gleitentladungen an einer Gießharzplatte bei Gleichspannung mit positiver Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,5$ MPa bei Einsetzspannung bei (a) SF6 und (b) synthetischer Luft.	64
Bild 6-39: Die Ladung q in Abhängigkeit der Messzeit t eines springenden Partikels (Kugel) bei Gleichspannung mit negativer Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,3$ MPa, bei (a) SF6 und (b) synthetischer Luft.	67
Bild 6-40: NoDi*-Diagramme eines springenden Partikels (Kugel) bei Gleichspannung mit negativer Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,3$ MPa bei Einsetzspannung bei (a) SF6 und (b) synthetischer Luft.	68
Bild 6-41: Die Ladung q in Abhängigkeit der Messzeit t eines springenden Partikels (Drahtstück) bei Gleichspannung mit negativer Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,5$ MPa, bei (a) SF6 und (b) synthetischer Luft.	71
Bild 6-42: NoDi*-Diagramme eines springenden Partikels (Drahtstück) bei Gleichspannung mit negativer Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,5$ MPa bei Einsetzspannung, bei (a) SF6 und (b) synthetischer Luft.	72
Bild 6-43: Die Ladung q in Abhängigkeit der Messzeit t eines springenden Partikels (Span) bei Gleichspannung mit negativer Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,3$ MPa bei (a) SF6 und (b) synthetischer Luft und (c) SF6 bei $p = 0,1$ MPa (Firefly-Effekt im Rot eingezeichneten Bereich).	75
Bild 6-44: NoDi*-Diagramme eines springenden Partikels (Span) bei Gleichspannung mit negativer Polarität und einem Gasdruck von $p = 0,3$ MPa bei Einsetzspannung bei (a) SF6 und (b) synthetischer Luft und (c) SF6 bei $p = 0,1$ MPa	76
Bild 6-45: Prüfkessel für $p = 0,95$ MPa mit der Spitze auf der Hochspannungselektrode und einer eingestellten Schlagweite von $s = 10$ mm.	79
Bild 6-46: Die Ladung q in Abhängigkeit der Messzeit t mit der Spitze auf der Hochspannungselektrode bei synthetischer Luft mit einem Gasdruck von $p = 0,95$ MPa bei (a) Gleichspannung mit positiver Polarität und (b) Gleichspannung mit negativer Polarität.	80

Bild 6-47: NoDi*-Diagramme Spitze auf der Hochspannungselektrode mit synthetischer Luft bei einem Gasdruck von $p = 0,95$ MPa bei (a) Gleichspannung mit positiver Polarität und (b) Gleichspannung mit negativer Polarität.	81
Bild 6-48: Aufgenommene Einsetzspannungen bei Gleichspannung mit positiver bzw. negativer Polarität bei SF ₆ und synthetischer Luft in Abhängigkeit des Gasdrucks.	82
Bild 6-49: Auswertung der Teildatensätze der jeweiligen Defekte mit einer linearen Support Vector Machine (SVM).	84
Bild 6-50: Auswertung der Teildatensätze der jeweiligen Defekte mit einem Tensorflow-trainierten Neuronalen Netz (NN).	84

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Kenngrößen von Teilentladungen bei Gleich- und Wechselspannung [6].....	10
Tabelle 5-1: Zusammenfassung der Werte von Schwefelhexafluorid nach [20].....	20
Tabelle 5-2: Übersicht der Werte von Novec™ 4710 nach [20].....	21
Tabelle 5-3: Zeigt einen Überblick der Werte vom Novec™ 5110 nach [20].....	21
Tabelle 5-4: Auflistung der Werte von g ³ nach [20, 24].....	22
Tabelle 5-5: Zusammenfassung der Werte von AirPlus nach [20, 24].....	22
Tabelle 5-6: Auflistung der Werte von synthetischer Luft (Clean Air) nach [20, 24].....	23
Tabelle 6-1: Zusammenfassung der untersuchten freien metallischen Partikel.....	27
Tabelle 6-2: Auflistung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen und der Einsetzspannungen der Spitze auf der Hochspannungselektrode für SF ₆ bei unterschiedlichem Gasdruck.	51
Tabelle 6-3: Auflistung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen und der Einsetzspannungen der Spitze auf Erdpotential für SF ₆ bei unterschiedlichem Gasdruck.	51
Tabelle 6-4: Auflistung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen und der Einsetzspannungen der Spitze auf der Hochspannungselektrode für synthetischer Luft bei unterschiedlichem Gasdruck.	51
Tabelle 6-5: Auflistung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen und der Einsetzspannungen der Spitze auf Erdpotential für synthetischer Luft bei unterschiedlichem Gasdruck.	52
Tabelle 6-6: Gegenüberstellung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen der Spitze auf der Hochspannungselektrode und Einsetzspannung bei $p = 0,5$ MPa synthetischer Luft und $p = 0,1$ MPa SF ₆	53
Tabelle 6-7: Gegenüberstellung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen der Spitze auf Erdpotential und Einsetzspannung bei $p = 0,5$ MPa synthetischer Luft und $p = 0,1$ MPa SF ₆	53
Tabelle 6-8: Auflistung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen und der Einsetzspannungen des freien Potentials für SF ₆ bei unterschiedlichem Gasdruck.	58

Tabelle 6-9: Auflistung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen und der Einsetzspannungen des freien Potentials für synthetische Luft bei unterschiedlichem Gasdruck.	59
Tabelle 6-10: Gegenüberstellung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen des freien Potentials und der Einsetzspannung bei $p = 0,5$ MPa synthetischer Luft und $p = 0,1$ MPa SF ₆	59
Tabelle 6-11: Auflistung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen und der Einsetzspannungen von Gleitentladungen an einer Gießharz- und Hartpapierplatte für SF ₆ bei unterschiedlichem Gasdruck.	65
Tabelle 6-12: Auflistung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen und der Einsetzspannungen von Gleitentladungen an einer Gießharz- und Hartpapierplatte für synthetische Luft bei unterschiedlichem Gasdruck.	65
Tabelle 6-13: Gegenüberstellung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen und Einsetzspannung von Gleitentladungen an einer Gießharzplatte bei $p = 0,5$ MPa synthetischer Luft und $p = 0,1$ MPa SF ₆	66
Tabelle 6-14: Gegenüberstellung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen und Einsetzspannung von Gleitentladungen an einer Hartpapierplatte bei $p = 0,5$ MPa synthetischer Luft und $p = 0,1$ MPa SF ₆	66
Tabelle 6-15: Auflistung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen und der Einsetzspannungen eines springenden Partikels (Kugel) für SF ₆ bei unterschiedlichem Gasdruck.	69
Tabelle 6-16: Auflistung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen und der Einsetzspannungen eines springenden Partikels (Kugel) für synthetische Luft bei unterschiedlichem Gasdruck.	69
Tabelle 6-17: Gegenüberstellung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen und Einsetzspannungen eines springenden Partikels (Kugel) bei $p = 0,5$ MPa synthetischer Luft und $p = 0,1$ MPa SF ₆	70
Tabelle 6-18: Auflistung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen und der Einsetzspannungen eines springenden Partikels (Drahtstück) für SF ₆ bei unterschiedlichem Gasdruck.	73
Tabelle 6-19: Auflistung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen und der Einsetzspannungen eines springenden Partikels (Drahtstück) für synthetische Luft bei unterschiedlichem Gasdruck.	73
Tabelle 6-20: Gegenüberstellung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen und Einsetzspannungen eines springenden Partikels (Drahtstück) bei $p = 0,5$ MPa synthetischer Luft und $p = 0,1$ MPa SF ₆	74
Tabelle 6-21: Auflistung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen und der Einsetzspannungen eines springenden Partikels (Span) für SF ₆ bei unterschiedlichem Gasdruck.	77
Tabelle 6-22: Auflistung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen und der Einsetzspannungen eines springenden Partikels (Span) für synthetische Luft bei unterschiedlichem Gasdruck.	77
Tabelle 6-23: Gegenüberstellung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen und Einsetzspannung eines springenden Partikels (Span) bei $p = 0,5$	

MPa synthetischer Luft und $p = 0,1$ MPa SF ₆	78
Tabelle 6-24: Auflistung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Ladungen bei Einsetzspannung und weitere Spannungspegel der Spitze-Platte-Anordnungen für synthetische Luft und einem Gasdruck von $p = 0,95$ MPa.....	82
Tabelle 6-25: Untersuchte TE-Defekte mit der Aufteilung der Datensätze.	83