



Dipl.-Ing. Alexander Pirker, BSc.

Messung und Darstellung von Teilentladungen bei Gleichspannung zur Identifikation von Defekten gasisolierter Systeme

Doktorarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Dr. tech.

Doktoratsstudium Elektrotechnik

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Schichler

Begutachter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Schichler

Prof. Dr.-Ing. Volker Hinrichsen

Institut für
Hochspannungstechnik und Systemmanagement

Graz, Jänner 2020

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 Dissertation identisch.

Datum

Unterschrift

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit behandelt das Thema der Teilentladungsmessung bei Gleichspannung unter besonderer Berücksichtigung der Bewertung und Charakterisierung von typischen Defekten in gasisolierten Systemen.

Ausgehend von einem Überblick über die Entwicklung der weltweiten Hochspannungs-Gleichstrom-Verbindungen wird im speziellen auf gasisolierte Systeme für Gleichspannung und die große Bedeutung von aussagekräftigen Diagnosemethoden zur Zustandsbewertung von Isoliersystemen eingegangen. Dabei kommt der Teilentladungsmessung eine große Bedeutung zu. Die unterschiedlichen Möglichkeiten zur Erkennung und Bewertung von Defekten in gasisolierten Systemen mithilfe der Teilentladungsmessung werden aufgezeigt und grundlegende physikalische Vorgänge dieser Entladungen sowie der Verteilung des elektrischen Feldes in Isoliersystemen bei Gleichspannung zusammengefasst. Die allgemeinen Kenngrößen der Teilentladungsmessung werden beschrieben und es wird auf Anforderungen an die Teilentladungsmessung bei Gleichspannung eingegangen. Nach einer Übersicht der in der Literatur beschriebenen Auswertemethoden für Teilentladungen bei Gleichspannung werden die im Zuge dieser Arbeit entwickelten NoDi*-Diagramme vorgestellt und charakterisiert sowie ein Ansatz für die automatische Klassifizierung der Defekte für Monitoringsysteme dargestellt. Erprobt und verifiziert wurden diese Auswerteverfahren mit der konventionellen Teilentladungsmessung gemäß der IEC 60270 und der Teilentladungsmessung im Ultrahochfrequenzbereich an Testzellen mit den typischen Defekten gasisolierter Systeme.

Die neuen NoDi*-Diagramme ermöglichen eine physikalische Interpretation der gemessenen Pulssequenzen und eine Charakterisierung von drei typischen Defekten gasisolierter Systeme sowie unterschiedlichen Störquellen. Mit Ansätzen des maschinellen Lernens konnte zusätzlich eine korrekte Klassifizierung der untersuchten Defekte sichergestellt werden. Ein besonderes Augenmerk wurde bei den Untersuchungen auf das unterschiedliche Teilentladungsverhalten der Defekte bei verschiedenen Messprozeduren gelegt und Einflussfaktoren sowie auftretende physikalische Effekte genauer betrachtet.

Die Ergebnisse der Arbeit liefern einen Beitrag zur Charakterisierung und Bewertung der typischen Defekte von gasisolierten Systemen bei Gleichspannung. Durch die Beobachtungen des Teilentladungsverhaltens der verschiedenen Defekte bei unterschiedlichen Messprozeduren und durch die aufgezeigten Einflussfaktoren können wertvolle Ansätze für die Entwicklung von Prüfprozeduren, Akzeptanzkriterien und Monitoringsystemen für Betriebsmittel bei Gleichspannung abgeleitet werden. Diese Arbeit leistet einen Beitrag zur Entwicklung einer Methode für die aussagekräftige Zustandsbewertung von HGÜ-Komponenten und dem darauf basierenden, sicheren und wirtschaftlichen Betrieb der zukünftigen Übertragungsnetze.

Abstract

The thesis deals with the topic of partial discharge measurement at DC voltage with special consideration of the evaluation and characterization of typical defects in gas-insulated systems. Starting with an overview of the development of the worldwide high-voltage direct current connections and gas-insulated systems for DC voltage, the great importance of meaningful diagnostic methods for the condition assessment of insulation systems is shown. The partial discharge measurement is of particular interest in this context. To illustrate the different possibilities to detect and evaluate defects in gas-insulated systems, by using the partial discharge measurement, are shown. Basic physical effects, which are associated with partial discharges, as well as the field distribution in insulation systems at DC voltage, are summarized. The general characteristic parameters for the interpretation of the partial discharge pulse sequences are described and the requirements for the partial discharge measurement at DC voltage are discussed. After an overview of existing literature regarding the evaluation methods of partial discharges at DC voltage, the newly developed NoDi* patterns are presented and characterized. An approach for an automatic classification of defects by monitoring systems is shown as well. These developed classification methods were tested and verified with the conventional partial discharge measurement according to IEC 60270, and the partial discharge measurement in the ultra high frequency range. Test cells with typical defects of gas-insulated systems, which were used for this.

The new NoDi* patterns allow a physical interpretation of the measured partial discharge pulse sequences and a identification of three typical defects of gas insulated systems, as well as different noise sources. Using machine learning approaches leads to a correct classification of the examined defects too. During the investigations, special attention was paid to the partial discharge behavior of the various defects during different measurement procedures. In addition, the factors influencing the partial discharge measurement as well as the occurring physical effects, were examined in more detail.

The results of this work provide a contribution to the characterization and evaluation of typical defects in gas-insulated systems at DC voltage. By observing the partial discharge behaviour of the different defects under various measurement procedures and the determined influencing factors, valuable approaches can be derived for the future development of test procedures, acceptance criteria and monitoring systems for high voltage DC components. Therefore this work makes a contribution to the development of methods for a meaningful condition assessment for different components for DC voltage which is vital for a safe and economic operation of the future transmission grid.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Teilentladungen in gasisolierten HGÜ-Komponenten	5
2.1	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung	5
2.2	Gasisolierte Systeme für Gleichspannung	8
2.3	Qualitätssicherung, Zustandsbewertung und kontinuierliches Monitoring von GIS und GIL mithilfe der Teilentladungsmessung	11
3	Physikalische Grundlagen	13
3.1	Grundlagen elektrischer Teilentladungen	13
3.2	Entladungsmechanismen in Gasen	15
3.2.1	Koronaentladungen	15
3.2.2	Koronastabilisierung	17
3.3	Elektrische Feldverteilung in festen Isolierstoffen	18
3.3.1	Kapazitiv-resistiver Übergang	18
3.3.2	Temperaturabhängigkeit der Feldverteilung	19
3.3.3	Oberflächen- und Raumladungsansammlungen	19
3.4	Modelle unterschiedlicher Teilentladungs-Defekte	20
3.4.1	Äußere Teilentladungen	20
3.4.2	Innere Teilentladungen	22
4	Methoden zur Erfassung und Auswertung von Teilentladungen	31
4.1	Historie und aktueller Stand der Teilentladungsmessung	31
4.2	Teilentladungsmessung nach IEC 60270	33
4.3	Teilentladungsmessung nach der UHF-Methode	37
4.4	Nicht-konventionelle Teilentladungsmessmethoden	38
4.5	Arten von Störimpulsen und Verfahren zur Störimpulsunterdrückung	40
4.6	Kenngößen und Begriffe der Teilentladungsmessung bei Gleichspannung	43
4.7	Anforderungen an die Teilentladungsmessung bei Gleichspannung	44
4.7.1	Messaufbau	44
4.7.2	Messprozeduren	45
4.7.3	Messsystem	45
4.7.4	Auswertemethoden	46
5	Methoden zur Auswertung und Darstellung von Teilentladungen bei Gleichspannung	47
5.1	Kenngößen zur Bewertung von Ergebnissen der Teilentladungsmessung	47
5.2	Prüfprozeduren und Akzeptanzkriterien für unterschiedliche HGÜ-Betriebsmittel	48
5.3	Darstellungsarten bei Gleichspannung	52
5.3.1	Pulssequenzen	52
5.3.2	Entwicklung weiterer Darstellungsarten	53
6	Charakterisierung der Pulssequenzen mithilfe der NoDi*-Diagramme	57
6.1	Aufbau der NoDi*-Diagramme	57
6.2	Zuordnung unterschiedlicher Impulsfolgen in den NoDi*-Diagrammen	60
6.3	Typische Muster im NoDi*-Diagramm	62
6.4	Einflüsse auf das charakteristische Muster der NoDi*-Diagramme	63
6.5	Automatische Klassifizierung mit Methoden des Maschinellen Lernens	65

7	Experimentelle Untersuchungen und Erprobung der NoDi*-Diagramme	67
7.1	Übersicht der durchgeführten Untersuchungen	67
7.2	Messaufbauten und Prüfobjekte	69
7.2.1	Testzellen mit typischen Defekten gasisolierter Systeme	69
7.2.2	Konventioneller TE-Messaufbau nach IEC 60270	72
7.2.3	TE-Messung im UHF-Bereich	73
7.3	Datenaufzeichnung und Auswertung	75
7.4	Messprozeduren	75
7.5	TE-Messungen gemäß IEC 60270	77
7.5.1	Verhalten, Kenngrößen und NoDi*-Diagramme typischer Defekte	77
7.5.1.1	Spitze auf Hochspannung	77
7.5.1.2	Freies Potential	80
7.5.1.3	Freie metallische Partikel	82
7.5.1.4	Innere Defekte	91
7.5.1.5	Partikel auf Isolator	93
7.5.2	Einflussfaktoren	96
7.5.2.1	Elektrische Zeitkonstante des Isoliermediums bzw. des Defekts	96
7.5.2.2	Bandbreite des Messsystems	96
7.5.2.3	Triggerschwelle und Dynamikbereich	103
7.5.2.4	Dämpfung, Reflexion und Überschwingungen	107
7.5.2.5	Störimpulse	108
7.5.2.6	Raum- und Oberflächenladungen	110
7.5.2.7	Gasart und Gasdruck	111
7.5.3	Automatische Klassifizierung der NoDi*-Diagramme und Pulssequenzen	114
7.5.4	Trennung gleichzeitig auftretender Defekte	116
7.6	UHF-TE-Messung	119
7.6.1	Grundlegende Eigenschaften des UHF-TE-Messsystems	119
7.6.2	Spitze auf Hochspannung	121
7.6.3	Freies Potential	121
7.6.4	Freies metallisches Partikel	122
8	Diskussion und Ausblick	125
8.1	TE-Verhalten der typischen Defekte bei Gleichspannung	125
8.2	Detektion von TE-Impulsen bei Gleichspannung	126
8.3	Messprozeduren zur Prüfung von HGÜ-Betriebsmitteln	128
8.4	Auswertung der TE-Pulssequenzen zur Charakterisierung von Defekten	129
8.4.1	Charakteristische Größen und Akzeptanzkriterium	129
8.4.2	Charakterisierung der Defekte mithilfe der NoDi*-Diagramme und deren Einflussgrößen	130
9	Zusammenfassung	133
	Literatur	139
	Formelzeichen und Abkürzungen	151
	Anhang: Übersicht der typischen NoDi*-Diagramme	155
	Eigene Veröffentlichungen	161

1 Einleitung

Die globalen Anstrengungen, dem Klimawandel entgegenzuwirken und die damit verbundenen politischen Beschlüsse, wie die Kyoto 40-27-27-Klimaziele der Europäischen Union für das Jahr 2030, sowie der Atomausstieg und der stetig wachsende Energiebedarf mancher Länder, haben einen weitreichenden Wandel der weltweiten Energiewirtschaft zufolge. Der Anteil an dezentral und dargebotsabhängig aus erneuerbaren Energieträgern erzeugter elektrischer Energie steigt und die Anzahl regelbarer fossiler Kraftwerke nimmt ab. Dieser Wandel ist verbunden mit neuen Aufgaben, wie z. B. die Energieübertragung über weite Strecken zu den Verbrauchszentren und die Speicherung der Energie. Anforderungen an die Spannungsqualität und Stabilität des Netzes verändern sich aufgrund der Vielfalt an unterschiedlichen Technologien im Kraftwerkspark. Die sichere und wirtschaftliche Energiebereitstellung kann durch diese Veränderungen mit der historisch gewachsenen Netzinfrastruktur und dem verzögerten Netzausbau langfristig nicht ausreichend und sicher gewährleistet werden [Aus19; Fai19; Deu19].

Durch die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) kann die Übertragungskapazität und Systemstabilität langer Übertragungsstrecken auf eine wirtschaftliche und effiziente Weise gesteigert werden. Neben den Vorteilen der geringeren Verluste bei der Energieübertragung mit Gleichspannung und der vereinfachten Lastflussregelung kann die notwendige Trassenbreite bei gleichbleibender Leistung verringert sowie die Kapazität vorhandener Drehstrom-Übertragungsstrecken erhöht werden. Die für den wirtschaftlichen Betrieb notwendige Länge der HGÜ-Übertragungsstrecken verringert sich aufgrund der sinkenden Kosten für Konverterstationen und die steigenden beherrschbaren Spannungsebenen der HGÜ-Betriebsmittel. Die Vorteile bei der Planung und Bewilligung der kompakteren HGÜ-Übertragungsstrecken vereinfachen deren Umsetzung. Durch die voranschreitende Entwicklung von DC-Schaltern werden eine zukünftige Verbindung der HGÜ-Strecken zu einem Gleichspannungsnetz und die Durchführung von schnellen Schalthandlungen im Fehlerfall ermöglicht. Neben den herkömmlichen Übertragungsstrecken aus Freileitungen und Gleichspannungskabeln werden besonders in städtischem Gebiet und im Bereich von Umspannwerken bzw. Konverterstationen gasisolierte Schaltanlagen (GIS) und gasisolierte Leitungen (GIL) eine bedeutende Rolle übernehmen [Ham+12; Dor16].

Der sichere Betrieb und die erfolgreiche Umsetzung der zukünftigen HGÜ-Verbindungen und HGÜ-Netze hängen stark von der Betriebssicherheit der einzelnen Betriebsmittel ab. Um diese bis in den höchsten Spannungsbereich zu garantieren, ist die Prüfung und Zustandsbewertung der HGÜ-Betriebsmittel und deren elektrische Isoliersysteme notwendig. Durch die Typ- und Stückprüfung sowie die Abnahmeprüfung der Betriebsmittel sind produktionsbedingte Fehlstellen

weitgehend auszuschließen. Im Betrieb ist die Kenntnis des aktuellen Zustands der Betriebsmittel zur Vermeidung von Ausfällen durch die zustandsorientierte Wartung oder durch ein kontinuierliches Monitoring von großer Bedeutung.

Bei Wechselspannung wurden für unterschiedliche elektrische Isoliersysteme aussagekräftige Diagnosemethoden entwickelt, welche eine Erkennung und Beurteilung der Art und Kritikalität eines Defekts zulassen. Eine der hilfreichsten Methoden ist dabei die Teilentladungsmessung (TE-Messung). Die Messmethode der konventionellen Teilentladungsmessung ist in der Norm IEC 60270 [IEC60270] beschrieben und Messprozeduren sowie Akzeptanzkriterien für unterschiedliche Prüfungen sind in den jeweiligen Normen der Betriebsmittel definiert. Diese Messmethode findet aufgrund der möglichen Kalibration meist bei Prüfungen im Labor und bei Typ- sowie Stückprüfungen einzelner Komponenten Anwendung. Besonders bei gasisolierten Systemen hat sich für Vor-Ort-Messungen und das kontinuierliche Monitoring die UHF-TE-Messung als praktikable Messmethode erwiesen.

Zur Auswertung der Messdaten und Bewertung von Defekten bei Wechselspannung sind Methoden wie z. B. das phasenaufgelöste TE-Diagramm und ausreichend Erfahrungen mit dem TE-Verhalten in unterschiedlichen Isoliermaterialien und Betriebsmitteln vorhanden. Die grundlegenden physikalischen Abläufe der Teilentladungen bei Gleichspannung und die Möglichkeiten zur Detektion sind mit denen bei Wechselspannung gleichzusetzen. Jedoch verschiebt sich bei konstanter Gleichspannung die Bedeutung einzelner physikalischer Effekte. Außerdem ist eine Bewertung und Charakterisierung mit den vorhandenen Auswertemethoden und Akzeptanzkriterien aufgrund der fehlenden Phaseninformation, der stark unterschiedlichen Anzahl und Amplitude der detektierten TE-Impulse sowie der geringen Erfahrungen über die Auswirkungen von Teilentladungen in unterschiedlichen Isoliermaterialien nicht möglich.

Auch sind die für Wechselspannung entwickelten Messprozeduren für die Prüfung der HGÜ-Betriebsmittel infolge der großen Zeitkonstanten beim Übergang der elektrostatischen Feldverteilung in das quasistationäre Strömungsfeld im Isoliersystem und der teilweise geringen TE-Aktivität einiger Defekte bei konstanter Gleichspannung nicht zielführend.

Mit modernen TE-Messsystemen ist es möglich, den Zeitpunkt und die Amplitude der TE-Impulse zu detektieren und für eine weitere Auswertung aufzuzeichnen. In der Literatur sind unterschiedliche Methoden zu finden, die eine Darstellung dieser grundlegenden Kenngrößen der Pulssequenz ermöglichen und einzelne physikalische Beobachtungen beschreiben [Van91; Fro+94; Seo+16; IEC60270]. Neben diesen Methoden zur Auswertung von Pulssequenzen werden auch Methoden zur Trennung gleichzeitig auftretender Defekte mithilfe von Informationen der Kurvenform einzelner TE-Impulse aufgezeigt [Li+07; Cav+08; Kim+12; Rah+15]. Die Entwicklung einer Methode zur Charakterisierung und Bewertung aller Defekte ist bisher jedoch nicht gelungen. Messprozeduren und Akzeptanzkriterien, die im Zusammenhang mit der TE-Messung bei Gleichspannung stehen,

sind in den Normen für HGÜ-Transformatoren, DC-Durchführungen und DC-Drosselpulen definiert [IEC65700; IEC60076a; IEC60076b]. Erfahrungen in Bezug auf die Reproduzierbarkeit und Aussagekraft der Ergebnisse dieser Prüfungen wurden bisher nur im geringen Umfang veröffentlicht.

Ziel dieser Arbeit ist daher die Entwicklung und Anpassung einer Darstellungsform für die Charakterisierung und Bewertung von Teilentladungen bei Gleichspannung. Diese neue Darstellungsform soll mit Pulssequenzen handelsüblicher TE-Messsysteme erstellt werden können und eine übersichtliche Darstellung und physikalische Interpretation der Messergebnisse erlauben. Zusätzlich sind grundlegende Überlegungen hinsichtlich der Umsetzbarkeit einer automatischen Erkennung und Klassifizierung in zukünftigen Monitoringsystemen anzustellen. Durch die konventionelle TE-Messung gemäß IEC 60270 an typischen Defekten von gasisolierten Systemen soll die entwickelte Methode erprobt und verifiziert werden und in einem weiteren Schritt die Anwendbarkeit bei der UHF-TE-Messung überprüft werden. Dabei sind messtechnische Einflussfaktoren auf die detektierten Pulssequenzen und die daraus erstellten Diagramme sowie das TE-Verhalten der Defekte und auftretende physikalische Effekte zu untersuchen. Die ermittelten Anforderungen an die TE-Messsysteme und Messprozeduren für Gleichspannung sollen zusammengefasst und beschrieben werden.

2 Teilentladungen in gasisolierten HGÜ-Komponenten

2.1 Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung

Die erste nennenswerte Übertragung von elektrischer Energie über eine weite Strecke und auch die erste Gleichstrom-Übertragung wurde von Oscar von Miller und Marcel Deprez im Zuge der zweiten internationalen Elektrizitätsausstellung am 16. September 1882 in München realisiert. Dabei wurde die Energie einer 1,5 PS (1,1 kW) starken dampfbetriebenen Dynamomaschine über eine 57,4 km lange Telegrafenteileitung von Miesbach bis München mit einer Gleichspannung von 2 kV übertragen. Im Münchner Glaspalast wurde mit dieser Energie eine Pumpe betrieben, die einen Wasserfall speiste. Ein weiterer Meilenstein war die im Folgejahr realisierte 112 km lange 6-kV-Gleichstromverbindung zwischen Creil und Paris [VDE+07]. Diese Erfolge wurden durch Entwicklungen im Bereich der Mehrphasen-Wechselstromtechnik besonders von Nikola Tesla stark geschmälert. Es entbrannte ein wahrer Wettstreit zwischen der Gleichstrom-, Einphasenwechselstrom- und der Dreiphasenwechselstromtechnik. Durch die Erfindung bzw. Weiterentwicklung der Drehstrommaschine und erfolgreiche Umsetzung einer 175 km langen dreiphasigen 25-kV-Übertragungsleitung von Lauffen am Neckar nach Frankfurt am Main im Jahre 1891 verlor die Gleichstromübertragung immer weiter an Bedeutung.

Besonders in Italien und der Schweiz wurden in den 1890er noch einige kleine Gleichstrom-Übertragungsleitungen im Bereich der Mittelspannung betrieben. Die erste richtige Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsleitung mit einer 180 km langen bipolaren Freileitung und einer Spannung von ± 100 kV war in den Jahren 1906 bis 1936 in Betrieb. Bei dieser von Rene Thury entwickelten Technologie ohne Umrichterwerke wurde die elektrische Energie mit Hilfe von in Reihe geschalteten Gleichstromgeneratoren in einem Wasserkraftwerk in Pombliere erzeugt und von Gleichstrommaschinen in Lyon zum Betrieb der elektrischen Straßenbahn umgesetzt [Ele84; Rey08].

Nach der erfolgreichen Entwicklung von Quecksilberdampfgleichrichtern und diversen Versuchsanlagen startete 1941 das Elbe-Projekt. Hier sollte mit zwei einpoligen 110 km langen Erdkabeln bei einer bipolaren Spannung von ± 200 kV eine Leistung von 60 MW vom Kraftwerk Elbe in Vockerode nach Berlin-Marienfelde übertragen werden. Aufgrund der Kriegereignisse wurde diese HGÜ-Verbindung jedoch nie in Betrieb genommen. Nach dem zweiten Weltkrieg wurde die Anlage demontiert und 1951 als monopolare HGÜ-Verbindung zwischen Moskau und Kaschira in Betrieb genommen [Deu18].

Den Siegeszug trat die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) mit der elektrischen Versorgung von Inseln in der Ostsee und im Jahre 1954 mit dem ersten 98 km langen Seekabel zwischen dem schwedischen Festland und der Insel Gotland an. Hier konnte mit einer Betriebsspannung von 100 kV eine Leistung von 20 MW übertragen werden. Im Jahre 1970 konnte die Spannung durch einen thyristorbestückten Stromrichter auf 150 kV erhöht und somit eine Übertragungsleistung von 30 MW erzielt werden [Eck05]. Ein weiterer Meilenstein dieser rasanten Entwicklung waren der Bau einer 1420 km langen Freileitung zwischen Cahora Bassa in Mosambik und Johannesburg in Südafrika mit einer Spannung von ± 533 kV und einer Übertragungsleistung von 1920 MW, die im Jahre 1977 ihren Betrieb aufnahm. Als Seekabel ist weiterhin die 200 km lange monopolare HGÜ-Verbindung mit Rückleiter über Erde zwischen Dannebo in Schweden und Rauma in Finnland mit einer Spannung von 400 kV und einer Übertragungsleistung von 500 MW zu erwähnen, die im Jahre 1989 in Betrieb genommen wurde [Fer09].

Im Jahr 2008 nahm die derzeit längste Unterseeverbindung ihren Betrieb auf. Die 580 km lange sogenannte NorNed zwischen Feda in Norwegen und Eemshaven in den Niederlanden ist als bipolares System mit ± 450 kV aufgebaut und besitzt eine Übertragungsleistung von 600 MW mit nur 3,7 % Verlusten [Sko+06]. Die derzeit längste HGÜ-Verbindung mit der bisher höchsten Spannung von ± 800 kV wurde im Jahre 2014 kommerziell in Betrieb genommen. Dabei kann eine Leistung von 2000 MW über eine Strecke von 2200 km von Hami nach Zhengzhou (Bild 2.1) in der Volksrepublik China übertragen werden [Sta12]. Die erfolgreiche Umsetzung dieser Ultrahochspannungs-Gleichstromverbindungen zeigt auch Möglichkeiten für Nordamerika, Indien und Brasilien, um die Herausforderungen der Energieübertragung über weite Strecken in Zukunft meistern zu können. In unterschiedlichen Szenarien für die Jahre 2035 und 2050 werden beispielsweise HGÜ-Verbindungen mit einer Spannung von 800 kV durch ganz Nordamerika angedacht, um den Umstieg auf regenerativen Energiequellen zu ermöglichen [IEC18].

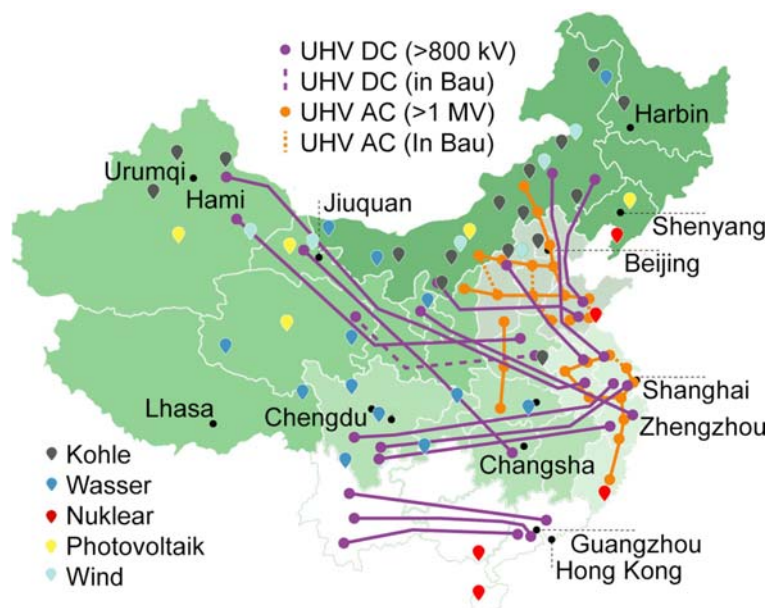


Bild 2.1: Aktuelle und im Bau befindliche UHV-Verbindungen in China (nach [Fai19])

Bis zu den Olympischen Winterspielen in Peking im Jahre 2022 soll der erste Schritt zu einem Hochspannungs-Übertragungs-Netz (Zhangbei DC grid) umgesetzt werden. Um erneuerbare Energien besser in das bisherige Netz eingliedern zu können und die Netzstabilität zu bewahren, wird ein bipolarer 666 km langer DC-Ring mit einer Spannung von ± 500 kV und vier Übergabestationen dem herkömmlichen AC-Netz überlagert. Dabei soll eine Leistung von bis zu 3 GW übertragen werden. Ein Augenmerk wird dabei auch auf eine schnelle Fehlererkennung, Schaltheaktionen und gezielte Lastflusssteuerungen gelegt [Tan+18].

Auch in Europa ist durch die im Bau befindlichen HGÜ-Verbindungen in Deutschland ein weiterer Ausbau der HGÜ abzusehen. Die Herausforderungen bei der Genehmigung neuer Übertragungsleitungen kann durch einen Umbau vorhandener Leitungen und die Nutzung bestehender Trassen für HGÜ-Verbindungen vereinfacht werden. Ein gesamteuropäisches HGÜ-Netz könnte im Vergleich zu einzelnen HGÜ-Verbindungen auch wirtschaftliche Vorteile bringen und den Weg zu einer CO₂-neutralen Energieerzeugung ermöglichen. Neben HGÜ-Verbindungen auf dem europäischen Festland und den Seekabeln zur Anbindung von Inseln und Offshore-Windparks werden Szenarien eines europäischen HGÜ-Netzes angedacht, die auch eine Anbindung möglicher Solar-Farmen in Afrika miteinbeziehen (Bild 2.2) [CTB533; Pie+17].

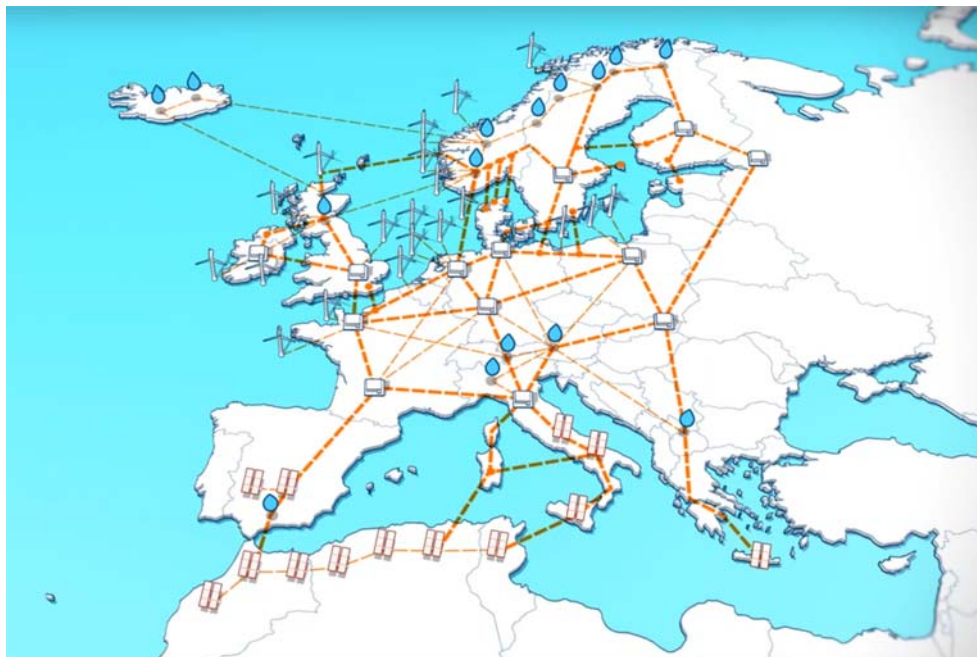


Bild 2.2: Szenario eines zukünftigen europäischen HGÜ-Netzes [Abb19]

Die HGÜ wird es in Zukunft erlauben, ein globales kontinental-übergreifendes Energieübertragungsnetz aufzubauen. Dieses kann neue Möglichkeiten in der globalen Erzeugung und Speicherung elektrischer Energie schaffen und den Schritt zur weltweiten CO₂-neutralen Energieerzeugung ermöglichen [Gel15].

Große Bedeutung bei der Umsetzung und dem sicheren Betrieb der HGÜ-Netze erlangt dabei die Realisierung von DC-Schaltanlagen. Zurzeit sind noch keine für den Netzbetrieb notwendi-

gen, HVDC-Leistungsschalter am Markt verfügbar. Unterschiedliche Konzepte sind jedoch in Entwicklung und werden erprobt [CTB533; Dor16; Jos+18].

Neben langen Freileitungen und Kabeln werden besonders in Schaltanlagen und räumlich begrenzten Gebieten auch gasisolierte Schaltanlagen (GIS) und gasisolierte Leitungen (GIL) eine wichtige Rolle übernehmen. Diese bei Wechselspannung etablierten Betriebsmittel müssen in Bezug auf die elektrische Feldverteilung und die auftretenden physikalischen Effekte bei Beanspruchung mit hoher Gleichspannung angepasst werden. Auch die für die Test und die Zustandsbewertung sowie für das Monitoring notwendigen Methoden müssen angepasst und entwickelt werden.

2.2 Gasisolierte Systeme für Gleichspannung

Die weltweite Entwicklung von gasisolierten Schaltanlagen begann in den 1960er Jahren. Die erste 110-kV-GIS mit SF₆ als Isoliermedium kam 1967 auf dem Markt und seit dem wurde diese Technologie im Hinblick auf Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit stetig weiterentwickelt. Heute sind gasisolierte Schaltanlagen für Spannungen von bis zu 1100 kV Wechselspannung im Einsatz. Für Gleichspannung sind bisher gasisolierte Schaltanlagen bis 550 kV verfügbar und gasisolierte Leitungen sind bis 550 kV in Entwicklung [Sie19].

Der prinzipielle Aufbau von gasisolierten Schaltanlagen ist für Gleichspannung gleich wie für Wechselspannung. Neben den Hauptbestandteilen der Kapselung (Gehäuse) aus Aluminium mit Flanschverschraubungen, dem spannungsführenden Leiter und dem Isoliergas sind weitere Komponenten wie gasdichte und gasdurchlässige Gießharzdurchführungen sowie Kompensatoren zum Ausgleich der Wärmedehnung und Berstscheiben zur Druckentlastung im Fehlerfall vorhanden. Im Vergleich zur Anwendung bei Wechselspannung werden bei Gleichspannung jedoch unterschiedliche physikalische Effekte für das Design und den Betrieb einer Anlage relevant (Bild 2.3). Besonders die Wärmeverteilung innerhalb der Isolierung, welche von Faktoren wie Wärmestrahlung, Konvektion und Wärmeleitung abhängt, hat aufgrund der Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit der Isolierstoffe eine besondere Bedeutung. Neben der effektiven Leitfähigkeit aufgrund der Elektronen- und Ionenleitfähigkeit bei festen Isolierstoffen muss auch Polarisierung und Raumladungsakkumulation berücksichtigt werden. Im Gas kommt es zur Ionenerzeugung durch natürliche Strahlung, Stoßionisation, Elektronenemission an den Elektroden und leitfähige Partikel sowie zu Ionendrift. Auch durch unkritische Defekte in der Anlage kann eine hohe Anzahl an Ionen erzeugt werden. An der Grenzschicht zwischen fester und gasförmiger Isolierung spielen die Oberflächenladungsakkumulation, die Oberflächenleitfähigkeit, der Ladungstransfer in den Feststoff, die Ladungsträgerrekombination mit Gasionen sowie Ladungsträgerinjektion und Emission an der Grenzfläche eine wichtige Rolle. Diese physikalischen Eigenschaften und deren Abhängigkeit von der Zeitdauer, der Spannung und der Temperatur sind bei der Verteilung und Steuerung des elektrischen Feldes bei Gleichspannung zu beachten und erfordern dafür geeignete Isoliermaterialien [Rie+14; Sie19].

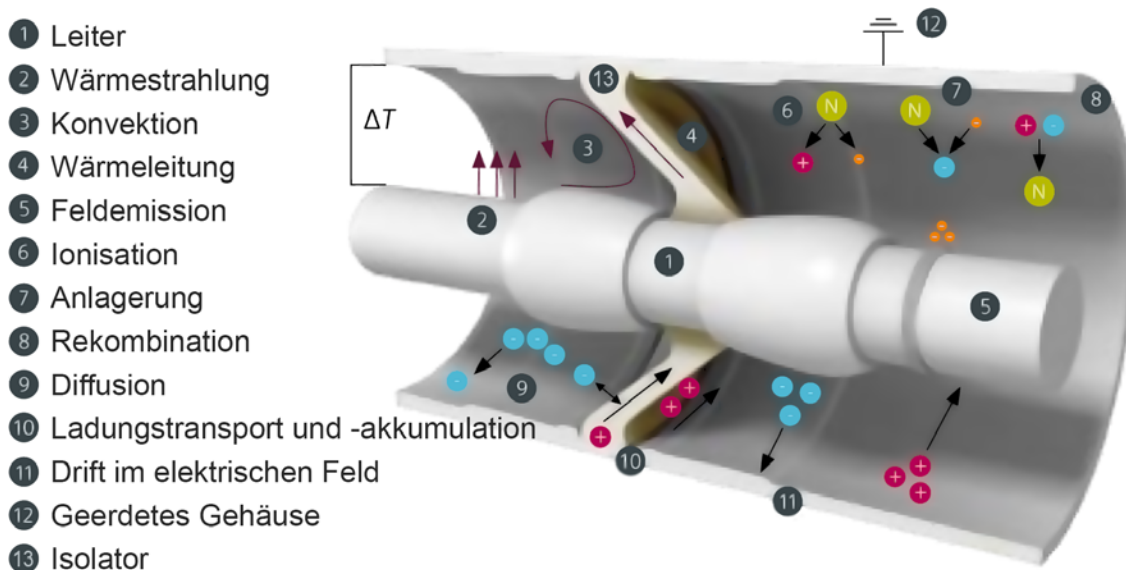


Bild 2.3: Prinzipieller Aufbau einer Gleichspannungs-GIS und relevante physikalische Mechanismen in Gas-Feststoff-Isoliersystemen (nach [Sie19])

Mit dem richtigen Design und einer Qualitätskontrolle bei der Fertigung und beim Aufbau von GIS und GIL wird versucht, Defekte möglichst zu vermeiden und mithilfe von Diagnosemethoden frühzeitig zu erkennen und zu beseitigen. In der Anlage können durch Beschädigungen oder unsachgemäße Montage fünf typische, elektrische Defekte im Isoliersystem auftreten, die in Bild 2.4 schematisch dargestellt und in den folgenden Absätzen genauer beschrieben werden.

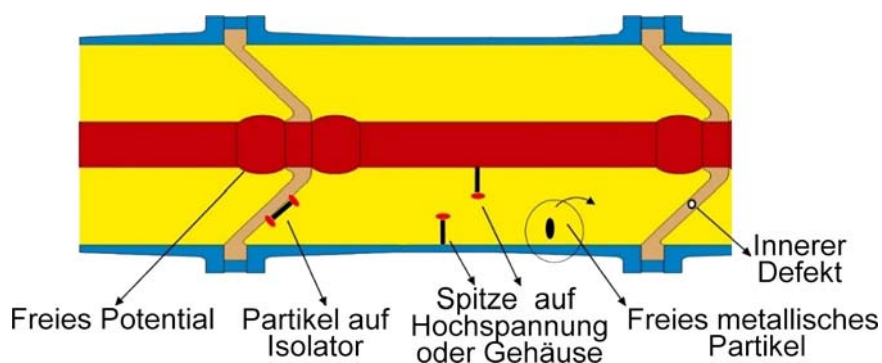


Bild 2.4: Schematische Darstellung der fünf typischen Defekte von gasisolierten Systemen (nach [CTB662])

Der Teilentladungsdefekt des Typs **freies Potential** stellt ein leitfähiges Objekt dar, das weder mit dem Gehäuse noch mit dem Leiter verbunden ist und auf ein unbestimmtes elektrisches Potential geladen wird. Dieser Defekt entsteht meist durch unsachgemäße Montage oder mechanische Spannungen in der GIS und ist bei korrektem Design und richtiger Montage der Anlage selten. Der Defekt freies Potential ist im Betrieb verhältnismäßig unkritisch. Durch die im Gasraum an diesem Defekt entstehenden freien Ladungsträger können sich Oberflächenladungen an benachbarten Isolatoren ansammeln, welche in weiterer Folge zu Gleitentladungen führen können. In anderen Fällen findet Materialerosion an den betroffenen Stellen statt.

Der Defekttyp **Partikel auf Isolator** entsteht durch ein metallisches Partikel, das sich auf einer Isolatoroberfläche befinden. Durch diesen Defekt entstehen Oberflächenladungen die das elektrische Feld an den Spitzen des Partikels verringern und eine Detektion mithilfe der Teilentladungsmessung erschweren. Besonders bei einer Überlagerung der Gleichspannung mit Stoßspannung kann dieser Defekt einen vollständigen Überschlag am Isolator verursachen [Her16].

die **Spitze auf Hochspannung** führt zu einer lokalen Erhöhung des elektrischen Feldes. Überschreitet die elektrische Feldstärke an der Spitze einen kritischen Wert entstehen Koronaentladungen. Die dadurch entstehenden freien Ladungsträger können Raumladungen im Gasraum oder Oberflächenladungen an Isolatoren aufbauen, die das elektrische Feld verzerren und die Durchschlagsfestigkeit der Isolierstrecke herabsetzen. Diese Art von Defekt ist aufgrund des optimierten Designs von gasisolierten Systemen selten und tritt meist durch Beschädigungen bei der Montage der Anlage auf.

Freie metallische Partikel können bei der Herstellung und Montage in das Gehäuse der GIS oder GIL gelangen. Die Aufladung des Partikels bewirkt eine Kraft im elektrischen Feld und das Partikel vollzieht eine Bewegung. Je nach Feldverteilung stellen sich zwei unterschiedliche Effekte ein. Das Springen des Partikels zwischen dem Leiter und dem Gehäuse, sowie der Firefly-Effekt, bei dem das Partikel eine tanzende Bewegung an der Elektrode mit negativer Polarität vollzieht. Durch die hohe Anzahl an erzeugten Ladungsträgern kann dieser Defekt einen vollständigen Durchschlag der Gastrecke hervorrufen. Auch nichtleitende Partikel können das elektrische Feld durch die Ansammlung von Ladungsträgern an der Partikeloberfläche erhöhen und zu einem Springen des Partikels führen.

Innere Defekte entstehen durch Hohlräume in Isolatoren oder Risse sowie Delaminationen an den Oberflächen von eingegossenen Elektroden. Durch die geringe Anzahl an Entladungen bei konstanter Gleichspannung ist dieser Defekt weniger kritisch als bei Wechselspannung. Über lange Betriebszeiten kann im betroffenen Bereich jedoch die Degradation der festen Isolierstoffe beschleunigt werden. Durch ein entsprechendes Design der Elektroden und optimierte Produktionsprozesse sowie eine ausführliche Stückprüfung mit Teilentladungsmessung bei Wechselspannung an den Isolatoren kann dieser Defekt nahezu ausgeschlossen werden. Aufgrund des sogenannten Verzögerungseffekts, bei dem ein fehlendes Startelektron im Hohlraum eine Verzögerung des Einsetzens von Teilentladungen verursacht, kommt es jedoch vor, dass dieser Defekt bei der werksseitigen Prüfung nicht erkannt wird [CTB662].

2.3 Qualitätssicherung, Zustandsbewertung und kontinuierliches Monitoring von GIS und GIL mithilfe der Teilentladungsmessung

Die weltweiten Erfahrungen mit gasisolierten Schaltanlagen für Wechselspannung zeigen eine hohe Betriebssicherheit und Verfügbarkeit in Verbindung mit einer geringen Fehlerhäufigkeit. Zahlreiche Anlagen haben bereits eine Lebensdauer von mehr als 50 Jahren ohne Zunahme der Fehlerhäufigkeit erreicht. Dies ist auf die hohen Standards und die Bedeutung der Qualitätssicherung bei der Fertigung der einzelnen Komponenten und bei der Inbetriebnahme der Anlage zurückzuführen. Unzulässige Defekte können im Rahmen der herstellerseitigen Stückprüfungen und der Abnahmeprüfungen durch empfindliche Teilentladungsmessungen bei Wechselspannung erkannt und beseitigt werden. Meist findet hier die elektrische Teilentladungsmessung gemäß der Norm IEC 60270 [IEC60270] Anwendung. Die Teilentladungen der typischen Defekte erzeugen bei Wechselspannung in Bezug auf die Phasenlage zur Spannung charakteristische Muster (Phase Resolved Partial Discharge (PRPD) Pattern), welche eine eindeutige Zuordnung der Messdaten zu den einzelnen Defekten erlauben. Bei Gleichspannung sind bisher noch keine Messprozeduren und Auswerteverfahren für die Erkennung aller Defekte vorhanden.

Die hohen Anforderungen bezüglich der Ausfallsicherheit an das Übertragungsnetz, verbunden mit der möglichst wirtschaftlichen Instandhaltung und Wartung der Netze, erfordern den Wandel der ereignis- bzw. zeitbasierten Instandhaltungsstrategie zur zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie. Diese Strategie macht jedoch eine möglichst genaue Kenntnis über den aktuellen Zustand der Betriebsmittel notwendig. Für das Assetmanagement ist hierbei insbesondere der aktuelle Zustand des Isoliersystems von Bedeutung. Verschiedene Teilentladungs-Messverfahren können für die erforderlichen Diagnosemessungen eingesetzt werden. Die UHF-TE-Messung hat sich für ein kontinuierliches Monitoring von gasisolierten AC-Schaltanlagen bewährt und eventuell im Betrieb entstehende Defekte können frühzeitig erkannt werden [Ach+05].

Das Übertragungsnetz der Zukunft stellt wegen der großen Anzahl an HGÜ-Betriebsmitteln neue Herausforderungen an die Zustandsbewertung und das Monitoring dieser Betriebsmittel. Aufgrund der unterschiedlichen Verteilung des elektrischen Feldes und damit verbundenen Beanspruchung des Isoliersystems bei Gleichspannung, ist eine Bewertung der Komponente bei Belastung mit Wechselspannung nicht zielführend und ohne Eingriff in den laufenden Betrieb nicht möglich. Im Besonderen bei der Teilentladungsmessung sind die herkömmlichen Diagnoseverfahren, welche eine Charakterisierung und Bewertung der Defekte bei Wechselspannung zulassen, durch die fehlende Information der Phasenlage der Teilentladungen nicht möglich. Für Gleichspannung müssen neue Verfahren zur Bewertung und Analyse entwickelt werden.

3 Physikalische Grundlagen

3.1 Grundlagen elektrischer Teilentladungen

Als Teilentladungen werden räumlich begrenzte elektrische Entladungen bezeichnet, die nur einen Teil der Isolierstrecke zwischen zwei Elektroden überbrücken. Sie entstehen, wenn die elektrische Feldstärke in einem örtlich begrenzten Bereich des Isoliermediums den kritischen Wert zur Stoßionisation überschreitet und ein Startelektron vorhanden ist (Kapitel 3.2). Die Art der Spannung spielt bei der grundlegenden Erklärung und den Eigenschaften der Teilentladungsimpulse keine Rolle. Grob werden sie in äußere und innere Teilentladungen eingeteilt.

Äußere Teilentladungen, auch Koronaentladungen genannt, treten an metallischen Leitern welche von Gasen umgeben sind im Bereich stark inhomogener Felder auf. Sie können durch das richtige Design der Betriebsmittel, mit ausreichenden Radien der Leiter und Abschirmungen, vermieden werden. Bei der Anwendung und im Betrieb werden sie meist durch Beschädigungen oder Verschmutzungen der Elektroden bzw. Leiter verursacht. Da sie meist in selbstheilenden Isoliermedien auftreten und in der Regel bei der Prüfung von Betriebsmittel leicht zu detektieren und zu beseitigen sind, stellen sie nur eine geringe Gefährdung im Betrieb der Anlage dar.

Gleitentladungen, auch Oberflächenentladungen genannt, können ebenfalls der Kategorie der äußeren Teilentladungen zugeordnet werden und treten bei tangentialen Verlauf des elektrischen Feldes an der Grenzschicht zwischen fester und gasförmiger Isolierung auf. Sie sind durch ein korrektes Design der Anordnung zu vermeiden, können jedoch durch Verunreinigungen der Isolatoroberfläche oder eine Ansammlung von Ladungsträgern bei Gleichspannung verursacht werden. Freie metallische Partikel sind ebenfalls eine Quelle für äußere Entladungen. Aufgrund der freien Bewegung und des direkten Ladungsaustauschs bei Berührung mit den Elektroden ist das Teilentladungsverhalten dieser Defekte nicht mit denen herkömmlicher äußerer Teilentladungen gleichzusetzen.

Innere Teilentladungen finden im inneren fester Isolierstoffe, z. B. in Hohlräumen wie Blasen, Risse oder Ablösungen von Elektroden, statt. Sie sind teilweise schwer erkennbar, verursachen irreparable Schäden am festen Isolierstoff und stellen bei längerer Einwirkung eine besondere Gefahr dar [Kre89; Küc17; Sch16; IEC60270].

Teilentladungen, die von Störstellen ausgehen, äußern sich durch kurze elektrische Stromimpulse. Die Anstiegszeit und Rückenhalbwertszeit dieser TE-Impulse ist vom Medium, in welchem die Entladungen auftreten, abhängig und kann bei Entladungen in SF₆ Werte von nur wenigen Zehn

Pikosekunden erreichen [Oht+11]. Neben der elektrischen Detektion dieser Stromimpulse an den Klemmen des zu prüfenden Objekts ist es möglich, die dabei entstehenden elektromagnetischen Wellen oder Photonen sowie die akustischen Wellen die von der Entladung ausgehen, zu messen. Die Kurvenform dieser Signale unterscheidet sich jedoch durch Dämpfung und Verzerrung deutlich von den realen, im Dielektrikum auftretenden Impulsen.

Die messbaren Stromimpulse der Teilentladungen an den Klemmen realer Prüfanordnungen besitzen Anstiegszeiten im Bereich von einigen Nanosekunden bis Mikrosekunden. Diese Teilentladungsimpulse lassen sich durch die Überlagerung von zwei Exponentialfunktionen darstellen und durch Parameter wie beispielsweise die Zeit bis zum Maximum T_P und die Rückenhalbwertszeit T_2 beschreiben (Bild 3.1a). Aus der Transformation in den Frequenzbereich resultiert die Amplitudendichte $F(f)$, welche in Bild 3.1b für unterschiedliche Anstiegs- und Rückenhalbwertszeiten dargestellt ist. Die Amplitudendichte der Impulse ist bis zu einem von der Impulsform bestimmten Grenzfrequenz annähernd konstant und fällt anschließend mit steigender Frequenz ab.

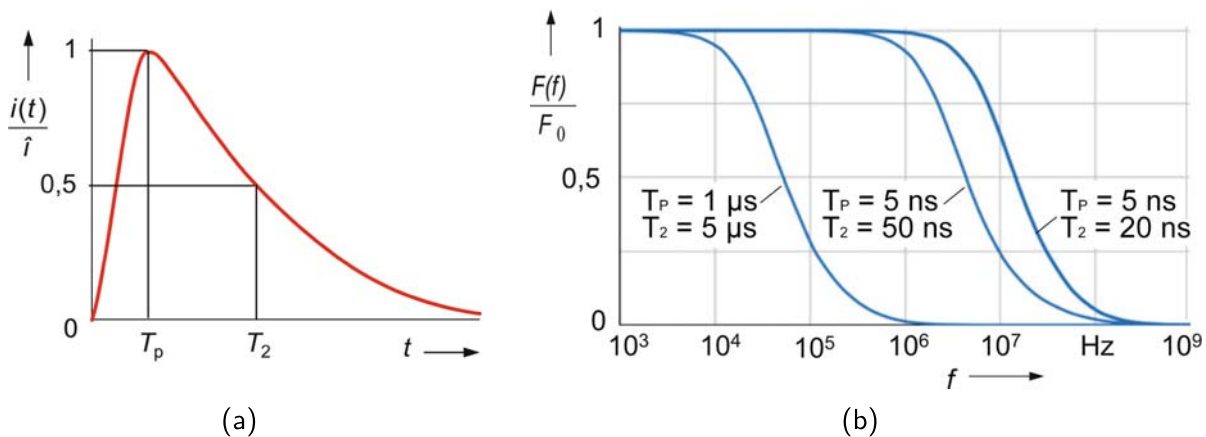


Bild 3.1: Zeitlicher Verlauf eines TE-Impulses an den Anschlussklemmen des Prüflings mit Bezeichnung charakteristischer Parameter sowie Frequenzspektrum der TE-Impulse mit unterschiedlichen Parametern [Sch16]

Seit Beginn der Teilentladungsmessung werden Anstrengungen unternommen, eine Teilentladungsgröße zu finden, die eine qualitative Aussage über den Zustand eines Isoliersystems bzw. die Lebensdauerverringerung eines Betriebsmittels zulässt. Diese Messgröße konnte jedoch bisher nicht umfassend und zufriedenstellend für alle Hochspannungsisolierungen ermittelt werden. Als Kompromiss wurde international die Ladung q , die aus dem Integral der Stromimpulse über die Zeit berechnet werden kann, als aussagekräftige Größe anerkannt [Küc17; Sch16; IEC60270].

$$q = \int_0^{\infty} i(t) dt \quad (3.1)$$

Ein großer Vorteil dieser Größe ist ihre Invarianz. Eine Veränderung der Kurvenform durch Verzerrungen beim Durchlaufen der Prüfschaltung bis zum Messgerät hat keinen Einfluss auf die Ladung der integrierten Stromimpulse. Die Ladung der Stromimpulse weist eine weitere besondere

Eigenschaft im Zusammenhang mit deren Frequenzspektrum auf. Die allgemeine Gleichung für das komplexe Spektrum eines Stromimpulses lautet:

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} i(t)e^{-j\omega t} dt \quad (3.2)$$

Bei Vergleich von Gleichung 3.1 und Gleichung 3.2 wird ersichtlich, dass sich für den positiven Zeitbereich und $\omega = 2\pi f = 0$ folgender Zusammenhang ergibt [Küp74]:

$$q = \int_0^{\infty} i(t) dt = |F(j\omega = 0)| = F(0) \quad (3.3)$$

Die Erkenntnis, dass die Impulsladung q dem Gleichanteil der Amplitudendichte $F(0)$ entspricht, hat für die Bestimmung der Ladung und somit für die Teilentladungsmessung im Allgemeinen, eine große Bedeutung. Zwar kann der Gleichanteil der Stromimpulse durch die Auskopplung über einen Koppelkondensator, wie in Kapitel 4.2 beschrieben, nicht bestimmt werden, jedoch bleibt die Amplitudendichte der TE-Impulse auch bei höheren Frequenzen annähernd konstant (Bild 3.1b). Somit gilt für den Frequenzbereich konstanter Amplitudendichte:

$$q = F(0) \approx F(f) \quad (3.4)$$

Dieser Zusammenhang ermöglicht eine bandbreitenbegrenzte Messung von Teilentladungen und eine einfache Bestimmung der Ladung der messbaren Stromimpulse (Kapitel 4.2).

3.2 Entladungsmechanismen in Gasen

3.2.1 Koronaentladungen

Koronaentladungen sind Vorentladungen die in stark inhomogenen Feldern auftreten. Dabei entstehen im Bereich stark gekrümmter Elektroden hohe Feldstärken und durch günstige Ionisierungsbedingungen (Ionisierungskoeffizient $\alpha_e > 0$) tritt nach Erfüllen der Zündbedingung ein selbstständiger Vermehrungsprozess der Elektronen ein. In feldschwachen Bereich wird der Ionisierungskoeffizient negativ. Die Anlagerung der freien Elektronen überwiegt und die Vorentladungen führen nicht unmittelbar zum Durchschlag. Ausgehend von Glimmentladungen setzt sich bei höheren Spannungen raumladungsbeschwerte Streamerentladungen auch in den feldschwachen Bereich fort. Wenn das elektrische Grundfeld nicht mehr für das Streamerwachstum ausreicht erlischt der Streamer. Die Vorentladung wird durch die, als in Reihe liegende ohmsch-kapazitiv wirkende Impedanz des nicht überbrückten feldschwachen Bereichs stabilisiert [Gän53; Sch74; Küc17].

Durch die steigende elektrische Feldstärke im Bereich der gekrümmten Elektrode nimmt die Einsatzspannung U_i für Vorentladungen mit zunehmender Inhomogenität des Feldes ab (Bild 3.2a). Durch die bei den Entladungen entstehende Raumladungswolke wird die gekrümmte Elektrode

abgeschirmt und damit die Durchschlagsspannung erhöht. Das Entladungsverhalten ist dabei stark von der Polarität der Spannung abhängig. Bei positiver Polarität der Spannung starten Elektronenlawinen im Gasvolumen vor der gekrümmten Elektrode (Bild 3.2b oben). Aufgrund stabiler Glimmentladungen bilden sich Raumladungswolken aus positiven Ionen vor der Anode die Richtung Kathode driften. Dadurch verringert sich das elektrische Feld im Bereich der gekrümmten Elektrode und erhöht sich im feldschwachen Bereich. Bei Steigerung der Spannung entstehen günstige Bedingungen für das Wachstum von Streamern. Bei negativer Spannung kann ein Zündverzug, aufgrund des kleinen Bereichs erhöhter Feldstärke der für ein Startelektron direkt vor der gekrümmten Elektrode zur Verfügung steht, auftreten (Bild 3.2b unten). Diese statistische Streuzzeit bis zur Entstehung eines Startelektrons ist durch zunächst unregelmäßige Koronaimpulse bei Einsatzspannung zu erkennen. Durch die Entladungen entsteht eine positive Raumladungswolke vor der gekrümmten Elektrode, welche das elektrische Feld direkt vor der Anode erhöht und das Feld im restlichen Bereich vergleichmäßigt. Dadurch wird das Wachstum der Streamer in den feldschwachen Bereich hinausgezögert. Erst wenn durch Erhöhen der Spannung im feldschwachen Bereich ausreichend hohe Feldstärken auftreten können Streamer bis zur Gegenelektrode verwachsen und einen vollständigen Durchschlag einleiten. Diese Vorentladungen und Differenz zwischen Einsatz- und Durchschlagsspannung sind für die zerstörungsfreie Prüfung bzw. Diagnose mithilfe der Teilentladungsmessung von großer Bedeutung [Sch74; Küc17].

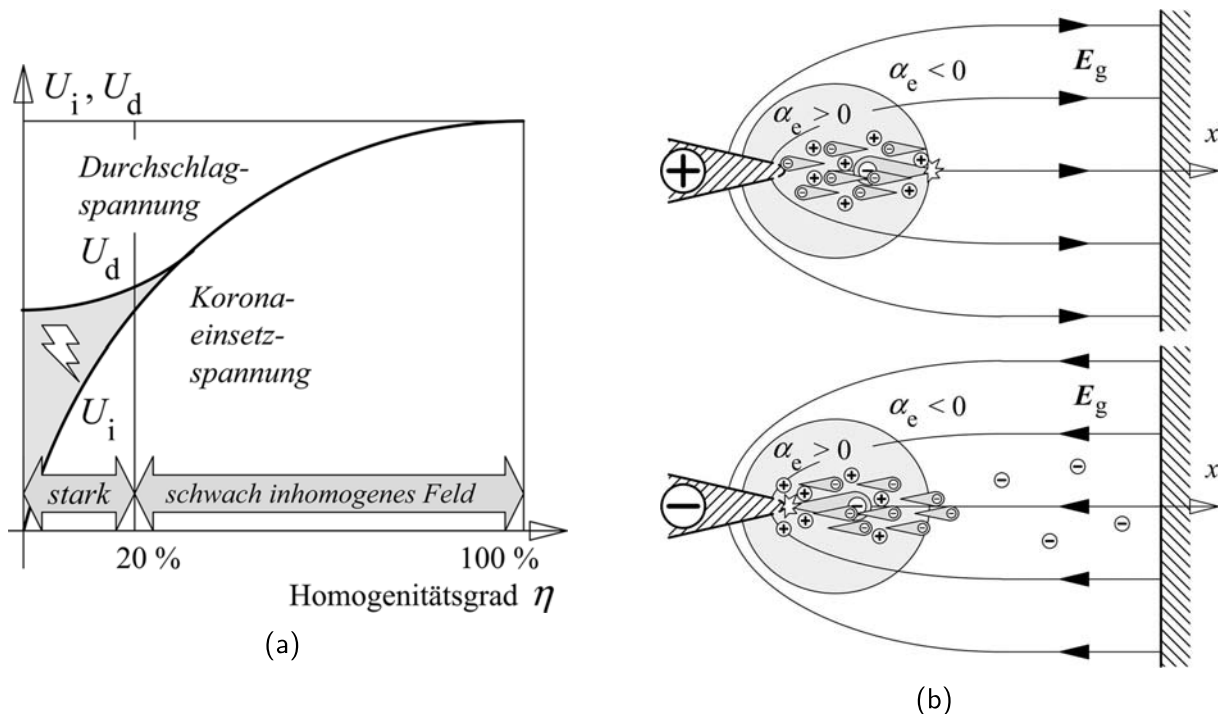


Bild 3.2: Unterschied zwischen Einsatz- und Durchschlagsspannung in Abhängigkeit des Homogenitätsgrad (a) sowie Raumladungsverteilung bei einer Spitze-Platte-Anordnung mit Spannung positiver und negativer Polarität (b) [Küc17]

3.2.2 Koronastabilisierung

Sowohl bei Spannung mit positiver als auch negativer Polarität können impulslose Entladungsformen auftreten, die nicht als Stromimpulse an den Klemmen des Prüflings detektiert werden können. Diese stabilen Glimmentladungen bei Spannung mit positiver Polarität und negativen Steh-Stielbüschel bei Spannung mit negativer Polarität erzeugen aufgrund sehr schnell aufeinanderfolgender Entladungsimpulse mit kleiner Amplitude einen konstanten Gleichstrom durch den Prüfling. In der Literatur sind diese Entladungsformen meist mit dem Begriff „Koronastabilisierung“, „Raumladungsstabilisierung“ oder „pulseless Glow“ zu finden. Die genauen Einflussfaktoren dieser Entladungen werden in unterschiedlichen Untersuchungen diskutiert [Kon+78; Cha+91; Tak+99; Tak+01; Che+19].

Der prinzipielle Ablauf der Koronastabilisierung kann anhand der in Bild 3.3 dargestellten Abfolge der Entladungen und Verteilung der geladenen Ionen bei einem niedrigen und hohen Spannungswert gezeigt werden. Bei Entladungen mit niedrigerem Spannungswert nimmt die Wahrscheinlichkeit einer Entladung aufgrund der Verringerung des kritischen Volumens im Bereich der Spitze ab. Dadurch können weitere Entladungen für die Zeitdauer bis zum Vorhandensein eines Startelektrons in diesem Bereich oder die Zeitdauer der Rekombination und des Abdriftens der Raumladungszone unterbunden werden. Zusätzlich werden durch die negative Raumladungszone vor der Spitze und das geringe elektrische Feld in Richtung Erdelektrode Entladungen mit hoher Amplitude vermieden. Erst nach dem Abdriften der positiven Raumladungszone ist eine weitere Entladung mit hoher

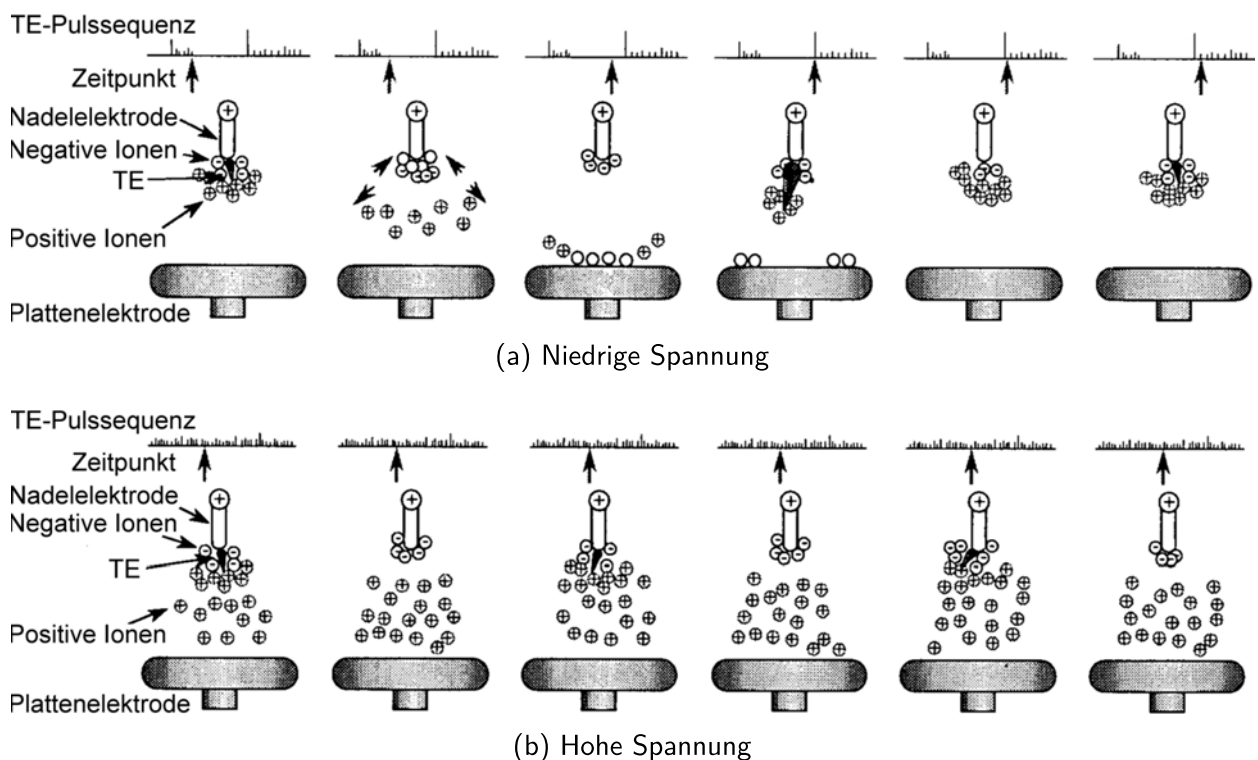


Bild 3.3: Schematische Verteilung der entstehenden Raumladungen bei Teilentladungen an einer Spitze auf Hochspannung mit unterschiedlichen Höhen der Gleichspannung mit positiver Polarität (nach [Tak+01])

Amplitude möglich. Bei höherer Spannung sind das kritische Volumen vor der Spitze und somit auch die Wahrscheinlichkeit eines Startelektrons durch Fremdionisation höher. Zusätzlich kann die Anzahl der negativen Ionen vor der Spitze als größer und die Erzeugung neuer Elektronen beim Auftreffen auf die positive Spitze als wahrscheinlicher angenommen werden. Dadurch wird eine hohe Anzahl an Entladungen mit kleiner Amplitude und somit auch eine kontinuierlich abdriftende positive Raumladungswolke erzeugt. Die entstehenden Stromimpulse an den Klemmen des Prüflings werden durch den kontinuierlichen Stromfluss überlagert und können aufgrund ihrer geringen Amplitude vom Teilentladungsmesssystem nicht mehr detektiert werden. [Kon+78; Tak+99; Tak+01; Hin02; Has13].

3.3 Elektrische Feldverteilung in festen Isolierstoffen

3.3.1 Kapazitiv-resistiver Übergang

Die Betrachtung der Feldverteilung in Gas-Feststoff-Isoliersystemen bei Gleichspannungsbeanspruchung erfordert die Berücksichtigung mehrerer physikalischer Phänomene, die bei der Beanspruchung mit Wechselspannung vernachlässigt werden können. Direkt nach dem Anlegen einer Gleichspannung stellt sich in Abhängigkeit der Permittivität der Isoliermedien wie bei Wechselspannung eine elektrostatische Feldverteilung ein. Dieses Feld geht anschließend in ein quasistationäres durch die Leitfähigkeiten bestimmtes Strömungsfeld über. In Bild 3.4 sind die Temperaturverteilung sowie kapazitive und resistive Feldverteilung an einem Stützisulator mit einer Temperaturdifferenz von 80 K gegenübergestellt. Die Zeitdauern dieses Übergangs kann im Bereich von Stunden bis zu Monaten liegen und wird hauptsächlich von der Leitfähigkeit der Isoliermedien bestimmt. Diese sind wiederum nichtlinear von weiteren Einflussfaktoren wie der Temperatur und der elektrischen Feldstärke abhängig [Küc17; Win+14; Her16].

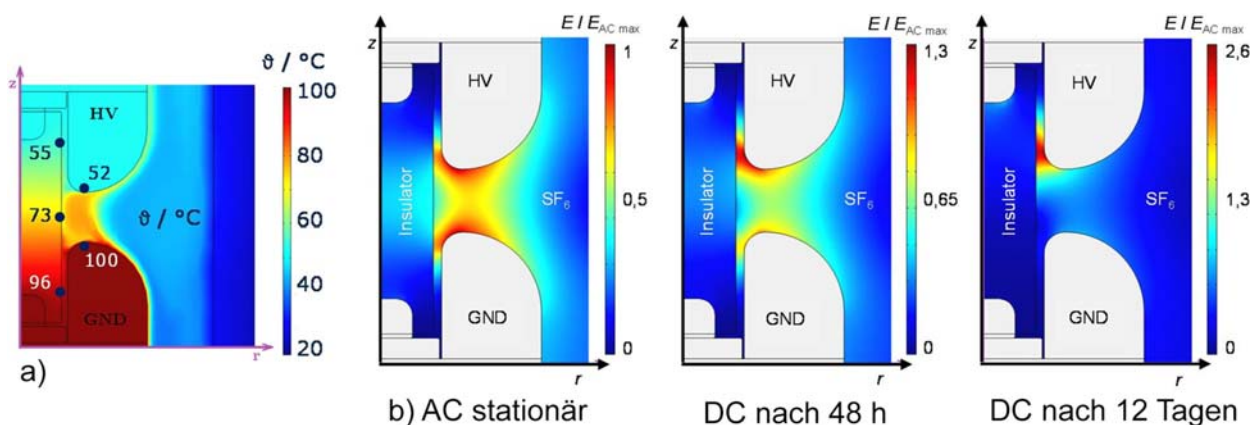


Bild 3.4: Versuchsanordnung und Temperaturverteilung an einem Isolator (Rotationssymmetrisch um z-Achse) (a) und Simulation der Feldverteilung (b) bei Beanspruchung mit Wechselspannung sowie Gleichspannung für eine Zeitdauer von 48 h und 12 Tagen [Gre+16]

3.3.2 Temperaturabhängigkeit der Feldverteilung

Der schwankende Betriebsstrom und auch Fehlerstrom in einer Hochspannungskomponente verursacht einen Temperaturgradienten zwischen Leiter und Gehäuse. Dieser beeinflusst neben der Leitfähigkeit der festen Isolierstoffe auch die Dichte von gasförmigen Isolierstoffen in unmittelbarer Nähe des Leiters. Je nach Temperaturdifferenz wird die Feldverteilung dadurch deutlich beeinflusst (Bild 3.5). Die Leitfähigkeit von festen Isolierstoffen ändert sich im Bereich der Betriebstemperatur um mehrere Größenordnungen [Wee85]. Dadurch ist die Feldverteilung beim Übergang des kapazitiven zum resistiven Feld und das stationäre Feld stark von der Temperatur und vom Temperaturgradienten abhängig. Eine höhere Temperatur führt allgemein zu einem schnelleren Feldübergang. Durch eine Änderung der Last wird durch die damit verbundenen Temperaturänderung auch die Feldverteilung im Isoliermedium beeinflusst. Die Gasdichte hat einen direkten Einfluss auf die Spannungsfestigkeit. Insbesondere in der Nähe von Leitern mit hoher Temperatur kann die daraus resultierende geringere Gasdichte zu einer Herabsetzung der Teilentladungseinsetz- und Durchschlagsspannung führen. Beim Wiedereinschalten von Komponenten nach der Beanspruchung mit einem Kurzschlussstrom muss die erhöhte Temperatur des Leiters im Bezug auf die maximale Belastung des Isoliersystems berücksichtigt werden [Küc17; Her+17].

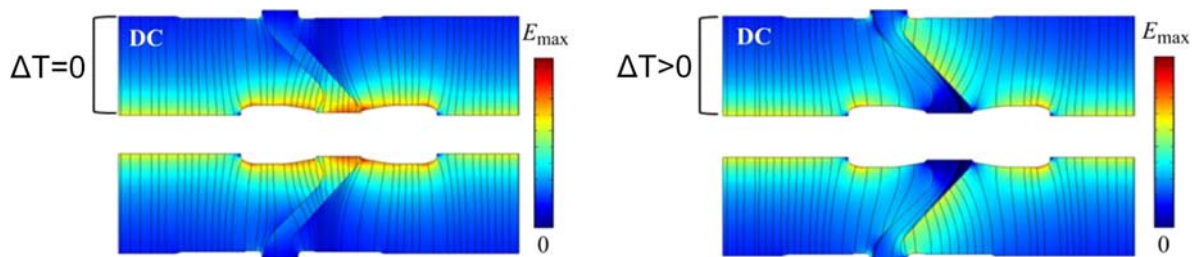


Bild 3.5: Feldverteilung an einem Isolator bei Gleichspannung ohne (links) und mit (rechts) Temperaturunterschied ΔT zwischen Leiter und Gehäuse [Kos+18]

3.3.3 Oberflächen- und Raumladungsansammlungen

Der Übergang des elektrostatischen Feldes in das quasistationäre Strömungsfeld durch die Verschiebung und Ausrichtung der Ladungen im Isoliermaterial, geht mit der Bildung von Oberflächen- und Raumladungen aufgrund der unterschiedlichen Stromdichten in den beteiligten Isoliermaterialien einher. Die Leitfähigkeit von festen und gasförmigen Isolierstoffen unterscheidet sich um mehrere Größenordnungen. Durch diesen Sprung der Leitfähigkeit an der Grenzschicht zwischen festen und gasförmigen Isoliersystemen und die damit verbundene Diskontinuität der Stromdichte führt zu einer Ansammlung von Ladungen. Die angesammelten Ladungen beeinflussen das elektrische Feld durch ein zusätzliches dielektrisches Verschiebungsfeld und Vergleichmäßigung der Stromdichte. Als Ursache für die Bildung der Oberflächenleitfähigkeit werden in der Literatur drei Ursachen genannt [Win+02; Oka07; Kin+08; CTB506; Her16; Noa+17]. Die Volumenleitfähigkeit des Fest-

stoffisolators, die Oberflächenleitfähigkeit entlang der Feststoffoberfläche und die Gasleitfähigkeit durch Drift der Ionen im Gasraum. Diese Prozesse können besonders durch die Erzeugung von freien Ladungsträgern an Defekten im Isoliersystem beschleunigt werden. Bild 3.6 zeigt die Feldverteilung an einem Schottisolator in Abhängigkeit der erzeugten freien Ladungsträger im Gasraum [Küc17; Gre+16; Her16].

Zur detaillierten Beschreibung der weiteren Mechanismen, wie die Beeinflussung durch Störstellen und die Wechselwirkung an der Grenzfläche sowie dem Ladungsträgerabbau, sei auf die genannte Literatur verwiesen [CTB506].

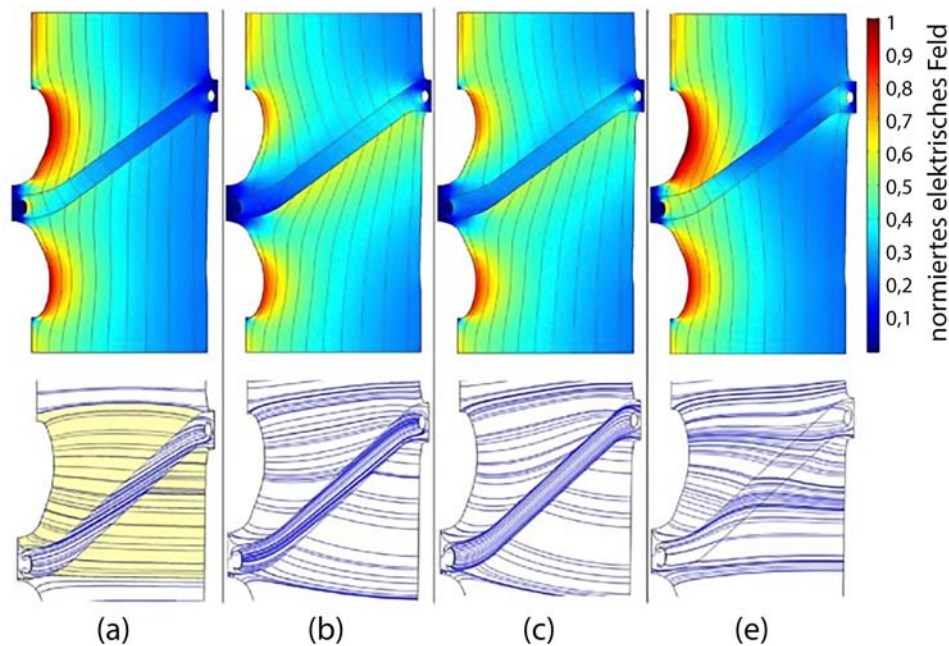


Bild 3.6: Feldverteilung und Äquipotentiallinien sowie Feldlinien an einem Schottisolator bei Wechselspannung (a) und Gleichspannung (b) sowie zusätzlicher Erzeugung von Ladungsträger im Gasraum (gelb) durch natürliche Ionisation (c) und einer Fehlerstelle (10-fache natürliche Ionisation) (d) [Rie+16]

3.4 Modelle unterschiedlicher Teilentladungs-Defekte

3.4.1 Äußere Teilentladungen

Beim Überschreiten der kritischen Feldstärke an Elektroden setzen in Gasen Entladungsmechanismen ein (Kapitel 3.2). An stark gekrümmten Elektroden kommt es aufgrund des inhomogenen Feldes durch Stoßionisation und Fotoionisation zu unvollkommenen Durchschlägen. Diese werden als Koronaentladungen bzw. äußere Entladungen bezeichnet. Durch die selbstheilende Eigenschaft von Gasen sind äußere Entladungen als verhältnismäßig unkritisch anzusehen. Durch die entstehenden Ladungsträger sowie Zersetzungsprodukte kann die Durchschlagsfestigkeit jedoch stark herabgesetzt werden. Die Entladungen können auch an Grenzschichten zu festen Isolierstoffen auftreten und zu einer langfristigen Schädigung der Isolierung führen.

Für die elektrische Beschreibung von Koronaentladungen sind in der Literatur einfache Ersatzschaltbilder für Koronaentladungen am Erdpotential bei Wechselspannung zu finden (Bild 3.7). Die Kapazität C_1 stellt darin die der durchschlagenden Gasstrecke zugeordnete Kapazität dar. Diese wird beim Erreichen der Zündspannung U_Z der Funkenstrecke F vollständig entladen. Die infolge der Entladung erzeugten Ladungsträger driften in den Feldraum und bewirken dadurch einen fließenden Strom bzw. eine gewisse Leitfähigkeit der Isolierstrecke, die im Ersatzschaltbild durch den Widerstand R_2 dargestellt werden kann. Die durch die Anordnung gegebene Parallelkapazität zwischen den bei der Teilentladung beteiligten Strecke und der intakten Strecke wird durch C_3 beschrieben. Im Fall der Beanspruchung mit einer Wechselspannung $u(t)$ kann $R_2 \gg 1/\omega C_1$ angenommen werden.

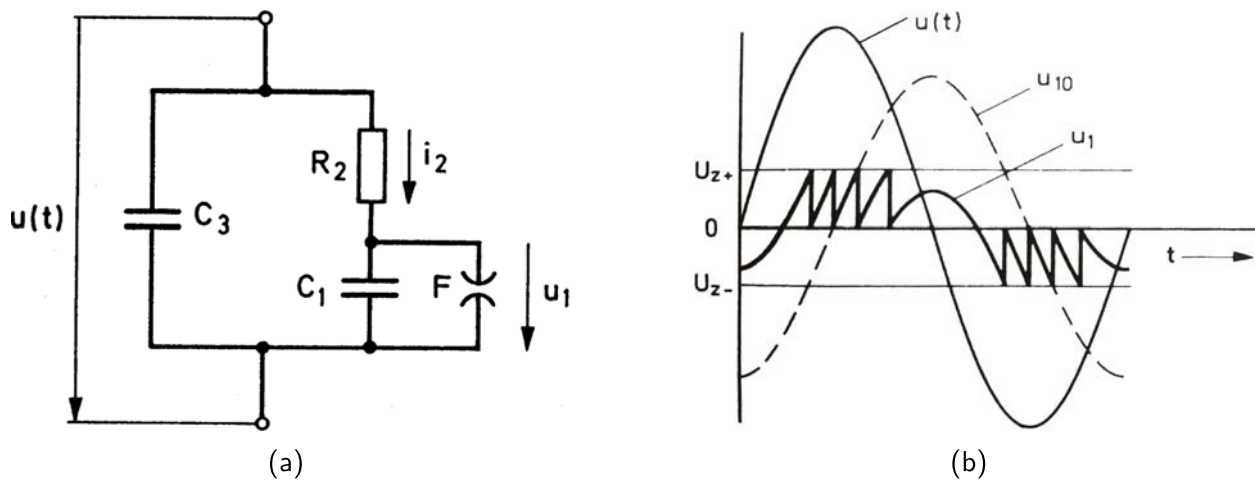


Bild 3.7: Ersatzschaltbild einer Anordnung für äußere Teilentladungen bei Wechselspannung (a) und zugehörige Spannungsverläufe (b) [Kin72]

Der Strom i_2 durch R_2 ergibt sich somit zu [Kre64; Kin72]:

$$i_2 = \frac{u(t)}{R_2} \quad (3.5)$$

Die fiktive Leerlaufspannung ohne Entladungen an der Kapazität C_1 entspricht im eingeschwungenem Zustand bei einer sinusförmigen Wechselspannung mit dem Scheitelwert \hat{U} :

$$u_{10}(t) = \frac{\hat{U}}{\omega C_1 \cdot R_2} \cdot \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (3.6)$$

Wenn der Scheitelwert der Prüfspannung die Einsetzspannung U_i erreicht, wird auch an der Funkenstrecke die Zündspannung U_Z überschritten.

$$\hat{U}_i = \omega C_1 \cdot R_2 \cdot U_Z \quad (3.7)$$

Daraufhin wird die Kapazität C_1 über die Funkenstrecke F kurzgeschlossen und entladen. Im Anschluss folgt die Spannung dem Verlauf der angelegten Spannung $u(t)$. Nachdem die Funkenstre-

cke erlischt, wird die Kapazität C_1 über den Widerstand R_2 erneut geladen, bis die Zündspannung erreicht. Wie an den Spannungsverläufen in Bild 3.7b zu erkennen, liegt dies jeweils im Bereich der Spannungsmaxima. Aufgrund des Polaritätseffektes ist die Zündspannung bei Spannung mit positiver und negativer Polarität unterschiedlich. Das Modell muss daher für die positive und die negative Halbwelle der Spannung getrennt betrachtet werden.

Bei jeder einzelnen Entladung wird in der Funkenstrecke die Ladung q_1 von der Spannungsquelle über den Widerstand R_2 an C_1 ausgeglichen. Diese Ladungsmenge ist die bei der Entladung direkt umgesetzte Ladung und kann messtechnisch erfasst werden [Kre64; Kin72].

$$q_1 = C_1 \cdot U_Z = \frac{\hat{U}_i}{\omega R_2} \quad (3.8)$$

Für die Erklärung bei Gleichspannung ist dieses Modell prinzipiell auf gleichermaßen geeignet. Dabei wird die Kapazität C_1 nach dem Zünden der Funkenstrecke über den Widerstand R_2 geladen welcher die im Gas driftenden freien Ladungsträger modelliert. Je nach Isoliermedium, erzeugten Ladungsträgern und Driftgeschwindigkeit der Ladungsträger ist die Zeitkonstante und somit der Abstand aufeinanderfolgender Entladungen unterschiedlich. Sonstige auftretenden Effekte, wie z. B. die Koronastabilisierung, können mit diesem Modell nicht beschrieben werden.

Einige weitere typische Defekte gasisolierter Systeme können mit einem auf diesem Ersatzschaltbild aufbauenden Modell beschrieben werden, da diese auf Koronaentladungen zurückgehen. Der Unterschied liegt meist in der Aufladung bzw. dem Ladungsausgleich nach einer Entladung. Das freie Potential oder das Partikel auf einem Isolator wird bei Gleichspannung über parasitäre Widerstände der beteiligten Isolatoren geladen, bis das kritische Feld in bestimmten Bereichen erreicht wird, Koronaentladungen auftreten und dadurch die Ladung wiederholt abgebaut wird. Durch die entstehenden freien Ladungsträger und die beteiligten festen Isolierstoffe können aufgrund der Ansammlung von abschirmenden Ladungsträgern unterschiedliche Effekte auftreten. Auch das TE-Verhalten freier metallischer Partikel geht auf Koronaentladungen zurück. Durch die auftretenden coulombsche Kräfte und die freie Bewegung der Partikel sowie den direkten Ladungsaustausch durch Berührung der Elektroden besitzen diese Defekte jedoch ein von diesem Modell abweichendes Teilentladungsverhalten.

3.4.2 Innere Teilentladungen

Innere Teilentladungen treten in Fehlstellen innerhalb fester oder flüssiger Isoliermaterialien auf. Die Fehlstellen werden dabei meist durch gasgefüllte Hohlräume wie z. B. Blasen oder Risse gebildet. Bei einer Teilentladung, also einem Teildurchschlag im Hohlraum, ergeben sich Feldveränderungen, die mit Ladungsverschiebungen im Hohlraum und an den äußeren Elektroden verbunden sind. Die bei der Teilentladung auftretenden elektromagnetischen Wellen oder die Ladungsverschiebungen an den Elektroden können mithilfe unterschiedlicher Teilentladungs-Messmethoden detektiert

werden. Zur Modellierung und Beschreibung von inneren Teilentladungen eignen sich das klassische a-b-c-Modell als Ersatzschaltbild mit diskreten Bauteilen sowie ein feldtheoretischer Ansatz mit Dipol-Modell. Um die Alterung der Isolierung aufgrund von Teilentladungen und das Entstehen von Treeing-Phänomenen zu beschreiben, sind in der Literatur für die beteiligten Isoliermedien unterschiedliche chemische und thermodynamische Ansätze zu finden.

a-b-c-Modell - Klassischer Ansatz

Das einfache a-b-c-Modell zur Erklärung von Teilentladungen bei Wechselspannung (Bild 3.8a) geht auf die Untersuchungen von Gemant und Philipoff [Gem+32] zurück und wurde von Kreuger um eine Parallelkapazität erweitert [Kre64]. In diesem Ersatzschaltbild wird der Hohlraum durch die Kapazität C_c und eine parallele Funkenstrecke F dargestellt. Mit der Kapazität C_b werden die Kapazitäten des intakten Dielektrikums in Serie zum Hohlraum zusammengefasst. Die Kapazität C_a stellt den parallelen intakten Teil des Dielektrikums des Prüflings dar. Überschreitet die Spannung am Hohlraum den Wert der Zündspannung und steht ein Startelektron zur Verfügung, so findet eine Teilentladung statt. Dies wird im Modell durch das Zünden der Funkenstrecke modelliert. Die Spannung über dem Hohlraum bricht dabei auf die sogenannte Löschspannung zusammen. Die Nachladung der Hohlraumkapazität erfolgt kapazitiv über die Kapazität C_b . Je nach Höhe der Hohlraumspannung können bei Wechselspannung mehrfach Teilentladungen im Bereich steigender und fallender Spannung auftreten. Theoretisch wird die Zündspannung in jeder Halbwelle der Wechselspannung erreicht. In der Praxis können die Entladungen durch das Fehlen von Startelektronen, leitfähige Zersetzungsprodukte an der Oberfläche des Hohlraums, steigenden Druck im Hohlraum usw. gestört werden [Kön93; Küc17].

Bei Wechselspannung ergibt sich die Leerlaufspannung u_{c0} am Hohlraum aus dem kapazitiven Spannungsteiler von C_b und C_c . Nach Erreichen der Zündspannung u_z kommt es an der Hohlraumkapazität zu einem Spannungseinbruch Δu_c und die Hohlraumkapazität C_c sowie die Serienkapazität C_b werden entladen. Im Anschluss erfolgt ein wiederholtes Laden der Kapazität C_c proportional zur Prüfspannung u_a bis die Zündspannung erneut erreicht wird (Bild 3.8b). Aus diesem Grund treten die Teilentladungen bevorzugt im Bereich des Nulldurchgangs auf. Der Strom bei der Entladung setzt sich aus i_c und i_b zusammen. Der Strom i_b fließt ebenfalls durch die Kapazität des Testobjekts C_a , da für die Zeitdauer der Teilentladung der Prüfling als vom restlichen Prüfaufbau entkoppelt angesehen werden kann. Dabei kann zwischen interner und externer Ladungen unterschieden werden. Die interne Ladung q_c ist das zeitliche Integral der Ströme $i_c + i_b$ und beschreibt die reale Ladung.

Unter der Annahme, dass die Kapazität C_a des intakten Teil des Prüflings überproportional größer ist als die Hohlraumkapazität C_c und die Serienkapazitäten C_b ($C_a \gg C_c \gg C_b$), kann die innere Ladung q_c durch folgende Annäherung (Gleichung 3.9) bestimmt werden:

$$q_c = \Delta u_c \cdot \left(\frac{C_b \cdot C_a}{C_b + C_a} + C_c \right) \approx \Delta u_c \cdot (C_b + C_c) \quad (3.9)$$

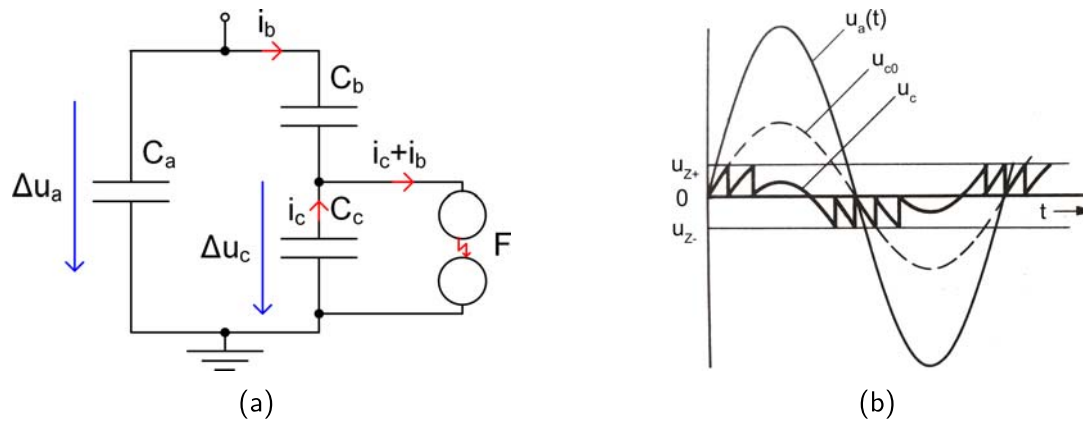


Bild 3.8: Klassisches kapazitives a-b-c-Modell für Wechselspannung (a) und zugehörige Spannungsverläufe (b) (nach [Kin72])

Die externe Ladung q_a entspricht dem zeitlichen Integral des Kreisstroms i_b der beim Zünden der Funkenstrecke durch die Serienschaltung der Kondensatoren C_b und C_a fließt. Unter der Annahme, dass der Prüfling für die Zeitdauer der Entladung (einige Nanosekunden) vom restlichen Prüfkreis induktiv entkoppelt ist, kommt es dadurch zu einem Spannungseinbruch Δu_a an den Prüflingsklemmen, welcher proportional dem Teilverhältnis des kapazitiven Teilers C_a und C_b ist. Daraus ergibt sich in Kombination mit Gleichung 3.9 die externe Ladung, welche als nachfließende Ladung an den Klemmen des Prüflings gemessen werden kann:

$$q_a = \Delta u_a \cdot C_a = \Delta u_c \frac{C_b}{C_b + C_a} \cdot C_a \approx \Delta u_c \cdot C_b = q_c \frac{C_b}{C_b + C_c} \approx q_c \cdot \frac{C_b}{C_c} \quad (3.10)$$

Diese externe, an den Klemmen messbare Ladung q_a wird auch als scheinbare Ladung bezeichnet und verhält sich proportional dem unbekanntem Verhältnis der Kapazitäten C_b und C_c . Mit der zuvor getroffenen Annahme, dass die Serienkapazität C_b um ein Vielfaches kleiner ist als die Hohlraumkapazität C_c , folgt, dass die innere Ladung um ein Vielfaches höher ist als die scheinbare Ladung: $q_a \ll q_c$. Trotzdem hat sich die scheinbare Ladung als Kenngröße zur Bewertung der TE-Intensität in der Praxis bewährt [Kre64; Küc17; IEC60270].

Bei Gleichspannung kann das Ersatzschaltbild mit Widerständen parallel zu den oben beschriebenen Kapazitäten ergänzt werden (Bild 3.9). Diese stellen die resistiven Anteile der Isolierung dar und sind sehr hochohmig. Bei schnellen Vorgängen, wie im Zeitfenster einer Teilentladung, werden die transienten Stromimpulse durch die Widerstände nicht beeinflusst und der Vorgang kann anhand des rein kapazitiven a-b-c-Modells beschrieben werden. Nach der Teilentladung erfolgt die Nachladung der Hohlraumkapazität über die großen Isolationswiderstände und die Serienkapazitäten spielen keine Rolle. Daraus resultieren, im Vergleich zur Wechselspannung, große elektrische Zeitkonstanten und längere zeitliche Abstände aufeinanderfolgender Teilentladungsimpulse. Die bei Gleichspannung beobachtete Abnahme der Teilentladungen mit der Zeit kann mit diesem Modell nicht erklärt werden [Fro95; Lem16].

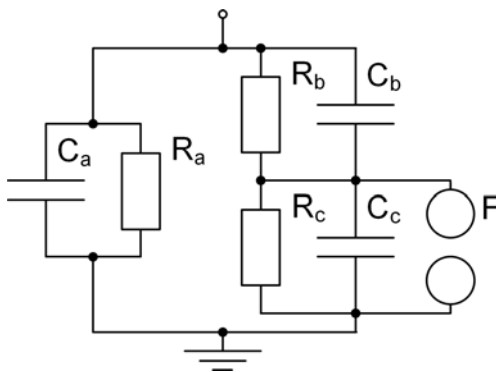


Bild 3.9: Erweitertes a-b-c-Modell für Gleichspannung (nach [Fro95])

Dipol-Modell - Feldtheoretischer Ansatz

In den 1980er-Jahren beschrieben Petersen und seine Kollegen, dass innere Teilentladungen nicht mit Kapazitäten erklärt und dargestellt werden können [Ped87; Ped+91; Ped+94; Ped+95]. Sie modellieren die Vorgänge einer Entladung in einem Hohlraum mit einem feldtheoretischen Ansatz, welcher auf einem Dipolmoment beruht. Dieser wurde in der Vergangenheit mehr oder weniger ignoriert und das kapazitive a-b-c-Modell war für die meisten Erklärungen ausreichend. In mehreren Arbeiten wurde der feldtheoretische Ansatz aufgegriffen und versucht, diesen in einer weniger mathematischen Weise darzustellen [Mor93; Nie95; Ach+08; Lem12; Lem13; Lem16; Hof+18]. Besonders durch das steigende Interesse an der Teilentladungsmessung bei Gleichspannung wird dieser Ansatz zur Erklärung einiger Effekte neu an Bedeutung gewinnen.

Im Modell werden die am Prüfling detektierbaren elektromagnetischen Transienten nicht durch die Entladung einer imaginären Hohlraumkapazität verursacht, sondern durch ein Dipolmoment, welches als Folge der Gasentladung im Hohlraum erzeugt wird (Bild 3.10). Bei der Analyse des Modells kann festgestellt werden, dass während der für die Ermittlung des Dipolmoments erforderlichen Übergangszeit nur das durch Raumladungen verursachte Poisson-Feld berücksichtigt werden muss. Das von den Elektroden erzeugte Laplace-Feld kann vernachlässigt werden, da die Prüfspannung während der Übergangszeit von wenigen Nanosekunden konstant bleibt.

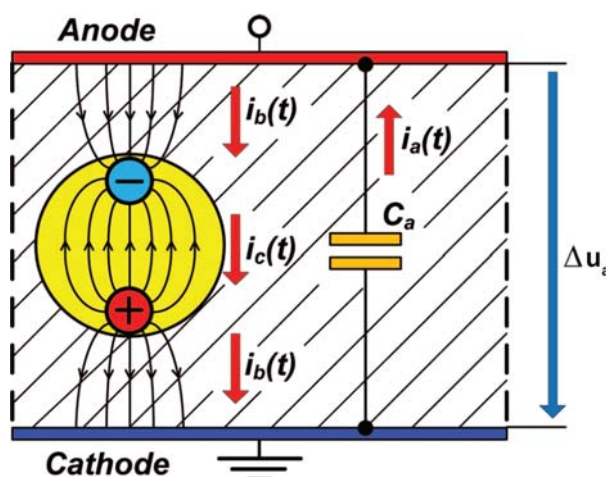


Bild 3.10: Dipolmodell des feldtheoretischen Ansatzes [Lem12]

Um die Kontinuitätsgleichung zu erfüllen, muss der Strom $i_c(t)$, welcher durch die bewegten Ladungsträger im Hohlraum erzeugt wird, gleich dem Verschiebungsstrom $i_b(t)$ durch das feste Dielektrikum zwischen dem Hohlraum und den Elektroden und gleich dem Strom $i_a(t)$ durch die Kapazität C_a des Prüfobjekts sein. C_a wird durch diesen Strom teilweise entladen woraus sich der Spannungsabfall Δu_a ergibt. Werden die Ströme über die für die Ermittlung des Dipolmoments erforderliche Übergangszeit t_e integriert, ergeben sich die Ladungen q_a , q_b und q_c gemäß Gleichung 3.11 [Ped87; Nie95; Lem12].

$$\int_0^{t_e} i_c dt = \int_0^{t_e} i_b dt = \int_0^{t_e} i_a dt = q_c = q_b = q_a = \Delta u_a \cdot C_a \quad (3.11)$$

Nach dem feldtheoretischen Ansatz sind diese Ladungen gleich der Ladung, die als Folge des Dipolmoments μ an den Elektroden des Prüfkörpers beeinflusst wird (Gleichung 3.12). λ ist dabei eine vom Ort der Raumladung in Bezug auf die Elektrode abhängige, dimensionslose Funktion und d der Abstand zwischen den Elektroden.

$$q_c = q_b = q_a = \mu \cdot \frac{\partial \lambda}{\partial d} = \mu \cdot \nabla \lambda \quad (3.12)$$

Zur einfacheren Erklärung des Modells wurde anstatt der Gasentladungen in kugel- und zylinderförmigen Hohlräumen die Einführung eines Dipolmoments in einem homogenen Feld zwischen zwei festen elektrisch nicht leitfähigen Schichten vorgenommen (Bild 3.11) [Lem12]. Hierbei wird durch zwei feste isolierende Schichten mit dem Abstand d_c , die sich symmetrisch zwischen zwei Elektroden mit dem Abstand d_b befinden, der Hohlraum in einem Dielektrikum nachgebildet und eine Ausbreitung der Ladungsträger verhindert. Zur weiteren Vereinfachung werden die bei der Entladung entstandenen Ladungsträger als Punktladungen und vorerst nur als einzelnes Elektron mit der Elementarladung e und der Driftgeschwindigkeit v_e angenommen. Bei diesen Annahmen ergeben sich unter Beachtung des Ramo-Shockley-Theorem¹ und des Konzepts der Spiegelladung für den Verschiebungsstrom i_e , welcher von einem bewegten Elektron zwischen den Elektroden hervorgerufen wird [Fro56; Lem12; Lem13]:

$$i_e(t) = \frac{e \cdot v_e}{d_b} = \frac{e}{d_b} \cdot \frac{dx_e}{dt} \quad (3.13)$$

Der selbe Zusammenhang kann über die Energie dw_e , die vom elektrischen Feld E_i bei der Einsetzspannung U_i auf das Elektron in einem Streckenintervall dx_e bzw. Zeitintervall dt übertragen wird, hergestellt werden:

$$dw_e = e \cdot E_i \cdot dx_e = e \cdot E_i \cdot v_e \cdot dt \quad (3.14)$$

¹Das Ramo-Shockley-Theorem ermöglicht eine einfache Berechnung des beeinflussten Stroms auf eine Elektrode, welcher durch eine bewegte Ladung in der Nähe der Elektrode hervorgerufen wird. Es basiert auf der Änderung der elektrostatischen Flusslinien, die auf der Elektrode enden.

Diese Energie muss bei der Spannung U_i durch den Strom i_e im Zeitintervall dt geliefert werden.

$$dw_e = U_i \cdot i_e(t) \cdot dt \quad (3.15)$$

Aus Kombination dieser beiden Gleichungen ergibt sich äquivalent zu Gleichung 3.13

$$i_e(t) = \frac{e \cdot v_e \cdot E_i}{U_i} = \frac{e \cdot v_e}{d_b} \quad (3.16)$$

Da bei Gasentladungen bei jedem in einem Molekül freigesetztem Elektron ein positives Ion erzeugt wird, setzt sich der Verschiebungsstrom i_d aus Strom i_e und i_p zusammen.

$$i_d(t) = i_e(t) + i_p(t) = \frac{e}{d_b} \left(\frac{dx_e}{dt} + \frac{dx_p}{dt} \right) \quad (3.17)$$

Die an den Elektroden influenzierte Ladung q_d ergibt sich durch Integration von Gleichung 3.17 über die maximale Drift-Strecke $x_e = d_c - x$ für das Elektron und $x_p = x$ für das positive Ion:

$$q_d = \frac{e}{d_b} \left(\int_x^{d_c} dx_e + \int_0^x dx_p \right) = \frac{e \cdot d_c}{d_b} = \frac{e \cdot d_c \cdot E_i}{U_i} \quad (3.18)$$

Die Ladung ist somit unabhängig vom Ort der Entstehung des Elektrons und des positiven Ions zwischen den Elektroden und kann rein durch die Länge des Hohlraums in Feldrichtung d_c , der elektrischen Feldstärke E_i und der Einsetzspannung U_i dargestellt werden. Somit ergibt sich die Gesamtladung q_a bei der Entstehung mehrerer ionisierter Moleküle durch eine einfache Multiplikation mit deren Anzahl n_i und kann durch das Dipolmoment m_d angenähert werden.

$$q_a = n_i \cdot q_d = n_i \cdot e \cdot \frac{d_c}{d_b} = \frac{n_i \cdot e \cdot d_c \cdot E_i}{U_i} = m_d \cdot \frac{E_i}{U_i} \quad (3.19)$$

Die influenzierte Ladung ist somit direkt proportional dem Dipolmoment $m_d = e \cdot n_i \cdot d_c$ und umgekehrt proportional dem Elektrodenabstand d_b . Das Verhältnis d_c/d_b kann für das einfachere Verständnis in drei grundlegende Fälle eingeteilt werden, die auch graphisch beschrieben werden können (Bild 3.11b, 3.11c und 3.11d) [Lem12]:

- $d_c \ll d_b$: In diesem Fall wird vom Dipol keine Ladung auf den Elektroden influenziert, da sich die Feldlinien der positiven und negativen Ladungen als Quelle der positiven Ladung zur Senke der negativen Ladung schließen (Bild 3.11b).
- $d_c \approx 0,5 \cdot d_b$: Die induzierte Ladung entspricht in etwa der Hälfte des Wertes der positiven und negativen Ladung. Nur 50 % der Feldlinien erreichen die Elektroden (Bild 3.11c).
- $d_c \approx d_b$: Die influenzierte Ladung ist in etwa die Ladung des Dipols. Alle Feldlinien starten bzw. enden an den Elektroden (Bild 3.11d).

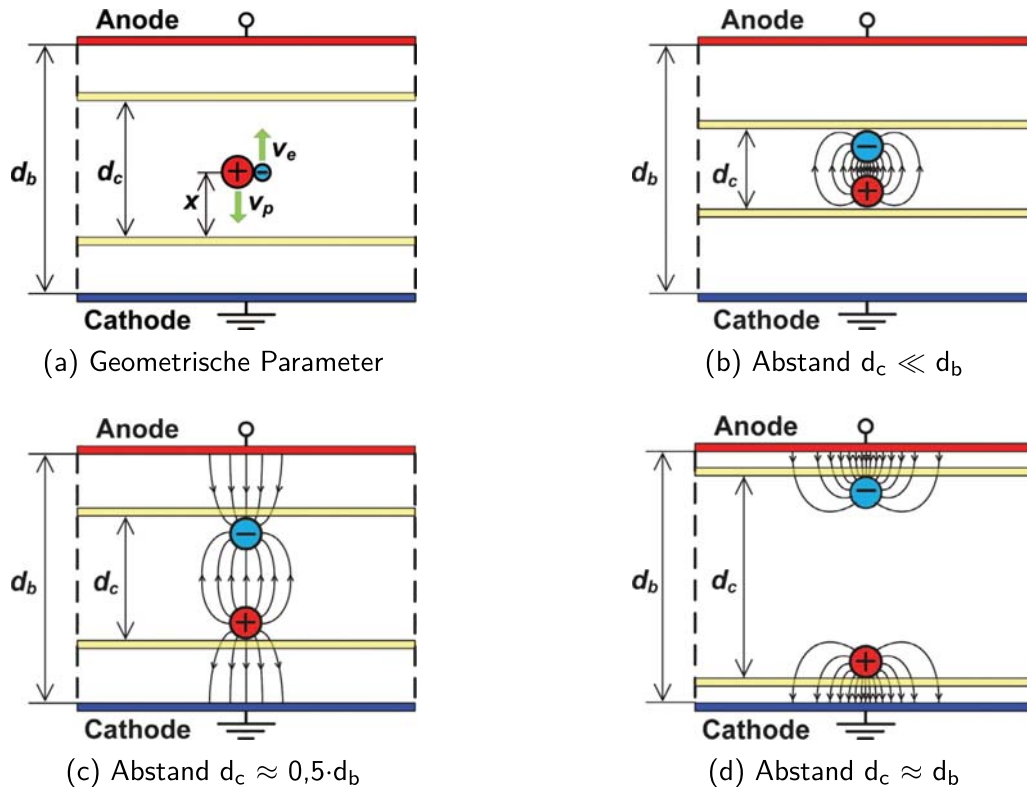


Bild 3.11: Vereinfachtes Modell zur Beschreibung der beeinflussten Ladung in Abhängigkeit des Abstands der positiven und negativen Punktladung [Lem12]

Die beeinflusste Ladung aus Gleichung 3.19 des Dipols kann mit dem Ergebnis des a-b-c-Modells aus Gleichung 3.10 verglichen werden. Die Abstände d_c und d_b können durch die umgekehrt proportionalen Kapazitäten C_b und C_c ersetzt werden. Daraus ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$q_a = e \cdot n_i \cdot \frac{d_c}{d_b} \approx q_c \cdot \frac{C_b}{C_c} \quad (3.20)$$

Unter der Annahme, dass die interne Ladung q_c gleich der Ladung ist, die von den den Elektronen und positiven Ionen getragen wird, ergibt sich aus Gleichung 3.20, dass die scheinbare Ladung gleichbedeutend mit der beeinflussten Ladung ist. Der Begriff scheinbare Ladung wird daher von einigen Autoren kritisiert, da die Impulse, die während einer Teilentladungsmessung an den Klemmen des Prüflings detektiert werden können, ohne ein äquivalentes kapazitives Ersatzschaltbild zu beschreiben sind. Bei einer exakten Theorie der Teilentladungsmessung ist der Begriff irreführend, hat nachteilige Auswirkungen auf das richtige Verständnis von Teilentladungen und führt zu falschen Aussagen. Es wird beispielsweise von Kreuger [Kre64] beschrieben, dass die innere Ladung q_c eine attraktive Wahl wäre, die Kritikalität eines Defekts zu beurteilen, da die Alterung des Dielektrikums mit dem Ladungstransfer² im Defekt zusammenhängt. Diese kann jedoch in der Realität nicht gemessen werden und die äußere Ladung q_a hat nur noch eine geringe Aussagekraft über den Ladungstransfer und somit die Kritikalität des Defekts. Bei dieser Schlussfolgerung wird

²Ladungstransfer: In diesem Zusammenhang ist damit der quantenmechanische Effekt gemeint, der die Verschiebung von Elektronendichten entlang chemischer Bindungen in Molekülkomplexen beschreibt und der große Bedeutung bei der Auflösung und Neubildung chemischer Bindungen hat.

davon ausgegangen, dass der Ladungstransfer im Defekt gleich dem Betrag der Ladungen ist, der entweder von den Elektronen oder den positiven Ionen alleine getragen wird. Diese Ladungen entgegengesetzter Polarität kompensieren sich in realen Fällen jedoch vollständig (Bild 3.11b). Die für den Ladungstransfer aussagekräftige Nettoladung, die durch den Defekt fließt, ist gleich der an den Elektroden influenzierten Ladung (Gleichung 3.19) und somit sehr wohl eine Kenngröße, die im direktem Zusammenhang mit der Kritikalität eines Defekts steht. Dies und weitere Erkenntnisse, die im Widerspruch zum klassischen a-b-c-Modell stehen, wie z. B. die Unabhängigkeit der Ladung von der Hohlraumkapazität, konnten in mehreren Untersuchungen gezeigt werden [Ped87; Ped+95; Nie95; Ach+08; Lem12; Lem13; Ovs+17].

Auch bei Gleichspannung lassen sich einige Beobachtungen mit Hilfe des feldtheoretische Ansatzes erklären. Das beschriebene Dipolmoment, welches durch die Ladungsträger an den Grenzschichten des Hohlraumes entsteht, bewirkt ein Raumladungsfeld, welches dem äußeren elektrischen Feld der Elektroden entgegenwirkt. Die resultierende elektrische Feldstärke innerhalb des Hohlraums wird daher nach einer Entladung reduziert. Weitere Entladungen werden eine Zeit lang verhindert, was allgemein als Rekombinationszeit bezeichnet wird. Bei konstanter Gleichspannung werden die Raumladungen aufgrund der hohen Widerstände des Isoliermaterials nur sehr langsam abgebaut. Die Rekombinationszeiten und somit die zeitlichen Abstände zwischen den einzelnen TE-Impulsen bei konstanter Gleichspannung können daher im Bereich von einigen Sekunden oder Minuten liegen [Fro95; Mor93; Cor+16; Lem16]. Die nach dem Anlegen einer Spannung oder nach einem Polaritätswechsel sinkende Amplitude oder der zunehmende zeitliche Abstand zwischen den Impulsen kann durch die Akkumulation von Raumladungen und Oberflächenentladungen erklärt werden. Die bei den Teilentladungen entstandenen Ladungsträger sammeln sich an den Oberflächen des Defekts an und breiten sich durch Ladungsträgerinjektion im Isoliermedium im Bereich des Defekts aus. Dadurch wird das elektrische Feld im Hohlraum verringert und die Aktivität der Entladungen nimmt nach der Änderung der Spannung ab.

Thermodynamischer Ansatz

Um Alterungserscheinungen, welche durch Teilentladungen in den unterschiedlichen festen Isolierstoffen auftreten, zu beschreiben, wurden verschiedenste thermodynamische und chemische Modelle entwickelt. Damit ist es möglich, die im Defekt auftretende Zersetzung der festen Isolierstoffe zu gasförmigen Anteilen und Kohlenwasserstoffen bei Wechselfspannung durch Depolymerisation zu beschreiben und Treeing-Phänomene zu erklären [Hed+96; Dod02; Mon13; Leo+18]. Es ist davon auszugehen, dass bei Gleichspannung die selben chemischen und thermodynamischen Effekte für die Alterung der Isolierstoffe verantwortlich sind. Der Energieeintrag ist, besonders bei Defekten in festen Isolierstoffen, aufgrund der geringeren Anzahl an Entladungen jedoch weniger stark ausgeprägt und Treeing-Phänomene werden ausschließlich durch Spannungsänderungen getriggert. Untersuchungen und Erfahrungen von Alterungsmechanismen in festen Isolierstoffen aufgrund von inneren Teilentladungen bei Gleichspannung sind bisher noch sehr begrenzt [Liu+16; Zhe+19].

4 Methoden zur Erfassung und Auswertung von Teilentladungen

4.1 Historie und aktueller Stand der Teilentladungsmessung

Die Messung und Lokalisierung von Teilentladungen in Hochspannungskomponenten für Wechselspannung ist seit den 1940er Jahren von Interesse. Zu den Unternehmen, die in diesem Bereich tätig sind, gehören Prüflabore, Universitäten, das Militär, Netzbetreiber und Hersteller von Hochspannungskomponenten auf der ganzen Welt, die sich gemeinsam die folgenden Fragen stellten [Gem+32; Aus+44; Kel63; LaK63; Nat93]:

- Was sind Teilentladungen?
- Wodurch werden Teilentladungen verursacht?
- Wie können Teilentladungen vermieden oder kontrolliert werden?

Frühe Messungen basierten auf kommerziell verfügbaren Testgeräten wie Oszilloskopen mit Bandbreiten im Bereich von Kilohertz. Bei ersten Untersuchungen und Ortungen von Teilentladungen in Isoliersystemen wurden beispielsweise tragbare Funkgeräte mit ausziehbaren Antennen als elektronische Schnüffler eingesetzt, um die Position von äußeren Teilentladungen zu ermitteln. Teilentladungen in mit Isolieröl gefüllten Transformatoren und Schaltanlagen konnten erkannt und lokalisiert werden, indem ein langes isolierendes Rohr gegen die Tankwand gelegt wurde, um hörbare Geräusche zum Ohr des Prüflingenieurs zu leiten. Es wurde auf jedes Ticken oder Zischen gehört, welches von einer Teilentladung erzeugt wurde. Mit dieser Technik, die als "hissing test" bekannt wurde, konnten Entladungen mit einer unteren Grenze von bis zu 40 pC erkannt und durch die Platzierung des Rohres an verschiedenen Stellen auch die Position der TE-Quelle abgeleitet werden [Mas49; Haw+64]. Die visuelle Beobachtung von Glimmentladungen war eine weitere frühe Technik zum Orten von Teilentladungen [Kre64].

Durch den Anstieg an Studien zu Teilentladungen in verschiedensten Isoliermaterialien mit unterschiedlichsten Messsystemen gewann die TE-Diagnostik in den 1960er Jahren weiter an Bedeutung. Meist wurden die Entladungen bzw. Stromimpulse mithilfe eines Oszilloskops in Bezug zur Phasenlage der Spannung dargestellt und ausgewertet. Hersteller, die Teilentladungs-Messgeräte zur routinemäßigen Prüfung benötigen, beteiligten sich an der Entwicklung von Prüfverfahren, Normen und der Entwicklung handelsüblicher Geräte. Die erste, hauptsächlich von der Radio-Industrie

entworfene Norm für das Messen von Funkstörungen war die NEMA 107 [NEM40]. Eines der ersten am Markt rein für diesen Zweck verkaufte Instrument war ein RIV-Messgerät (Radio Interference Voltage Meter). Dies war eine modifizierte Version eines variablen Hochfrequenz-Funkempfängers mit Skalierung in dB- und pV-Bereich, einem eingebautem Lautsprecher und einer ausziehbaren Antenne, mit der externe Störer überwacht werden konnten [Man55]. Es wurde bald klar, dass die Hochfrequenzdetektion einige Nachteile z. B. bei der Erkennung von Teilentladungen in Transformatorwicklungen bietet und einige Prüfungen und Normen eine individuelle Impulserkennung und sogar eine Impulszählung verlangen. Außerdem konnte mit dem RIV-Messgerät kein Phasenbezug zur Spannung hergestellt werden, was für die Identifikation der TE-Quellen jedoch von Bedeutung ist.

Schließlich entwickelten sich Niederfrequenzdetektoren mit mittleren Bandbreiten im kHz-Bereich. Die begrenzte Bandbreite ermöglichte Teilentladungsmessungen mit ausreichender Empfindlichkeit, die unabhängig von den hochfrequenten Dämpfungseigenschaften der zu prüfenden Vorrichtung und außerhalb der meisten hochfrequenten Resonanzen in der Testkonfiguration sind. Infolgedessen entwickelte sich ein Markt für unterschiedliche Geräte, die für bestimmte Arten von Isoliersystemen geeignet waren. So war beispielsweise der DLA (Dielektrischer Verlustanalysator) eine Verlustfaktor-Messbrücke mit Oszilloskop für die Ellipsen-Anzeige der Entladungen [Dak+60].

Die moderne Teilentladungsmessung begann mit der Einführung der ladungsbasierten Messung durch Kreuger [Kre64]. Dieser Vorschlag wurde lebhaft diskutiert und führte zur Entwicklung verschiedener Instrumente wie z. B. der "Enraf Nonius" aus Delft, dem ERA-Detektor aus Großbritannien oder dem TEM77 von Messwandlerbau Bamberg [Gro16]. Ende der 1960er Jahre kamen erste Systeme mit einer Speicherung der Amplitude der einzelnen TE-Amplituden auf einem Magnetband zum Einsatz [Sal+66] und die Messtechnik wurde mit der VDE 0434 [VDE0434] und IEC-Publikation 270 [IEC270] in eine Norm überführt. Kurz darauf wurde ein Leitfaden zur Klassifizierung von Defekten bei Wechselspannung veröffentlicht [Cig69].

Funkenstrecken (Nadel-Platte-Anordnungen) gehörten zu den frühen Kalibrierstandards [Kre64]. Da diese jedoch eine bestimmte Spannungshöhe erforderten, wurden schließlich elektronische Kalibratoren entwickelt, die teilweise sogar batteriebetrieben waren und gemeinsam mit Kalibrierrichtlinien sicherstellten, dass TE-Messungen an ähnlichen Geräten in verschiedenen Laboren vergleichbare Ergebnisse liefern [IEE67; Pra75].

Der immer häufiger eingesetzte und gegenüber Teilentladungen äußerst empfindliche Isolierstoff Polyethylen war ein weiterer großer Treiber der Teilentladungsmessung. Um empfindlichere Messungen durchzuführen zu können, entstanden abgeschirmte Prüflabore mit Filterung der Hochspannungs- und Stromversorgung sowie sensiblen Auskoppelfahren und Messinstrumente.

Der nächste Entwicklungsschritt wurde durch den Fortschritt in der Elektronik und Computertechnik eingeleitet. Im Jahr 1976 wurde das erste digitale Computersystem zur Messung von Teilentladungen präsentiert [Aus+76]. Zur Ortung von TE-Quellen wurden Ultraschalldetektoren

eingesetzt und unterschiedliche Methoden wie die Ultraschallvektor-TE-Lokalisierung wurden für Transformatoren entwickelt [Har71].

Anfang der 1990er Jahre fand das phasenaufgelöste Teilentladungsmuster zunächst in der Forschung Anwendung und führte kurz darauf zur Entwicklung leichter, tragbarer Instrumente. Zusätzliche mobile Computer und neue Software-Tools ermöglichten die Entwicklung unzähliger neuer Verfahren zur Störimpulsunterdrückung und Lokalisierung mit allen unterschiedlichen Arten von Teilentladungssensoren.

Durch die Deregulierung des Energiesektors und der entstehenden wirtschaftlichen Zwängen wurde eine Verlängerung der Nutzungsdauer von Hochspannungsbetriebsmitteln und eine kostenoptimierte Isoliersysteme in neuen Betriebsmitteln angestrebt. Dies führte dazu, dass die bis dahin meist im Labor angewandten Messsysteme zunehmend bei der Zustandsbewertung Vor-Ort und als Monitoringsysteme für unterschiedliche Betriebsmittel bei Wechselspannung eingesetzt wurden. Die Weiterentwicklungen und Fortschritte der TE-Messtechnik mit unterschiedlichen Methoden zur Störimpulsunterdrückung, Filter- und Gateing-Techniken dauert bis heute an und Geräte unterschiedlicher Hersteller sind am Markt verfügbar. Am bedeutendsten für die Anwendung in der Forschung zur Teilentladungsmessung bei Gleichspannung sind drei moderne digitale Teilentladungsmessgeräte: Das MPD600 von Omicron, welches aus dem MPD von mtronix hervorging [Mtr04; Ret06; Omi13], das ICMsystem von Power Diagnostix Systems [Pow19] sowie das DDX 9121B von Haefely Hipotronics [Hae04]. Diese bieten neben einigen Zusatzfunktionen und Spezialanwendungen die Möglichkeit, die Amplitude und den Zeitpunkt der TE-Impulse aufzuzeichnen.

Die Entwicklung von Messsystemen fokussiert sich auf unterschiedliche Methoden zur Störimpulsunterdrückung und genauen Ortung der Teilentladungsquellen. Dabei spielen auch Informationen über die Kurvenform der TE-Impulse eine immer wichtigere Rolle [Wen+08; San+16; Yus+16; Mon+17; Gov+19]. Auch die Entwicklung neuer, empfindlicher Sensoren für unterschiedliche Anwendungen schreitet voran [Wan+18; Rod+18; Rom+19; Dua+19].

4.2 Teilentladungsmessung nach IEC 60270

Die konventionelle elektrische Erfassung von Teilentladungen ist in der IEC 60270 [IEC60270] definiert. Drei grundlegenden Schaltungen mit unterschiedlichen Möglichkeiten zur Platzierung des Ankoppelvierpols stehen bei der konventionellen Erfassung von Teilentladungen zur Verfügung. Aus diesen können weitere Schaltungen für unterschiedliche Betriebsmittel abgeleitet werden, in denen beispielsweise Steuerbeläge von Durchführungen zur Auskopplung der TE-Impulse Anwendung finden. Im Wesentlichen besteht jede Schaltung aus einem Prüfling, der im Ersatzschaltbild für Wechselspannung als Kondensator C_p dargestellt ist und einem Koppelkondensator C_k oder einem zweiten Prüfling, der ähnlich dem zu untersuchenden Prüfling sein muss Bild 4.1. Weitere

Bestandteile sind die Koppereinheit CD mit Messsystem, eine Hochspannungsquelle, Hochspannungsverbindungen, sowie eine Impedanz oder ein Filter Z [IEC60270; CTB366].

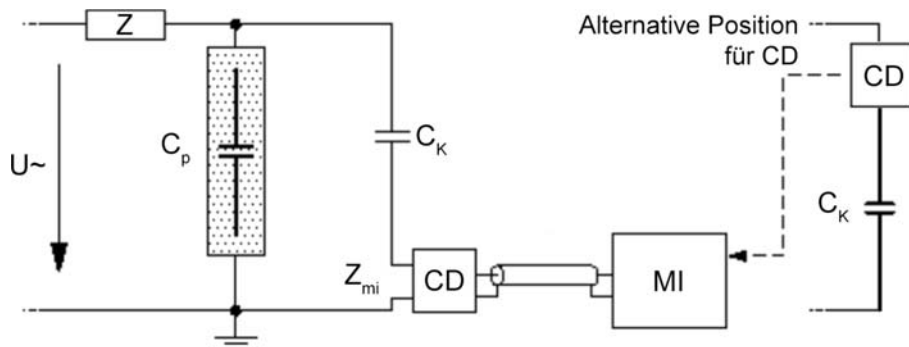


Bild 4.1: TE-Grundschialtung mit Koppereinheit in Reihe mit dem Koppelkondensator [IEC60270]

Der Koppelkondensator C_k koppelt die hochfrequenten TE-Impulse aus dem Hochspannungskreis und hält die Hochspannung und Harmonische von der Koppereinheit und dem TE-Messsystem fern. Er muss spannungsfest, induktivitätsarm und teilentladungsfrei sein. Seine Kapazität soll groß im Vergleich zur Streukapazität des Prüfkreis und der Kapazität des Prüflings sein, um eine hohe Messempfindlichkeit zu erzielen. Die Hochpasseigenschaften des Koppelkondensators sind bei der Wahl der Mittenfrequenz, besonders bei schmalbandigen Messsystemen, zu berücksichtigen, um zu gewährleisten, dass der Messbereich im annähernd konstanten spektralen Bereich der zu messenden TE-Impulse liegt.

Die Koppereinheit CD, auch Ankoppelvierpol AKV genannt, ist gewöhnlich ein aktives oder passives Netzwerk, welches die Eingangsströme in Ausgangsspannungssignale wandelt. Diese Signale werden vom Übertragungsmedium zum Messsystem übertragen. Im Bezug auf das Übertragungsverhalten sind die Koppereinheit und das Messsystem als Einheit zu sehen. Die Frequenzantwort der Koppereinheit ist so gewählt, dass die Frequenzen der Prüfspannung und deren Harmonische gefiltert werden und eine größtmögliche Empfindlichkeit im Messkreis erreicht wird. Für die Platzierung der Koppereinheit gibt es unterschiedliche Möglichkeiten. Zum einen kann die Koppereinheit am Kopf des Koppelkondensators angeordnet sein. Dabei müssen die TE-Impulse potentialfrei zum Messsystem übertragen werden. Eine weitere Möglichkeit ist es, die Koppereinheit im Erdzweig des Koppelkondensators (Bild 4.1) oder des Prüflings anzuordnen. Mit zwei Koppereinheiten kann zur Reduktion externer Störeinflüsse eine Brückenschaltung aufgebaut werden [IEC60270].

Die als Tiefpass ausgelegte Impedanz Z zwischen Prüftransformator und Messkreis blockt hochfrequente Störungen von der Hochspannungsversorgung und verhindert ein Abfließen der TE-Impulse über die Parallelkapazitäten des Prüftransformators bzw. über den Glättungskondensator des Gleichrichters bei Gleichspannung. Dadurch wird eine höhere Messempfindlichkeit erzielt.

Das Hauptmerkmal von modernen digitalen TE-Messgeräten ist die Fähigkeit, die einzelnen Antwortsignale mit angemessener Genauigkeit zu quantisieren und die für Gleichspannung grundlegenden Informationen wie die scheinbaren Ladungen bzw. TE-Amplituden q_i und die Zeitpunkte

des Auftretens t_i der TE-Impulse zu speichern. Die Antwortsignale der Koppeleinheiten sind stark von den Eigenschaften des Messsystems und nur zu einem geringen Teil von der Form der TE-Stromimpulse abhängig. Daher muss auch das Verarbeitungsverfahren an die Form der Antwortsignale angepasst sein. Die scheinbare Ladung kann bei Auftreten eines TE-Impulses als an den Klemmen des Prüflings nachgelieferte Ladung gemessen werden. Aufgrund des komplexen Aufbaus der Isolierung und der Fehlstelle ist es nicht möglich, die tatsächlich in der Fehlstelle umgesetzte Ladung zu bestimmen (Kapitel 3.1). Die Erkennung der Polarität sowie die Erfassung des der scheinbaren Ladung proportionalen ersten Scheitelwertes oder des Maximums der Scheitelwerte der überschwingenden Signale innerhalb der Impulsauflösezeit kann in einigen Fällen schwierig sein [IEC60270].

Die scheinbare Ladung q der TE-Impulse kann, wie in Kapitel 3.1 beschrieben, auf zwei unterschiedliche Arten bestimmt werden:

- Integration im Frequenzbereich (Quasi-Integration):

$$q = F(0) \approx F(f)$$

- Integration im Zeitbereich (Echte Integration):

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

Die Integration im Frequenzbereich bildet die Grundlage für die vor allem in der Anfangszeit der TE-Messtechnik vorwiegend eingesetzten Messgeräte. Diese Methode beruht darauf, dass der Scheitelwert der Impulsantwort eines Systems mit der Bandbreite Δf proportional der Ladung des Eingangsimpulses ist, solange das Frequenzspektrum der Eingangsimpulse innerhalb der Bandbreite des Messsystems konstant ist $q = F(0) \approx F(f)$ (Gleichung 3.4 in Kapitel 3.1). Die Form, die Dauer und der Scheitelwert des Ausgangsimpulses werden von der Transferimpedanz des Messsystems bestimmt und weichen von dem des Eingangsimpulses ab [IEC60270; Sch16]. Um einen Integrationsfehler durch das Verlassen des näherungsweise konstanten Frequenzbereichs der TE-Impulse zu vermeiden, werden in der IEC 60270 für die Mittenfrequenz f_m und Bandbreite Δf bzw. untere und Grenzfrequenz f_1 und f_2 des Messsystems die schmalbandige und breitbandige Messung empfohlen:

- Schmalbandige Messung:

$$9 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 30 \text{ kHz}$$

$$50 \text{ kHz} \leq f_m \leq 1 \text{ MHz}$$

- Breitbandige Messung:

$$30 \text{ kHz} \leq f_1 \leq 100 \text{ kHz}$$

$$f_2 \leq 1 \text{ MHz}$$

$$100 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 900 \text{ kHz}$$

Die Antwort schmalbandiger Messsysteme auf einen Teilentladungstromimpuls ist, unabhängig von der Polarität, eine transiente Schwingung, deren Einhüllende der positiven und negativen Scheitelwerte proportional zur scheinbaren Ladung ist. Die Information über die Polarität des TE-Impulses geht verloren und die Impulsauflösezeit liegt aufgrund der Abklingdauer der Schwingung im Bereich von $100 \mu\text{s}$.

Ein breitbandiges Messsystem antwortet im Allgemeinen mit einer gut gedämpften Schwingung auf einen Teilentladungstromimpuls. Der Scheitelwert ist proportional zur scheinbaren Ladung und die Polarität des TE-Impulses kann aus dieser Schwingung meist noch abgeleitet werden. Die Impulsauflösezeit kann bis zu $1 \mu\text{s}$ erreichen.

In Bild 4.2 sind zur Veranschaulichung dieser Schwingungen die normierten Impulsantworten eines Butterworth-Filters fünfter Ordnung mit unterschiedlichen Bandbreiten auf einen TE-Impuls mit einer Anstiegszeit von ca. 1 ns und einer Rückenhalbwertszeit von 5 ns dargestellt. Die untere Grenzfrequenz f_1 der breitbandigen Filter beträgt 100 kHz . Die Mittenfrequenz f_m des schmalbandigen Filters ($\Delta f = 9 \text{ kHz}$) entspricht 1 MHz . Es ist zu erkennen, dass die Detektion der Polarität des Eingangsimpulses aus der Antwortfunktionen der Filter mit einer Bandbreite kleiner als ca. 800 kHz alleine durch die Erkennung des Scheitelwerts nicht möglich ist. Bei schnell aufeinanderfolgenden TE-Impulsen können Überlagerungen der Impulsantworten auftreten und dadurch die Amplitude der detektierten TE-Impulse beeinflusst und sogar eine Detektion der TE-Impulse verhindert werden.

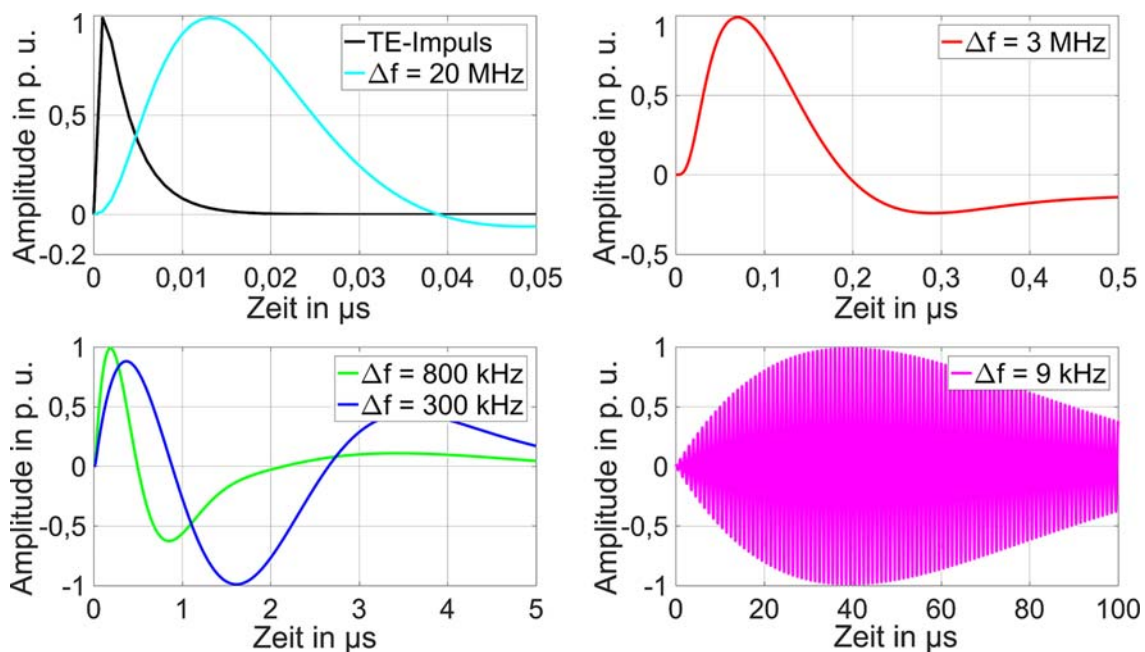


Bild 4.2: Impulsantworten eines Messsystems mit unterschiedlichen Bandbreiten auf einen TE-Impuls

Durch die Entwicklungen in der Elektrotechnik wurden echte Integrationsverfahren zur Bestimmung der scheinbaren Ladung möglich. Breitband-TE-Messgeräte mit aktivem Integrator bestehen aus einem breitbandigen Verstärker, dem ein elektronischer Integrator nachgeschaltet ist. Die

Antwort des Integrators auf einen TE-Impuls ist ein Spannungssignal, das mit der Summe der Ladung anwächst. Die endgültige Amplitude der Spannung ist proportional der Gesamtladung, wenn die Zeitkonstante des Integrators größer ist als die Dauer des TE-Impulses. In der Praxis liegt die Zeitkonstante dieser Integratoren im Bereich von einer Mikrosekunden welche auch die Impulsauflösezeit begrenzt. Auch eine numerische Bestimmung der Ladung mithilfe eines Rechenalgorithmus, der auf den von einem Digitalrecorder aufgezeichneten Impulsverlauf angewandt wird oder eine Kombination aus analogen und digitalen Verfahren ist möglich [IEC60270].

Mithilfe der Kalibrierung können die über die Streukapazitäten zur Erde abfließende Ladungen bestimmt und sichergestellt werden, dass das Messsystem in der Lage ist, TE-Impulse mit Amplituden in einem bestimmten Wertebereich korrekt zu detektieren. Die Kalibrierung ist im vollständigen Prüfkreis durchzuführen, da über dessen Streukapazitäten ein Teil der scheinbaren Ladung abfließt und nicht vom Messsystem erfasst werden kann. Dieser Anteil wird durch die Kalibrierung ermittelt und über den Maßstabsfaktor k bei der Messung der TE-Impulse berücksichtigt. Dabei werden Stromimpulse mit einer bekannten Ladung q_0 und Folgefrequenz an den Anschlussklemmen des Prüfling eingespeist und mit dem Messsystem abgeglichen. Da die Kapazität des Prüflings und Streukapazitäten die Eigenschaften des Messkreises beeinflussen, muss die Kalibrierung nach jeder Änderung im Prüfaufbau erneut durchgeführt werden [IEC60270].

4.3 Teilentladungsmessung nach der UHF-Methode

Die Anstiegszeit von Teilentladungsimpulsen in Gasen, besonders in SF₆, liegt unter 35 ps [Rei+06; Oht+11]. Die schnellen Gasentladungen erzeugen elektromagnetische Wellen, die sich im Isoliermedium des Prüflings ausbreiten. Bei der UHF-TE-Messung werden diese mit Sensoren aufgenommen und bis in den Bereich von mehreren GHz ausgewertet.

In einem idealen Rohrleiter breiten sich TEM-Wellen³ und bei entsprechenden Abmessungen auch höhere TE-⁴ und TM-Moden⁵ mit nahezu Lichtgeschwindigkeit aus [Jud+97a]. In einer realen gasisolierten Schaltanlage oder Leitung wird die Wellenausbreitung durch Dämpfung und Reflexion der Wellen an Isolatoren, Abgängen und Winkelbausteinen beeinflusst. Die genaue Ausbreitung der Welle ist aufgrund der starken Abhängigkeit vom Ort des Defekts und dem Aufbau der gasisolierten Anlage schwer zu beschreiben. Ein typischer Wert der mittleren Dämpfung der Wellen liegt bei 2 dB/km im gasgefüllten Rohr und bei 1 – 5 dB pro Schottisolator [CTB525]. Ein Vorteil der UHF-TE-Messtechnik für GIS und GIL liegt im geringen Einfluss elektromagnetischer Störungen, da Störimpulse von außen weitgehend abgeschirmt werden und leitungsgebundene Störungen in dem Frequenzbereich der UHF-TE-Messung nur noch einen geringen Anteil haben.

³Transversalelektromagnetische (TEM) Wellen sind Wellen, bei denen sowohl der elektrische als auch der magnetische Anteil in Ausbreitungsrichtung verschwinden.

⁴Bei transversal-elektrischen (TE) Wellen verschwindet die elektrische Komponente in Ausbreitungsrichtung.

⁵Transversal-magnetische (TM) Wellen besitzen keine magnetische Komponente in Ausbreitungsrichtung.

Die breitbandigen Sensoren für die UHF-TE-Messung können in interne und externe Sensoren eingeteilt werden. Interne Sensoren sind z. B. scheiben- oder kegelförmig aufgebaut und werden so in die Montageöffnungen des geerdeten Außenleiters eingebaut, dass der symmetrische Aufbau der GIS oder GIL möglichst ungestört bleibt. Eine weitere Möglichkeit sind in Ring- oder Antennenform aufgebaute Sensoren, die in den Stütz- oder Schottisolatoren integriert sind. Die TE-Impulse werden von den Sensoren kapazitiv ausgekoppelt und an das Messsystem übertragen. Externe Sensoren werden an Sichtfenstern des Außenleiters angebracht und erfassen das durch das Fenster nach außen dringende Feld. Alternativ sind auch Horn- oder andere Antennen im Bereich der Sichtfenster oder Schottisolatoren positioniert, die das auftretende Streufeld der TE-Impulse erfassen. Gegenüber den externen Sensoren oder Antennen ist mit inneren Sensoren im Allgemeinen eine höhere Messempfindlichkeit und bessere Störuneempfindlichkeit gegeben. Da die elektromagnetische Welle in der GIS oder GIL gedämpft wird, werden mehrere Sensoren in bestimmten Abständen angebracht. Durch die Messung der Laufzeit der TE-Impulse zwischen zwei oder mehreren Sensoren ist eine Ortung des Defekts möglich [Jud+97b; Sch16; Che+16; Qi+19].

Das von den Sensoren aufgenommene Signal wird breitbandig an das TE-Messsystem weitergegeben. Hier werden die TE-Impulse entweder direkt vom UHF-Messsystem über die maximale Amplitude der einlaufenden Welle quantisiert oder durch einen Down-Konverter in einen tieferen Frequenzbereich transformiert und mit herkömmlichen TE-Messsystemen weiterverarbeitet.

Die Amplitude der UHF-TE-Messung wird üblicherweise in mV angegeben und ist, neben der Höhe des TE-Impulses, auch abhängig von der Entfernung des Defekts vom Sensor und von Interferenzen der elektromagnetischen Wellen. Ein direkter Zusammenhang zur scheinbaren Ladung des TE-Impulses kann nicht hergestellt werden. Jedoch wurde von der CIGRE WG D1.25 ein Leitfadensystem für einen Empfindlichkeitsnachweis ausgearbeitet, der den Nachweis der Detektierbarkeit von TE-Impulsen einer bestimmten scheinbaren Ladung mit dem UHF-TE-Messsystem ermöglicht [CTB654].

4.4 Nicht-konventionelle Teilentladungsmessmethoden

Neben der konventionellen und der UHF-TE-Messtechnik gibt es noch weitere unterschiedliche Methoden, die teilweise bei Wechselspannung schon Jahrzehnte etabliert sind, jedoch bis auf Spezialanwendungen oder Untersuchungen im Labor bis jetzt keine bedeutende Rolle bei TE-Messungen an gasisolierten Systemen spielen [CTB444].

Bei der **HF-/VHF-Teilentladungsmessung** kommen meist induktive Wandler und in einigen Spezialfällen auch kapazitive Koppereinheiten zum Einsatz. Die TE-Impulse werden dabei mit einer Grenzfrequenz von bis zu 100 MHz an das Messsystem übertragen. Induktive Sensoren sind hier meist aus einer Ringkernspule aufgebaut, welche den stromführenden Leiter umschließt. Durch die zeitliche Änderung des TE-Impulsstroms wird eine dazu proportionale Spannung in

dieser Ringkernspule induziert. Vorteilhaft an dieser Methode ist, wie bei der UHF-TE-Messung, die galvanische Trennung von der Hochspannung bei gleichzeitiger möglicher Kalibrierung und Erfassung der scheinbaren Ladung des TE-Impulses. Da bei dieser Methode im Vergleich zur UHF-TE-Messung leitungsgebundene TE-Impulse erfasst werden, erreicht die Doppelimpulsauflösung des Messsystems Werte von wenigen hundert Nanosekunden. Bei bekannter Polarität kann außerdem die Richtung des TE-Impulses bestimmt werden. HFCT (high frequency current transformers) für die direkte Integration in Schottisolatoren von GIS und GIL sind in Entwicklung [Rod+18; Cas+19].

Die **Akustische Teilentladungsmessung** nutzt den Effekt, dass bei Teilentladungen neben elektromagnetischen Wellen auch Ultraschallwellen erzeugt werden, die sich in Gasen, Flüssigkeiten und Feststoffen mit unterschiedlicher Geschwindigkeit ausbreiten. Bei GIS und GIL wird sie teilweise in Kombination mit der UHF-TE-Messtechnik eingesetzt. Der Frequenzbereich akustischer Sensoren liegt im Bereich von 50 kHz bis 200 kHz. Die Sensoren können sehr einfach an der äußeren Hülle der GIS oder GIL befestigt werden. Der Vorteil dieses Messverfahrens ist, dass elektrische Störimpulse keinen Einfluss auf das Ergebnis haben. Auch mechanische Vibrationen in der GIS liegen weit außerhalb des Frequenzbereichs der akustischen TE-Messung [Lun+00; Sch+09].

Weitere Entwicklungen der akustischen TE-Messung basieren auf dem Einfluss von Teilentladungen auf einen polarisierten Lichtstrahl, der von einem He-Ne-Laser über einen Polarisator in eine Glasfaser eingekoppelt wird. Die Teilentladung verursacht eine Druckwelle, welche eine zeitliche Änderung des Brechungsindex der Glasfaser und damit eine Phasenmodulation des Lichtstrahls bewirken. Diese Technik könnte beim Monitoring langer gasisolierter Leitungen eine Bedeutung erlangen [Zar+97; Roh+03].

Teilentladungen lassen sich auch mit der **optischen Teilentladungsmessung** nachweisen. Das Spektrum des von Teilentladungen emittierten Lichtes ist von dem umgebenen Isolierstoff abhängig und liegt im Bereich von Infrarot bis Ultraviolett. Der Vorteil dieser Messmethode liegt in der sehr hohen Bandbreite und ermöglicht eine nahezu originalgetreue Messung der TE-Impulse im Nanosekundenbereich. Bei der Erfassung des direkt emittierten Lichtes muss jedoch Blickkontakt zur Teilentladung bestehen. Diese Methode findet bisher nur bei Untersuchungen im Labor Anwendung, in denen auch teilweise ein direkte Proportionalität der detektierten Amplitude zur scheinbaren Ladung hergestellt werden konnte [Sch+03].

Um auch das emittierte Licht von inneren Teilentladungen zu erfassen, kommen in aktuellen Forschungsarbeiten fluoreszierende optische Fasern oder Isolierstoffe zum Einsatz, welche das emittierte Licht verstärken und an den Sensor des Messsystems transportieren [Sie+15].

Bei der **chemischen Teilentladungsmessung** wird die Tatsache genutzt, dass Teilentladungen zu einer Zersetzung des Isoliergases SF₆ führen. Der Vorteil gegenüber anderen TE-Messmethoden ist, dass sie weniger durch Störgrößen (elektromagnetisch oder akustisch) beeinflusst werden und durch die aufsummierende Methode über lange Zeiten auch Defekte mit niedriger Amplitude detektiert werden können. Der Nachteil ist, dass eine Charakterisierung der unterschiedlichen Fehlerarten nicht

möglich ist. Meist wird die Gaschromatographie mit Massenspektrometrie-Kopplung eingesetzt, um die Zersetzungsprodukte von SF₆ wie SOF₂, SO₂F₂, SO₂ und CF₄ zu messen. Innerhalb von 12 – 96 h sind damit Entladungen in Gasräumen einer GIS mit kleinem Volumen nachweisbar. Ein vielversprechender Ansatz ist die Verwendung von Kohlenstoff Nanoröhren (CNT), deren elektrische Leitfähigkeit mit der Menge an Zersetzungsprodukten zunimmt. Für Langzeitanalysen und das Monitoring könnten diese Anwendungen vielversprechende Ansätze liefern [Mar+12; Che+17].

4.5 Arten von Störimpulsen und Verfahren zur Störimpulsunterdrückung

Als Störimpulse werden vom Messsystem detektierte Impulse bezeichnet, die nicht vom Defekt im Prüfobjekt verursacht werden. Diese Störimpulse überlagern die Pulssequenz des TE-Defekts und können die Aussage der TE-Messung beeinflussen oder das Erkennen eines Defekts verhindern. Grundsätzlich können diese in unterschiedliche Kategorien eingeteilt werden. Im Bezug auf das Auftreten der Störimpulse wird in der IEC 60270 [IEC60270] nach Störungen im spannungslosen und eingeschalteten Messaufbau unterschieden. Bei Gleichspannung kann hier noch zwischen konstanter Gleichspannung oder Bereichen der Spannungsänderung unterschieden werden. Die Störimpulse können periodisch oder stochastisch auftreten. Um die TE-Messung zu beeinflussen, muss der Frequenzbereich der Störimpulse im Bereich der Messbandbreite liegen. Dabei können breitbandige oder schmalbandige Störimpulse unterschieden werden. In den Messkreis werden diese Impulse leitungsgebunden oder elektromagnetisch eingekoppelt.

Als Ausgangsort der Störimpulse können, wie bei Wechselspannung, unterschiedliche Quellen charakterisiert werden (Tabelle 4.1). Mögliche Störquellen sind das Eigenrauschen des Messsystems aufgrund des thermischen Rauschens der Bauteile oder infolge von Störungen die von der Datenübertragung zur Weiterverarbeitung an den PC hervorgerufen werden, Störimpulse von den Bauteilen und Verbindungen des Hochspannungs-Messaufbaus oder aus benachbarten Aufbauten, Schaltimpulse des Gleichrichters, der Spannungserzeugung oder aus benachbarten Stromkreisen sowie Störimpulse unterschiedlichster Sendeanlagen oder atmosphärische Entladungen. Bei Gleichspannung schwierig zu beherrschen sind Störimpulse aufgrund von Aufladungs- und Entladungserscheinungen an Bauteilen. Diese können z. B. durch das Abfließen von angesammelten Oberflächenentladungen auftreten und zeigen sich besonders nach einer Veränderung der Prüfspannung oder bei langen Messzeiten. Auch driftende Partikel im Isolieröl der beteiligten Bauteile oder im Prüfling können bei Gleichspannung Ladungen zwischen den Elektroden transportieren, die als Störimpuls detektiert werden.

Bei Wechselspannung ist es möglich, einzelne Störimpulse im PRPD-Diagramm aufgrund der regelmäßigen und repetierenden TE-Impulse zu erkennen. Durch die Gewichtung der TE-Amplitude bei Wechselspannung haben diese außerdem keinen starken Einfluss auf das Ergebnis. Bei Gleich-

spannung können schon einzelne Störimpulse aufgrund der geringen Anzahl der TE-Impulse mancher Defekte einen Einfluss auf das Ergebnis haben. Auch die grundlegenden charakteristischen Kenngrößen werden durch Störimpulse beeinflusst und die bisher entwickelten Auswerteverfahren und Darstellungsarten sind dadurch betroffen. Aus diesem Grund sind bei den Messungen ein erhöhter Abschirmaufwand und besondere Methoden zur Störimpulsunterdrückung notwendig. Meist können diese Abhilfemaßnahmen aus der Teilentladungsmessung bei Wechselspannung übernommen werden. Durch die auftretenden physikalischen Effekten bei Gleichspannung und den starken Einfluss auf das Ergebnis haben sich weitere Maßnahmen als hilfreich herausgestellt:

- A: Schirmung des kompletten Hochspannungsaufbaus sowie des Prüflings und Messsystems. In einigen Fällen kann auch die Schirmung eines Teilbereichs des Messaufbaus oder der Umgebung Störimpulse dämpfen oder vermeiden. Zusätzlich sollten alle Verbindungen überprüft und alle metallischen Teile im Einflussbereich des Prüfplatzes geerdet oder abgeschirmt werden.
- B: Verwendung von geeigneten Schirmelektroden und Hochspannungsverbindungen im gesamten Messaufbau. Dabei ist darauf zu achten, dass der Messaufbau bis mindestens in Spannungsbereiche oberhalb der Prüfspannung teilentladungsfrei ist und nicht durch die Ansammlung von z. B. Staub während der Prüfdauer beeinflusst wird.
- C: Oberflächenladungen an Bauteilen können durch geometrische und resistive Feldsteuerung vermieden werden. Die Umladung von driftenden Partikeln in Isolieröl an den Elektroden ist durch entsprechende Barrieren zu vermeiden.
- D: Insekten, die durch Aufladungserscheinungen an den Gleichspannungselektroden haften, können spontan auftretende Entladungen während der Prüfdauer verursachen und sind durch geeignete Maßnahmen vom Prüfaufbau fernzuhalten.
- E: Leitungsgebundene Störimpulse können je nach Störquelle mit unterschiedlichen Filtern (einfache Spulen, LC-Filter) im Zweig der Hochspannung, im Erdfeld oder im Netzanschluss des Prüftransformators gedämpft werden.
- F: Die Flächen elektrischer Schleifen im Messaufbau sind so klein wie möglich zu halten, um elektromagnetischen Einkopplungen entgegenzuwirken. Besonders die Nähe zu Störquellen und die Änderung der Lage des Aufbaus hat einen starken Einfluss auf die eingekoppelten Störimpulse.
- G: Durch eine Brückenschaltung können Gegentaktstörimpulse durch die gegenseitige Überlagerung der Impulse der beiden Messzweige unterdrückt werden. Erfolgversprechend ist dieses Verfahren bei Vorhandensein von zwei identischen Prüflingen oder einem Koppelkondensator mit einer Kapazität im Bereich der Prüflingskapazität. Eine weitere Möglichkeit diese Störer zu erkennen sind Richtkoppler die neben der Polarität auch die Laufrichtung des Impulses erfassen können.

- H: Filterung der analogen Signale kann auf mehreren Wegen zu einer Unterdrückung von Störimpulsen beitragen. Zum einen kann der Messfrequenzbereich des Messsystems an den Bereich mit möglichst wenig Störungen angepasst werden. Eine weitere Möglichkeit ist es, einzelne schmalbandige Störer durch geeignete Bandsperrefilter zu dämpfen.
- I: Das Ausblenden von periodischen und breitbandigen Störimpulsen ist durch Methoden, die auf Zeitfenster-, Impulsdiskriminierungs- oder ähnlichen Verfahren beruhen, zulässig, solange bei Prüfungen mit Gleichspannung nicht mehr als 2% der gesamten Prüfzeit ausgeblendet werden [IEC60270]. Bei Defekten mit einer sehr geringen Anzahl von TE-Impulsen kann dies die Aussage der Prüfung jedoch stark beeinflussen.
- J: Moderne Prozeduren der Signalverarbeitung zur Unterdrückung von Störimpulsen werden durch z. B. Wavelet-Packet-Denoising [Kyp+06] oder unterschiedliche Kreuzkorrelationsverfahren [Niu+09] durchgeführt. Durch Informationen über die Kurvenform der Impulse ist außerdem eine Separation der TE-Impulse unterschiedlicher Quellen und Störimpulse möglich. Diese Verfahren sind als TE-Mapping [Cav+08] oder als Multispektrale-Teilentladungsmessung am Markt etabliert [Ret+10; Twi+10].

In Tabelle 4.1 sind einige typische Störimpulse der Teilentladungsmessung bei Gleichspannung zusammengefasst, charakterisiert und den oben beschriebenen Abhilfemaßnahmen zugeordnet.

Tabelle 4.1: Charakterisierung typischer Quellen von Störimpulsen und deren möglichen Abhilfemaßnahmen

	spannungslos	konstante Spannung	Spannungsänderungen	leitungsgebunden	el.-mag. eingekoppelt	periodisch	stochastisch	breitbandig	schmalbandig	Abhilfemaßnahmen
Eigenrauschen Messsystem	x	x	x	x	x	x	x	x		I, J
Gleichrichter		x	x	x		x		x		E, G, I
TE an Elektroden und Bauteilen		x	x	x		x	x	x		B, C, D
Störimpulse Regeltransformator			x	x	x		x	x		E, G
Abfließende Oberflächenladungen	x	x	x	x			x	x		B, C
Schlechte elektrische Kontakte		x	x	x	x	x	x	x		B
Metallische Teile auf freiem Potential		x	x		x	x	x	x		A
Schaltimpulse	x	x	x	x	x	x	x	x		A, E, F, G, I, J
TE in benachbarten Messkreisen	x	x	x	x	x	x	x	x		A, B, F, G, J
Sender (WLAN, Feuermelder usw.)	x	x	x		x	x			x	A, F, H, I, J
Flugsicherungsradargeräte	x	x	x		x	x		x		A, F, I
Atmosphärische Entladungen	x	x	x	x	x		x	x		A, E, F, G, J

4.6 Kenngrößen und Begriffe der Teilentladungsmessung bei Gleichspannung

Die zuvor beschriebenen hochfrequenten impulsförmigen Ströme bzw. vom Messsystem detektierten TE-Signale lassen sich mit unterschiedlichen Kenngrößen beschreiben. Eine Zusammenstellung der international genutzten Kenngrößen ist in der IEC 60270 [IEC60270] aufgelistet und von der Cigre Task Force 15.03.08 für die Anwendung bei Wechselspannung zusammengefasst [Cig98]. Hier werden direkt aus den TE-Signalen gewonnene primäre TE-Kenngrößen und daraus abgeleitete TE-Kenngrößen unterschieden.

Im Folgenden wird auf die für die Messung bei Gleichspannung relevanten Kenngrößen genauer eingegangen.

Primäre TE-Kenngrößen unterteilen sich in Größen, die TE-Impulse als singuläre Ereignisse charakterisieren und Kenngrößen, die Informationen über die Kurvenform der einzelnen Stromimpulse beschreiben (Bild 4.3).

Die Amplitude q_i beschreibt die Intensität der einzelnen TE-Impulse. Sie entspricht bei einer Messung nach der IEC 60270 der scheinbaren Ladung und bei nicht kalibrierbaren Messverfahren, wie z. B. der UHF-TE-Messung, der Impulshöhe.

Der Zeitpunkt t_i der einzelnen TE-Impulse ist eine weitere wichtige Kenngröße bei Gleichspannung. Diese wird meist vom zeitlichen Beginn der TE-Messwerterfassung gemessen.

Die Zeitpunkte bilden gemeinsam mit den TE-Amplituden die sogenannte TE-Pulssequenz, welche für weitere Auswertungen und Darstellungen verwendet wird (Bild 4.3a).

Weitere primäre TE-Kenngrößen sind Informationen über die Kurvenform der TE-Impulse wie die Anstiegszeit t_r , die Abfallzeit t_f und die Pulsbreite t_{pw} . Da diese Kenngrößen einen hohen messtechnischen Aufwand und rechenintensive Auswertungen erfordern, wird auch auf darauf basierende spektrale Kenngrößen wie die äquivalente Dauer und äquivalente Bandbreite [Cav+08] der TE-Impulse zurückgegriffen. Diese Parameter sind stark abhängig vom Signalweg der TE-Impulse und vom Ort des Defekts zum Messsystem, können jedoch bei der Trennung mehrerer gleichzeitig auftretender Defekte oder bei der Störimpulsunterdrückung hilfreich sein.

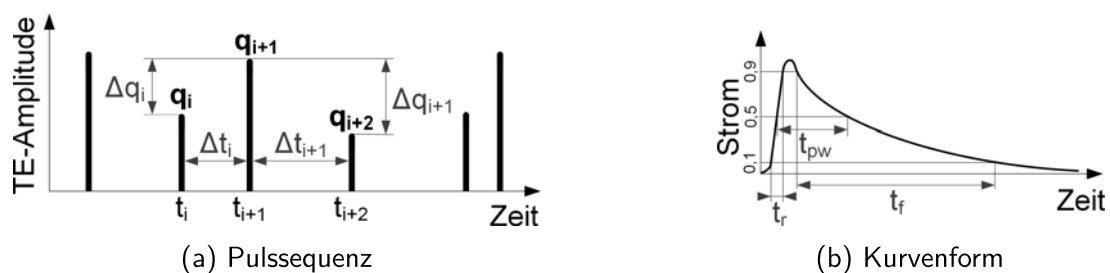


Bild 4.3: Charakteristische Kenngrößen einer TE-Pulssequenz bei Gleichspannung

Abgeleitete TE-Kenngrößen stellen die Informationen der primären Kenngrößen in einer überschaubaren Form dar. Neben einfachen statistischen Auswertungen wie dem Maximum,

Mittelwert, Minimum, Standardabweichung usw. der Pulssequenzen werden in der IEC 60270 weitere abgeleitete Größen definiert. Für bei Gleichspannung aussagekräftige Parameter sind hierbei die Impulswiederholrate n , die Impulszahl m und die akkumulierte scheinbare Ladung oder die scheinbare Ladung während einer festgelegten Messzeit Δt_i zu nennen. Weitere in der Literatur zu findende Parameter sind die Amplitudendifferenz Δq_i , die Zeitdifferenz Δt_i sowie der Differenzenquotient m_i . Eine IEC-Gewichtung der TE-Impulse zur größten wiederholt auftretenden Teilentladungsstärke Q (bei der TE-Messung unter Wechselspannung vereinfacht auch als TE-Amplitude bezeichnet) ist bei Gleichspannung aufgrund der Unterschiede der Wiederholrate von TE-Impulsen im Bereich von Nanosekunden bis Minuten nicht sinnvoll [IEC60270].

Besonders bei der Auswertung der einzelnen TE-Impulse wie Mittelwertbildung oder Impulszählung haben Störimpulse des Grundstörpegels und sonstige Störimpulse einen maßgeblichen Einfluss. Zur Vermeidung von irreführenden Kenngrößen dürfen diese Störimpulse nicht in die Auswertung einfließen. Vor der TE-Messung ist daher der Grundstörpegel zu ermitteln. Darauf aufbauend muss gemäß der IEC 60270 die Triggerschwelle auf mindestens den doppelten Wert des Grundstörpegels gesetzt werden [IEC60270].

Die Bestimmung der TE-Einsetz- und TE-Aussetzspannung kann bei Gleichspannung schwierig sein, da für die Bestimmung eine stationäre Feldverteilung im Prüfling vorherrschen muss. Dadurch ist diese auch stark von weiteren Einflussfaktoren wie z. B. der Temperatur abhängig. Häufig treten Teilentladungen bei erster Spannungsbeanspruchung und während Spannungsänderungen auf. Teilentladungen können nach abgeschlossener Prüfung auch noch im spannungsfreien Zustand des Prüflings auftreten. Eine genaue Definition zur Bestimmung der Einsetz- und Aussetzspannung ist in der IEC 60270 nicht festgelegt [IEC60270].

4.7 Anforderungen an die Teilentladungsmessung bei Gleichspannung

4.7.1 Messaufbau

Die Prüfspannung wird im Allgemeinen mithilfe von Gleichrichtern erzeugt. Diese müssen die gewünschte Prüfspannung und den resultierenden Strom liefern. Der Welligkeitsfaktor der Spannung darf dabei gemäß der IEC 60060-1 [IEC60060] nicht größer als 3% sein. Für Messdauern von höchstens 60s muss die Prüfspannung innerhalb von $\pm 1\%$ des festgelegten Wertes liegen. Für Prüfdauern über 60s ist eine Abweichung von maximal $\pm 3\%$ einzuhalten. Störimpulse von der Netzseite sowie die durch die Erzeugung der Gleichspannung verursachten Störimpulse, wie z. B. Schaltimpulse der Dioden des Gleichrichters, müssen ausreichend gedämpft werden, um die Ergebnisse der TE-Messung nicht zu beeinflussen. Weitere Bauteile wie Glättungskondensator, Spannungsteiler oder Koppelkondensator müssen bei Prüfspannung frei von Teilentladungen sein und es dürfen keine Störimpulse aufgrund von abfließenden Oberflächen- oder Raumladungen auftreten. Besonders nach einem Polaritätswechsel ist der Einfluss von abfließenden Oberflächenladungen

an den Bauteilen auf das Ergebnis zu beachten. Weitere Störquellen im Messaufbau, wie z. B. Störimpulse von driftenden Partikeln in Öl-gefüllten Bauteilen oder Insekten im Prüffeld, dürfen nicht auftreten.

4.7.2 Messprozeduren

Messprozeduren zur Prüfung von Hochspannungsbetriebsmitteln sind auf die reale Beanspruchung der Isoliermedien und des TE-Verhaltens möglicher typischer Defekte abzustimmen. Die in Prüffeldern vorliegenden technischen Gegebenheiten, wie z. B. die umsetzbare Geschwindigkeit der Spannungssteigerung und Zeitdauern des Polaritätswechsels, müssen dabei berücksichtigt werden. Das mögliche Auftreten von Störimpulsen bei konstanter Spannung und besonders bei Spannungsänderungen und nach einem Polaritätswechsel ist zu berücksichtigen. Es muss ein Kompromiss zwischen den für die reale Beanspruchung notwendigen langen Prüfdauern und den umsetzbaren Prüfdauern an Betriebsmitteln im Labor oder Vor-Ort gefunden werden. Durch unterschiedliche Kombinationen mit weiteren Prüfungen wie z. B. Heizzyklen, Schalthandlungen, Vibrationen usw. können kritische Betriebszustände unterschiedlicher Betriebsmittel schneller erreicht und dadurch die Prüfdauer verkürzt werden.

4.7.3 Messsystem

Bei der Detektion der TE-Impulse sind aufgrund der stark beeinflussbaren Auswertemethoden und Akzeptanzkriterien bei Gleichspannung hohe Anforderungen zu erfüllen. Um eine Charakterisierung unterschiedlicher Defekte zu ermöglichen, muss das Messsystem in der Lage sein, einen Großteil der vom Defekt verursachten TE-Impulse mit korrekter Amplitude q_i und Zeitpunkt t_i zu detektieren, weiterzuverarbeiten und abzuspeichern. Defekte bei Gleichspannung können TE-Impulse mit Amplituden erzeugen, deren Höhe sich um einen Faktor von bis zu 1000 unterscheidet. Bei Schalthandlungen oder einem Polaritätswechsel können sehr hohe Entladungen auftreten. Bei der Datenverarbeitung ist zu beachten, dass die Anzahl der TE-Impulse je nach Defekt im Bereich von über 10^6 TE-Impulsen pro Sekunde bis zu wenigen TE-Impulsen pro Minute oder Stunde liegen kann. Neben einem ausreichend geringen Grundstörspegel des Messsystems müssen Methoden zur Erkennung und Beseitigung von Störimpulsen angeboten werden. Der Dynamikbereich und die Impulsauflösezeit des Messsystems sind an die auftretenden TE-Impulse anzupassen. Eine Überlagerung schnell aufeinanderfolgender Impulse und die Detektion von TE-Impulsen mit stark unterschiedlicher Amplitude sollten überprüft werden. Eine Darstellung einzelner TE-Impulse im Zeit- und Frequenzbereich ist dabei hilfreich. Die gesamten Pulssequenzen sollten mit korrekter Polarität und in ausreichender Auflösung in unterschiedlichen Zeitbereichen mit Bezug zur Spannung darstellbar sein. Moderne Darstellungsarten und eine Möglichkeit, die Daten in Echtzeit weiterzuverarbeiten, sind hilfreich.

4.7.4 Auswertemethoden

Methoden für die Auswertung der primären Kenngrößen der Teilentladungsmessung bei Gleichspannung müssen aussagekräftige Ergebnisse zur Beurteilung und eindeutigen Charakterisierung der unterschiedlichen Defekte liefern. Das Ergebnis soll möglichst robust gegen unterschiedliche Einflussfaktoren sein. Auftretende Störimpulse dürfen die Aussage der Beurteilung und die Charakterisierung nicht beeinflussen und sollten leicht erkannt werden. Die Methode sollte möglichst einfach, nachvollziehbar und hilfreich bei der Erkennung und Erklärung physikalischer Phänomene sein. Die Auswertung sollte in einem Messzyklus abgeschlossen sein und ein Ergebnis zur Bewertung der Komponente sollte nach erfolgter Prüfung vorliegen. Die mögliche hohe Anzahl von TE-Impulsen in kurzer Zeit darf die Methoden der Auswertung nicht überlasten. Auch mit den wenigen TE-Impulsen einiger Defekte soll eine aussagekräftige Bewertung der Defekts möglich sein.

5 Methoden zur Auswertung und Darstellung von Teilentladungen bei Gleichspannung

5.1 Kenngrößen zur Bewertung von Ergebnissen der Teilentladungsmessung

Eine der wichtigsten Größen der Teilentladungsmessung bei Gleichspannung ist, wie bei Wechselspannung, die Einsetzspannung der Teilentladungen U_i . Ihre Definition kann jedoch aufgrund der abweichenden und stark variierenden TE-Impuls-Wiederholrate bei Gleichspannung im Vergleich zur Wechselspannung nicht von der IEC 60270 übernommen werden. Zusätzlich ist es aufwändiger, die bei Gleichspannung im Betrieb auftretende Feldverteilung im zu untersuchenden Isoliersystem auch bei Prüfungen im Labor nachzubilden. Dies kann infolge von Raumladungserscheinungen und Temperaturverteilungen besondere Messprozeduren erfordern. In der Literatur sind unterschiedliche Definitionen der Einsetzspannung bei Gleichspannung und teilweise definierte Messprozeduren für deren Bestimmung zu finden (Tabelle 5.1).

Tabelle 5.1: Unterschiedliche Definitionen der Einsetzspannung bei Gleichspannung

Definition	Messprozedur	Quelle
0,1 TE-Impulse pro Sekunde	20-Sekunden-Spannungsstufen	[Van+80]
1 TE-Impuls pro Minute		[Mor+97]
1 TE-Impuls pro Minute	5 Minuten, 1-kV-Spannungsstufen	[Cav+11]
1 TE-Impuls pro Minute		[ASTM13]
3 TE-Impulse pro 30 Sekunden	30-Sekunden-Spannungsstufen	[Pir+16]
3 TE-Impulse pro 2 Minuten	2 Minuten, 1-kV-Spannungsstufen	[Tak+16]

Äquivalent zur Einsetzspannung ist bei der TE-Messung bei Wechselspannung die Aussetzspannung U_e definiert. Für Gleichspannung ist aufgrund der lang andauernden Entladezeiten einiger Isoliersysteme keine Definitionen der Aussetzspannung oder Messprozedur für deren Bestimmung zu finden.

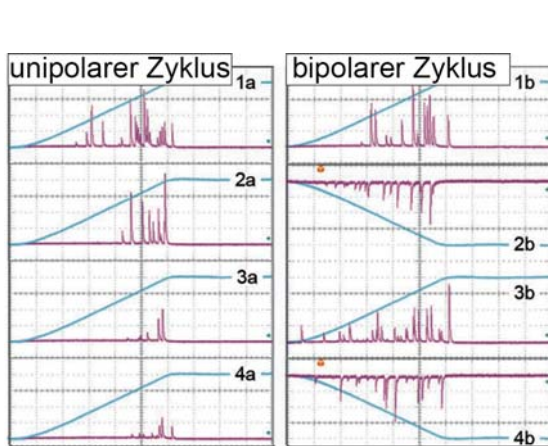
Mithilfe moderner am Markt erhältlicher Teilentladungsmesssysteme können die Amplituden q_i und die Zeitpunkte t_i der TE-Impulse detektiert und in einer TE-Pulssequenz dargestellt und gespeichert werden. Bei der konventionellen Teilentladungsmessung können Informationen über die Kurvenform der TE-Impulse, wie die Anstiegszeit t_r , die Abfallzeit t_f und die Pulsbreite t_{pw} oder Informationen über die spektralen Anteile der TE-Impulse, weitere wertvolle Kenngrößen liefern.

Es ist möglich, diese grundlegenden Parameter bzw. Pulssequenzen weiterzuverarbeiten und auszuwerten. Eine Gewichtung der Impulsfolgen gemäß der IEC 60270 ist aufgrund der starken Unterschiede in der Wiederholfrequenz bei unterschiedlichen Defekten nicht zielführend [IEC60270]. Bisher werden einfache statistische Methoden, wie das Maximum oder der Mittelwert der Amplituden oder die zeitlichen Abstände der TE-Impulse sowie die Anzahl der TE-Impulse in einem bestimmten Zeitfenster über einer definierten Triggerschwelle für die Auswertung der Pulssequenzen und Bewertung von Defekten bei Gleichspannung herangezogen [Rog+60; Sal+67; Mal+87; Fro95; Wu+09; Jo+15; Stu+15; Cor+16; Wan+16; Ous+17; Wen+18]. Weitere Parameter, die häufig für eine automatische Klassifizierung der Defekte Anwendung finden, sind z. B. die Varianz, Symmetrie, Wölbung oder Weibull-Parameter der Häufigkeitsverteilung der zuvor beschriebenen grundlegenden Parameter (Kapitel 6.5).

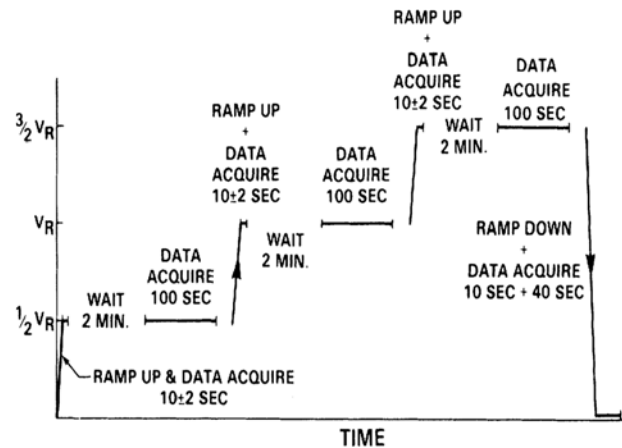
5.2 Prüfprozeduren und Akzeptanzkriterien für unterschiedliche HGÜ-Betriebsmittel

Das Teilentladungsverhalten von verschiedenen Defekten bei konstanter Gleichspannung ist unterschiedlich und der Nachweis von z. B. Hohlräumen in Isolatoren oder Partikeln auf Isolatoren ist schwierig und anfällig auf Störimpulse. Spannungsänderungen und Polaritätswechsel nach einer Konditionierung des Isolierstoffs mit konstanter Gleichspannung können Teilentladungen provozieren und somit den Nachweis einiger Defekte erleichtern oder die Messzeit verkürzen. In der Literatur sind unterschiedliche Messprozeduren für die Messung von Teilentladungen bei Gleichspannung zu finden. In diesen werden neben verschiedenen Spannungsrampen auch Polaritätswechsel empfohlen bzw. gefordert. In Bild 5.1 sind einige dieser Messprozeduren zusammengefasst.

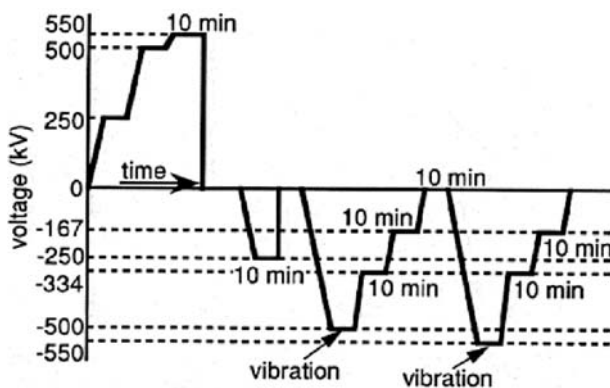
Bei Durchführungen, Drosseln und Transformatoren für HGÜ-Anwendungen sind verschiedene Normen und Leitlinien mit Messprozeduren und Akzeptanzkriterien für die Prüfung bei Gleichspannung mit Teilentladungsmessung vorhanden [IEC65700; IEC60076b; IEC60076a]. Die zeitlichen Dauern der Messprozeduren dieser Normen gehen auf die Empfehlungen der Cigre JWG 12/14.10 aus dem Jahr 1994 zurück [Lin+94]. Diese schlussfolgert, dass bei der Stehspannungsprüfung eine Zeitdauer der Spannungsstufe von zwei Stunden bei allen HGÜ-Betriebsmitteln ausreichend ist. Vor einem Polaritätswechsel wird eine Zeitdauer von 90 Minuten empfohlen, um eine für die Prüfung ausreichend stationäre Ladungs- und Feldverteilung im Isoliermedium zu gewährleisten. Diese Zeitdauern, in Kombination mit den festgelegten Prüfspannungen, wurden von der Cigre JWG A2/B4.28 in Frage gestellt und für HGÜ-Transformatoren als Test für die höchstmögliche elektrische Beanspruchung als unzureichend befunden [CTB406]. Dies veranlasste die Cigre JWG A2/D1.41 [CTB646], weitere Untersuchungen einzuleiten, die jedoch nicht vollständig abgeschlossen wurden. Für Design-Tests wurde daraufhin im Hinblick auf die langen elektrischen Zeitkonstanten von modernen Isolierölen ein erweiterter Polaritätswechsel-Test in der IEC/IEEE 65700-19-03 [IEC65700] definiert.



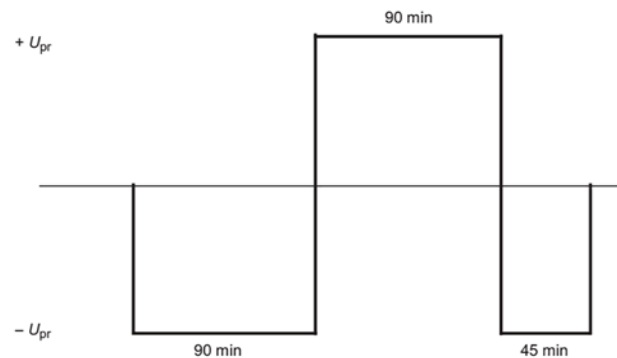
(a) Spannungsverlauf mit TE-Impulsen zur Prüfung defekter DC-Kondensatoren [Lem16]



(b) DC-Rampen-Test [Bev85]



(c) Spannungsrampen zur Konditionierung einer 500-kV-GIS [Yos+97]



(d) Polaritätswechsel-Test IEC/IEEE 65700-19-03 [IEC65700] und IEC 60076-6 [IEC60076a]

Bild 5.1: Unterschiedliche Messprozeduren für die Teilentladungsmessung bei Gleichspannung

Aktuell werden Prüfungen bei Gleichspannung mit Teilentladungsmessung in den Normen für HGÜ-Transformatoren (IEC/IEEE 60076-57-129 [IEC60076b]), Durchführungen für Gleichspannungsanwendungen (IEC/IEEE 65700-19-03 [IEC65700]) und Drosselspulen (IEC 60076-6 [IEC60076a]) gefordert. Die unterschiedlichen Prüfungen werden in eine Stehspannungsprüfung, einen Polaritätswechsel-Test und einen erweiterten Polaritätswechsel-Test eingeteilt. Die Teilentladungsmessung ist dabei gemäß der IEC 60270 durchzuführen. Weitere Vorgaben zu Einstellungen des TE-Messsystems werden nicht definiert. Als Akzeptanzkriterium wird in den vorhandenen Normen eine maximale Anzahl an TE-Impulsen festgelegt, deren Amplitude einen bestimmten Grenzwert überschreiten darf.

Stehspannungsprüfung

Die Zeitdauer der Stehspannungsprüfung bei Gleichspannung mit Teilentladungsmessung ist in den Normen für HGÜ-Transformatoren, Durchführungen und Drosseln mit zwei Stunden festgelegt. Der Spannungspegel muss dabei innerhalb von einer Minute auf die Prüfspannung gesteigert und nach Abschluss der Prüfung innerhalb einer Minute wieder auf den Wert Null gesenkt werden. Das

Akzeptanzkriterium dieser Prüfung ist mit der Ausnahme, dass während der gesamten Prüfung kein Überschlag oder Durchschlag auftreten darf, unterschiedlich:

- Entsprechend der IEC/IEEE 65700-19-03 [IEC65700] darf die Anzahl der TE-Impulse mit einer Amplitude größer als 2000 pC in den letzten 30 Minuten der Prüfung den Wert 10 nicht überschreiten.
- In der IEC/IEEE 60076-57-129 [IEC60076b] und IEC 60076-6 [IEC60076a] müssen zwei Kriterien in Bezug auf die Teilentladungsmessung für eine bestandene Prüfung erfüllt sein. Zum einen darf die Anzahl der TE-Impulse mit einer Amplitude größer als 2000 pC in den letzten 30 Minuten der Prüfung nicht größer als 30 sein. Zusätzlich dürfen nicht mehr als 10 TE-Impulse mit einer Amplitude größer als 2000 pC in den letzten 10 Minuten dieses Zeitfensters auftreten.

Bei Nichteinhaltung des Kriteriums ist eine einmalige Verlängerung der Prüfung um 30 Minuten zulässig, in der das jeweilige Akzeptanzkriterium jedoch eingehalten werden muss.

Eine weitere Stehspannungsprüfung ist in der IEC 61287-1 [IEC61287] als Prüfung für Baugruppen über 1,5 kV zu finden. In dieser Norm sind zwei Spannungsstufen festgelegt. Zuerst wird die Prüfspannung auf die 1,5-fache Nennspannung erhöht. Diese Spannung wird anschließend für eine Minute konstant gehalten. Im Anschluss daran wird die Spannung auf die 1,1-fache Nennspannung gesenkt und für 30 Sekunden gehalten. Am Ende der Prüfung soll die Spannung auf den Wert Null gesenkt werden. Jede Spannungsänderung ist in 10 Sekunden abzuschließen. Als Akzeptanzkriterium wird auf die jeweiligen Betriebsmittel und Vorgaben der Hersteller verwiesen. Als typischer Wert für das Bestehen der Prüfung wird eine Amplitude von 10 pC angegeben. Weitere Angaben zur Auswertung dieses Ladungswertes oder der Anzahl der TE-Impulse sind nicht definiert.

Polaritätswechsel-Test

Auch im Polaritätswechsel-Test gibt es je nach Komponente Unterschiede hinsichtlich der Messprozedur und des Akzeptanzkriteriums. Bei allen Prüfungen ist jedoch das Prüfobjekt vor der Prüfung zu erden, um ein Abfließen aller vorhandenen Ladungsträger sicherzustellen. Eine Konditionierung der Isolierstoffe vor der Prüfung mit niedrigeren Spannungswerten ist nicht zulässig. Die Messprozedur ist in drei Spannungsstufen mit zwei Polaritätswechsel gegliedert. Die erste Spannungsstufe mit Prüfspannung negativer Polarität ist innerhalb einer Minute zu erreichen und anschließend für 90 Minuten zu halten. Im Anschluss erfolgt ein Polaritätswechsel auf Prüfspannung mit positiver Polarität. Der Polaritätswechsel muss innerhalb von zwei Minuten abgeschlossen sein und die Spannung ist wiederholt für 90 Minuten zu halten. Nach dem zweiten Polaritätswechsel auf Prüfspannung mit negativer Polarität folgt die letzte Spannungsstufe. Die Zeitdauer dieser Spannungsstufe ist gemäß IEC/IEEE 65700-19-03 [IEC65700] und IEC 60076-6 [IEC60076a] mit 45 Minuten und in IEC/IEEE 60076-57-129 [IEC60076b] mit 30 Minuten festgelegt. Am Ende soll die Spannung innerhalb von einer Minute auf Null gesenkt werden. Die schematische Darstellung

der Spannungsrampen der erstgenannten Normen ist in Bild 5.1d dargestellt. Das Akzeptanzkriterium dieser Prüfung ist mit der Ausnahme, dass während der gesamten Prüfung kein Überschlag bzw. Durchschlag auftreten darf, in allen drei Normen unterschiedlich:

- IEC 60076-6: Es dürfen nicht mehr als 10 TE-Impulse mit einer Amplitude größer 2000 pC innerhalb eines gleitenden 10-Minuten-Fensters über die gesamte Messzeit auftreten. Die Impulse während des Polaritätswechsels und 5 Minuten danach sollen bei dieser Auswertung nicht berücksichtigt werden.
- IEC/IEEE 65700-19-03: Es dürfen nicht mehr als 10 TE-Impulse mit einer Amplitude größer 2000 pC innerhalb eines gleitenden 30-Minuten-Fensters über die gesamte Messzeit auftreten. Die Impulse während des Polaritätswechsels sollen bei der Auswertung nicht berücksichtigt werden.
- IEC/IEEE 60076-57-129: Es dürfen während der 30 Minuten nach jedem der beiden Polaritätswechsel nicht mehr als 30 TE-Impulse mit einer Amplitude größer 2000 pC auftreten und in den letzten 10 Minuten dieser 30 Minuten nicht mehr als 10 TE-Impulse mit einer Amplitude größer 2000 pC.

In der IEC 60076-6 und IEC/IEEE 60076-57-129 ist eine Nichteinhaltung des Akzeptanzkriteriums in Bezug auf die Teilentladungen nicht mit einer sofortigen Ablehnung des Prüfobjekts verbunden, sondern erfordert eine Abstimmung zwischen Hersteller und Anwender im Hinblick auf weitere Untersuchungen und Maßnahmen [IEC65700; IEC60076a; IEC60076b].

Erweiterter Polaritätswechsel-Test

Die Prüfprozedur des erweiterten Polaritätswechsel-Tests ist ausschließlich in der Norm für Transformatoren IEC/IEEE 60076-57-129 definiert und umfasst drei Spannungsstufen mit wechselnder Polarität. Die Zeitdauern der ersten zwei Stufen sind mit jeweils sechs Stunden festgelegt. Die Zeitdauer der letzten Spannungsstufe beträgt 30 Minuten. Die Wahl der Polarität der ersten Stufe obliegt dem Hersteller. Eine Änderung der Zeitdauern kann zwischen Betreiber und Hersteller vereinbart werden.

Alternativ kann diese Prüfung mit der Stehspannungsprüfung kombiniert werden. In diesem Fall beginnt die erste Stufe der Prüfung mit der Prüfspannung der Stehspannungsprüfung und einer Zeitdauer von zwei Stunden. Im Anschluss daran wird die Spannung für eine Zeitdauer von einer Stunde auf den Wert der Prüfspannung des Polaritätswechsel-Test gesenkt und nach einem Polaritätswechsel mit der zweiten Stufe des erweiterten Polaritätswechsel-Test wie oben beschrieben fortgefahren.

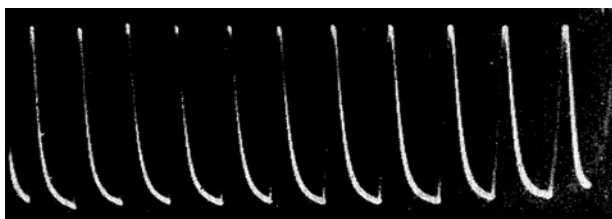
Die Polaritätswechsel müssen innerhalb von zwei Minuten abgeschlossen sein. Die Teilentladungen sind während der gesamten Prüfdauer aufzuzeichnen. Bei der Prüfung dürfen keine Überschläge oder Durchschläge auftreten. Als Akzeptanzkriterium bei der Teilentladungsmessung sind nicht mehr als 30 TE-Impulse mit einer Amplitude größer als 2000 pC in einem gleitenden Zeitfenster

von 30 Minuten festgelegt, wobei nur die ersten 2 Stunden nach abgeschlossenem Polaritätswechsel ausgewertet werden sollen. Eine Nichteinhaltung des Akzeptanzkriteriums in Bezug auf die Teilentladungen ist nicht mit einer sofortigen Ablehnung des Prüfobjekts verbunden, sondern erfordert eine Abstimmung zwischen Käufer und Lieferant im Hinblick auf weitere Untersuchungen und Maßnahmen. Die Prüfung wird nicht von der Norm IEC/IEEE 65700-19-03 für Durchführungen abgedeckt. Daher ist deren Belastbarkeit, vor der Prüfung abzuklären [IEC60076b].

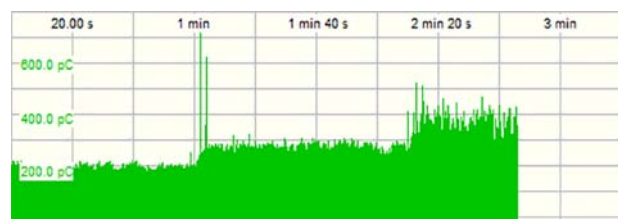
5.3 Darstellungsarten bei Gleichspannung

5.3.1 Pulssequenzen

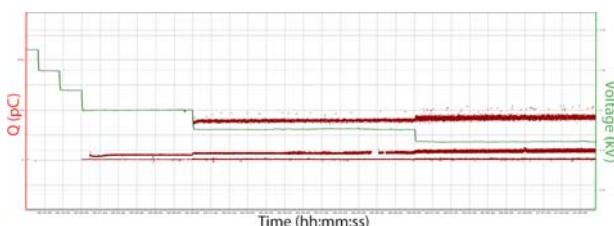
Die älteste Darstellungsart von Teilentladungen bei Gleichspannung geht auf die Untersuchungen der Stromimpulse von Koronaentladungen zurück. Diese wurden über einen Shuntwiderstand gemessen und mit einem Oszilloskop dargestellt. Bild 5.2a zeigt beispielsweise die von Trichel aufgenommenen Stromimpulse mit negativer Polarität an einer Nadel-Platte-Anordnung bei Gleichspannung [Tri38]. Das Aussehen dieser zeitlich begrenzten Oszillogramme ist denen heutiger Pulssequenzen gleichzusetzen, hatte jedoch außerhalb physikalischer Untersuchungen keine Relevanz für die Diagnose von HGÜ-Betriebsmitteln. Erst durch die weitere Entwicklung und Anwendung der Teilentladungsmessung bei Untersuchungen von Isoliersystemen bei Wechselspannung in den 1950er-Jahren wurde durch die Integration der Stromimpulse und Berechnung der scheinbaren Ladung der Grundstein zu der von modernen digitalen Messsystemen verwendeten Darstellungsart, der Pulssequenzen, gelegt. Die heute verwendete Art der Darstellung der Amplituden einzelner TE-Impulse über deren Zeitpunkt variiert je nach Hersteller. In Bild 5.2 sind einige der am Markt üblichen Darstellungsarten der Pulssequenzen zusammengefasst.



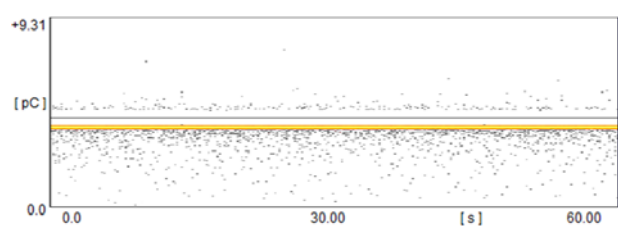
(a) Oszillogramm (Strom über der Zeit) von Trichel



(b) Omicron MPD 600



(c) Haefely DDX 9121b



(d) Power Diagnostix ICMsystem

Bild 5.2: Oszillogramm der Stromimpulse von Trichel [Tri38] (a) und moderne Darstellungsarten von Pulssequenzen (b – d)

5.3.2 Entwicklung weiterer Darstellungsarten

Die für das menschliche Auge schwer zu beurteilenden Pulssequenzen bei Gleichspannung wurden durch Darstellungsarten wie z. B. mittlere Amplitude und Wiederholrate der TE-Impulse über der Prüfspannung oder über der Messzeit schon in den 1960er Jahren vereinfacht [Rog+60]. Dadurch können neben der Häufigkeit von TE-Impulsen auch zeitliche Änderungen in der TE-Aktivität über lange Messdauern oder große Spannungsbereiche veranschaulicht werden. Der direkte Zusammenhang der Wiederholrate mit der Amplitude der TE-Impulse ist mit diesen Diagrammen jedoch schwer erkennbar. Die Digitalisierung der TE-Messtechnik und die mögliche Speicherung und Weiterverarbeitung der Pulssequenzen ermöglichten neue Methoden zur Erstellung von charakteristischen Mustern zur physikalischen Erklärung und Identifikation von Defekten. Dies erlaubte genauere Untersuchungen der Zusammenhänge verschiedener Größen wie beispielsweise die Gegenüberstellung der Wiederholrate mit der zugehörigen Amplitude der TE-Impulse. Dadurch ist ein Erkennen der Abhängigkeit des zeitlichen Abstands von TE-Impulsen und deren Amplitude auf einfache Weise möglich [Sal+66; Sal+67].

Informationen über die Häufigkeit der aufgetretenen TE-Impulse mit bestimmter Amplitude sind in diesen Darstellungsarten nicht möglich. Abhilfe schaffte die Erstellung einer Häufigkeitsverteilung (Bild 5.3a) oder Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Amplituden und zeitlichen Abstände der TE-Impulse [Mal+87; Mac+90]. In diesen, für einzelne Defekte charakteristischen Verteilungen geht jedoch die Information über die zeitliche Änderung des TE-Verhaltens verloren.

Die Modernisierung von Messsystemen, steigende Rechen- und Speicherleistung sowie die zunehmende Anwendung der TE-Diagnose bei Wechselspannung ermöglichte eine weitere Auswertung von neuen Parametern und Darstellungsmöglichkeiten für die Messung bei Gleichspannung. Zusammenhänge zwischen den Amplituden oder den zeitlichen Abständen des aktuellen TE-Impulses mit den Informationen des vorhergehenden oder nachfolgenden TE-Impulses konnten durch die Gegenüberstellung der unterschiedlichen Parameter miteinander in einem einfachen Diagramm überprüft werden. Durch die mögliche Erfassung und Speicherung von Informationen über die Kurvenform der detektierten TE-Impulse, wie z. B. die Pulsbreite, konnten zusätzliche Parameter zur Untersuchung neuer Zusammenhänge genutzt werden. Die ersten dreidimensionalen Darstellungsarten entstanden durch die Erstellung einer Häufigkeitsverteilung als Funktion der Pulsbreite und Amplitude der TE-Impulse. Die für Gleichspannung von den phasen-aufgelösten-TE-Diagrammen (Phase Resolved Partial Discharge Pattern) bei Wechselspannung abgeleitete Häufigkeitsverteilung als Funktion der Amplitude und des zeitlichen Abstands der TE-Impulse (Bild 5.3b) zeigte bei einigen Defekten charakteristische Muster und wurde zur Auswertung der Pulssequenzen bei Gleichspannung empfohlen [Fro95; Hoo+96; Mor+96; Bey02].

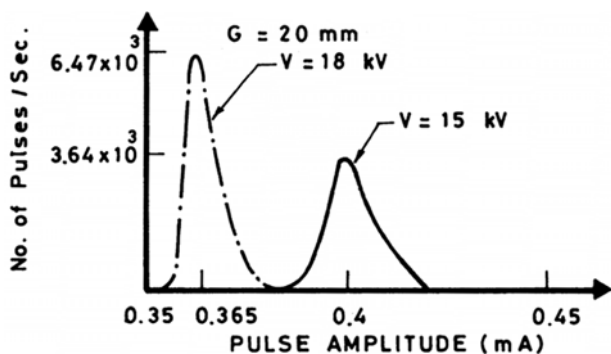
Die Darstellungsart der Häufigkeitsverteilung der scheinbaren Ladung und akkumulierten scheinbaren Ladung über der Messzeit wurde im Jahr 2015 in die IEC 60270 aufgenommen (Bild 5.3c und 5.3d). Auf der Suche nach Diagrammen, die für die jeweiligen Defekte charakteristische Muster erzeugen, wurden in der Puls-Sequenz-Analyse unterschiedliche statistische Auswerteverfahren und Korrelationen in Streudiagrammen hergestellt. Beispiele hierfür sind die Gegenüberstellung der

Parameter der Weibull-Verteilung (α, β) mit der Schiefe oder Wölbung der Häufigkeitsverteilung unterschiedlichster Kenngrößen (Bild 5.3e) [Cav+11; Wan+16]. Durch weitere Darstellungsarten mit Informationen und Gegenüberstellungen des vorgehenden oder nachfolgenden zeitlichen Abstands oder der Amplitude der TE-Impulse wurde die Abhängigkeit dieser Parameter voneinander in diese Darstellungsarten miteinbezogen. Eine weitere Herangehensweise ist es, die grundlegenden Kenngrößen der TE-Messung bei Gleichspannung in verschiedenen Varianten miteinander zu korrelieren. Im CAPD-Diagramm werden diese in differenzierter und normierter Form durch die Korrelation miteinander und mit deren Vorgängerwerten in drei unterschiedlichen Varianten dargestellt [Lim+01; Seo+16]. Dadurch verschwindet jedoch der Bezug zur realen Amplitude und besonders zum zeitlichen Abstand der TE-Impulse. Im NoDi*-Diagramm (Kapitel 6) wurden die drei Arten der Streudiagramme in dieser Arbeit entscheidend weiterentwickelt und an typischen Defekten gasisolierter Systeme erprobt.

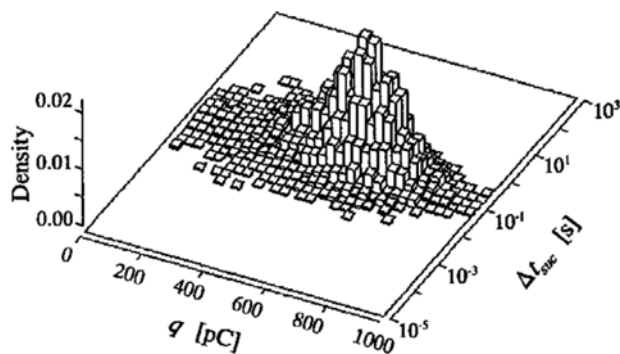
In weiteren Untersuchungen wurden wiederholt charakteristische Merkmale in den Häufigkeitsverteilungen der Informationen über die Kurvenform der TE-Impulse gesucht [Klu+13] und neue Kenngrößen wie die äquivalente Dauer und äquivalente Bandbreite eines TE-Impulses eingeführt, welche besonders bei der Trennung mehrerer unterschiedlicher Defekte einen vielversprechenden Ansatz bieten [Cav+05; Cav+08; Rah+15].

Weitere Versuche der Charakterisierung von Defekten mit Gleichspannung gehen auf Streudiagramme zurück, in denen die Amplitude der Stromimpulse und deren Energie bzw. das Verhältnis von Amplitude zu Ladung und Energie zu Ladung miteinander korreliert werden (Bild 5.3f) [Mor+17]. Auch der aus der Charakterisierung bei Wechselspannung bekannte Differentialquotient in Gegenüberstellung zur differenzierten Ladung und dem zeitlichen Abstand der TE-Impulse wurde aufgegriffen [Pih+18].

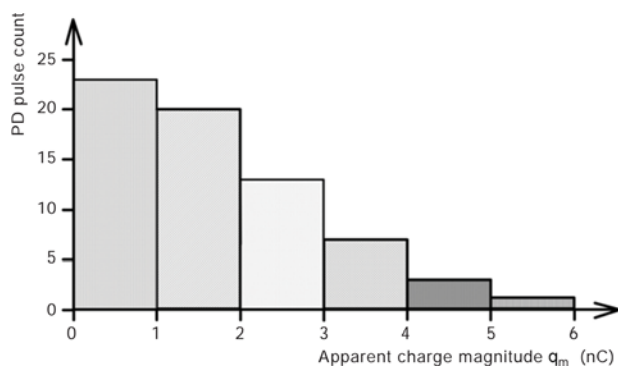
Am Markt erhältliche moderne digitale Messsysteme, die überwiegend für den Einsatz bei Messungen der Wechselspannung entwickelt wurden, bieten die Möglichkeit die detektierten Pulssequenzen mit der Amplitude und dem Zeitpunkt der TE-Impulse und der aktuellen Prüfspannung zum Zeitpunkt des TE-Impulses darzustellen und für weitere Analysen zu exportieren. Methoden zur Trennung mehrerer Defekte oder der Rauschunterdrückung anhand von Informationen über spektrale Anteile der TE-Impulse, wie z. B. die synchrone mehrkanalige TE-Messung, sind vorhanden. Eine Darstellung und Verarbeitung der Parameter der Kurvenform für jeden einzelnen TE-Impuls ist jedoch derzeit nicht möglich. In der Praxis ist aufgrund der Abhängigkeit der Kurvenform der TE-Impulse vom Signalweg und somit vom Messaufbau, Auftrittsort usw. eine Charakterisierung der Defekte anhand dieser Parameter nicht zielführend. Die Puls-Sequenz-Analyse wird sich daher auf lange Sicht für die Charakterisierung der Defekte bei Gleichspannung durchsetzen.



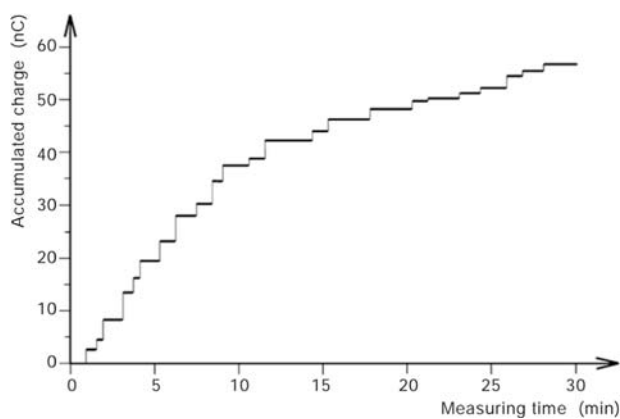
(a) Häufigkeitsverteilung [Mal+87]



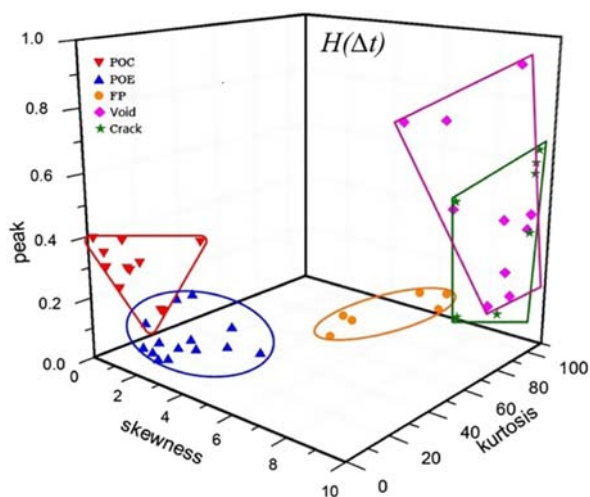
(b) 3D-Häufigkeitsverteilung $H(q, \Delta t)$ [Fro95]



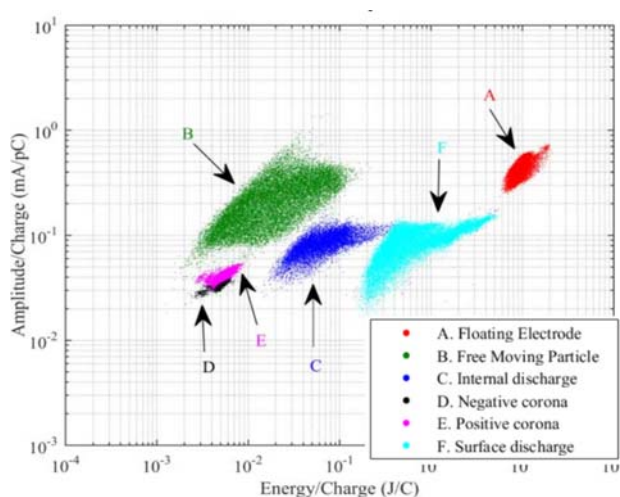
(c) Häufigkeitsverteilung der Ladung [IEC60270]



(d) Akkumulierte Ladung [IEC60270]



(e) Streudiagramm $H(\Delta t)$ [Wan+16]



(f) Streudiagramm phys. Kenngrößen [Mor+17]

Bild 5.3: Unterschiedliche Darstellungsarten von Pulssequenzen bei Gleichspannung

6 Charakterisierung der Pulssequenzen mithilfe der NoDi*-Diagramme

6.1 Aufbau der NoDi*-Diagramme

Die im Rahmen dieser Arbeit neu entwickelten NoDi*-Diagramme werden durch die graphische Normierung und Korrelation der differenzierten Werte einer Pulssequenz (Δt und Δq) miteinander und mit deren Nachfolgewerten in Streudiagrammen erzeugt. Dadurch entstehen typische Muster, die eine Charakterisierung der Defekte und physikalische Interpretation der gemessenen Pulssequenzen zulassen. Der Stern „*“ in NoDi* beschreibt die Version dieser Diagramme.

Ausgehend von der mathematischen Methode eines Streudiagramms, welches eine Korrelation von unterschiedlichen Werten auf einem graphischen Weg ermöglicht, wird durch die Rasterung und das Stapeln der Einträge eine optische Erkennung der Häufigkeitsverteilung gewährleistet.

Die zusammengehörigen NoDi*-Diagramme werden jeweils aus drei einzelnen Streudiagrammen gebildet. Dem sogenannten NoDi_Q*, NoDi_T*- und NoDi_{QT}*-Diagramm. Dabei beziehen sich die Indizes jeweils auf die im Diagramm korrelierten Werte.

Das **NoDi_Q***-Diagramm zeigt die Verteilung der auftretenden Amplitudenunterschiede zueinander und zu deren Vorgängerwerten. Dadurch ist neben der Abschätzung der Streuung der Amplituden auch der Zusammenhang der Amplitude der Impulse mit deren Vorgängerwerten und das Erkennen von charakteristischen Amplitudenabfolgen möglich.

Im **NoDi_T***-Diagramm kann die Verteilung und Streuung der zeitlichen Abstände aufeinanderfolgender Impulse veranschaulicht werden. Periodische Impulse oder zeitliche Abfolgen werden dadurch abgebildet.

Das **NoDi_{QT}***-Diagramm zeigt Zusammenhänge zwischen der Amplitudenänderung und dem zeitlichen Abstand der Impulse. Dabei werden periodische Impulse auch im Bezug auf deren Amplitudenunterschiede miteinander in Verbindung gebracht.

Die Achsen der Diagramme werden jeweils auf die Maximalwerte der vorkommenden korrelierten Werte angepasst. Bei Bedarf, wie z. B. dem Auftreten von Ausreißern, können die Maximalwerte auf fixe Grenzen gesetzt werden. Um einen Bezug auf die Anzahl der Einträge in den Feldern pro Zeit herzustellen, wird die Farbskala der Stapelhöhe ebenfalls auf das Maximum und Minimum der Einträge pro Minute skaliert. Dadurch wird ein Bezug zur zeitlichen Häufigkeit der detektierten

Impulse hergestellt und ein Vergleich der NoDi*-Diagramme von Messungen unterschiedlicher Dauer ist auf einfache Weise möglich.

Zur Erstellung der NoDi*-Diagramme wird die Pulssequenz, bestehend aus den Amplituden q_i und den Zeitpunkten t_i der detektierten Impulse, differenziert (Gleichung 6.1). Die differenzierten Werte der Amplitude Δq_i und die zeitlichen Abstände zwischen den Impulsen Δt_i werden miteinander und mit deren nachfolgenden Werten in drei Varianten ($\Delta q_i|\Delta q_{i+1}$, $\Delta t_i|\Delta t_{i+1}$ und $\Delta q_i|\Delta t_i$) in jeweils einem Streudiagramm korreliert. Das Raster dieser Streudiagramme besitzt 100x100 äquidistante Felder. Durch die Zuordnung in die jeweiligen Rasterfelder ($Q'_i|Q'_{i+1}$, $T'_i|T'_{i+1}$ und $Q'_i|T'_i$) werden die korrelierten Werte graphisch normiert (Bild 6.1). Die Anzahl der Einträge je Feld wird mit einer logarithmischen Farbskala versehen, um eine optische Hervorhebung der Häufigkeitsverteilung zu gewährleisten. In Tabelle 6.1 und Bild 6.2a sind ein Beispiel der Rohdaten (q_i und t_i) sowie die daraus berechneten differenzierten Werte (Δq_i und Δt_i) einer Pulssequenz dargestellt. Bild 6.2b zeigt die Methode zur Erstellung des NoDi*_{QT}-Diagramms dieser Pulssequenz. Zur einfacheren Darstellung besitzt das Raster in diesem Beispiel 10 x 10 Felder anstatt der 100 x 100 Felder.

$$\begin{aligned} \Delta q_i &= q_{i+1} - q_i \\ \Delta t_i &= t_{i+1} - t_i \end{aligned} \tag{6.1}$$

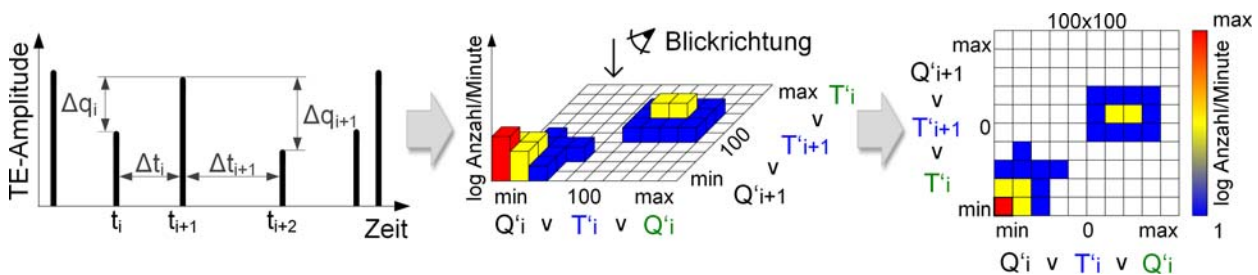
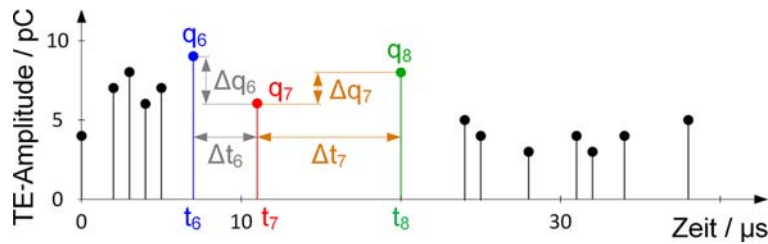


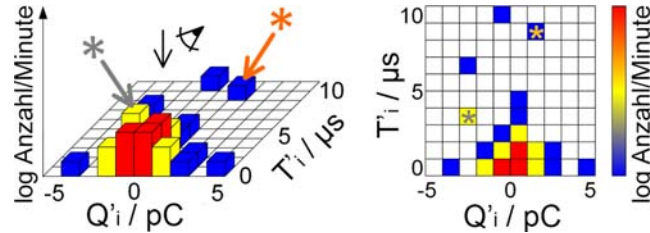
Bild 6.1: Schematische Darstellung der Methode zur Erstellung der NoDi*-Diagramme

Tabelle 6.1: Beispiel einer Pulssequenz und deren differenzierte Werte

i	t_i in μs	q_i in pC	Δt_i in μs	Δq_i in pC
1	0	4		
2	2	7	2	3
3	3	8	1	1
4	4	6	1	-2
5	5	7	1	1
6	7	9	2	2
7	11	6	4	-3
8	20	8	9	2
9	24	5	4	-3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮



(a) Schematische Darstellung der Pulssequenz mit den charakteristischen Parametern

(b) Drei- und zweidimensionale Variante des NoDi*_{QT}-Diagramms mit 10 x 10 RasterBild 6.2: Beispiel einer Pulssequenz (a) und resultierendes NoDi*_{QT}-Diagramm (b) mit Markierung der Einträge $i = 6$ und 8 (grauer Stern) sowie $i = 7$ (orangefarbener Stern)

Alle differenzierten Werte der Pulssequenz Δq_i und Δt_i werden den jeweiligen Feldern in den drei Streudiagrammen zugeordnet. Im Beispiel setzen die differenzierten Werte des Eintrags Nummer Sieben ($i = 7$, $\Delta q_7 = 2$ und $\Delta t_7 = 9$) den Wert des Feldes bei $Q'_i = 1$ bis 2 und $T'_i = 8$ bis 9 auf den Wert Eins. Tritt wiederholt ein Eintrag in diesem Feld auf, so wird der Wert dieses betroffenen Feldes um Eins erhöht. Als Beispiel dienen hierfür die Einträge Nr. 6 und Nr. 8 bei $Q'_i = -2$ bis -3 und $T'_i = 3$ bis 4 . Die Anzahl der Einträge pro Felder wird auf die Einträge pro Minute skaliert, um einen Vergleich von Pulssequenzen mit unterschiedlicher Messdauer zu ermöglichen. Zur Darstellung in einem zweidimensionalen Diagramm werden die Einträge der Felder mit einer logarithmischen Farbskala versehen. Die NoDi*_Q- und NoDi*_T-Diagramme werden auf die gleiche Weise durch Korrelation der differenzierten Werte (Δq_i und Δt_i) mit deren nachfolgenden Werten (Δq_{i+1} und Δt_{i+1}) erzeugt. In Bild 6.3 ist ein Beispiel der drei NoDi*-Diagramme mit dem herkömmlichen 100 x 100 Raster für den Defekt freie metallisches Partikel dargestellt.

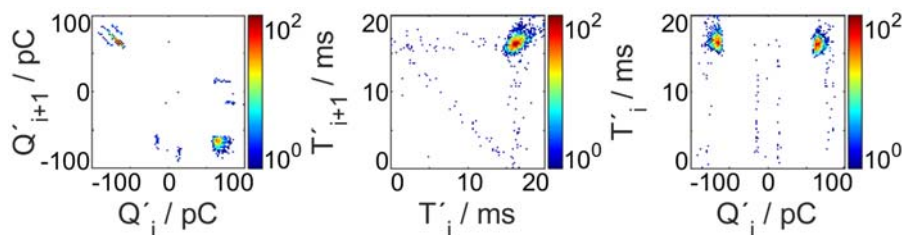


Bild 6.3: Beispiel der NoDi*-Diagramme eines freien metallischen Partikels

6.2 Zuordnung unterschiedlicher Impulsfolgen in den NoDi*-Diagrammen

Der größte Vorteil der NoDi*-Diagramme ist, dass für den Menschen nicht erfassbare Pulssequenzen in einem einfachen zweidimensionalen Muster dargestellt werden können. Je nach den Parametern von drei aufeinanderfolgenden Impulsen werden unterschiedliche Bereiche im NoDi_Q*, NoDi_T*- und NoDi_{QT}*-Diagramm gefüllt. Dadurch kann schnell identifiziert werden, welche Folge von Impulsen Bestandteile der gesamten Pulssequenz sind.

Drei aufeinanderfolgende Impulse liefern die Information über die Amplitude q_i , q_{i+1} und q_{i+2} sowie deren Zeitpunkt t_i , t_{i+1} und t_{i+2} . Daraus werden für die Erstellung der NoDi*-Diagramme die differenzierten Parameter Δq_i , Δq_{i+1} , Δt_i und Δt_{i+1} abgeleitet (Kapitel 6.1). Je nach Impulsfolge füllen diese Parameter unterschiedliche Bereiche in den NoDi*-Diagrammen. In Bild 6.4 sind den Bereichen allgemeine schematische Impulsfolgen mit positiver Polarität zugeordnet. In Tabelle 6.2 werden die Symbole der Pulssequenzen genauer beschrieben. Bei Impulsfolgen mit negativer Polarität wird die Zuordnung der Bereiche aufgrund der unterschiedlichen Vorzeichen der differenzierten Werte um den Ursprung der Diagramme gespiegelt.

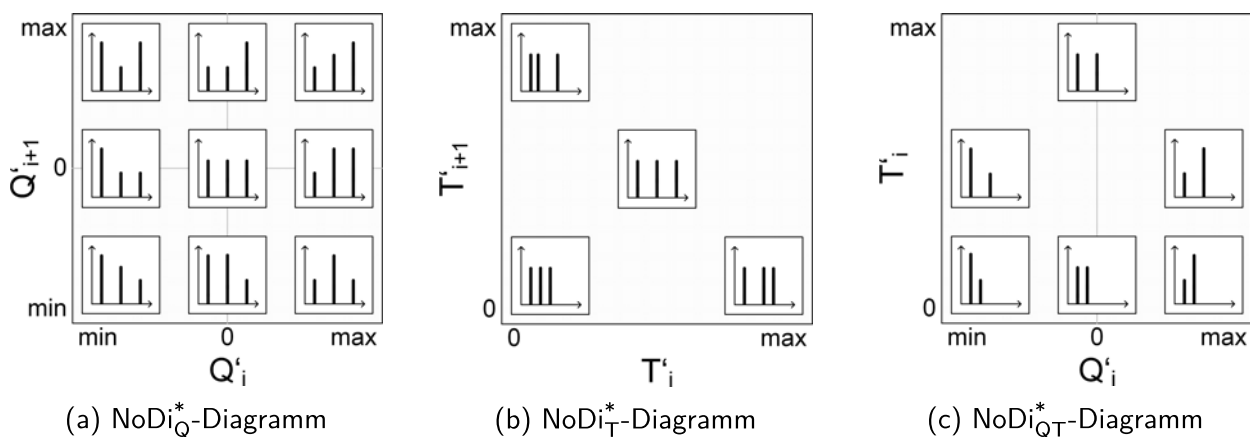


Bild 6.4: Schematische Impulsfolgen mit positiver Polarität und deren zugeordnete Bereiche in den NoDi*-Diagrammen










Wird die Information der Amplitude der Impulse betrachtet, gibt es insgesamt neun unterschiedliche grundsätzliche Impulsfolgen, die bestimmten Bereichen im NoDi_Q*-Diagramm zuzuordnen sind (Tabelle 6.2a und Bild 6.4a). Sieben unterschiedliche Abfolgen von Impulsen mit niedriger und höherer Amplitude sowie eine streng monoton fallende und eine streng monoton steigende Impulsfolge werden unterschieden. Drei aufeinanderfolgenden Impulsen niedriger Amplitude ist der gleiche Bereich zuzuordnen wie drei aufeinanderfolgenden Impulsen hoher Amplitude. Der zeitliche Abstand zwischen den Impulsen hat auf diese Darstellung keinen Einfluss.





Aufgrund der streng monoton steigenden Werte des Zeitpunkts werden die Bereiche im NoDi_T*-Diagramm von vier grundsätzlichen Impulsfolgen bestimmt (Tabelle 6.2b und Bild 6.4b). Schnelle







oder langsame Impulsfolgen mit konstantem zeitlichen Abstand sowie ein kurzer zeitlicher Abstand gefolgt von einem längeren und ein langer zeitlicher Abstand gefolgt von einem kürzeren. Die Amplitude der Impulse hat auf diese Darstellungsart keinen Einfluss.

Bei Korrelation zeitlicher Abstände mit der differenzierten Amplitude der Impulse im NoDi_{QT}*-Diagramm kommen fünf grundsätzliche Impulsfolgen in Frage, die einem bestimmten Bereich im NoDi_{QT}*-Diagramm zuzuordnen sind (Tabelle 6.2c und Bild 6.4c). Impulsfolgen mit gleichbleibender Amplitude und kurzem bzw. langem zeitlichen Abstand sowie Impulsfolgen mit steigender und sinkender Amplitude mit unterschiedlichem zeitlichem Abstand können unterschieden werden. Dabei wird im Vergleich zum NoDi_Q*- und NoDi_T*-Diagramm kein Zusammenhang mit dem Nachfolgewert hergestellt.

Tabelle 6.2: Symbole und Kenngrößen der Impulsfolgen sowie deren differenzierte Werte zur Beschreibung der Bereiche in den unterschiedlichen NoDi*-Diagrammen

(a) Impulsfolgen im NoDi _Q *-Diagramm					
	q_i in pu	q_{i+1} in pu	q_{i+3} in pu	Δq_i in pu	Δq_{i+1} in pu
	1 (2)	1 (2)	1 (2)	0	0
	1	1	2	0	1
	1	2	1	1	-1
	1	2	2	1	0
	2	1	1	-1	0
	2	1	2	-1	1
	2	2	1	0	-1
	1	2	3	1	1
	3	2	1	-1	-1

(b) Impulsfolgen im NoDi _T *-Diagramm					
	t_i in pu	t_{i+1} in pu	t_{i+3} in pu	Δt_i in pu	Δt_{i+1} in pu
	0	1	2	1	1
	0	1	3	1	2
	0	2	3	2	1
	0	2	4	2	2

(c) Impulsfolgen im NoDi _{QT} *-Diagramm						
	t_i in pu	t_{i+1} in pu	q_i in pu	q_{i+1} in pu	Δt_i in pu	Δq_i in pu
	0	1	1(2)	1(2)	1	0
	0	1	1	2	1	1
	0	1	2	1	1	-1
	0	2	1(2)	1(2)	2	0
	0	2	1	2	2	1
	0	2	2	1	2	-1

6.3 Typische Muster im NoDi*-Diagramm

Je nach Verteilung der Amplituden und zeitlichen Abstände der Impulsfolgen entstehen typische Muster in den NoDi*-Diagrammen. Die häufig auftretenden geometrischen Erscheinungsformen können folgendermaßen beschrieben werden:



Dreiecke entstehen durch eine breite Streuung der differenzierten Werte. Dies tritt häufig bei stochastisch auftretenden Impulsen wie z. B. Koronaentladungen auf, wenn eine Impulsfolge mit niedriger und gleichbleibender Amplitude von einzelnen Impulsen mit höherer und breit streuender Amplitude unterbrochen wird (Kapitel 7.5.1.1). Der Häufungspunkt der NoDi*-Diagramme ist unterschiedlich breit um den Ursprung der Diagramme verteilt und nimmt nach außen ab.



Ellipsen oder **Sechsecke** entstehen wie das Dreieck bei stochastisch auftretenden Impulsen. Überwiegen jedoch nicht gleichbleibende Impulse mit bestimmter Amplitude, hat dies ebenfalls eine gleich verteilte Streuung der Amplitudendifferenzen und zeitlichen Abstände der Impulse zu Folge. Es werden mit Ausnahme der monoton steigenden und fallenden Bereiche alle übrigen Bereiche der NoDi*-Diagramme gefüllt. deren Häufungspunkte sind meistens breit verteilt. Diese Muster ergeben sich besonders bei stochastisch auftretenden Impulsfolgen, die nicht von der Triggerschwelle oder Doppelimpulsauflösung des Messsystems begrenzt sind, wie z. B. Koronaentladungen in Luft (Kapitel 7.5.2.7).



Feine Strukturen oder **Linien** werden durch den gleichbleibenden Wechsel zwischen Impulsen mit unterschiedlicher Amplitude verursacht. Diese Amplituden bilden dabei jedoch nicht voneinander getrennte Bänder in der Pulssequenz, sondern zeigen eine weite Streuung. Häufig überwiegt die Anzahl der Impulsfolgen mit gleichbleibender Amplitude, wodurch sich ein begrenzter Häufungspunkt im Ursprung der Diagramme ausbildet. Ein Beispiel dafür ist das freie Potential (Kapitel 7.5.1.2).



Ausgeprägte und abgegrenzte **Häufungspunkte** beschreiben periodisch auftretende Impulse. Besonders im zeitlichen Bereich des NoDi_T*- und NoDi_Q*-Diagramms deuten diese abgegrenzten Häufungspunkte auf periodische Auf- und Entladungserscheinungen oder Resonanzerscheinungen hin (Kapitel 7.5.1.3). Tritt ein periodischer Wechsel zwischen Impulsen mit unterschiedlichen Bereichen der Amplituden auf, so sind diese Häufungspunkte auch im NoDi_Q*-Diagramm zu erkennen. Die Häufungspunkte müssen dabei nicht immer punktförmig auftreten, sondern können auch Linien in einem bestimmten Bereich der Amplitude oder dem zeitlichem Abstand der Impulse darstellen.

Periodisch auftretende Störimpulse können durch diese Häufungspunkte erkannt werden. Besonders Bereiche der Periodendauer der Netzfrequenz und deren Vielfachen sollten im Bezug auf Störimpulse von der Wechselspannungsseite des Prüfaufbaus oder der Testumgebung genauer betrachtet werden (Kapitel 7.5.2.5).



Begrenzungen in den NoDi*-Diagrammen geben einen Hinweis auf das Erreichen der Grenzen des Messsystems. Dies kann z. B. durch eine ausgeprägte Trennlinie zu kurzen zeitlichen Abständen im NoDi_T*- und NoDi_{QT}*-Diagramm aufgrund des Erreichens der maximalen Impulsauflösezeit hervorgerufen werden (Kapitel 7.5.2.2).



Überlagerungen der unterschiedlichen typischen Muster in den NoDi*-Diagrammen treten nicht aufgrund von Überlagerungen unterschiedlicher Pulssequenzen auf (vergleiche Kapitel 7.5.4), sondern durch zeitliche Veränderungen der Pulssequenz. Ein Beispiel hierfür ist der TE-Defekt springender metallischer Span, der von kurzen Phasen des Firefly-Effekts unterbrochen wird (Kapitel 7.5.1.3).

6.4 Einflüsse auf das charakteristische Muster der NoDi*-Diagramme

Wie auf die allgemeinen Kenngrößen der Teilentladungsmessung bei Gleichspannung haben einige Parameter einen starken Einfluss auf das Erscheinungsbild der NoDi*-Diagramme. Neben einer Stauchung und Verzerrung kann das charakteristische Muster der einzelnen Diagramme vollständig verändert werden. Bei einer geringen Anzahl an TE-Impulsen kann das Muster der NoDi*-Diagramme blass ausfallen. Daher werden zur Erstellung der NoDi*-Diagramme mindestens 500 – 1000 TE – Impulse empfohlen.

Zeitliche Veränderungen in der Pulssequenz können bei Auswertung der gesamten Pulssequenz mithilfe der NoDi*-Diagramme nicht immer erkannt werden und führen zu einer Überlagerung unterschiedlicher Muster. Mithilfe einer separaten Auswertung der unterschiedlichen Bereiche der Pulssequenz kann ein Bezug zur zeitlichen Änderung hergestellt und eine Charakterisierung des Defekts ermöglicht werden (Kapitel 7.5.2.6). Eine Unterbrechung bzw. Pause in der Pulssequenz kann durch die Skalierung des NoDi_T*- und NoDi_{QT}*-Diagramms eine Stauchung der Muster hervorrufen. Mit der Filterung dieser Ausreißer aus den differenzierten Daten und dem Setzen von festen Grenzen kann die Stauchung verhindert werden.

Erreicht der zeitliche Abstand der Impulse den Bereich der bandbreitenabhängigen maximalen Impulsauflösezeit des Messsystems, werden die NoDi*-Diagramme durch die Wahl der Bandbreite beeinflusst. Eine Charakterisierung des Defekts ist dann in den meisten Fällen mithilfe der NoDi*-Diagramme möglich, jedoch werden auch die Amplitude der detektierten TE-Impulse und somit auch die differenzierte Amplitude dadurch maßgebend beeinflusst (Kapitel 7.5.2.2).

Eine weitere durch das Messsystem gegebene Grenze ist der Dynamikbereich. Deckt dieser nicht den vollständigen Amplitudenbereich der auftretenden TE-Impulse ab, ist eine korrekte Charakterisierung der Defekte nur begrenzt möglich (Kapitel 7.5.2.3).

Die Auswirkung von stochastisch oder periodisch auftretenden Störimpulsen hängt vom Verhältnis der Anzahl und der Amplitude der Störimpulse zu den TE-Impulsen ab. Überschreitet das Verhältnis

der Anzahl den Bereich von ca. 10 % nicht wesentlich und sind die Amplituden der Störimpulse kleiner oder gleich den Amplituden der TE-Impulse, wird das grundsätzliche Erscheinungsbild der NoDi*-Diagramme nur geringfügig beeinflusst. Zusätzliche einzelne Einträge überlagern sich mit dem charakteristischen Muster der Defekte. Bei höheren Amplituden der Störimpulse wird das gesamte Muster durch die Anpassung der Maximalwerte gestaucht. Abhilfe kann durch Filterung der hohen Impulse und das Setzen fester Maximalwerte geschaffen werden. Bei einer übermäßigen Anzahl an Störimpulsen gehen alle charakteristischen Eigenschaften der Amplitudendifferenzen und der zeitlichen Abstände der TE-Impulse und somit auch das charakteristische Erscheinungsbild der NoDi*-Diagramme verloren. Es treten Muster in den NoDi*-Diagrammen auf, die weder einem Defekt noch einer Störquelle zuzuordnen sind.

Auch eine Doppelerkennung von Impulsen infolge einer zu gering gesetzten Totzeit des Messsystems oder die Detektion von reflektierten Impulsen verändern die NoDi*-Diagramme (Kapitel 7.5.2.4). In den meisten Fällen können diese jedoch durch Häufungspunkte im NoDi_T*- und NoDi_{QT}*-Diagramm erkannt und bei der Auswertung bereinigt werden.

Auf Methoden zur Störimpulsunterdrückung und Abhilfemaßnahmen zur Auswertung von störimpulsbehafteten Pulssequenzen wurde in Kapitel 4.5 genauer eingegangen.

6.5 Automatische Klassifizierung mit Methoden des Maschinellen Lernens

Monitoringsysteme mit einer automatischen Auswertung und Charakterisierung der Defekte werden im Bereich der Wechselspannung bereits mehrere Jahrzehnte eingesetzt. Dadurch können Fehler frühzeitig erkannt und die Gesamtkosten gesenkt sowie die Lebensdauer gesteigert werden [Bei+98]. Für die automatische Bewertung der Messergebnisse ist ein Expertensystem notwendig. Dieses muss in der Lage sein, externe Störungen zu reduzieren und eine angemessene Diagnose und Risikobewertung durchzuführen. Bei Monitoringsystemen für GIS konnte bei Wechselspannung bisher eine Identifikationsgenauigkeit von 97 % für die typischen TE-Defekte, Radar und verschiedene Störquellen auf Basis der UHF-TE-Messung erreicht werden [Ach+05]. Die verwendeten Algorithmen waren Artificial Neural Networks (ANN), Genetic Algorithm und Fuzzy-Logik mit statistischen Merkmalen. Diese Algorithmen des maschinellen Lernens benötigen kein für den Menschen verarbeitbares Muster oder Diagramm. Es ist jedoch notwendig, sogenannte Features aus den Messdaten zu extrahieren, welche möglichst viele charakteristische Eigenschaften der Messdaten beinhalten [Mor+14; Wu+15].

Für das kontinuierliche TE-Monitoring von Betriebsmitteln bei Gleichspannung sind neue Methoden zu entwickeln. In grundlegenden Untersuchungen wurden aus den von modernen digitalen Messsystemen gelieferten Kenngrößen mit dem Zeitpunkt und der Amplitude der TE-Impulse sowie deren differenzierten Werten jeweils die in Tabelle 6.3 zusammengefassten statistischen Parameter als Features ermittelt. Zusätzlich wurden die Rohdaten der Pulssequenz und die Pixel-Daten der NoDi*-Diagramme als Features verwendet. Zur Reduktion der Datengröße wurde das Raster der NoDi*-Diagramme auf 25 x 25 verringert.

Tabelle 6.3: Zusammenfassung der möglichen abgeleiteten Features aus den grundlegenden Kenngrößen q_i und Δt_i

Maximum	Schiefe der Häufigkeitsverteilung
Minimum	Wölbung der Häufigkeitsverteilung
Mittelwert	Parameter der Weibullverteilung (α, β)
Varianz	Korrelationskoeffizienten
Standardabweichung	Hauptfrequenz

Unterschiedliche Klassifikations-Algorithmen wie Artificial Neural Network (ANN) und Decision Tree (DT) wurden in einer Kooperation getestet [Kai+17] und auf diese Features angewandt. Diese Algorithmen wurden mit einer frei verfügbaren maschinellen Lernsoftware, dem "Waikato Environment for Knowledge Analysis (WEKA)" [Hal+09] implementiert und können durch Training mit bekannten Messdaten lernen. Die Leistungsfähigkeit steigt mit der Anzahl und Varianz der Messdaten. Das Ziel ist eine möglichst fehlerfreie Charakterisierung und Bewertung aller möglichen Defekte sowie das Erkennen von Störimpulsen zur Unterstützung eines menschlichen Experten und für den Einsatz in Expertensystemen für das Monitoring.

Das **Artificial Neural Network (ANN)** besteht aus einem Input Layer, einem Output Layer und mehreren Hidden Layern (Bild 6.5a). Jeder Knoten (Node) verbindet alle Knoten der vorhergehenden und der folgenden Schicht mit unterschiedlicher Gewichtung. Die Knoten der Eingangsschicht stellen die Eingangs-Features dar, während die der Ausgangsschicht die möglichen vorhergesagten Defekte darstellen. An jedem Knoten wird eine gewichtete Summe der eingehenden Signale berechnet und mit einer nichtlinearen Funktion (Sigmoidfunktion) die Weitergabe dieses Wertes bestimmt. Durch das Training des Netzwerks mit bekannten Messdaten werden die optimalen Gewichtungen ermittelt, so dass die Ausgabe des gesamten Netzwerks der gewünschten Klassifizierung des Defekts entspricht. Das Training von ANN wird mit dem Back-Propagation-Algorithmus⁶ durchgeführt.

Der **Decision Tree-Algorithmus (DT)** konstruiert eine Struktur ähnlich einem Flussdiagramm (Bild 6.5b). Jeder Leaf Node repräsentiert eine Defekt-Art. Am Root Node und an den Internal Nodes wird ein Kriterium zur Klassifizierung der Eingangsdaten festgelegt. Diese Kriterien werden ebenfalls durch das Training mit bekannten Messdaten ermittelt. Nach mehreren Vorversuchen mit unterschiedlichen DT-Algorithmen kam der C4.5 DT-Algorithmus bei der Klassifizierung zur Anwendung. Als Features kamen dabei lediglich die statistischen Parameter zum Einsatz.

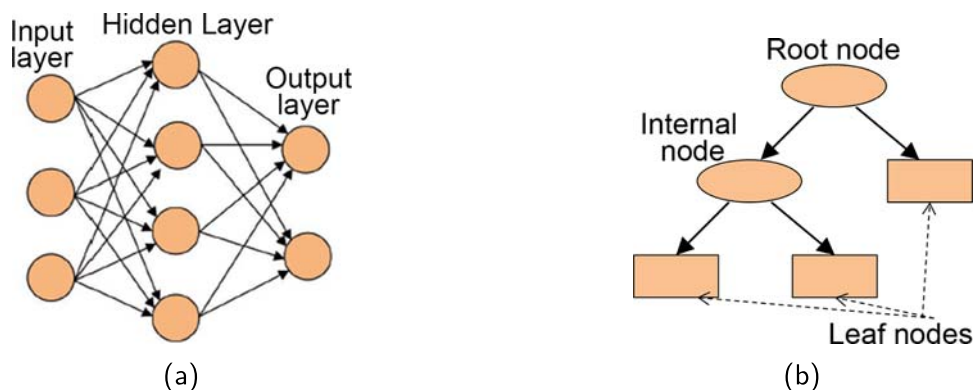


Bild 6.5: Typische Struktur eines Artificial Neural Network (a) und Decision Tree (b)

Um die Leistung der Algorithmen zu validieren, wurde die k -fache Kreuzvalidierung eingesetzt. Dabei werden die vorhandenen Messdaten bzw. die daraus abgeleiteten Features nach dem Zufallsprinzip in k gleich große Teilproben aufgeteilt. Eine Teilprobe dient für den Test des Algorithmus und die restlichen $k - 1$ Teilproben werden für das Training verwendet. Der Kreuzvalidierungsprozess wird k -mal wiederholt, wobei jede der k Teilproben einmal für die Prüfung verwendet wird. Die Ergebnisse werden zusammengefasst und das Verhältnis von korrekt zu falsch identifizierten Defekten wird ausgegeben.

⁶Backpropagation, auch Fehlerrückführung genannt, ist ein verbreitetes Verfahren für das Einlernen von künstlichen neuronalen Netzen. Es gehört zur Gruppe der überwachten Lernverfahren und wird als Verallgemeinerung der Delta-Regel auf mehrschichtige Netze angewandt. Dazu muss ein externer Lehrer existieren, der zu jedem Zeitpunkt der Eingabe die gewünschte Ausgabe kennt. Die Rückwärtspropagierung ist ein Spezialfall eines allgemeinen Gradientenverfahrens in der Optimierung, basierend auf dem mittleren quadratischen Fehler.

7 Experimentelle Untersuchungen und Erprobung der NoDi*-Diagramme

7.1 Übersicht der durchgeführten Untersuchungen

Zur Entwicklung, dem Test und der Verifizierung der Methoden für die Auswertung der TE-Pulssequenzen bei Gleichspannung wurden TE-Messungen an typischen Defekten gasisolierter Systeme durchgeführt. In vier unterschiedlichen Testzellen (Kapitel 7.2.1) wurden die Defekte, „Spitze auf Hochspannung“, „freies Potential“, „freies metallisches Partikel“, „Hohlraum in Isolator“ und „Partikel auf Isolator“, nachgebildet. Die geometrischen Eigenschaften der Defekte wie Spitzendurchmesser und Schlagweite bei der Spitze auf Hochspannung sowie die Partikelarten und Partikellängen wurden dabei variiert. Auch zur Untersuchung von inneren Defekten standen unterschiedliche Hohlräume in Isolatoren zur Verfügung. Neben den Hauptuntersuchungen der Defekte in SF₆ wurden an ausgewählten Defekten vergleichende Messungen in synthetischer Luft, N₂ und CO₂ durchgeführt. Der Gasdruck p wurde zwischen 0,1 und 0,5 MPa variiert. Neben den Voruntersuchungen bei Wechselspannung wurden, abhängig vom Defekt, unterschiedliche Messprozeduren bei Gleichspannungen beiden Polaritäten sowie Polaritätswechsel zur Bestimmung der charakteristischen Größen getestet. Um auftretende Effekte genauer zu untersuchen, wurden die Messprozeduren angepasst und um die Reproduzierbarkeit zu gewährleisten, mehrmals wiederholt. Die Detektion der TE-Impulse zur Untersuchung des TE-Verhaltens der unterschiedlichen Defekte sowie die Entwicklung und der Test der Methoden zur Auswertung der gemessenen Pulssequenzen fand an einem IEC 60270 [IEC60270] konformen Messaufbau und Messsystem statt (Kapitel 7.2.2). Für den Nachweis der Anwendbarkeit der NoDi*-Diagramme bei der UHF-TE-Messungen wurden Messungen an Testzellen in einer 420-kV-GIS-Sammelschiene durchgeführt. Die Erfassung der TE-Impulse erfolgte sowohl mit der konventionellen TE-Messung als auch mit der UHF-TE-Messung mit dem Messsystem MPD 600 der Firma Omicron. Dieses ermöglicht eine einfache Speicherung und Weiterverarbeitung sowie eine direkte Verarbeitung der Pulssequenzen. Zur konventionellen Auskopplung der TE-Signale diente der Ankoppelvierpol CLP 542. Bei der UHF-TE-Messung kamen ein Fenstersensor und der Downkonverter UHF 620 von Omicron zur Anwendung (Kapitel 7.2.3). Die gemessenen Pulssequenzen konnten anschließend mit einem in Matlab erstellten Tool, dem PDDC-Analyzer, weiterverarbeitet und dargestellt werden (Kapitel 7.3).

In Tabelle 7.1 und 7.2 ist eine Übersicht der durchgeführten Messungen mit der konventionellen TE-Messung gemäß IEC 60270 und der UHF-TE-Messung dargestellt. Neben der Polarität + und – der Gleichspannung werden Messprozeduren mit Polaritätswechsel PR unterschieden.

Der Durchmesser d oder die Länge l sowie die Schlagweite s bzw. die Position beschreiben die Geometrie der Defekte. Zusätzlich werden die untersuchte Gasart, der Gasdruck und die Art des freien Partikel angegeben und ein künstlich erzeugter oder ein produktionsbedingter Hohlraum unterschieden.

Tabelle 7.1: Übersicht der durchgeführten Messungen an den unterschiedlichen TE-Defekten mithilfe der konventionellen TE-Messung

		Spannung			Geometrie		Gas							
		+	-	PR	d bzw.	s bzw.	Art				Druck / MPa			
					l	Pos.	SF ₆	N ₂	CO ₂	Luft	0,1	0,3	0,5	
Spitze auf Hochspannung		x	x	(x)	50 µm	17 mm	x	x	x	x	x	x	x	x
					25 µm	50 cm								
Freies Potential		x	x	(x)			x	x	x	x	x	x	x	x
Freie Partikel	Kugel	x	x	(x)	2 mm	15 mm	x	(x)	(x)	(x)	x	x	x	x
					2,5 mm									
	Draht	x	x	(x)	4,5 mm	15 mm	x				x	x	x	x
					1,5 mm									
	Span	x	x	(x)	1 mm	15 mm	x				x	x	x	x
					2 mm									
Partikel auf Isolator		x	x	x	10 mm	Mittig	x				x	(x)	(x)	
Hohlraum	Künstlich	x	x	x	2 mm	5 mm	x Versuchsreihe (x) Kurzversuche							
	Produktion	x	x	x										

Tabelle 7.2: Übersicht der durchgeführten Messungen an den unterschiedlichen TE-Defekten mithilfe der UHF-TE-Messung

		Spannung		Geometrie		Gas			
		+	-	d bzw.	s bzw.	Art		Druck / MPa	
				l	Pos.	SF ₆	0,1	0,3	0,5
Spitze auf Hochspannung		x	x	50 µm	17 mm	x	x		x
				25 µm	50 cm				
Freies Potential		x	x			x	x		x
Freie Partikel	Kugel	x	x	2 mm	15 mm	x	x	x	x
	Draht	x	x	4,5 mm	15 mm	x	x		

7.2 Messaufbauten und Prüfobjekte

7.2.1 Testzellen mit typischen Defekten gasisolierter Systeme

Die fünf typischen Defekte von gasisolierten Systemen („Spitze auf Hochspannung“, „freies Potential“, „freie metallische Partikel“, „Hohlraum im Isolator“ und „Partikel auf Isolator“) wurden in unterschiedlichen Testzellen nachgebildet (Bild 7.1). Das Modell der Defekte befindet sich dabei in einem geschlossenen Gasraum, welcher mit einem Druck p von bis zu 0,5 MPa beaufschlagt werden kann. Es kamen zwei unterschiedlich große Testzellen mit Gasvolumen V von 80 cm³ und 2000 cm³ zum Einsatz. Neben den Untersuchungen in Schwefelhexafluorid (SF₆) wurde auch der Einfluss der Gasarten Stickstoff (N₂), Kohlendioxid (CO₂) und synthetische Luft (20,5 % O₂, 79,5 % N₂,) untersucht.

Die Testzelle für den TE-Defekt **„Spitze auf Hochspannung“** besteht aus zwei austauschbaren unterschiedlichen Wolfram-Nadeln mit einem Spitzenradius r von 25 µm oder 50 µm und einem Spitzenwinkel α von 14°. Der Abstand s zwischen Nadel und Erdelektrode konnte in den zwei unterschiedlich großen Testzellen von 10 mm bis 50 mm variiert werden (Bild 7.2a).

Der TE-Defekt **„freies Potential“** ist durch eine elektrisch isolierte Elektrode zwischen einer Stab-Platten-Anordnung realisiert. Die isolierte Elektrode ist dabei als Kombination einer metallischen Kugel und Stabelektrode aufgebaut und über eine Aufhängung aus Polyethylen mit der Hochspannungselektrode verbunden. Die Abmessungen dieser Anordnung sind in Bild 7.2b zu finden.

Die Testzelle zur Untersuchung des TE-Defekts **„freies metallisches Partikel“** besteht aus einer schalen-förmigen Erdelektrode sowie einer abgerundeten zylindrischen Hochspannungselektrode. Diese Anordnung wurde in der Testzelle mit einem Volumen von 2000 cm³ aufgebaut. Die Partikel wurden direkt unter der Elektrode platziert und konnten durch die schrägen Ausrichtung der Testzelle und ein Sichtfenster im Deckel beobachtet werden (Bild 7.3a). Bei angelegter Spannung vollzog das Partikel die Bewegung im koaxialen Feld zwischen den Elektroden.

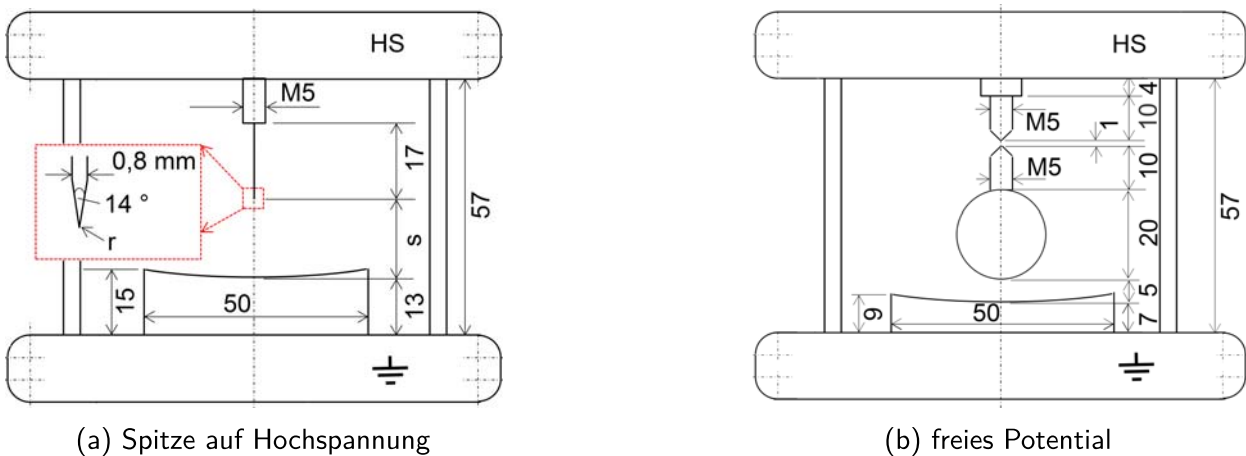


(a) Spitze auf Hochspannung

(b) freies Potential

(c) Hohlraum in Isolator

Bild 7.1: Testzellen mit unterschiedlichen typischen Defekten von gasisolierten Systemen

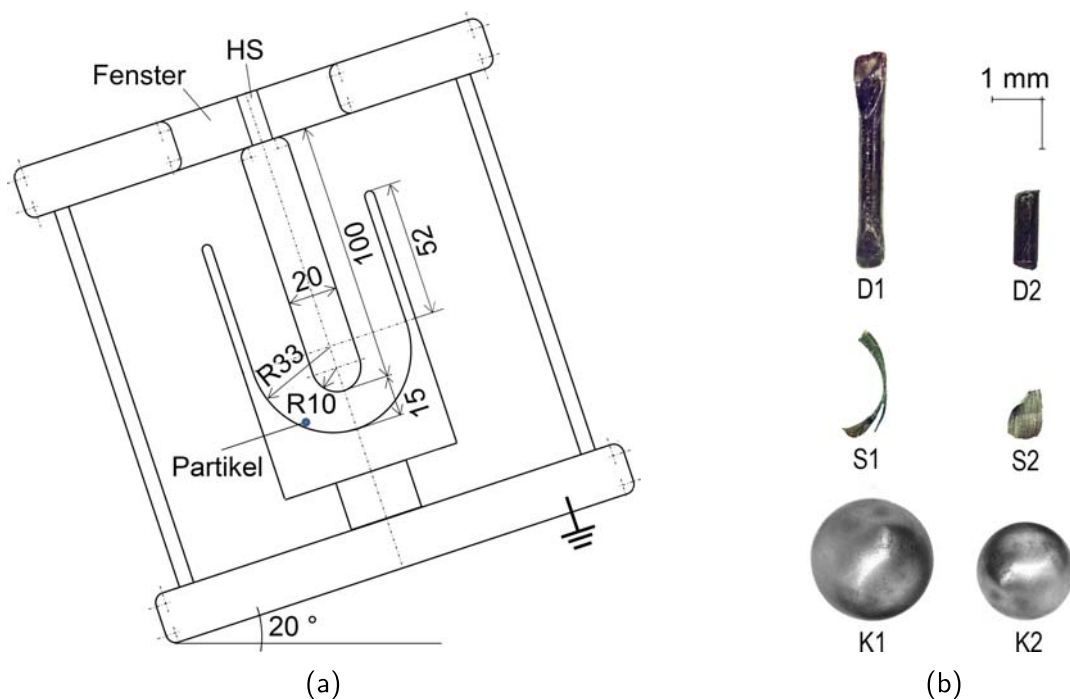


(a) Spitze auf Hochspannung

(b) freies Potential

Bild 7.2: Abmessungen der Testzellen in mm mit unterschiedlichen typischen Defekten von gasisolierten Systemen

Das Verhalten von drei unterschiedlichen Arten von metallischen Partikeln wurde untersucht (Bild 7.3b). Die erste Art waren zwei **Kugeln** aus Stahl mit einem Durchmesser d von 2 mm und 2,5 mm mit der Bezeichnung **K1** und **K2** sowie einem Gewicht m von 33 mg bzw. 65 mg. Die zweite Art waren zwei **Drähte** aus Stahl mit einem Durchmesser von 0,5 mm und einer Länge von 4,5 mm (**D1**) und 1,5 mm (**D2**). Diese beiden scharfkantigen Drähte hatten ein Gewicht von 3,8 mg und 2,4 mg. Als dritte Art von Partikeln dienten zwei **Späne** einer Fräsmaschine. Span **S1** besteht aus Stahl und hat mit einer Länge von 1 mm ein Gewicht von 0,5 mg. Span **S2** ist aus Aluminium, hat eine Länge von 2 mm und ein Gewicht von 0,2 mg.



(a)

(b)

Bild 7.3: Abmessungen und Platzierung der Testzelle in mm (a) zur Untersuchung der unterschiedlichen Arten freier metallischer Partikel(b)

Der TE-Defekt „**Hohlraum im Isolator**“ konnte an zwei unterschiedlichen Arten von Prüflingen untersucht werden. Die erste Art bestand aus zwei in Gießharz eingegossenen Elektroden mit einem Abstand s von 5 mm und einer darin künstlich erzeugten Luftblase mit einem Durchmesser d von 2 mm (Bild 7.4a). Eine weitere Art waren TE-behaftete 36-kV-Stützisolatoren aus Gießharz ($l = 50$ mm, $d = 60$ mm und $s = 17$ mm). Ein Querschnitt dieser Isolatoren ist in Bild 7.4b dargestellt. Diese Isolatoren hatten durch die Produktion bedingte nicht genauer definierte Fehlstellen. Um Oberflächenentladungen zu vermeiden, wurden die Isolatoren in der Testzelle mit dem Volumen von 2000 cm^3 unter Stickstoff bei einem Druck von $0,5\text{ MPa}$ vermessen.

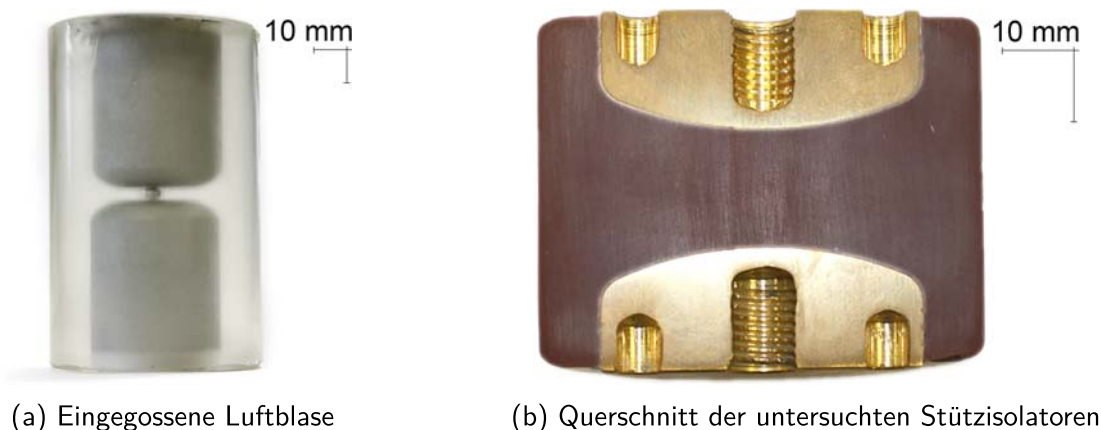


Bild 7.4: Unterschiedliche Arten von Hohlräumen in Isolatoren

Der TE-Defekt „**Partikel auf Isolator**“ wurde durch Drahtstücke und einen Span aus Aluminium mit einer Länge von 5 – 15 mm auf einem intakten, zuvor beschriebenen 36-kV-Stützisolator nachgebildet. Als Beispiel ist ein Span mit einer Länge von 10 mm in Bild 7.5a dargestellt. Der Abstand zur Hochspannungselektrode wurde wie in Bild 7.5b beschrieben zwischen „Position Oben“ und der „Position Mitte“ variiert. Befestigt wurde das Partikel mithilfe eines Silikonklebers in der Mitte des Partikels. Der Isolator mit Partikel befand sich zwischen zwei Elektroden in der Testzelle mit einem Volumen von 2000 cm^3 in SF_6 (Bild 7.1c).

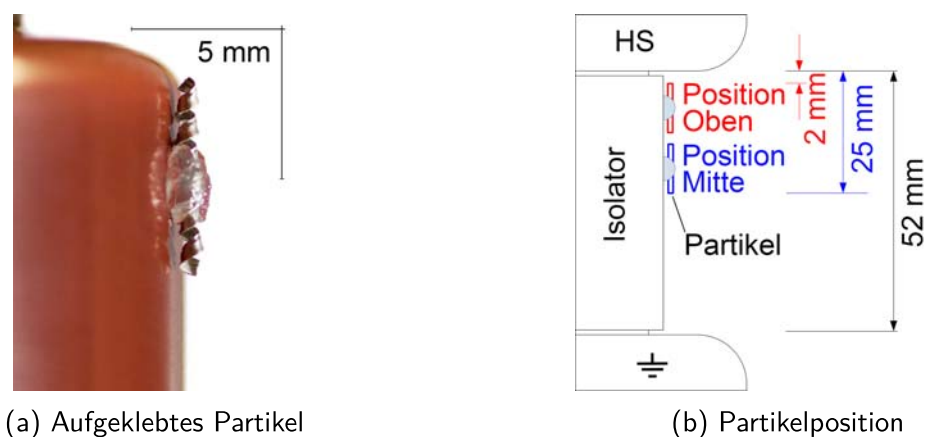


Bild 7.5: Anordnung des Partikels (Span) auf Isolator

7.2.2 Konventioneller TE-Messaufbau nach IEC 60270

Das Teilentladungsverhalten der unterschiedlichen typischen Defekte wurde bei Gleichspannung mithilfe eines IEC 60270 konformen Messaufbaus untersucht (Bild 7.6). Dieser wurde aus Komponenten des MWB-Hochspannungs-Baukastensystems aufgebaut und besteht aus einem Hochspannungstransformator TEO 100/10 sowie einem Einweggleichrichter mit Diode D_1 , einem Begrenzungswiderstand $R_D = 250 \text{ k}\Omega$ und einem Glättungskondensator $C_1 = 10 \text{ nF}$. Die Spannungsmessung am TE-Messsystem wird durch einen ohmschen Spannungsteiler, bestehend aus den Widerständen $R_2 = 140 \text{ M}\Omega$ und $R_3 = 230 \text{ k}\Omega$, ermöglicht. Die Parallelschaltung des Prüflings (Testzelle mit einer Kapazität $C_p \approx 1 - 5 \text{ pF}$) und der Serienschaltung des Koppelkondensators $C_2 = 1,2 \text{ nF}$ und des Ankoppelvierpols CLP 542 ist durch den Widerstand $R_1 = 10 \text{ M}\Omega$ vom Messaufbau zur Gleichspannungserzeugung entkoppelt. Dadurch werden Störimpulse vom ohmschen Teiler und dem restlichen Aufbau gedämpft. Der Spannungsfall an dem Widerstand R_1 und somit die Differenz zwischen gemessener Spannung U_{C1} und der am Testobjekt anliegenden Prüfspannung U_{DC} kann aufgrund des geringen Stroms durch das Testobjekt und der zusätzlichen Spannungskalibrierung mit Messung und Abgleich der Spannung direkt am Prüfling vernachlässigt werden. Der Welligkeitsfaktor der Prüfspannung ist abhängig vom Strom I_{DC} durch das Testobjekt. Bei einem maximalen Strom von $30 \mu\text{A}$, der bei den Untersuchungen der verschiedenen Defekte festgestellt werden konnte (Spitze auf Hochspannung, $s = 50 \text{ mm}$, $r = 50 \mu\text{m}$, SF_6 , $p = 0,1 \text{ MPa}$, $U_{DC} = 70 \text{ kV}$), beträgt der Welligkeitsfaktor $0,14 \%$. Der Mittelwert der gemessenen Spannung U_{C1} und der Prüfspannung U_{DC} unterscheidet sich dabei um $0,4 \%$. Bei einer spannungsrichtigen Messung mit Einbau des Widerstands R_1 zwischen Glättungskondensator und ohmschen Teiler erhöht sich der Welligkeitsfaktor bei dem gegebenen Prüfstrom auf 1% (Bild 7.7). Im Teilentladungsverhalten der untersuchten Defekte konnte kein Einfluss des Welligkeitsfaktors in diesem Bereich festgestellt werden.

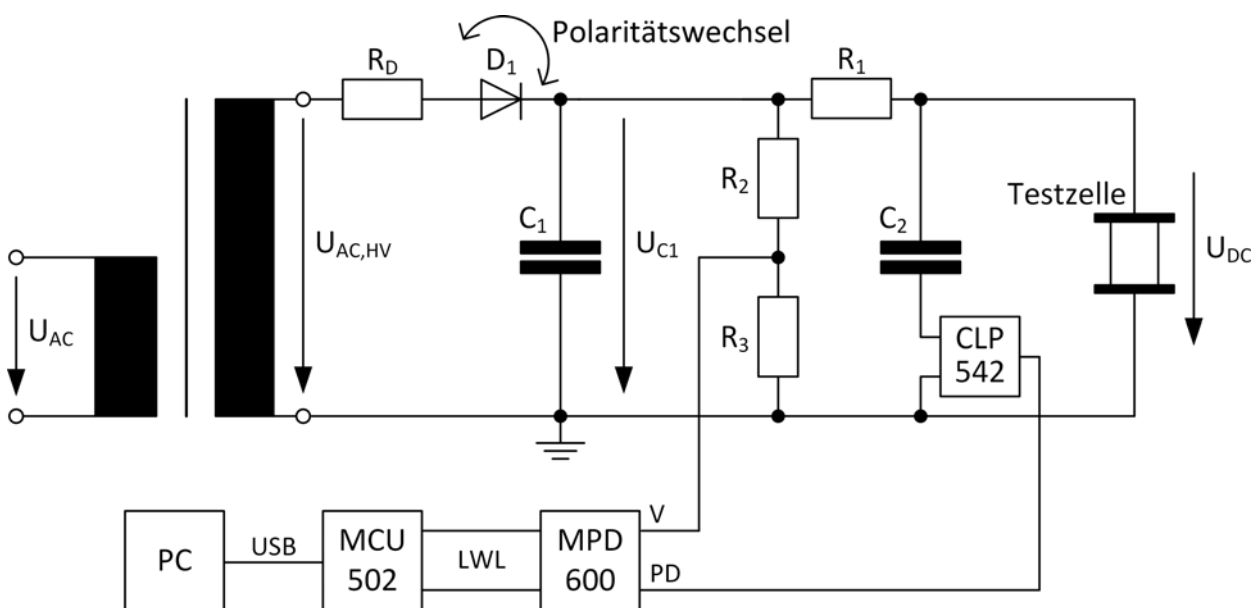


Bild 7.6: Messaufbau zur Erfassung von TE-Impulsen bei Gleichspannung

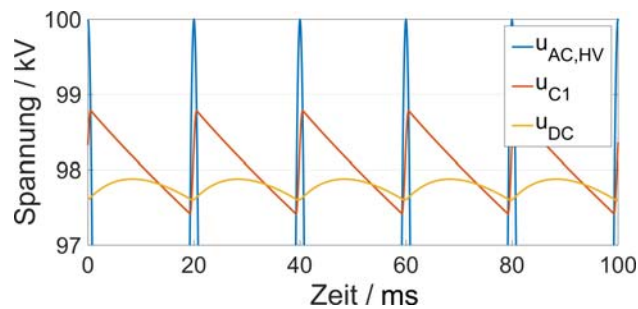


Bild 7.7: Simulation der Spannungsverläufe im Prüfkreis bei einer Wechselspannung von $\hat{U}_{AC,HV} = 100 \text{ kV}$ und einem Strom von $I_{DC} = 30 \mu\text{A}$ durch das Testobjekt

Als Messsystem diente das MPD 600 der Firma Omicron mit dem Ankoppelvierpol CLP 542. Die Mittenfrequenz und die Bandbreite des Messsystems wurden, sofern nicht anders angegeben, mit $f_m = 1,6 \text{ MHz}$ und $\Delta f = 3 \text{ MHz}$ gewählt. Daraus resultiert eine vom Messsystem vorgegebene Impulsauflösezeit von 300 ns . Vor jedem Messzyklus wurde das Messsystem mit Hilfe des Kalibrators CAL1A der Firma Power Diagnostix und dem Hochspannungstastkopf Fluke 80K-40 auf den Wert der zu erwartenden TE-Amplitude bzw. die Spannung kalibriert. Die Verstärkerstufe des Messsystems wurde manuell gewählt und die Triggerschwelle entsprechend angepasst. Bei der höchsten Verstärkerstufe, die üblicherweise zur Bestimmung der Einsatzspannung gewählt wird, lagen die maximalen Störimpulse des Grundstörspegels bei diesem Messaufbau im Labor im Bereich von $0,2 - 0,7 \text{ pC}$.

Neben der händischen Steuerung der Spannung konnten an einem automatisierten Prüfplatz über das dafür entwickelte Matlab-Tool *HSI Measurement Assistent* beliebige Spannungsstufen und Spannungsrampen vorgegeben sowie Polaritätswechsel durchgeführt und die gemessenen Pulssequenzen automatisch abgespeichert werden. Die kleinstmögliche Zeitdauer des Polaritätswechsels von 50 kV auf -50 kV betrug $3,5 \text{ s}$.

7.2.3 TE-Messung im UHF-Bereich

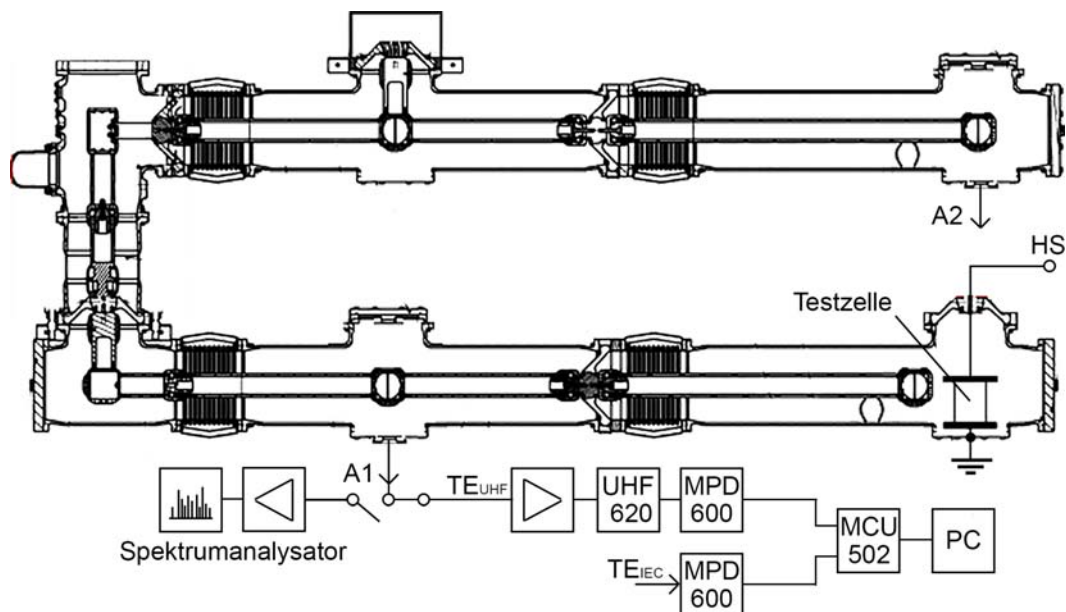
Die Untersuchungen der TE-Defekte im UHF-Bereich wurden an einer $11,5 \text{ m}$ langen U-förmig aufgebauten einpoligen 420-kV -Sammelschiene durchgeführt (Bild 7.8a). Die Gleichspannungserzeugung und parallele konventionelle Teilentladungsmessung wurde äquivalent zu der in Kapitel 7.2.2 beschriebenen und der in Bild 7.6 dargestellten Schaltung realisiert. Die Testzellen befanden sich bei den Untersuchungen am Beginn der Sammelschiene und wurden über eine Durchführung im Deckel des ersten Sammelschienenabgangs mit dem Messaufbau zur Gleichspannungserzeugung verbunden.

Das UHF-TE-Messsystem bestand aus dem Spektrumanalysator ZVL Network Analyzer von R&S oder aus dem MPD 600 der Firma Omicron mit einem UHF 620 Downconverter und einem zusätzlichen externen Verstärker ZFL-2000GH+ der Firma Mini-Circuits. Es standen Fenster-Sensoren mit einem Durchmesser von 7 cm an zwei unterschiedlichen Messpunkten zur Verfügung.

Die Sensoren befanden sich an den Sammelschienenabgängen im Bereich des ersten Drittels, in 3,5 m Entfernung von der Testzelle mit der Bezeichnung A1, sowie am oberen Ende der Sammelschiene in 11,5 m Entfernung von der Testzelle mit der Bezeichnung A2. Die Sensoren wurden über ein 10 m langes Kabel des Typs RG213 mit dem Verstärker des Messsystems verbunden (Bild 7.8b). Für die parallele und zeitsynchrone konventionelle TE-Messung wurde das in Kapitel 7.2.2 beschriebene TE-Messsystem im Frequenzbereich mit einer Mittenfrequenz f_m von 800 kHz und einer Bandbreite Δf von 1,6 MHz verwendet.



(a) Übersicht



(b) Detaillierter Aufbau mit UHF-TE-Messsystem am Sensor A1

Bild 7.8: Aufbau der GIS-Sammelschiene mit Bezeichnung der Messpunkte (A1, A2) und Testzelle

7.3 Datenaufzeichnung und Auswertung

Die detektierten TE-Pulssequenzen konnten direkt mit der zum Omicron MPD 600 Messsystem zugehörigen *Software for MPD and MI 1.6.7* dargestellt und gespeichert werden. Aufgrund der begrenzten Analysemöglichkeiten und der unvorteilhaften Darstellungsmöglichkeit der Pulssequenzen in dieser Software wurde der *PDDC-Analyzer* entwickelt. Dieses in Matlab realisierte Softwaretool erlaubt eine benutzerfreundliche Weiterverarbeitung der aus den Messdaten unterschiedlicher Messsysteme exportierten Pulssequenzen. Neben der grundlegenden Verarbeitung und Filterung der Messdaten ist eine Berechnung der abgeleiteten TE-Kenngrößen (Kapitel 4.6) und die Erstellung aller in der Literatur vorhandenen Darstellungsarten (Kapitel 5) realisierbar. Zusätzlich wird mit diesem Tool eine Entwicklung und Erprobung von neuen Analyseverfahren, wie z. B. den NoDi*-Diagrammen, ermöglicht.

Um die Daten während der Messung in Echtzeit zu verarbeiten und die grundlegenden Kenngrößen sowie Darstellungsarten auszuwerten, stand der *Online-PDDC-Analyzer* zur Verfügung. Diese Software stellt eine Schnittstelle zwischen der *Omicron Software for MPD and MI* und dem *PDDC-Analyzer* dar. Neben einer schnellen Konfiguration des Messsystems für Messungen bei Gleichspannung ist damit eine Darstellung der Pulssequenz und der NoDi*-Diagramme in Echtzeit möglich.

Für die Auswertung der Messergebnisse wurde die Einsetzspannung bei Gleichspannung für alle Defekte mit drei TE-Impulsen in einem Zeitfenster von 30 Sekunden definiert. Die statistische Auswertung der gemessenen Pulssequenzen basierte auf dem Mittelwert, dem Maximum und dem Minimum der Amplitude q sowie dem zeitlichen Abstand Δt oder der Anzahl der Impulse pro Zeit n der TE-Pulssequenzen.

Graphisch wurden die Amplitude über der Zeit (q - t -Diagramm) sowie die NoDi*-Diagramme, dargestellt, ausgewertet und verglichen.

7.4 Messprozeduren

Die Messprozedur bei Gleichspannung positiver und negativer Polarität gliedert sich in zwei Teile. Im ersten Teil, zur Ermittlung der Einsetzspannung, wurde in Vorversuchen die vorläufige Einsetzspannung des Defekts abgeschätzt. Nach einer für den Ladungsabtransport ausreichend langen Pause mit kurzgeschlossenem und geerdetem Prüfling folgte die eigentliche Messprozedur zur Bestimmung der Einsetzspannung und Aufnahme der Pulssequenzen (Bild 7.9a). Zu Beginn dieser Messungen wurde die Spannung auf ca. 50 % der zuvor abgeschätzten Einsetzspannung gesteigert. Im Anschluss daran wurde die Spannung stufenweise um den Wert ΔU_1 und für eine Stufendauer Δt_{m1} bis zum Erfüllen des Kriteriums der Einsetzspannung mit 3 TE-Impulsen im zeitlichen Fenster von 30 Sekunden erhöht. Die Werte der Spannungshöhe ΔU_1 und Zeitdauer

pro Stufe Δt_{m1} wurde den unterschiedlichen Defekten angepasst. Die entsprechenden Werte sind den jeweiligen Unterkapiteln zu entnehmen.

Nach Erreichen der Einsatzspannung beginnt der zweite Teil der Messprozedur zur Aufzeichnung der Pulssequenzen. In diesem wurde die Spannung stufenweise erhöht und die Pulssequenz für eine vom Defekt bzw. der TE-Aktivität abhängigen Zeitdauer Δt_{m2} aufgenommen. Die Stufenhöhe betrug dabei, falls nicht weiter definiert, 10 % der Einsatzspannung. Der Maximalwert der Spannung ist durch die Durchschlagspannung des Defekts oder die Einsatzspannung des Messaufbaus begrenzt. Nach abgeschlossenem zweiten Teil der Messprozedur wird die Spannung auf Null gesenkt und das Testobjekt geerdet.

Nicht bei allen Defekten war diese Messprozedur zur korrekten Bestimmung der Einsatzspannung zielführend. Bei diesen Defekten und um den Einfluss der Vorbelastung mit unterschiedlichen Spannungshöhen oder Spannung mit entgegengesetzter Polarität zu untersuchen, kamen Messprozeduren mit Polaritätswechsel zum Einsatz. Dabei wurde nach jeder Spannungsstufe die Polarität der Gleichspannung geändert (Bild 7.9b).

Davon abweichende Messprozeduren, die zur genaueren Untersuchung bestimmter defektabhängigen Effekten angewandt wurden, werden in den jeweiligen Unterkapiteln beschrieben.

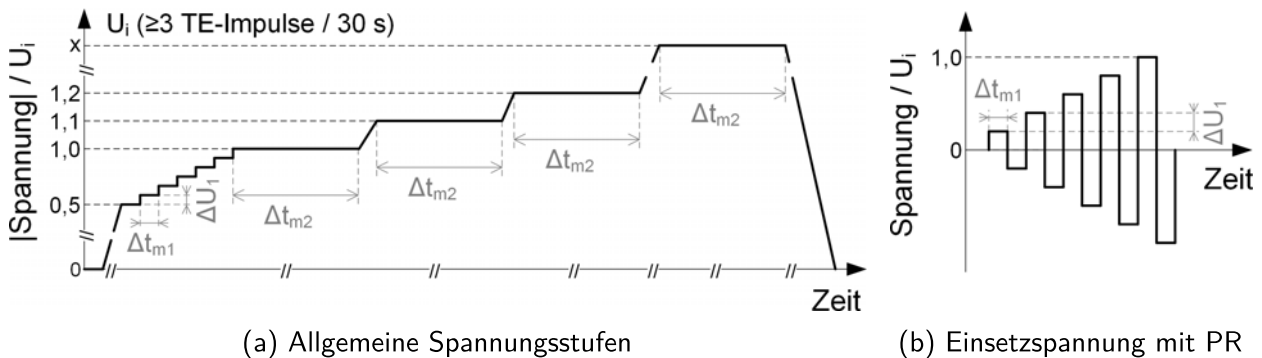


Bild 7.9: Messprozedur zur Ermittlung der Einsatzspannung und Aufnahme der Pulssequenzen

7.5 TE-Messungen gemäß IEC 60270

7.5.1 Verhalten, Kenngrößen und NoDi*-Diagramme typischer Defekte

7.5.1.1 Spitze auf Hochspannung

Die Zeitdauer der Spannungsstufen Δt_{m1} zur Ermittlung der Einsetzspannung U_i von Koronaentladungen einer Spitze auf Hochspannung in SF_6 zeigen im Bereich vom 10 s bis 5 min keinen Einfluss auf deren absoluten Wert. Die Stufenhöhe ΔU_1 beeinflusste lediglich die Auflösungsgenauigkeit der Einsetzspannung. Auch Vorbelastungen des Defekts mit Spannungen unterhalb der Einsetzspannung konnten in Vorversuchen als beeinflussende Größe ausgeschlossen werden. Neben der Polarität der Spannung sind die Geometrie der Anordnung sowie der Gasdruck als maßgebende Einflussgrößen festzustellen.

Das TE-Verhalten bei der Einsetzspannung bzw. nur geringfügig höheren Spannungen ist mit einer unregelmäßigen, teilweise aussetzenden und wiederkehrenden TE-Aktivität zu beschreiben. Neben schwankenden Amplituden der TE-Impulse kann ein Aussetzen der TE-Aktivität im Bereich mehrerer Sekunden beobachtet werden. In Bild 7.10 ist dieses Verhalten in der Pulssequenz bei negativer (a) und positiver Polarität (b) dargestellt. Die Anzahl der TE-Impulse pro Zeit bei Gleichspannung positiver Polarität liegt im Bereich von 10^3 Impulsen pro Sekunde und ist niedriger als bei Gleichspannung mit negativer Polarität mit 10^4 Impulsen pro Sekunde. Die Amplitude der TE-Impulse ist hingegen bei Gleichspannung mit positiver Polarität um den Faktor 2 bis 5 größer als bei Gleichspannung mit negativer Polarität. Bei der Spitze auf Hochspannung in SF_6 ist der Übergang zwischen den Amplituden der TE-Impulse und den Amplituden der Impulse des Grundstörpegels fließend. Die gewählte Triggerschwelle hat somit einen starken Einfluss auf die charakteristischen Größen. Besonders bei der Auswertung der Anzahl der Impulse pro Zeit sowie dem Mittelwert und dem Maximum der zeitlichen Abstände oder der Amplituden der TE-Impulse, sowie bei auf diesen Kenngrößen passierenden Darstellungsarten, muss dieses Verhalten berücksichtigt werden (vergleiche Kapitel 7.5.2.3).

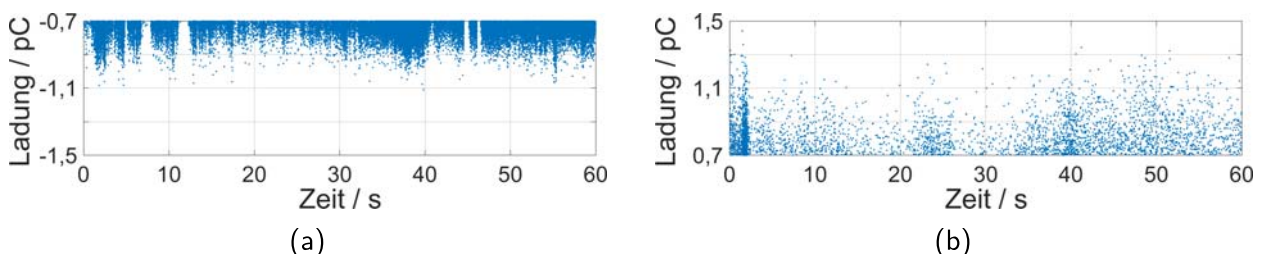


Bild 7.10: Pulssequenz einer Spitze auf Hochspannung bei Einsetzspannung mit negativer (a) und positiver (b) Polarität ($U_{DC} = U_i$, $s = 17$ mm, $r = 50$ μm , SF_6 , $p = 0,1$ MPa)

Bei Spannungswerten oberhalb der Einsetzspannung tritt ein kontinuierliches Entladungsverhalten auf. Die Streuung der Amplituden und zeitlichen Abstände der TE-Impulse ist relativ breit und liegt im Bereich von wenigen Picocoulomb und hunderten Mikrosekunden. Es konnte kein

Zusammenhang der Amplituden oder der zeitlichen Abstände mit deren Vorgängerwerten festgestellt werden. In den NoDi*-Diagrammen entstehen dadurch die charakteristischen symmetrischen Dreiecke. Aufgrund der geringeren Anzahl der Impulse bei Gleichspannung positiver Polarität ist in diesem Fall das NoDi*-Diagramm weniger stark ausgeprägt. In Bild 7.11 sind Beispiele von NoDi*-Diagrammen bei unterschiedlichen Spannungshöhen und Gasdrücken dargestellt. Weitere Darstellungen der NoDi*-Diagramme der Spitze auf Hochspannung sind im Anhang zu finden.

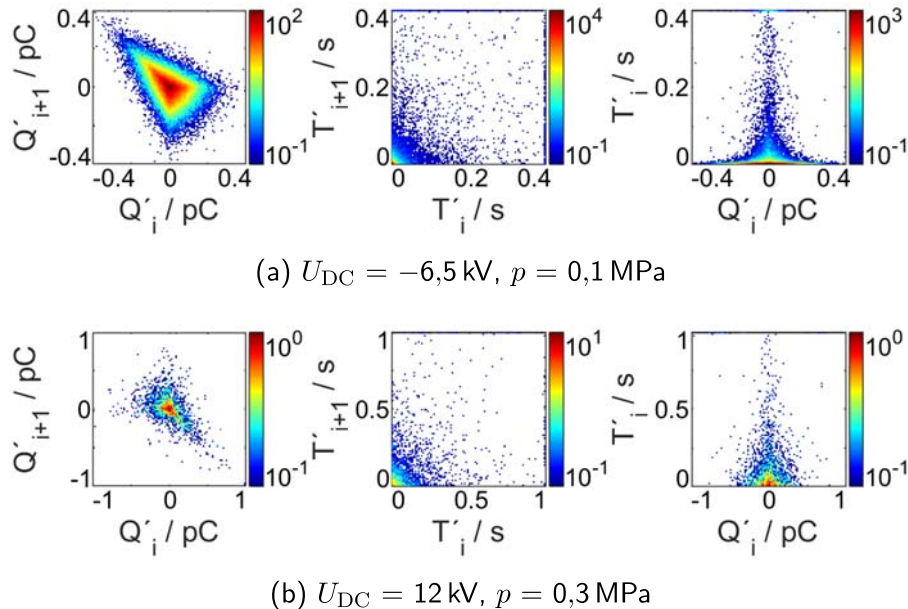


Bild 7.11: NoDi*-Diagramme einer Spitze auf Hochspannung bei unterschiedlichen Spannungshöhen und Gasdrücken ($s = 17 \text{ mm}$, $r = 50 \text{ }\mu\text{m}$, SF_6)

Bei weiterer Steigerung der Spannung wird ein Bereich von Spannungswerten erreicht, in dem die Amplitude und Anzahl der TE-Impulse pro Zeit sinkt und die TE-Impulse in einigen Fällen nicht mehr detektiert werden. Der gemessene Gleichstrom I_{DC} durch die Anordnung steigt dabei weiterhin exponentiell mit der Spannung. In Luft ist der Bereich der aussetzenden Entladungen stärker ausgeprägt als unter SF_6 . Mit Hilfe einer UV-Kamera konnten in diesem Bereich hingegen gleichbleibende Entladungen beobachtet werden. Sowohl bei Gleichspannung mit negativer und positiver Polarität als auch bei Wechselfeldspannung im Bereich des negativen Scheitels ist dieses Verhalten zu beobachten. Zwei unterschiedliche Effekte können dafür verantwortlich sein.

Zum einen ist dieses Verhalten physikalisch durch die Koronastabilität, wie in Kapitel 3.2 genauer beschrieben, zu begründen. Durch eine Raumladungszone von Ionen wird das lokale elektrische Feld vor der Nadel erhöht. Die Anzahl der TE-Impulse nimmt mit gleichzeitiger Abnahme der Amplitude zu. Ein Großteil der TE-Impulse liegt dabei unterhalb der Triggerschwelle und der Auflösungsgenauigkeit des Messsystems und kann nicht mehr detektiert werden. Besonders bei einer Spitze auf Hochspannung in Luft mit verhältnismäßig langen zeitlichen Abständen zwischen den Impulsen konnte dieses Phänomen auch mit einem breitbandigen Messsystem (Oszilloskop Yokogawa DL9240 1,5 GHz) überprüft werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Erklärung dieser Erscheinung, die bei Anordnungen in SF_6 eine Rolle spielen kann, sind TE-Impulsfolgen mit zeitlich knapp aufeinanderfolgenden TE-Impulsen. Das

bandbreitenbegrenzte Messsystem ist aufgrund von Interferenzen dieser TE-Impulse nicht mehr in der Lage, diese ausreichend aufzulösen und zu detektieren. Dadurch sinken ebenfalls die Amplitude und Anzahl der erfassten TE-Impulse [Mra+16].

In Bild 7.12 sind die Messergebnisse einer Spitze auf Hochspannung in SF₆ mit einer Schlagweite von $s = 50$ mm und einem Druck $p = 0,1$ MPa sowie die schematische Messanordnung dargestellt. Aus drei aufeinanderfolgenden Messungen mit Spannungsstufen von 2,5 kV wurden der Mittelwert und die Standardabweichung der Amplitude sowie der Anzahl der TE-Impulse pro Zeit über einer Triggerschwelle von 0,6 pC bestimmt. Zusätzlich wurde der Gleichstrom im Erdzweig des Prüflings mit Hilfe eines pA-Meters (Keithley 6400) aufgenommen.

Ab der Teilentladungseinsetzspannung von $U_{i-} = -12,5$ kV bzw. $U_{i+} = 15$ kV steigen sowohl die Amplitude und die Anzahl der TE-Impulse als auch der Gleichstrom durch die Anordnung mit zunehmender Spannung. Bei weiterer Erhöhung der Spannung mit negativer Polarität beginnen die Amplitude sowie die Anzahl ab einem Spannungsbereich von $-22,5$ kV bis -30 kV zu sinken. Erst ab -45 kV konnte ein wiederholter Anstieg dieser Kenngrößen beobachtet werden. Bei Spannung mit positiver Polarität beginnt die Amplitude der TE-Impulse ab $57,5$ kV zu sinken. Der Gleichstrom durch die Anordnung nimmt jedoch in beiden Fällen bei Steigerung der Spannung exponentiell zu. Eine Fehlmessung des Messsystems aufgrund der Bandbreitenbegrenzung konnte in diesem Fall durch eine breitbandige Überprüfung mit Hilfe des Oszilloskops ausgeschlossen werden.

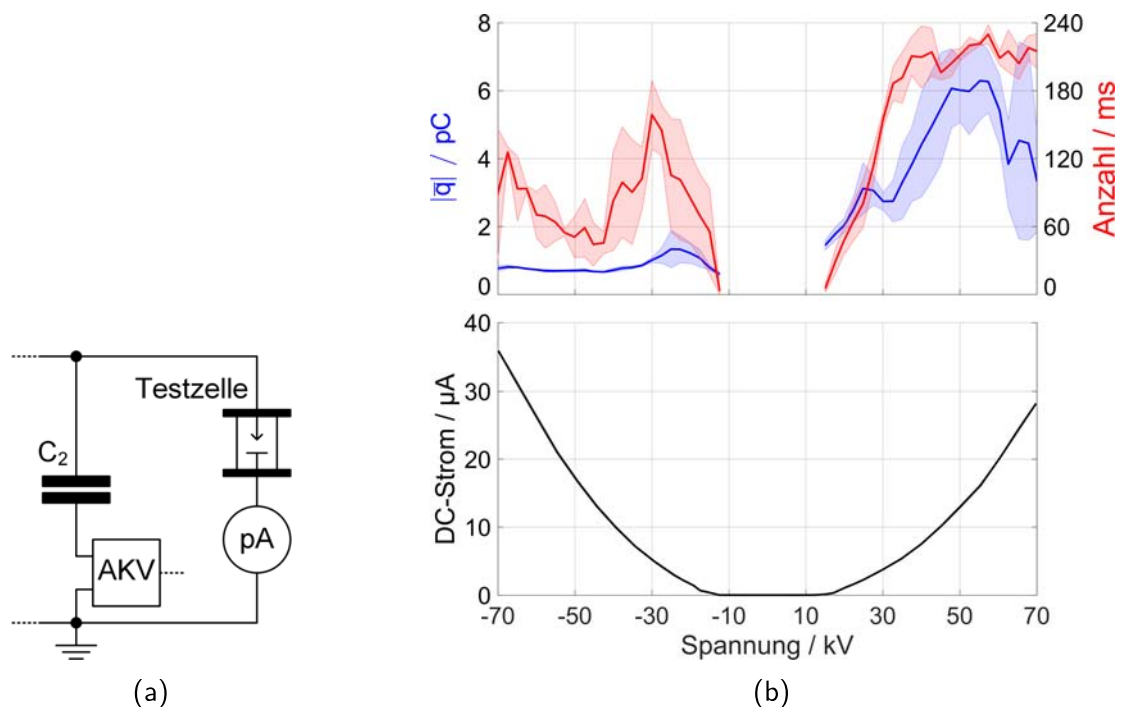


Bild 7.12: Erweiterung des Messaufbaus zur DC-Strommessung (a) und Darstellung des Mittelwerts und der Standardabweichung der TE-Amplitude, Anzahl der Impulse sowie Gleichstrom durch die Nadel-Platte-Anordnung (b) ($s = 50$ mm, $r = 50$ μm, SF₆, $p = 0,1$ MPa)

7.5.1.2 Freies Potential

Die Einsatzspannung des untersuchten freien Potentials ist eindeutig bestimmbar und zeigte keine Abhängigkeit von einer entladungsfreien Vorbelastung. Charakteristisch für das TE-Verhalten des freien Potentials sind wiederholende und konstante Impulsfolgen. Diese setzen sich aus einer hohen Anzahl von TE-Impulsen mit niedriger Amplitude gefolgt von einem TE-Impuls mit höherer Amplitude zusammen. Je nach Anordnung können die zeitlichen Abstände zwischen diesen TE-Impulsen und Impulsfolgen im Bereich von einigen hundert Mikrosekunden bis Sekunden liegen. Die Amplituden der TE-Impulse liegen im Bereich von wenigen Picocoulomb bis einigen hundert Picocoulomb. An das Messsystem werden im Bezug auf den Dynamikbereich für die korrekte Erkennung dieser TE-Impulse mit unterschiedlicher Amplitude große Anforderungen gestellt. Ein Beispiel der Pulssequenzen eines freien Potentials ist in Bild 7.13 für Gleichspannung mit negativer (a) und positiver (b) Polarität dargestellt. Die hohe Anzahl von TE-Impulsen mit kleiner Amplitude ist bei der untersuchten Anordnung auf das Laden der freien Elektrode über die Hochspannungselektrode zurückzuführen. Erreicht die freie Elektrode ein Potential, bei dem das kritische Feld im Bereich zur Erdelektrode überschritten wird, kommt es zu deren Entladung in Richtung Erdelektrode. Die Amplituden der auftretenden TE-Impulse fallen aufgrund der Geometrie der freien Elektrode und Hochspannungselektrode um den Faktor von 50 bis 100 höher aus (Bild 7.1b). Durch ein abwechselndes Erreichen der kritischen Feldstärke zwischen freier Elektrode und Hochspannungselektrode sowie freier Elektrode und Erdelektrode entsteht ein periodisches Gleichgewicht an Entladungen in den unterschiedlichen Bereichen. Im für eine Diagnose ungünstigen Fall nimmt die freie Elektrode nach dem Anlegen der Spannung und wenigen TE-Impulsen ein Potential an, bei dem die Feldstärke in den Bereichen über und unter der freien Elektrode unterhalb der kritischen Feldstärke liegt. Die freie Elektrode wird weder von der Hochspannungselektrode weiter geladen, noch entlädt sich diese über die Erdelektrode. Es treten keine weiteren TE-Impulse auf und eine Erkennung des Defekts ist bei gleichbleibender Spannungshöhe nicht möglich. Ein weiterer ungünstiger Fall tritt ein, wenn an der Anordnung ab einer bestimmten Spannungshöhe die kritische Feldstärke in beiden Bereichen überschritten wird. Es kommt zu starken Entladungen und wiederkehrend zündenden Durchschlägen, ohne zuvor erkennbare TE-Impulse des Defekts bei konstanter Gleichspannung. In diesen Fällen kann eine Messprozedur mit Polaritätswechsel beim Nachweis der Defekte hilfreich sein.

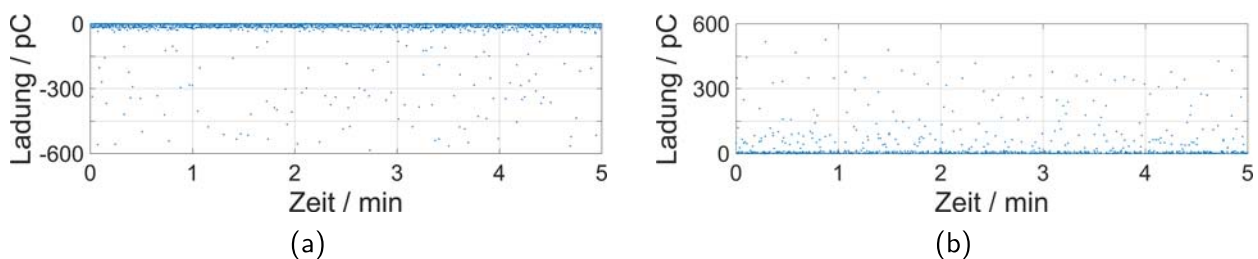


Bild 7.13: Pulssequenz des freien Potentials bei Gleichspannung mit negativer (a) und positiver (b) Polarität ($U_{DC} = \pm 32 \text{ kV}$, SF_6 , $p = 0,5 \text{ MPa}$)

Die beschriebenen periodischen Impulsfolgen erzeugen für diesen Defekt charakteristische NoDi*-Diagramme mit feinen Strukturen. In Bild 7.14 sind die NoDi*-Diagramme des freien Potentials für unterschiedliche Spannungshöhen und Polaritäten dargestellt. Die feinen Strukturen entlang der Grenze des ersten und vierten sowie dritten und vierten Quadranten im NoDi_Q*-Diagramm in Bild 7.14a entstehen durch die gleichbleibenden Amplituden der Impulse mit niedriger Amplitude und kleiner differenzierter Ladung und dem darauffolgenden Impuls mit hoher Amplitude bzw. einem Impuls mit hoher Amplitude gefolgt von Impulsen mit niedriger und gleichbleibender Amplitude. Die Diagonale im zweiten Quadranten spiegelt die Unterbrechung einer Impulsfolge mit kleinen Amplituden und Amplitudenänderungen mit einem einzelnen Impuls mit hoher Amplitude wieder. Der ausgeprägte Häufungspunkt im Zentrum des Diagramms wird durch die Vielzahl von Impulsen mit niedriger und gleichbleibender Amplitude erzeugt. Das NoDi_T*- und NoDi_{QT}*-Diagramm zeigt die breite Streuung der zeitlichen Abstände zwischen den Impulsen. Durch die Häufung der Einträge zwischen rechter und linker Hälfte im NoDi_{QT}*-Diagramm ist die überwiegende Anzahl von Impulsen mit kleiner Amplitudendifferenz zu erkennen.

Bei positiver Polarität ändert sich aufgrund des gleichbleibenden grundlegenden TE-Verhaltens des freien Potentials lediglich die Polarität der Pulssequenz und somit auch das Vorzeichen der differenzierten Werte. Die NoDi*-Diagramme werden dadurch an deren Ursprung gespiegelt (Bild 7.14b). Eine weitere Auswahl von NoDi*-Diagrammen des freien Potentials sind im Anhang zu finden.

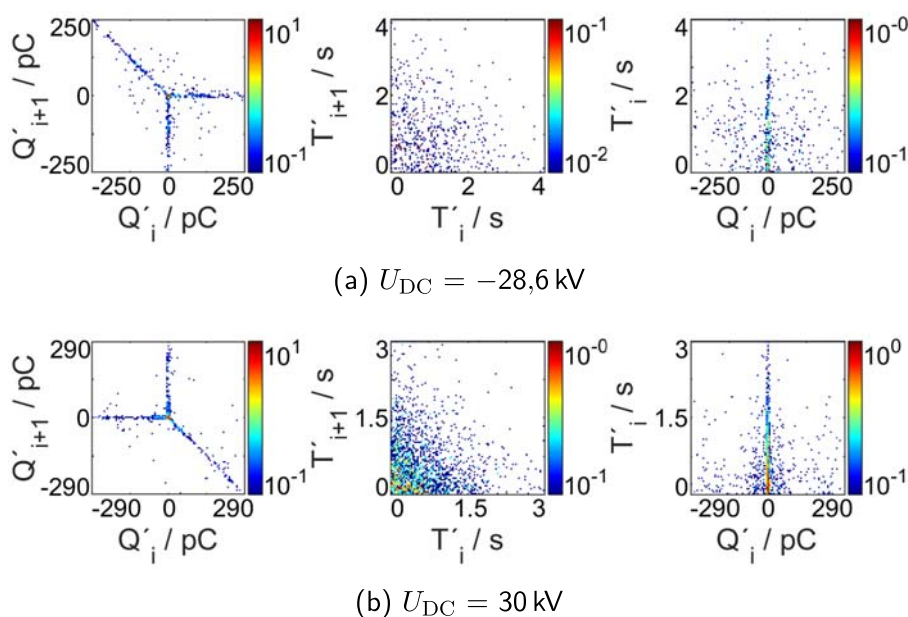


Bild 7.14: NoDi*-Diagramme eines freien Potentials bei unterschiedlicher Spannungshöhe und Polarität (SF_6 , $p = 0,3 \text{ MPa}$)

7.5.1.3 Freie metallische Partikel

Die unterschiedlichen freien metallischen Partikel zeigten eine eindeutige und reproduzierbare Einsetzspannung ohne eine Abhängigkeit der Vorbelastung. Prinzipiell konnten zwei unterschiedliche Effekte beobachtet werden: das Springen der Partikel zwischen den Elektroden und der Firefly-Effekt. In bestimmten Fällen treten Mischformen auf, in denen diese beiden Effekte alternieren bzw. sich gegenseitig ablösen.

Beim **springenden metallischen Partikel** wird das geladene Partikel nach Erreichen der Abhebefeldstärke in Richtung Hochspannungselektrode beschleunigt. Durch den nahezu elastischen Stoß mit den Elektroden stellt sich eine periodische Hin- und Her-Bewegung des Partikels zwischen den Elektroden ein. Diese Bewegung kann mit einer Pseudoresonanzfrequenz f_r beschrieben werden. Der Effekt tritt meist bei schweren Partikeln mit runden Kanten wie beispielsweise einer Kugel und einem hohen Gasdruck auf. Der genaue Vorgang mit Beschreibung des Ladungsaustausches wird nachfolgend anhand des Beispiels einer springenden Kugel genauer betrachtet.

Ist das Partikel in der Lage, die aufgenommene Ladung auf dem Weg zur Gegenelektrode abzugeben, so stellt sich der sogenannte **Firefly-Effekt** ein. Dabei bewegt sich das Partikel vorzugsweise im Bereich der negativ geladenen Elektrode. Die aufgenommene Ladung wird kurz nach dem direkten Kontakt mit der Elektrode durch Glimmentladungen sowie pulsierenden Koronaentladungen abgegeben und wiederholt von der Elektrode angezogen. Es stellt sich eine schnelles, ruckartiges Tänzeln des Partikels im Bereich der Elektrode ein. Begünstigt wird die Ladungsabgabe infolge von Koronaentladungen durch hohe Feldstärken im Bereich der scharfen Kanten am Partikel, einen niedrigen Gasdruck und Ladungen mit negativer Polarität am Partikel.

In den folgenden Punkten wird das TE-Verhalten der unterschiedlichen metallischen Partikel-Arten (Kugel, Draht und Span) beschrieben und auf physikalische Vorgänge genauer eingegangen.

Kugel

Die freien metallischen Kugeln mit einem Durchmesser d von 2 mm und 2,5 mm vollzogen bei allen gewählten Gasdrücken ab der Einsetzspannung bzw. Abhebespannung bis zur Durchschlagspannung eine springende Bewegung zwischen den Elektroden. Diese Bewegung blieb auch bei einer Verringerung der Spannung bis zur Aussetzspannung erhalten, welche weit unterhalb der Einsetzspannung liegt. Eine gleichmäßige Bewegung mit Pseudoresonanz stellte sich nach Verändern oder Zuschalten der Spannung nach einem Einschwingvorgang von Millisekunden ein. In der gemessenen Pulssequenz können TE-Impulse mit Amplituden in drei unterschiedlichen Bereichen erkannt werden (Bild 7.15).

Diese drei unterschiedlichen Amplituden der Impulse treten in einer gleichbleibend wiederholenden Impulsfolge mit nahezu identischen zeitlichen Abständen auf und können physikalisch beschrieben werden. Der Aufbau der zylindrischen Elektrodenanordnung mit dem grundlegenden Bewegungsmuster der springenden Kugel bei Gleichspannung mit negativer Polarität sowie die dabei auftretende TE-Pulssequenz ist schematisch in Bild 7.16 dargestellt.

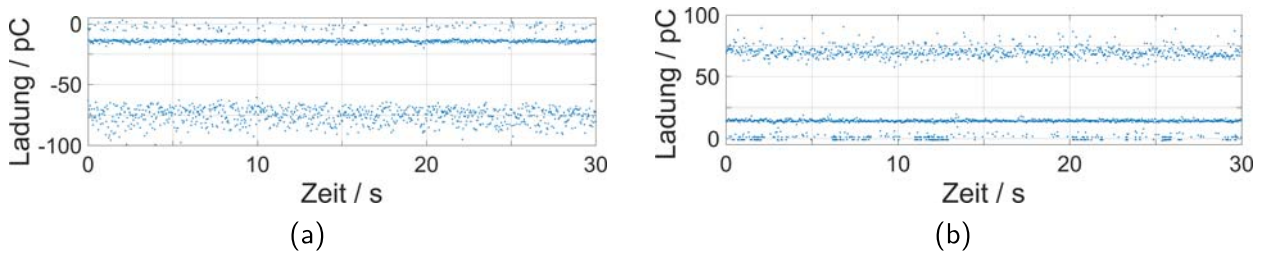


Bild 7.15: Pulssequenz der springenden metallischen Kugel bei Gleichspannung mit negativer (a) und positiver (b) Polarität (K1, $U_{DC} = \pm 35 \text{ kV}$, SF_6 , $p = 0,1 \text{ MPa}$)

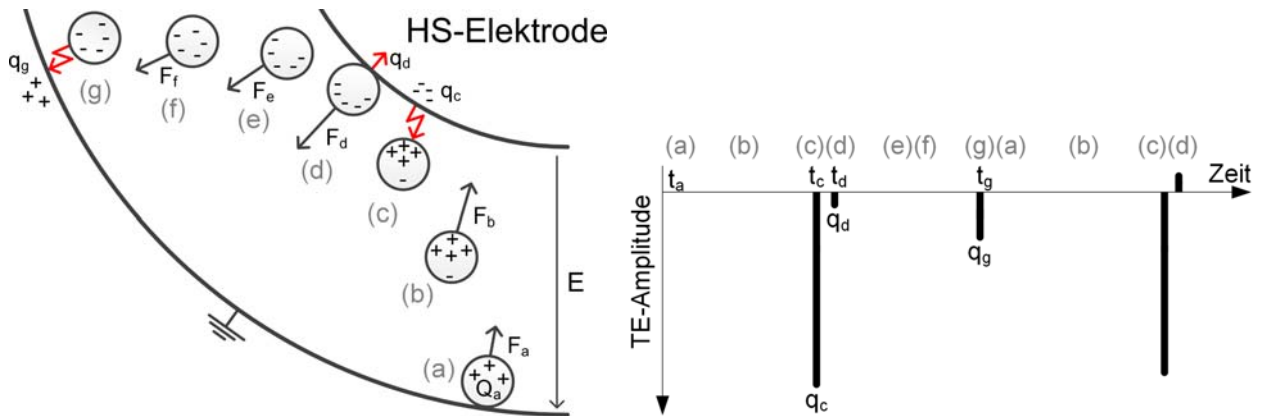


Bild 7.16: Schematischer zeitlicher Ablauf der Bewegung einer springenden Kugel und dabei auftretende TE-Pulssequenz

Zu Beginn der Messung befindet sich das Partikel am tiefsten Punkt direkt unter der Hochspannungselektrode (Bild 7.16(a)). Bei Anlegen einer Spannung U_{DC} zum Zeitpunkt $t_a = 0$ stellt sich zwischen der Hochspannungselektrode mit dem Radius R_i und der Erdelektrode mit dem Radius R_a das elektrische Feld $\vec{E}(r)$ gemäß Gleichung 7.1 ein. Das sich im Bereich $r = R_a$ befindende Partikel mit dem Durchmesser d und Oberfläche A lädt sich auf die Ladung $Q(R_a)$ auf (Gleichung 7.2) [Har+75].

$$\vec{E}(r) = \frac{U_{DC}}{\vec{r} \cdot \ln\left(\frac{R_a}{R_i}\right)} \tag{7.1}$$

$$Q(R_a) = \oint_A \vec{D} \, d\vec{A} = \varepsilon \oint_A \vec{E} \, d\vec{A} = \frac{2}{3} \cdot \pi^3 \cdot \varepsilon \cdot \frac{d^2}{4} \cdot |\vec{E}(R_a)| \tag{7.2}$$

Überschreitet die auf das Partikel mit der Masse m_P und der Ladung Q wirkende Coulomb-Kraft \vec{F}_{coul} (Gleichung 7.3), welche aufgrund der Kraft der Spiegelladung um einen vom Aufenthaltsort abhängigen Korrekturfaktor $k_S(r)$ verringert ist, die Gewichtskraft auf das Partikel \vec{G} (Gleichung 7.4), wird dieses in Richtung Hochspannungselektrode beschleunigt. Dabei wirkt aufgrund der Ladungsverschiebung im Partikel eine zusätzliche Kraft \vec{F}_{grad} in Richtung des Gradienten des elektrischen Feldes (Gleichung 7.5) sowie eine Gegenkraft, hervorgerufen durch die Viskosität \vec{F}_{visk} (Gleichung 7.6), welche von der Reynolds-Zahl Re und Dichte ρ_g des Gases sowie der Partikelgeschwindigkeit v abhängt. Die resultierende, vom Aufenthaltsort r und der Geschwindigkeit v des Partikels abhängige Kraft $\vec{F}(r, v)$ bewirkt die Bewegung des Partikels zwischen den Elektroden.

Zusätzlich ändern sich die Polarität und der Betrag der Ladung des Partikels bei jeder Berührung mit den Elektroden [Coo+77; Sak+99; Wu+17; Sun+18].

$$\vec{F}_{\text{coul}}(r) = k_S(r) \cdot Q \cdot \vec{E}(r) \quad (7.3)$$

$$\vec{G} = m_P \cdot \vec{g} \quad (7.4)$$

$$\vec{F}_{\text{grad}}(r) = 2\pi \cdot \frac{d^3}{8} \cdot \varepsilon \cdot |\nabla E(r)|^2 = 4\pi \cdot \varepsilon \cdot \frac{d^3}{r^3} \cdot \left(\frac{U}{\ln \frac{R_i}{R_a}} \right)^2 \quad (7.5)$$

$$\vec{F}_{\text{visk}}(v) = \left(\frac{24}{Re} + \frac{6}{1 + \sqrt{Re}} + 0,4 \right) \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot \frac{\rho_g \cdot v^2}{2} \quad (7.6)$$

$$\vec{F}(r, v) = \vec{F}_{\text{coul}} + \vec{G} + \vec{F}_{\text{visk}} + \vec{F}_{\text{grad}} \quad (7.7)$$

In der Literatur ist die empirisch ermittelte Abhebefeldstärke E_L für kugelförmige Partikel in Abhängigkeit der Dichte ρ_k und des Durchmessers d zu finden (Gleichung 7.8) [Har+75].

$$E_L = 0,49 \sqrt{\frac{\rho_k \cdot g \cdot d}{\varepsilon_0}} \quad (7.8)$$

Bei der Bewegung des Partikels in Richtung der Hochspannungselektrode nehmen somit das elektrische Feld $\vec{E}(r)$ und auch die Kraft $\vec{F}(r, v)$ auf das Partikel zu (Bild 7.16(b)). Die Ladung des Partikels bleibt jedoch mit $Q(R_a)$ konstant. Darüber hinaus tritt eine zusätzliche Verschiebung der Ladungsträger im Partikel auf. Proportional mit der Ladungsdichte an der zu den Elektroden gewandten Seite der Kugel steigt proportional auch die Oberflächenfeldstärke am Partikel. Wird die kritische Feldstärke überschritten, kommt es zwischen Partikel und Hochspannungselektrode bereits vor der direkten Berührung zu einer Entladung (c). Das Partikel wird dabei auf $Q(R_c)$ umgeladen und nimmt annähernd das Potential der HS-Elektrode an. Diese Entladung bzw. dieser Ladungsaustausch wird vom TE-Messsystem als TE-Impuls (q_c) detektiert und bildet das Band der Impulse mit hohen Amplituden in der Pulssequenz.

Zusätzlich zur Kraftumkehr infolge der gleichartigen Ladung des Partikels und der Elektrode verstärkt sich die auf das Partikel wirkende Kraft F_d , aufgrund des darauffolgenden nahezu elastischen Stoßes des Partikels mit der HS-Elektrode. Bei der direkten Berührung wird die verbleibende Ladungsdifferenz zwischen HS-Elektrode und Partikel ausgeglichen. Vom Messsystem wird dieser Impuls q_d mit unterschiedlicher Polarität wenige Mikrosekunden nach dem Impuls q_c detektiert und bildet das Band der nur geringfügig oberhalb des Grundstörpegels liegenden Impulse in der Pulssequenz. Die Anzahl dieser Impulse im Band mit niedriger Amplitude erhöht sich bei der Steigerung der Spannung und verringert sich bei der Erhöhung des Gasdrucks.

Das Partikel wird nun in Richtung Erdelektrode beschleunigt. Dabei verringert sich die Ladungsverschiebung durch das abnehmende elektrische Feld (e) und die Kraft F_e auf das Partikel nimmt ab (f). Beim Erreichen der Erdelektrode entlädt sich das Partikel mit einer relativ schwachen Entladung, welche der Differenz von an der HS-Elektrode aufgenommenen Ladung $Q(R_C)$ und der durch die Feldstärke im Bereich R_g geforderten Ladung $Q(R_g)$ entspricht (g). Diese Entladungen q_g werden vom Messsystem als Band von TE-Impulsen im Bereich mittlerer Amplitude detektiert. Der zeitliche Abstand zu dem Doppelimpulspaket der Entladungen an der Hochspannungselektrode q_c und q_d ist nahezu konstant und liegt je nach Elektrodenanordnung, Partikel-Eigenschaften, Gasdruck und Spannung im Bereich von einigen Millisekunden. Die Kraft ändert infolge der Umladung des Partikels erneut die Richtung und gemeinsam mit dem elastischen Stoß beginnt der Bewegungsablauf des Partikels zwischen den Elektroden von neuem (a). Nach einem kurzen Einschwingvorgang wird eine nahezu periodische Bewegung des Partikels mit identischen zeitlichen Abständen zwischen den TE-Impulsen und somit ein Zustand sogenannter Pseudoresonanz erreicht.

Das kontinuierliche und periodische Verhalten der springenden Kugel erzeugt für diesen Defekt charakteristische NoDi^* -Diagramme. Die drei Bänder gleichbleibender Amplituden sind durch die Häufungspunkte im NoDi_Q^* - und NoDi_{QT}^* -Diagramm zu erkennen. Die gleichbleibenden periodischen zeitlichen Abstände zwischen den Impulsen rufen Häufungspunkte im Bereich der Pseudoresonanz f_r bzw. der Zeitkonstante $T_r = \frac{1}{f_r}$ im NoDi_T^* - und NoDi_{QT}^* -Diagramm hervor. In Bild 7.17 und im Anhang 9 sind NoDi^* -Diagramme eines springenden Partikels bei unterschiedlichen Spannungshöhen dargestellt.

In Bild 7.17a bei $U_{DC} = -25$ kV ist die Zeitdauer der Pseudoresonanz im Bereich von $T_r = 26$ ms im NoDi_T^* - und NoDi_{QT}^* -Diagramm zu erkennen. Darüber hinaus wird ersichtlich, dass die Zeitdauer, die das Partikel von der Hochspannungselektrode zur Erdelektrode benötigt, mit 24,8 ms (rechte Hälfte im NoDi_{QT}^* -Diagramm) etwas kürzer ist als die Zeitdauer auf dem Weg von der Erdelektrode zur Hochspannungselektrode mit 26,6 ms (linke Hälfte im NoDi_{QT}^* -Diagramm). Diese Zeiten sind auch im NoDi_T^* -Diagramm durch die doppelte Ausprägung des Häufungspunkts zu erkennen. Das NoDi_Q^* -Diagramm zeigt prinzipiell zwei Häufungspunkte, die den periodischen Wechsel eines Impulses mit jeweils hoher und niedriger Amplitude beschreiben. Das Band der Impulse nahe dem Grundrauschen fehlt aufgrund der niedrigen Spannung bei dieser Messung vollständig. Zusätzlich ist der Häufungspunkt im vierten Quadranten des Diagramms schärfer ausgeprägt als der Häufungspunkt im zweiten Quadranten, welcher eine deutlich breitere Streuung aufweist. Dies ist auf die geringere Schwankung der Amplituden der Impulse im niedrigen Band der Pulssequenz zurückzuführen. Die Amplitude der Impulse im Band der Entladungen an der Hochspannungselektrode ist deutlich breiter verteilt.

Die NoDi^* -Diagramme der springenden Kugel bei einer Spannung von $U_{DC} = -40$ kV (Bild 7.17b) haben ein ähnliches Erscheinungsbild, wobei hier keine doppelte Ausprägung des Häufungspunkts im NoDi_T^* -Diagramm auftritt und auch im NoDi_{QT}^* -Diagramm äquivalente Zeitdauern der Partikelbewegung bei 16 ms ersichtlich sind. Dies ist dadurch zu begründen, dass die Geschwindigkeit und somit die Zeitdauer des Partikels zwischen den Elektroden, überwiegend durch die Kraft

des elastischen Stoßes und die Gegenkraft der Viskosität bestimmt wird. Zusätzlich sind an den Grenzen des ersten und zweiten sowie des zweiten und dritten Quadranten des NoDi_Q*-Diagramms weitere Einträge bzw. Verschiebungen der Häufungspunkte zu erkennen. Dies ist auf das oben beschriebene und bei dieser Spannungshöhe häufig auftretende dritte Band an TE-Impulsen, nahe dem Grundrauschen, zurückzuführen.

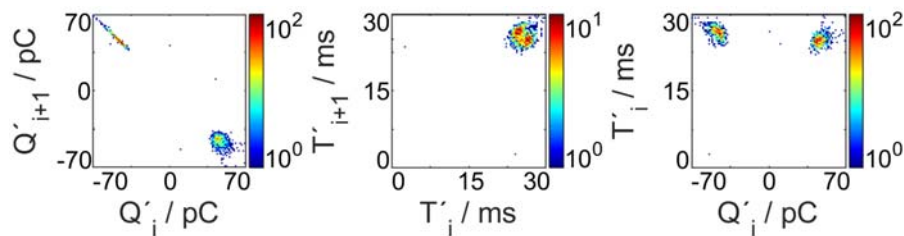
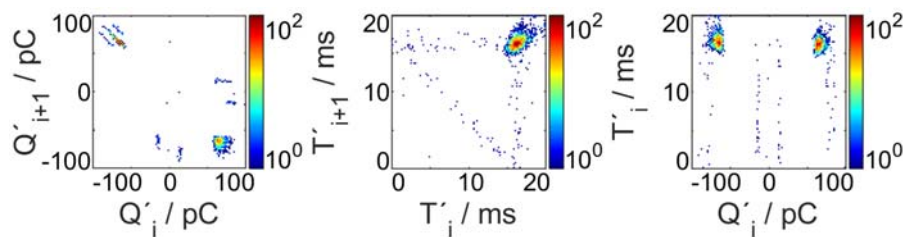
(a) $U_{DC} = -25 \text{ kV}$, $T_r = 26 \text{ ms}$ (b) $U_{DC} = -40 \text{ kV}$, $T_r = 16 \text{ ms}$

Bild 7.17: NoDi*-Diagramme einer springenden metallischen Kugel bei unterschiedlichen Spannungshöhen (Kugel K1, SF₆, $p = 0,5 \text{ MPa}$)

Draht

An den untersuchten Drahtstücken konnten eine springende Bewegung des Partikels zwischen den Elektroden, der Firefly-Effekt sowie ein schneller Wechsel dieser beiden Effekte beobachtet werden.

Besonders bei einem niedrigen Gasdruck von 0,1 MPa und Spannungen mit negativer Polarität vollzogen die Partikel einen stabilen Firefly-Effekt an der negativ geladenen Elektrode. Dabei tritt eine charakteristische Impulsfolge mit auf- und abklingenden Amplituden auf (Bild 7.18).

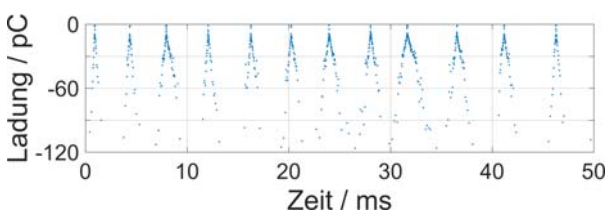
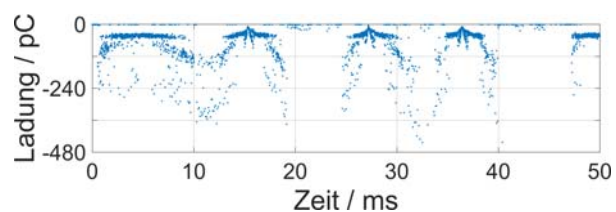
(a) $U_{DC} = -20 \text{ kV}$ (b) $U_{DC} = -40 \text{ kV}$

Bild 7.18: Pulssequenz eines Drahtstücks bei Gleichspannung mit negativer Polarität in Firefly bei unterschiedlichen Spannungshöhen (Draht D1, SF₆, $p = 0,1 \text{ MPa}$)

Im Gegensatz zur vorhergehenden Betrachtung am Beispiel der springenden Kugel behält das Partikel seine Ladung nach der Berührung mit der negativ geladenen Elektrode nicht bis zum

Erreichen der Gegenelektrode, sondern gibt diese auf den Weg dorthin ab. Diese Effekte können anhand der in Bild 7.19 dargestellten schematischen Bewegungsabfolge und der dabei auftretenden Pulssequenz beschrieben werden.

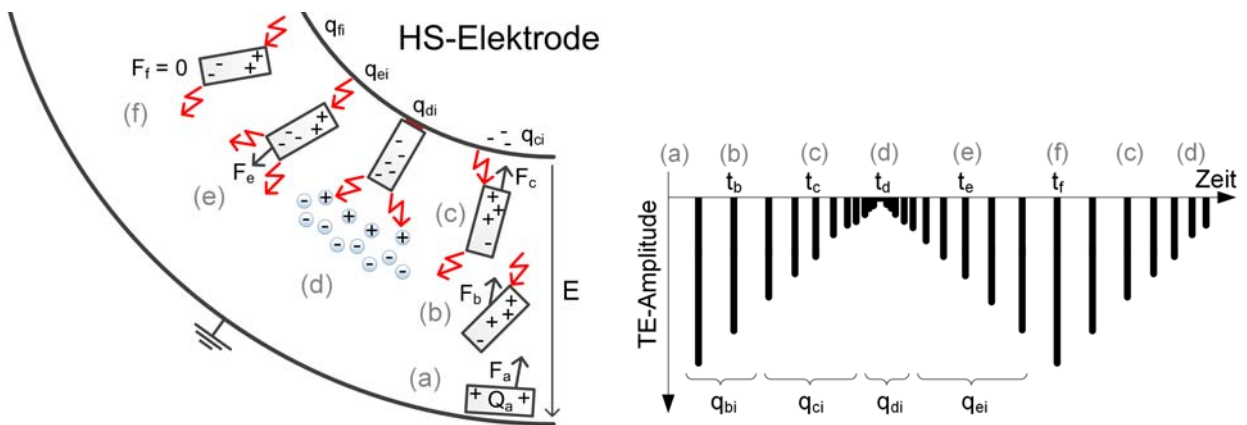


Bild 7.19: Schematischer zeitlicher Ablauf der Bewegung eines Drahtstücks in Firefly und dabei auftretende TE-Pulssequenz

Ab der Abhebefeldstärke richtet sich das Partikel aufgrund der Coulomb-Kraft auf (Bild 7.19(a)) und bewegt sich wie zuvor anhand der metallischen Kugel beschrieben infolge der wirkenden Kräfte in Richtung Hochspannungselektrode (b). Durch die Ladungsverschiebung und die scharfen Kanten des Partikels wird die kritische Feldstärke lokal überschritten und das Partikel gibt seine gespeicherte Ladung in Form von Koronaentladungen ab bzw. nimmt negative Ladung auf (b). Die dadurch entstehenden TE-Impulse können vom Messsystem als Impulsfolge q_{bi} mit großen zeitlichen Abständen und Amplituden detektiert werden. Je näher sich das Partikel an der Hochspannungselektrode befindet, desto größer wird das elektrische Feld im Bereich der Kanten am Partikel. Folglich steigt die Anzahl der auftretenden TE-Impulse in der Pulssequenz q_{ci} (c) bei gleichzeitiger Abnahme der Amplituden. Bei direkter Berührung des Partikels mit der Hochspannungselektrode (d) wirkt dieses wie eine Spitze auf Hochspannung. Es kommt neben dem Kontaktrauschen zwischen Partikel und Elektrode auf einer hohen Anzahl an TE-Impulsen q_{di} an der von der Elektrode abgewandten Seite des Partikels. Dadurch bildet sich eine Raumladungszone aus positiven und negativen Ionen vor der Spitze des Partikels. Positive Ionen sammeln sich im Bereich direkt vor dem Partikel und bewirken eine Erhöhung des elektrischen Feldes an der Spitze. Dadurch werden weitere, sehr schnell aufeinanderfolgende Entladungen begünstigt. Durch die entstehenden freien Elektronen rekombinieren die positiven Ionen und in weiterer Folge entstehen zusätzliche negative Ionen. Diese negativen Ionen driften in Richtung Erdelektrode und wirken dem elektrischen Feld im Bereich des Partikels entgegen. Die auf das Partikel wirkende Kraft sinkt und es bildet sich ein Gleichgewicht aus erzeugten und rekombinierenden bzw. abdriftenden, positiven und negativen Ionen. Neben kreisenden und ruckartigen Bewegungen des Partikels an der Hochspannungselektrode kommt es dadurch zu einem kurzzeitigen Stillstand des Partikels. Wird dieses Gleichgewicht gestört, so wird das Partikel wieder von der Elektrode abgestoßen (e). Die zeitlichen Abstände der Entladungen q_{ei} werden erneut größer mit gleichzeitigem Anstieg der Amplituden. Das Partikel verliert dabei wiederholt an Ladung. Die wirkende Kraft nimmt

ab und ändert schlussendlich die Richtung (f), womit die periodische Bewegung in Richtung Hochspannungselektrode von neuem beginnt (c) [Coo+77; Lag+81; Asa+97; You+17]. Abhängig von Partikel-Geometrie, Gasdruck und Spannungshöhe wiederholt sich diese periodische Bewegung im Bereich von einigen Millisekunden. Die Gesamtwiederholrate n der TE-Impulse erreicht dabei Werte von bis zu 10^6 Impulsen pro Sekunde.

Die hohe Anzahl an Impulsen bildet sehr kräftige NoDi*-Diagramme (Bild 7.20 und Anhang 9). Die charakteristischen Dreiecke und feinen drei Ästen erinnern an eine Überlagerung der NoDi*-Diagramme der Spitze auf Hochspannung und des freien Potentials.

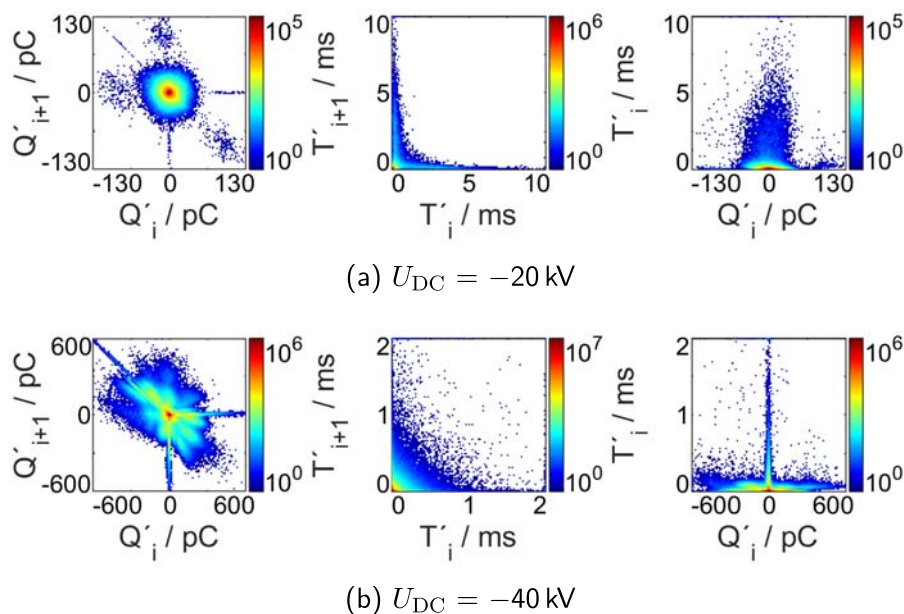


Bild 7.20: NoDi*-Diagramme eines Drahtstücks in Firefly bei unterschiedlichen Spannungshöhen Draht (D1, SF₆, $p = 0,1 \text{ MPa}$)

Bei einer Spannung von -20 kV (Bild 7.20a) bildet sich im NoDi_Q*-Diagramm aufgrund der überwiegenden Anzahl an Impulsen mit kleiner Amplitudenänderung, ein ausgeprägter Häufungspunkt im Zentrum des Diagramms. Auffällig ist neben den in Kapitel 7.5.1.1 beschriebenen Impulsfolgen auch die symmetrische Ausprägung um das Zentrum infolge der monoton steigenden und monoton fallenden Impulsfolgen (Bild 7.18a). Die in Kapitel 7.5.1.2 beschriebenen charakteristischen feinen Strukturen sind hier verhältnismäßig gering und zeigen ein gespiegeltes, breit verteiltes Muster, welches die Abweichungen der Amplitudenänderung von kleinen zu mehreren großen Impulsen beschreibt. Im NoDi_T*- und NoDi_{QT}*-Diagramm sind die kurzen zeitlichen Abstände der Impulse mit kleinen Amplitudenänderungen sowie die monoton steigenden und fallenden Impulsfolgen ersichtlich.

Die Anzahl an detektierten TE-Impulsen erhöht sich bei einer Spannung von -40 kV (Bild 7.20b) um den Faktor 10. Unterschiedlich stark ausgeprägte charakteristische Dreiecke überlagern sich dem Muster des freien Potentials. Die Asymmetrie im NoDi_{QT}*-Diagramm spiegelt die größeren zeitlichen Abstände der monoton fallenden Impulsfolgen (Partikel bewegt sich in Richtung Hoch-

spannungselektrode) im Vergleich zu den monoton steigenden Impulsfolgen (Partikel entfernt sich von der Hochspannungselektrode).

Bei einem Gasdruck von 0,5 MPa konnten die untersuchten Partikel die gespeicherte Ladung nicht durch Koronaentladungen auf dem Weg zwischen den Elektroden abgeben. Dadurch wird der Firefly-Effekt verhindert und das Partikel zeigt in allen untersuchten Fällen eine springende Bewegung zwischen den Elektroden. Die Abfolge der Bewegung verhält sich wie im vorherigen Kapitel (Kugel) beschrieben. Infolge der asymmetrischen Partikelgeometrie und dem unterschiedlichen Aufttrittswinkel bei jedem einzelnen Stoß des Partikels mit den Elektroden ist diese Bewegung im Vergleich zur Kugel unregelmäßiger. Dadurch heben sich die drei beschriebenen Bänder in der Pulssequenz nicht stark voneinander ab. Besonders nach dem elastischen Stoß mit der geerdeten Elektrode schwanken die differenzierten Ladungswerte Δq und zeitlichen Abstände Δt . Dies ist bei Spannung mit positiver Polarität in der Asymmetrie des $\text{NoDi}_{\text{QT}}^*$ -Diagramms durch die größere Streuung des zeitlichen Abstands bei positiver Ladungsdifferenz zu erkennen (Bild 7.21a). Bei Spannung negativer Polarität ist dies auf der linken Seite des Diagramms bei negativer Ladungsdifferenz zu erkennen (Bild 7.21b). Auch die Häufungspunkte im NoDi_{Q}^* - und NoDi_{T}^* -Diagramm sind durch die stärkere Streuung der Amplitude und im zeitlichen Abstand weniger ausgeprägt als bei der springenden Kugel.

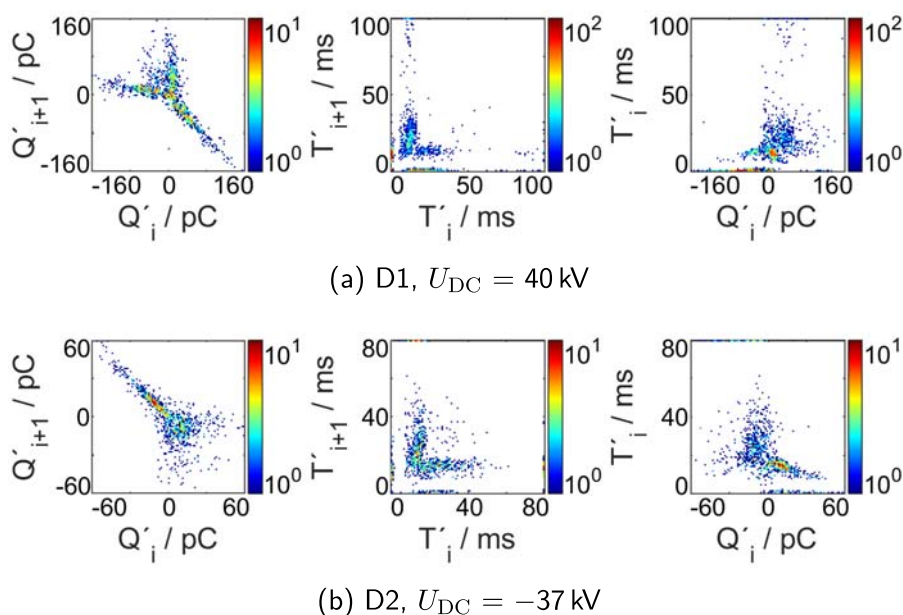


Bild 7.21: NoDi^* -Diagramme der springenden Drahtstücke bei unterschiedlicher Spannung (SF_6 , $p = 0,5 \text{ MPa}$)

Span

Das Verhalten der untersuchten Späne ist mit denen der Drahtstücke vergleichbar. Die Bewegung der Partikel ist, im Vergleich zur Kugel, aufgrund der starken richtungsabhängigen geometrischen Eigenschaften chaotischer. Daraus folgt eine größere Streuung der Amplituden und zeitlichen Abstände zwischen den TE-Impulsen. Bei Spannung mit negativer Polarität und einem Gasdruck

von 0,1 MPa stellt sich ein stabiler Firefly-Effekt an der Hochspannungselektrode ein. Die zeitlichen Abstände der auf- und abklingenden Amplitudenfolgen sind jedoch unregelmäßig (Bild 7.22a). Bei hohen Spannungswerten mit positiver Polarität und einem Gasdruck von 0,1 MPa zeigt sich ein häufiger Wechsel zwischen kurzzeitigem Firefly-Effekt an der Erdelektrode und einer springenden Bewegung des Partikels zwischen den Elektroden (Bild 7.22b). Der Bereich des Firefly-Effekts ist in der Pulssequenz durch die hohe Anzahl der Impulse in einer kurzen Zeitdauer sowie die auf- und abklingenden Amplituden der Impulse zu erkennen. Bei einem Gasdruck höher als 0,3 MPa konnte sowohl bei Spannung mit positiver als auch negativer Polarität ausschließlich das Springen der Partikel zwischen den Elektroden beobachtet werden.

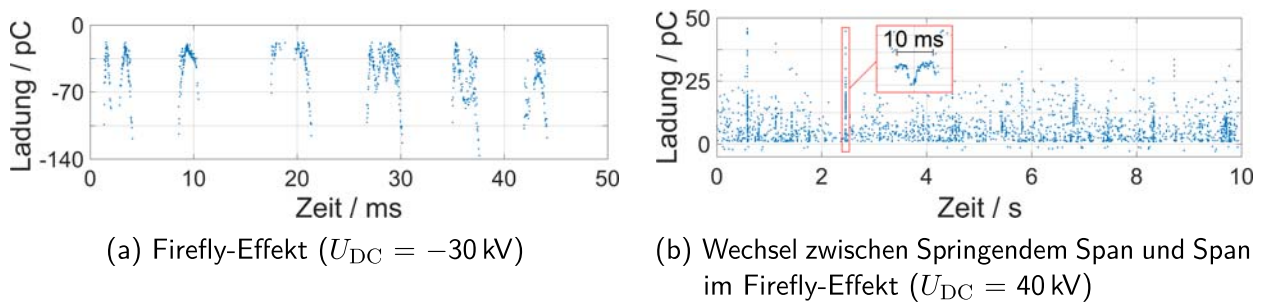


Bild 7.22: Pulssequenz eines Spans bei Spannung mit negativer (a) und positiver (b) Polarität (S1, SF₆, $p = 0,1$ MPa)

In den NoDi*-Diagrammen können die beiden Effekte trotz der starken Streuung der zeitlichen Abstände und Amplituden eindeutig charakterisiert werden (Bild 7.23). Bei Spannung mit positiver Polarität und einem Gasdruck von 0,5 MPa kann das Muster, wie zuvor für den Fall „Draht“ beschrieben, erkannt werden (Bild 7.23a). Auch die NoDi*-Diagramme der Späne in Firefly sind denen der Drahtstücke gleichzusetzen (Bild 7.23b).

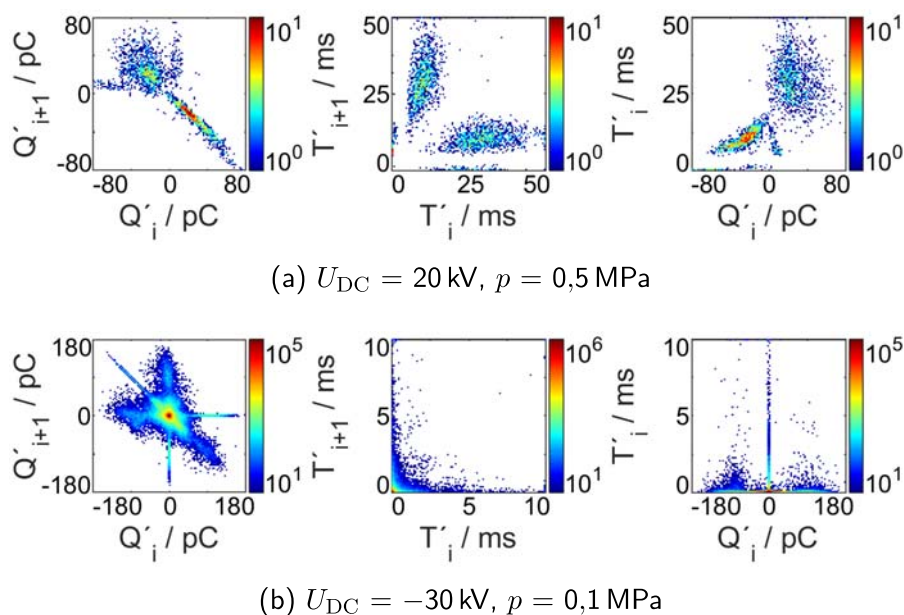


Bild 7.23: NoDi*-Diagramme des springenden Span (a) und Span in Firefly (b) (Span S1, SF₆)

7.5.1.4 Innere Defekte

Bei der Bestimmung der Einsetzspannung von inneren Defekten müssen die langen Messzeiten infolge der großen elektrischen Zeitkonstanten fester Isolierstoffe berücksichtigt werden. Durch die geringe Anzahl von TE-Impulsen bei inneren Defekten und konstanter Gleichspannung im Bereich von wenigen Impulsen pro Minute bis Stunde ist die Unterdrückung von Störimpulsen von hoher Bedeutung. Störimpulse vom Messaufbau, die aufgrund von Aufladungserscheinungen beteiligter Bauteile auftreten oder Störimpulse aus der Umgebung haben einen starken Einfluss auf das Messergebnis.

Zur Bestimmung der Einsetzspannung eines Hohlraums in Gießharz ($d = 2 \text{ mm}$, $s = 5 \text{ mm}$) wurde folgender Zyklus gewählt. Beginnend bei Gleichspannung mit positiver Polarität wurde die Spannung von 0 – 50 kV in Stufen von 2,5 kV erhöht. Diese Messprozedur wurde anschließend bei Gleichspannung mit negativer Polarität wiederholt. Die Zeitdauer t_m der Spannungsstufen betrug im ersten Durchgang 1 min und im zweiten Durchgang 5 min. Nach jeder einzelnen abgeschlossenen Messprozedur wurde der Prüfling für 1 h geerdet, um dem Einfluss der Vorbelastung aufgrund von aufgebauten Raumladungen entgegenzuwirken. Dieser Zyklus zur Bestimmung der positiven und negativen Einsetzspannung der beiden Stufendauern wurde drei mal wiederholt. In Bild 7.24a sind der Mittelwert und die Standardabweichung der Einsetzspannung dieser Messungen für Gleichspannung mit positiver und negativer Polarität sowie für die beiden Stufendauern zusammengefasst.

Zu erkennen ist die sehr hohe Streuung der Einsetzspannung der aufeinanderfolgenden Messungen. Der Einfluss der Stufendauern ist durch die um ca. 18 % tiefer liegende Einsetzspannung bei 5 min Stufendauer zu erkennen. Für eine korrekte Ermittlung der Einsetzspannung müsste die Stufendauer länger als ein Vielfaches der elektrischen Zeitkonstante des Prüflings gewählt werden. Dies ist bei der praktischen Umsetzung von Messungen an Hochspannungskomponenten bei einer ausreichenden Auflösung der Spannung nicht möglich. Es ist darauf hinzuweisen, dass die Einsetzspannung des Prüfaufbaus in der selben Größenordnung liegt wie die Einsetzspannung der Isolatoren und daher Störimpulse, die durch den Aufbau hervorgerufen werden, bei dieser Messung das Ergebnis beeinflussen. Durch die Überlagerung unterschiedlicher TE-Quellen ist daher eine Auswertung mit Hilfe der NoDi*-Diagramme nicht aussagekräftig. Auch die Reproduzierbarkeit in Bezug auf die Amplitude sowie die Anzahl der Impulse ist nicht gegeben. Diese weichen trotz gleichbleibender Umgebungsbedingungen und der vollständigen Entladung des Isolators zwischen den drei Zyklen voneinander ab. Zur Veranschaulichung wurden die Pulsesequenzen der drei Zyklen bei Gleichspannung mit positiver Polarität und einer Stufendauer von 5 min in Bild 7.24b gegenübergestellt. Auch im Zuge eines Round-Robin-Tests konnten in unterschiedlichen Laboren bei Messungen an Gießharzisolatoren Abweichungen von bis zu 80 % bei der Einsetzspannung, 210 % bei der mittleren Amplitude und 150 % bei der Anzahl der detektierten Impulse festgestellt werden [Har+17]. Ein Grund dafür ist im Besonderen die große Anzahl an beeinflussenden Größen

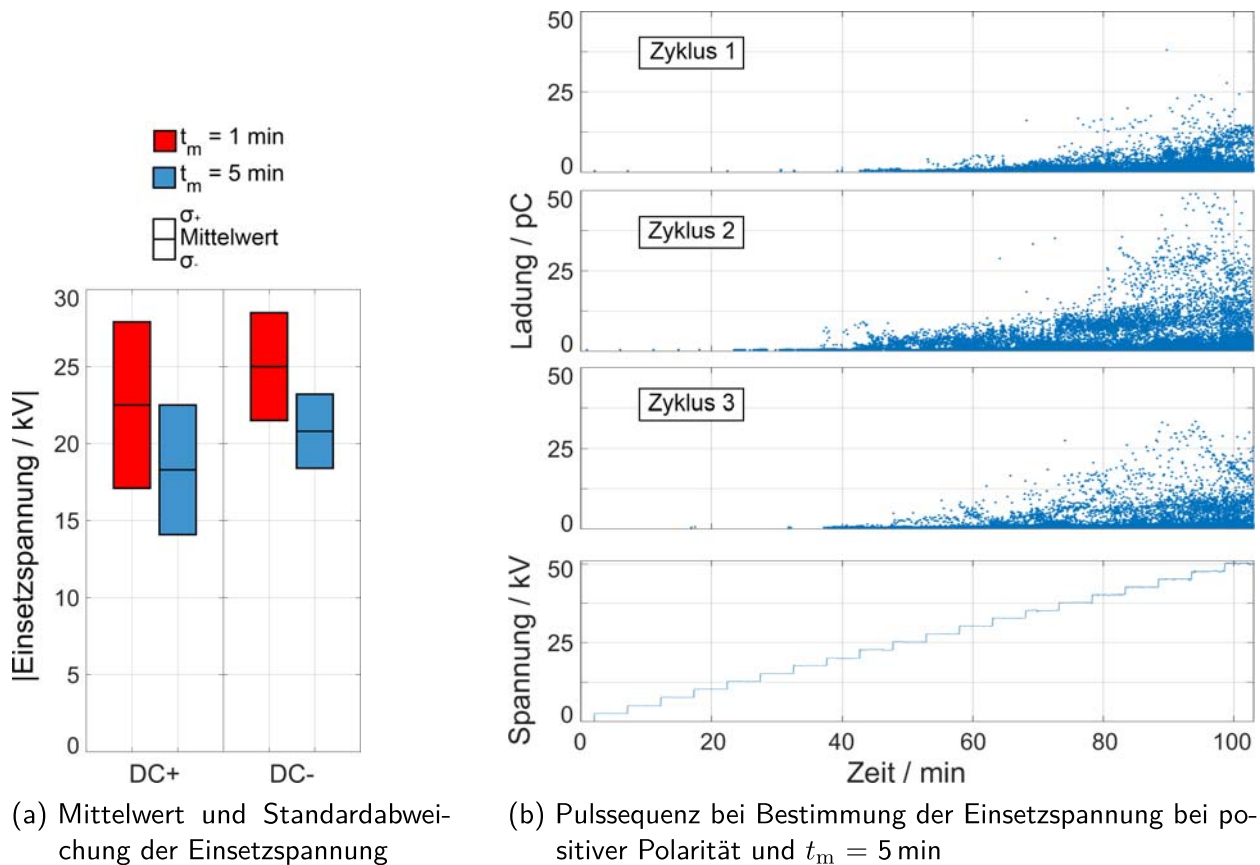


Bild 7.24: Einsetzspannung an einem Hohlraum ($d = 2$ mm, $s = 5$ mm) in Gießharz bei unterschiedlichen Spannungsstufendauern t_m und Polaritäten (a) sowie Vergleich der Pulssequenz der drei Messzyklen (b)

bei der Teilentladungsmessung und Feldverteilung in festen Isolierstoffen bei Gleichspannung (Kapitel 7.5.2).

Im Bereich der Einsetzspannung erzeugen innere Defekte bei konstanter Gleichspannung nur eine geringe Anzahl von Impulsen pro Minute bis Stunde. Durch Spannungsänderungen oder einen Polaritätswechsel kann eine TE-Aktivität dieser Defekte provoziert werden. Daher können TE-Impulse während des Polaritätswechsels oder unmittelbar danach sehr hilfreich bei der Charakterisierung der Defekte sein. Trotz intensiver Bemühungen war es mit dem verwendeten Aufbau und Messsystem nicht möglich, die bei der Spannungsänderung auftretenden Störimpulse von den TE-Impulsen des Defekts zu unterscheiden.

Weitere Messungen haben gezeigt, dass die TE-Aktivität von inneren Defekten sehr stark von der Vorbelastung des Defekts abhängt. Bei Untersuchungen mit verschiedenen Messprozeduren zeigten Gießharzisolatoren bei wiederholenden Spannungsstufen ein stark unterschiedliches Verhalten bei Variation der Vorbelastungen. Als Beispiel ist in Bild 7.25 die Pulssequenz einer Messung mit zwei wiederholten Spannungsstufen und Polaritätswechsel dargestellt. Bei der ersten 60-minütigen Spannungsstufe mit 30 kV und positiver Polarität ist die Anzahl mit 12 Impulsen gering. Auch in der darauffolgenden Stufe bei einer niedrigeren Spannung von 20 kV konnten 6 Impulse detektiert

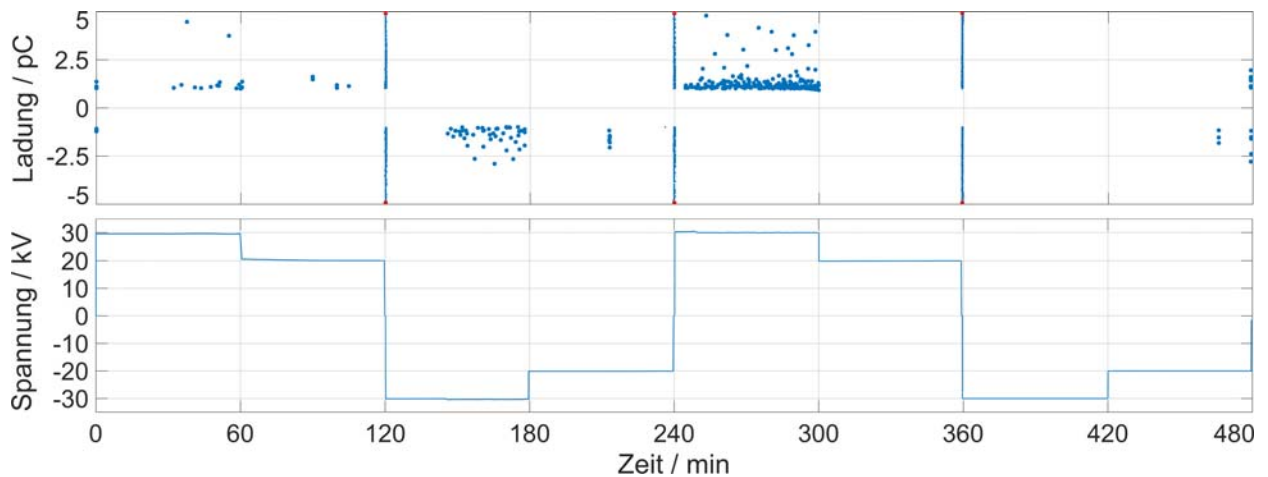


Bild 7.25: Pulssequenz und Spannungsrampe der Untersuchungen an einem Gießharzisolator mit innerem Defekt (N13)

werden. Nachdem der selbe Zyklus bei einer Spannung mit negativer Polarität durchgeführt wurde, konnten bei der wiederholten Spannungsstufe mit 30 kV und positiver Polarität insgesamt 120 Impulse detektiert werden. In der nächsten Stufe mit einer Spannung von 20 kV wurde kein TE-Impuls festgestellt. Bei den Spannungsstufen mit negativer Polarität zeigten sich bei 30 kV im ersten Zyklus hingegen 46 Impulse und im zweiten Zyklus konnte kein TE-Impuls detektiert werden. Auffällig ist, dass die Entladungen im ersten Zyklus erst nach ca. 30 Minuten der Stufendauer beginnen.

Aufgrund der geringen Anzahl an TE-Impulsen ist eine Auswertung der Pulssequenzen mithilfe der NoDi*-Diagramme bei diesem Defekt nicht zielführend.

7.5.1.5 Partikel auf Isolator

Die Untersuchungen der beiden Partikel an unterschiedlichen Positionen auf dem Isolator zeigten bis zum Durchschlag, bei konstanter Gleichspannung oder Spannungsstufen gleicher Polarität, keine messbaren TE-Impulse, die von den Störimpulsen unterschieden werden konnten. Nach Anlegen einer Spannung nimmt das Partikel durch den Kriechstrom über den Isolator oder über einzelne TE-Impulse, welche von den Störimpulsen des Spannungsreglers nicht zu unterscheiden sind, ein definiertes Potential an. Das elektrische Feld an den Spitzen des Partikels kann, ähnlich wie in Kapitel 7.5.1.2 beschrieben, zu gering sein, um weitere Entladungen zu erzeugen. Treten an den Spitzen doch Teilentladungen auf, entsteht eine stabile Raumladungszone an der Oberfläche des Isolators. Dadurch reduziert sich das elektrische Feld im Bereich des Partikels und eine Erkennung des Defekts ist durch die TE-Messung nicht möglich. Die Durchschlagsfestigkeit des Isolators wird durch das Partikel jedoch besonders bei transienter Spannungen, wie z. B. Überlagerung der Gleichspannung mit Blitzstoßspannung, deutlich herabgesetzt [Her16].

In weiteren Versuchen wurde das TE-Verhalten des Partikels über eine längere Zeitdauer untersucht. Die Messprozedur besteht dabei aus vier gleich langen Spannungsstufen mit einer Zeitdauer von jeweils 60 min. Zwischen den Spannungsstufen fand jeweils ein Polaritätswechsel statt. Die Spannungshöhe wurde nach Voruntersuchungen auf ± 45 kV festgelegt. Unterhalb dieses Spannungswerts konnten keine TE-Impulse vom Partikel am Isolator detektiert werden. Bei Spannungswerten größer als 45 kV kam es schon bei kurzzeitiger Spannungsbeanspruchung zu einer hohen Anzahl an Störimpulsen vom Aufbau (Bild 7.26). In Bild 7.27 ist ein Beispiel der gemessenen Pulssequenzen ohne und mit Partikel auf Isolator sowie der dazugehörige Spannungsverlauf dargestellt. Das Partikel befand sich dabei in der Mitte des Isolators in SF₆ bei einem Gasdruck von 0,1 MPa.

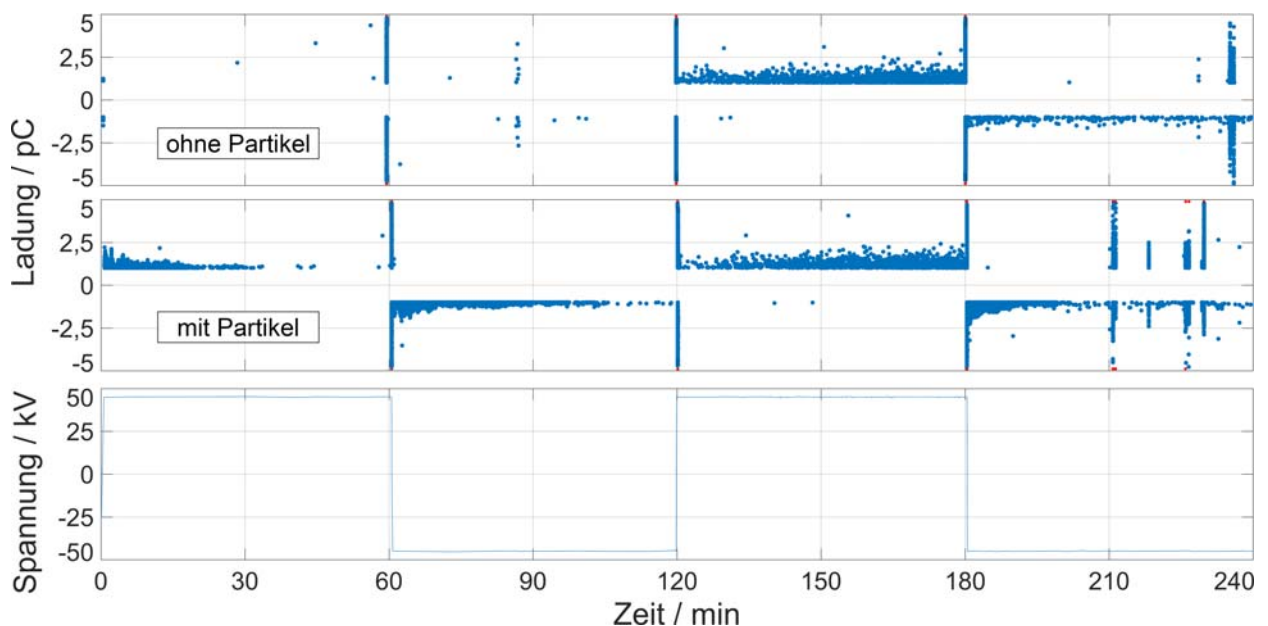


Bild 7.27: Pulssequenz der Messung ohne und mit Partikel auf Isolator (Span, $l = 10$ mm, Position Mitte, SF₆, $p = 0,1$ MPa) sowie Spannungsverlauf des Langzeittests

Besonders am Beginn der Spannungsstufe zeigen die Isolatoren mit Partikel im Vergleich zum Isolator ohne Partikel eine erhöhte TE-Aktivität. Die Amplitude und Anzahl der TE-Impulse klingen nach dem Polaritätswechsels ab und gehen gegen Ende der Spannungsstufe gegen Null. Im Bereich des Polaritätswechsel konnten keine signifikanten Unterschiede in der Pulssequenz der beiden Messungen erkannt werden. Besonders in der dritten Spannungsstufe bei Prüfspannung mit positiver Polarität ist in beiden Pulssequenzen ein erhöhter, annähernd identischer Anteil an Störimpulsen aus dem Aufbau zu erkennen. In der vierten Spannungsstufe treten bei beiden Messungen TE-Ereignisse mit sehr schnell aufeinanderfolgenden Impulsfolgen, mit bis zu 100 Impulsen und mit Amplituden von bis zu 100 pC, auf.

7.5.2 Einflussfaktoren

7.5.2.1 Elektrische Zeitkonstante des Isoliermediums bzw. des Defekts

Um ein Isoliersystem bei reiner Gleichspannungsbeanspruchung zu untersuchen, muss der Übergang vom kapazitiven zum resistiven Feld abgewartet werden (Kapitel 3.3.1). Vor allem bei festen Isolierstoffen kann die elektrische Zeitkonstante im Bereich von einigen Stunden oder Wochen liegen. Erst nach dieser Zeitdauer stellen sich im Isoliersystem die in der Realität auftretenden Verteilungen des elektrischen Feldes ein. Auch die Vorbelastung des Isoliermediums durch vorhergehende Prüfungen und den Betrieb kann einen Einfluss auf das TE-Verhalten der Defekte ausüben (Kapitel 7.5.1.4). Hinzu kommt der Einfluss der Temperaturverteilung und somit die vom Betriebszustand der Komponente abhängige Feldverteilung in der Isolierung. Die Zusammenhänge aus allen beeinflussenden Größen sind sehr komplex und die Prüfbedingungen sowie die Wahl der Messprozeduren müssen auf die jeweiligen Betriebsmittel abgestimmt werden, um die kritischsten im Betrieb auftretenden Beanspruchungen abzudecken. Auch bei der Bestimmung der Einsetzspannung müssen die Zeitkonstante und die reale Feldverteilung im zu prüfenden Objekt beachtet werden, da ansonsten Falschaussagen getroffen und Defekte bei zu kurzer Prüfdauer nicht erkannt werden können.

7.5.2.2 Bandbreite des Messsystems

Um einen Integrationsfehler bei der Bestimmung der scheinbaren Ladung von TE-Impulsen zu vermeiden, wird bei der konventionellen TE-Messung gemäß der IEC 60270 [IEC60270] eine Begrenzung der Bandbreite und der maximalen Frequenz empfohlen (Kapitel 4.2). Eine Doppelerkennung von TE-Impulsen durch das bandbreitenbegrenzte, überschwingende Signal ist zu vermeiden, indem nach der Detektion eines Impulses eine ausreichend lange Totzeit bis zur Detektion eines darauffolgenden Impulses abgewartet wird. Der minimale Wert dieser Totzeit $t_{T,\min}$ liegt im Bereich des Kehrwerts der Messbandbreite ($1/\Delta f$) und wird von modernen Messsystemen automatisch vorgegeben (Kapitel 7.5.2.4). Impulsfolgen können dadurch jedoch nur bis zur Impulsauflösezeit aufgelöst werden (Kapitel 4.2). Erreichen die Impulswiederholraten bzw. der zeitliche Abstand zwischen zwei Impulsen den Bereich der Impulsauflösezeit, dann sind die charakteristischen Kenngrößen von der Messbandbreite abhängig. Besonders bei schnell aufeinanderfolgenden Impulsfolgen, wie z. B. bei Koronaentladungen in SF₆ oder dem Firefly-Effekt bei freien metallischen Partikeln, überschreitet die Wiederholrate die mögliche Impulsauflösezeit.

Einfluss der Bandbreite auf Impulsfolgen einer Spitze auf Hochspannung in SF₆

Anhand der Ergebnisse von Messungen einer Spitze auf Hochspannung in SF₆ kann der Einfluss der Bandbreite gezeigt werden. In Bild 7.28 sind der Betrag des Mittelwerts der Amplitude $|\bar{q}|$ sowie des zeitlichen Abstands $\overline{\Delta t}$ der TE-Impulse und deren Standardabweichung $\sigma_{|q|}$ bzw. $\sigma_{\Delta t}$ über drei aufeinanderfolgende Messungen in Abhängigkeit der Spannung U_{DC} und des Messfrequenzbereichs

(f_m und Δf), dargestellt. Die Spannung wurde bei diesen Messungen mit beiden Polaritäten von 0 bis 30 kV in Stufen von 2,5 kV erhöht. Bei der Messbandbreite von $\Delta f = 9$ kHz beträgt die Triggerschwelle 1 pC. Bei allen restlichen Bandbreiten konnte die Triggerschwelle auf 0,2 pC gesetzt werden. Durch den Unterschied der Triggerschwelle ist die abweichende Einsetzspannung von $\pm 7,5$ kV bei einer Messbandbreite von 9 kHz zu ca. ± 5 kV bei 300 kHz und 3 MHz zu begründen (Bild 7.28a). Auch bei einer Bandbreite von 800 kHz konnten erst ab $\pm 7,5$ kV TE-Impulse über der Triggerschwelle detektiert werden. Die mittlere Amplitude $|\bar{q}|$ der aufgenommenen Pulssequenzen steigt mit dem Wert der Spannung bei negativer Polarität. Bei Spannungen mit positiver Polarität sinkt die mittlere Amplitude ab 17,5 kV und beginnt erst ab 22,5 kV erneut zu steigen. Bei einer Bandbreite von 9 kHz werden die höchsten mittleren Amplituden gemessen, wobei ein direkter Vergleich aufgrund der unterschiedlichen Triggerschwelle nicht möglich ist (Kapitel 7.5.2.3). Die mittleren Amplituden bei den Messungen mit den Bandbreiten 300 kHz, 800 kHz und 3 MHz, sowie identischen Triggerschwellen, weichen bei beiden Polaritäten der Spannung um bis zu 40 % voneinander ab. Grund dafür sind die schnell aufeinanderfolgenden Impulse und daraus resultierende destruktive und konstruktive Interferenzen der durch den Filter laufenden Impulse. Dieser Effekt wird im Unterpunkt zur Abhängigkeit der Amplitude vom zeitlichen Abstand der TE-Impulse auf Seite 102 genauer beschrieben. Ein Erreichen der Impulsauflösezeit des Messsystems ist in Bild 7.28b durch die Begrenzung der Kurven auf unterschiedliche Minima bei höheren Spannungswerten zu erkennen.

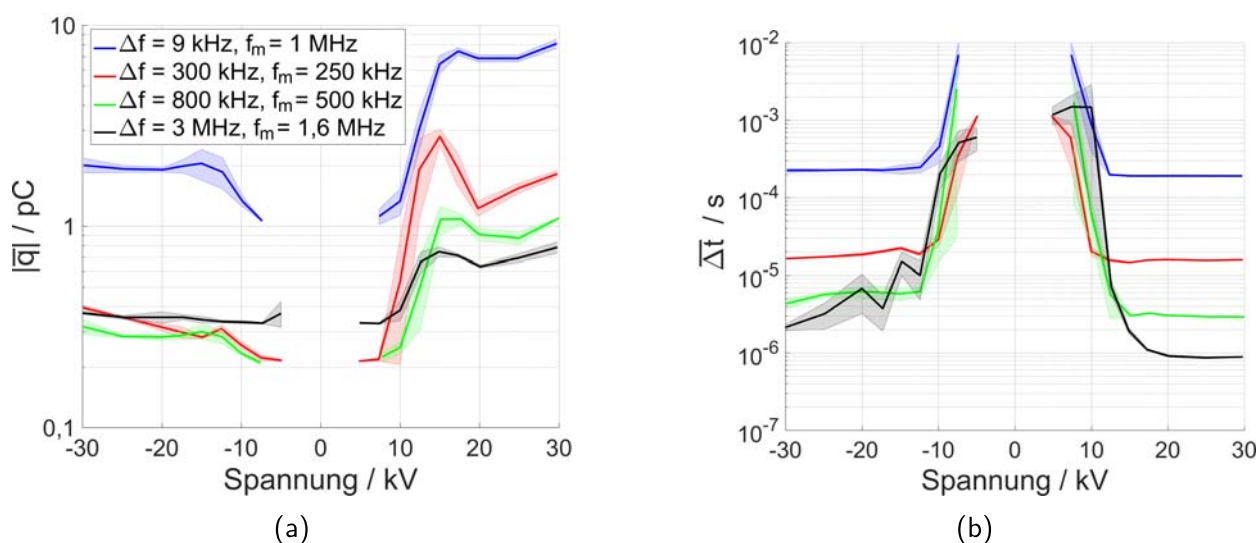


Bild 7.28: Betrag des Mittelwerts der Amplitude $|\bar{q}|$ (a) und des zeitlichen Abstands $\overline{\Delta t}$ (b) der TE-Impulse sowie deren Standardabweichung $\sigma_{|\bar{q}|}$ bzw. $\sigma_{\overline{\Delta t}}$ in Abhängigkeit der Spannung U_{DC} und des Messfrequenzbereichs (Δf und f_c) einer Spitze auf Hochspannung ($s = 15$ mm, $r = 50$ μ m, SF_6 , $p = 0,1$ MPa)

Auch in den NoDi*-Diagrammen ist der Einfluss der gewählten Bandbreiten ersichtlich. In Bild 7.29 und 7.30 sind die NoDi*-Diagramme des jeweils zweiten Durchgangs der Messungen bei ± 15 kV dargestellt. Aufgrund der fehlenden Polaritätserkennung der Impulse bei der schmalbandigen Messung wurde zur Erstellung der NoDi*-Diagramme der Betrag der Pulssequenzen herangezogen. Die Auflösungsgenauigkeit der jeweiligen Filter mit unterschiedlichen Bandbreiten wird in der Anzahl

der detektierten Impulse bzw. in der Stapelhöhe der NoDi*-Diagramme und den voneinander abweichenden Werten des zeitlichen Abstands im NoDi_T*- und NoDi_{QT}*-Diagramm ersichtlich. Das Erreichen des von der Impulsauflösezeit abhängigen minimalen zeitlichen Abstandes der Impulse ist im NoDi_T*- und NoDi_{QT}*-Diagramm als Begrenzung zum Nullpunkt zu erkennen. In den NoDi_{QT}*-Diagrammen ist bei Spannung mit positiver Polarität die größere Streuung der zeitlichen Abstände bei monoton steigenden Impulsfolgen ersichtlich. Diese ist bei der breitbandigen Messung mit 3 MHz am deutlichsten ausgeprägt. In den NoDi_Q*-Diagrammen der Messungen mit einer Bandbreite von 800 kHz und 3 MHz bilden sich die charakteristischen Dreiecke. Infolge der Überlagerung aufeinanderfolgender Impulse werden bei Messungen mit schmaler Bandbreite mehrere aufeinanderfolgende Impulse mit hoher Amplitude detektiert. Dadurch fallen die NoDi_Q*-Diagramme deutlich symmetrischer aus. Bei Spannung mit negativer Polarität sind sich die NoDi*-Diagramme wie auch die detektierten mittleren Amplituden und zeitlichen Abstände der TE-Impulse deutlich ähnlicher.

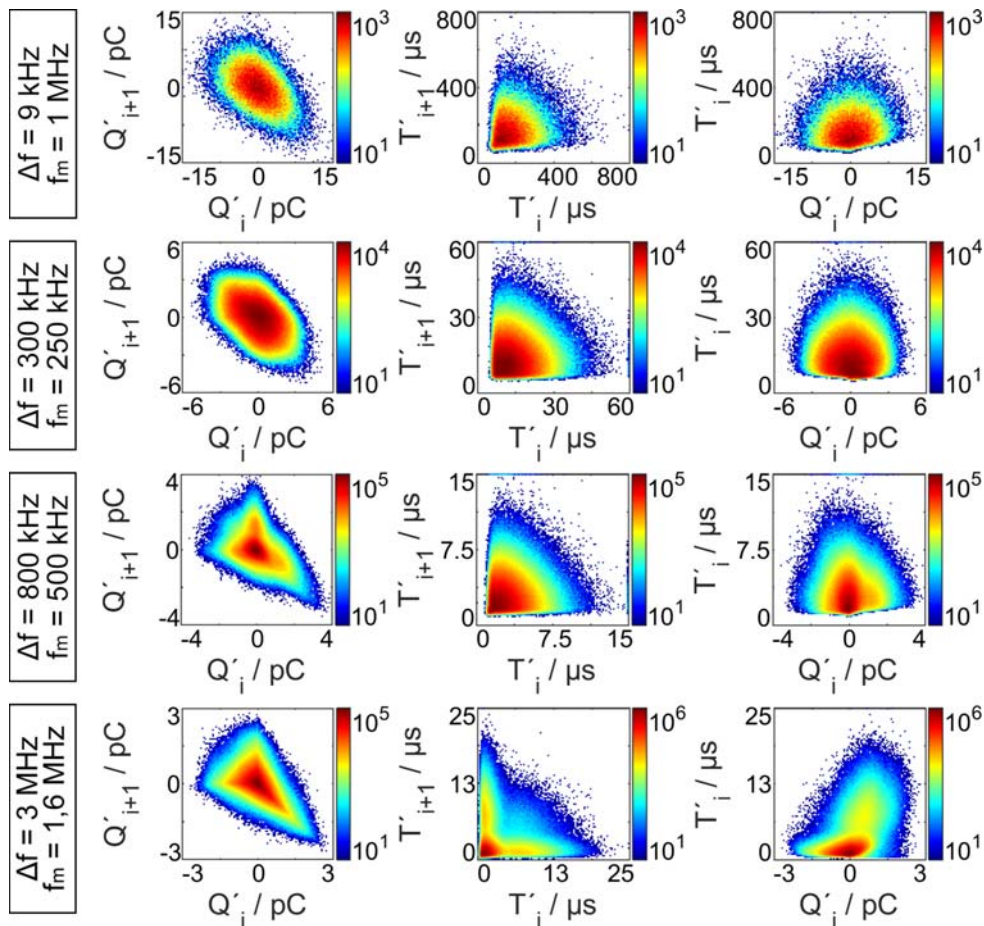


Bild 7.29: NoDi*-Diagramme einer Spitze auf Hochspannung in Abhängigkeit des Messfrequenzbereichs ($U_{DC} = 15 \text{ kV}$, $s = 15 \text{ mm}$, $r = 50 \mu\text{m}$, SF_6 , $p = 0,1 \text{ MPa}$)

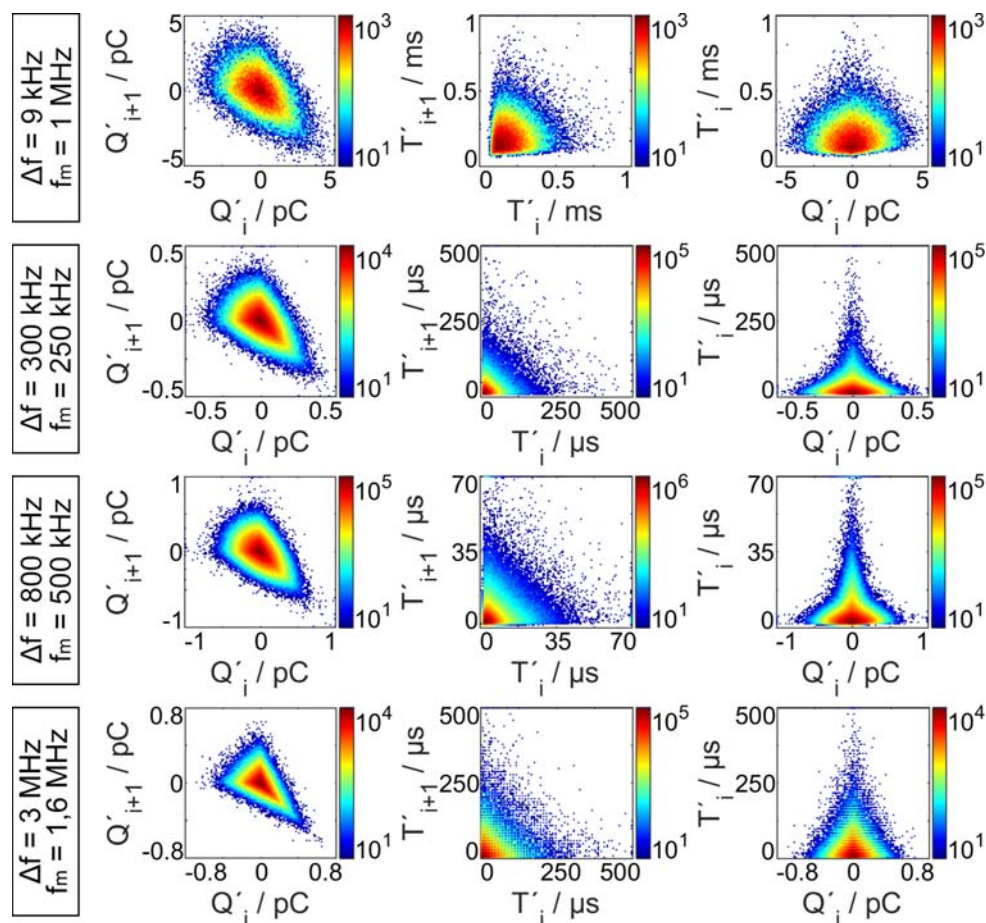


Bild 7.30: NoDi*-Diagramme einer Spitze auf Hochspannung in Abhängigkeit des Messfrequenzbereichs ($U_{DC} = -15 \text{ kV}$, $s = 15 \text{ mm}$, $r = 50 \text{ }\mu\text{m}$, SF_6 , $p = 0,1 \text{ MPa}$)

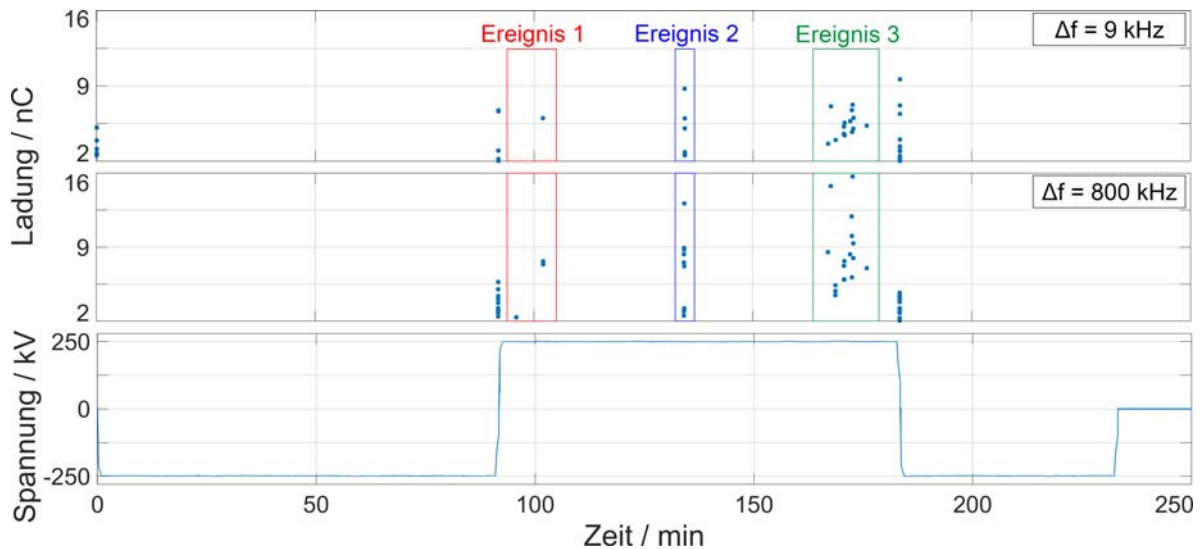
Einfluss der Bandbreite auf das Ergebnis einer TE-Prüfung

Infolge der bandbreitenabhängigen Impulsauflösezeit kann die Bandbreite das Ergebnis von Prüfungen beeinflussen, in denen die Anzahl oder die Amplitude der TE-Impulse als Akzeptanzkriterium herangezogen wird. Dies ist dann der Fall, wenn der zeitliche Abstand aufeinanderfolgender TE-Impulse die jeweilige Doppelimpulsauflösezeit erreicht. Dieser Effekt konnte anhand der Prüfung eines 200-kV-Kondensators für Gleichspannung gezeigt werden. An diesem Kondensator wurde ein Polaritätswechsel-Test mit TE-Messung gemäß der IEC/IEEE 65700-19-03 [IEC65700] durchgeführt. Um den Einfluss der Bandbreite auf das Ergebnis der Prüfung zu untersuchen, kamen zwei identische, parallel geschaltete Messsysteme mit unterschiedlichen Bandbreiten zum Einsatz, welche zu Beginn der Prüfung mit 2 nC kalibriert wurden.

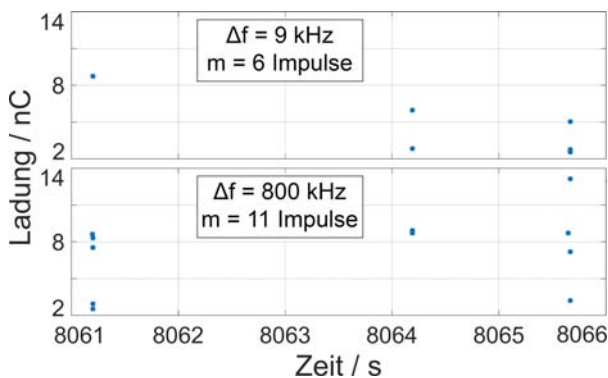
Die Messprozedur des Polaritätswechsel-Tests und das Akzeptanzkriterium mit weniger als 10 TE-Impulsen in einem 30-Minuten-Fenster ist in Kapitel 5.2 und in [IEC65700] genauer beschrieben.

In Bild 7.31 sind die Ergebnisse dieser Prüfung dargestellt. Bild 7.31a zeigt die vom schmalbandigen ($f_m = 1 \text{ MHz}$, $\Delta f = 9 \text{ kHz}$) und breitbandigen ($f_m = 500 \text{ kHz}$, $\Delta f = 800 \text{ kHz}$) Messsystem aufgenommenen Pulssequenzen sowie die Prüfspannung über der Zeit. Die TE-Impulse im Bereich des Polaritätswechsels wurden in der Auswertung nicht berücksichtigt. Im gesamten Prüfzyklus

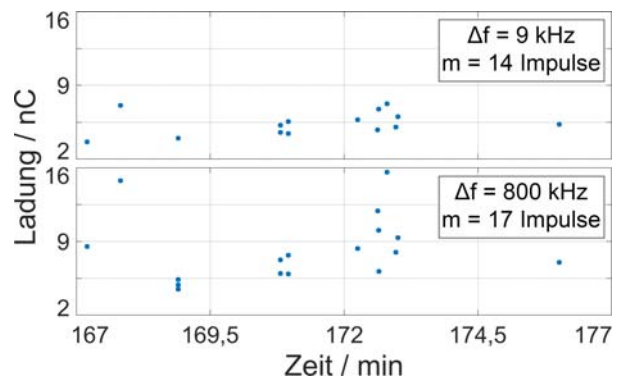
traten bei Anwendung des gleitenden 30-Minuten-Fensters drei TE-Ereignisse auf. Das Ereignis 1 kurz nach dem ersten Polaritätswechsel, Ereignis 2 nach ca. 135 Minuten der Prüfzeit und Ereignis 3 im Zeitbereich von 167 bis 177 Minuten.



(a) Gesamte Pulssequenzen der Messsysteme mit unterschiedlichen Bandbreiten sowie Prüfspannung über der Zeit und Markierung der einzelnen TE-Ereignisse



(b) Pulssequenz des Ereignisses 2



(c) Pulssequenz des Ereignisses 3

Bild 7.31: Ergebnisse des Polaritätswechsel-Tests an einem Kondensator mit Auswertung der Einzelereignisse bei Messsystemen mit unterschiedlicher Bandbreite

Ereignis 1 zeigt bei einer Bandbreite des Messsystems von $\Delta f = 800 \text{ kHz}$ insgesamt drei einzelne TE-Impulse größer 2 nC . Bei einer Bandbreite von 9 kHz konnte nur ein einzelner TE-Impuls erkannt werden. Der erste TE-Impuls dieses Ereignisses liegt mit einer Ladung von $2,3 \text{ nC}$ sehr nahe an der Triggerschwelle und konnte vom schmalbandigen Messsystem nicht erkannt werden. Der zeitliche Abstand zwischen den TE-Impulsen der darauffolgenden Impulsfolge in Ereignis 1 wurde vom breitbandigen Messsystem mit $60 \mu\text{s}$ detektiert. Dies liegt unterhalb der Impulsauflösezeit des schmalbandigen Messsystems mit $111 \mu\text{s}$, womit die beiden TE-Impulse durch deren Überlagerung nur als einzelner TE-Impuls detektiert werden konnten. Die Amplitude dieses TE-Impulses ist mit 7 nC bei der schmalbandigen Messung um 21% kleiner als die TE-Impulse der breitbandigen Messung im Bereich von $7,6 \text{ nC}$.

Ereignis 2 beinhaltet bei der schmalbandigen Messung sechs und bei der breitbandigen Messung elf einzelne TE-Impulse (Bild 7.31b). Dieser Unterschied ist wiederholt auf die geringere Impulsauflösezeit des schmalbandigen Messsystems zurückzuführen. Das Ergebnis der Prüfung gemäß dem Akzeptanzkriterium des Polaritätswechsel-Tests (≥ 10 TE-Impulse in 30-Minuten-Fenster) ist ab diesem Zeitpunkt je nach Bandbreite des Messsystems unterschiedlich. Auch die maximale Amplitude der TE-Impulse in diesem Ereignis liegt mit 13,1 nC bei der breitbandigen Messung um 51 % höher als bei der schmalbandigen Messung mit 8,7 nC.

Ereignis 3 erstreckt sich über einen Zeitraum von insgesamt 10 min (Bild 7.31c). Wiederholt konnten aufgrund der Einfacherkennung von drei schnell aufeinanderfolgenden TE-Impulsen 14 Einzelimpulse vom schmalbandigen Messsystem und 17 TE-Impulse vom breitbandigen Messsystem erkannt werden. Bedeutend ist auch hier der Unterschied in der Amplitude der detektierten TE-Impulse. Diese ist bei der breitbandigen Messung um 30 – 150 % höher als bei der schmalbandigen Messung.

Die Auswertung der Pulssequenzen der Messsysteme mit unterschiedlichen Bandbreiten liefert somit unterschiedliche Ergebnisse und kann bei der Anwendung des Akzeptanzkriteriums den Ausgang der Prüfung beeinflussen.

Abhängigkeit der Amplitude vom zeitlichen Abstand der TE-Impulse

Die Abhängigkeit der Amplituden der detektierten TE-Impulse von schnell aufeinanderfolgenden Impulsen konnten mit dem Kalibrator CAL1A/DP und zwei aufeinanderfolgenden Kalibrierimpulsen gezeigt werden. Dazu wurde alle 20 ms ein Doppelimpulspaket mit einer Amplitude von 100 pC für jeweils ca. 5 s an den Klemmen des 200-kV-Kondensators eingespeist. Der zeitliche Abstand Δt_d zwischen den Impulsen des Doppelimpulspakets wurde von 90 bis 0,1 μs stufenweise gesenkt. In Bild 7.32 sind die Pulssequenzen der schmalbandigen und breitbandigen Messsysteme dargestellt. Das schmalbandige Messsystem detektiert bei einem zeitliche Abstand von $\Delta t_d = 90 \mu\text{s}$ nur noch einen einzelnen Impuls. Das breitbandige Messsystem kann diese beiden Impulse bis zu einem zeitlichen Abstand von 0,9 μs auflösen.

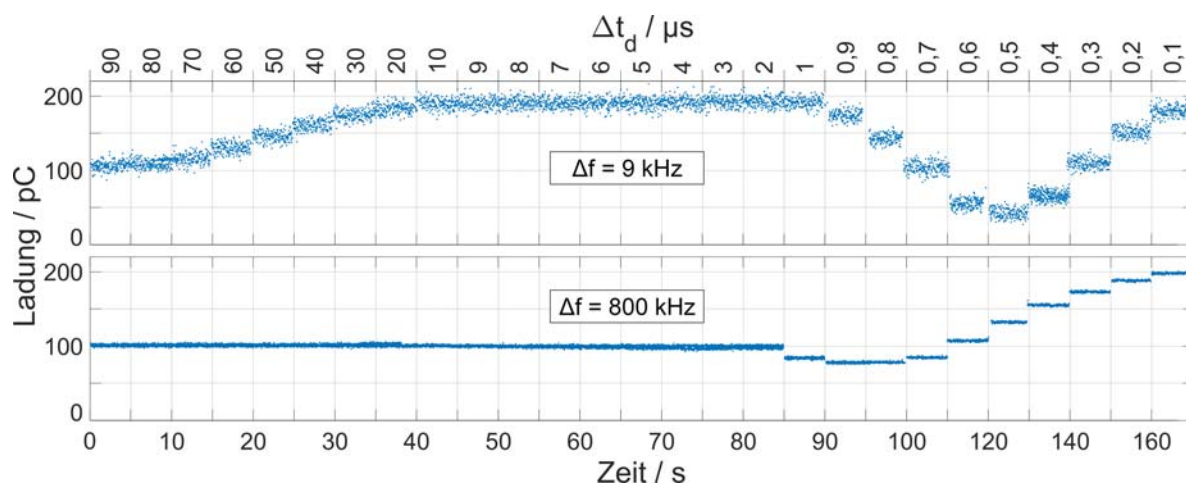


Bild 7.32: Pulssequenzen der beiden Messsysteme mit unterschiedlicher Bandbreite als Antwort auf ein periodisches Doppelimpulspaket mit variablem zeitlichen Abstand Δt_d

Die Amplitude der schmalbandig detektierten Impulse beginnt ab dem zeitlichen Abstand Δt_d von 70 μs zu steigen und erreicht bei 10 μs den Bereich der doppelten vom Kalibrator eingespeisten Amplitude mit 200 pC. Ab 0,9 μs sinkt die detektierte Amplitude der Impulse und erreicht bei 0,5 μs die Hälfte der eingespeisten Amplitude. Danach steigt sie erneut in den Bereich der doppelten eingespeisten Amplitude.

Bis zu einem zeitlichen Abstand von 1 μs liegt die Amplitude der breitbandig detektierten Impulse konstant bei 100 pC. Bei kleinerem zeitlichen Abstand sinkt die Amplitude ebenfalls auf 80 pC und steigt anschließend auf die doppelte Amplitude des eingespeisten Impulses.

Die Bandbreite des Messsystems hat neben der Anzahl der TE-Impulse auch einen Einfluss auf die Amplitude der einzelnen TE-Impulse. Dies ist auf die Überlagerung der einzelnen TE-Impulse zurückzuführen, welche neben der Bandbreite des Messsystems auch vom gesamten Signalweg des Impulses und somit vom Prüfling und Messaufbau abhängig ist. Eine geringfügige Änderung des zeitlichen Abstands zwischen den TE-Impulsen hat bei Erreichen der Impulsauflösezeit des Messsystems einen starken Einfluss auf die Amplitude der detektierten TE-Impulse.

7.5.2.3 Triggerschwelle und Dynamikbereich

Die Triggerschwelle muss zur korrekten Detektion von TE-Impulsen so gesetzt sein, dass eine Trennung der Störimpulse des Grundstörpegels von den TE-Impulsen gewährleistet ist. Heben sich die Amplituden der TE-Impulse eines Defekts nicht ausreichend von den Amplituden des Grundstörpegels ab, ist dies bei der Auswertung zu berücksichtigen. Eine Veränderung der Triggerschwelle führt zur Beeinflussung des Mittelwerts der Amplitude und der zeitlichen Abstände der Impulse. Ein Vergleich von unterschiedlichen Messungen kann in diesem Fall daher nur mit identischer Triggerschwelle durchgeführt werden. Bei verschiedenen Messaufbauten oder starken Unterschieden in der Amplitude der TE-Impulse sowie Höhe der Amplitude der Impulse des Grundstörpegels ist dies infolge unterschiedlicher Verstärkereinstellungen oder einem zu kleinen Dynamikbereich oft nicht möglich.

Einfluss der Triggerschwelle auf die charakteristischen Kenngrößen

Als Beispiel ist die vergleichende Messung an einer Spitze auf Hochspannung in SF₆ und CO₂ gegenübergestellt. Die Pulssequenzen dieser Anordnung wurden bei einem Gasdruck von 0,1 MPa, dem 1,1-fachen der Einsetzspannung bei negativer Polarität und einer Triggerschwelle q_{tr} von 0,7 pC aufgenommen (Bild 7.33). Im Fall der Anordnung in CO₂ hat eine Veränderung der Triggerschwelle bis 15 pC keinen Einfluss auf die charakteristischen Größen wie die mittlere Amplitude oder der zeitliche Abstand der TE-Impulse (Bild 7.34) wie auch nicht auf die NoDi*-Diagramme (Bild 7.35). Bei der Anordnung in SF₆ gibt es keine klare Abgrenzung zwischen den TE-Impulsen und den Impulsen des Grundstörpegels. Eine Veränderung der Triggerschwelle beeinflusst die charakteristischen Größen dieser Messung. Wie in den Ergebnissen der Amplitude in Bild 7.34 zu erkennen, ändern sich das Minimum und der Mittelwert der Amplitude q der TE-Impulse aufgrund der Erhöhung der Triggerschwelle q_{tr} von 0,7 pC auf 1 pC um 30 % bzw. 23 %. Auch das Minimum und der Mittelwert des zeitlichen Abstands Δt ändern sich durch diese Erhöhung um 40 % bzw. 23 %.

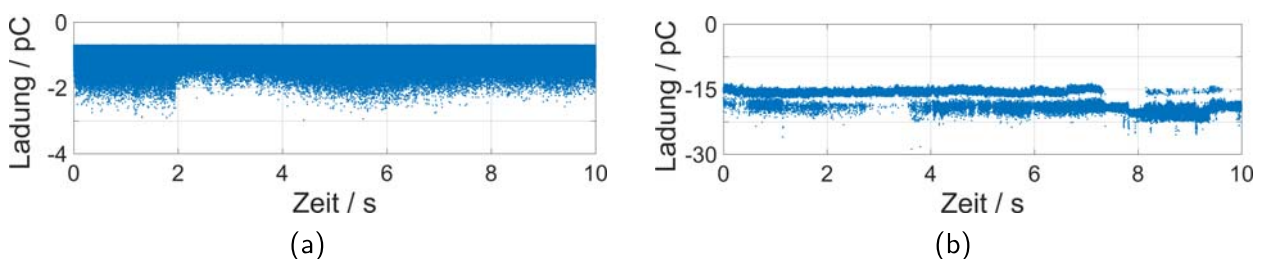


Bild 7.33: Pulssequenz einer Spitze auf Hochspannung in SF₆ (a) und CO₂ (b) bei einer Triggerschwelle von 0,7 pC ($U_{DC} = 1,1 \cdot U_i$, $s = 10$ mm, $r = 50$ μ m, $p = 0,1$ MPa)

Trotz der Beeinflussung der charakteristischen Größen bleibt infolge der stochastischen Verteilung der Amplitude und der zeitlichen Abstände der TE-Impulse das grundsätzliche Erscheinungsbild der NoDi*-Diagramme einer Spitze auf Hochspannung erhalten (Bild 7.35). Der einzige Unterschied ist im NoDi_Q*-Diagramm der Spitze auf Hochspannung in SF₆ festzustellen. Hier werden aufgrund

der höheren Triggerschwelle die differenzierte Amplitude und somit auch das charakteristische Dreieck bei gleichbleibender Skalierung größer. Im NoDi_T*- und NoDi_{QT}*-Diagramm kommt es in diesem Fall lediglich zu einer geringfügigen Veränderung der Häufungspunkte.

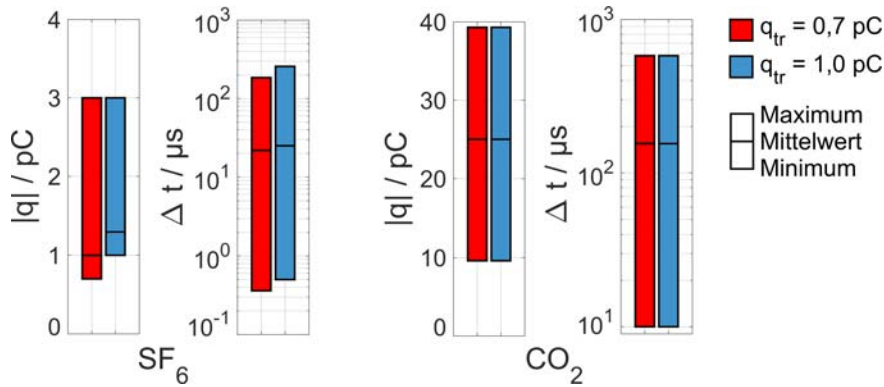


Bild 7.34: Maximum, Minimum und Mittelwert der charakteristische Größen ($|q|$ und Δt) einer Spitze auf Hochspannung in SF₆ und CO₂ bei einer Triggerschwelle q_{tr} von 0,7 pC und 1,0 pC ($U_{DC} = 1,1 \cdot U_i$, $s = 10$ mm, $r = 50$ μm , $p = 0,1$ MPa)

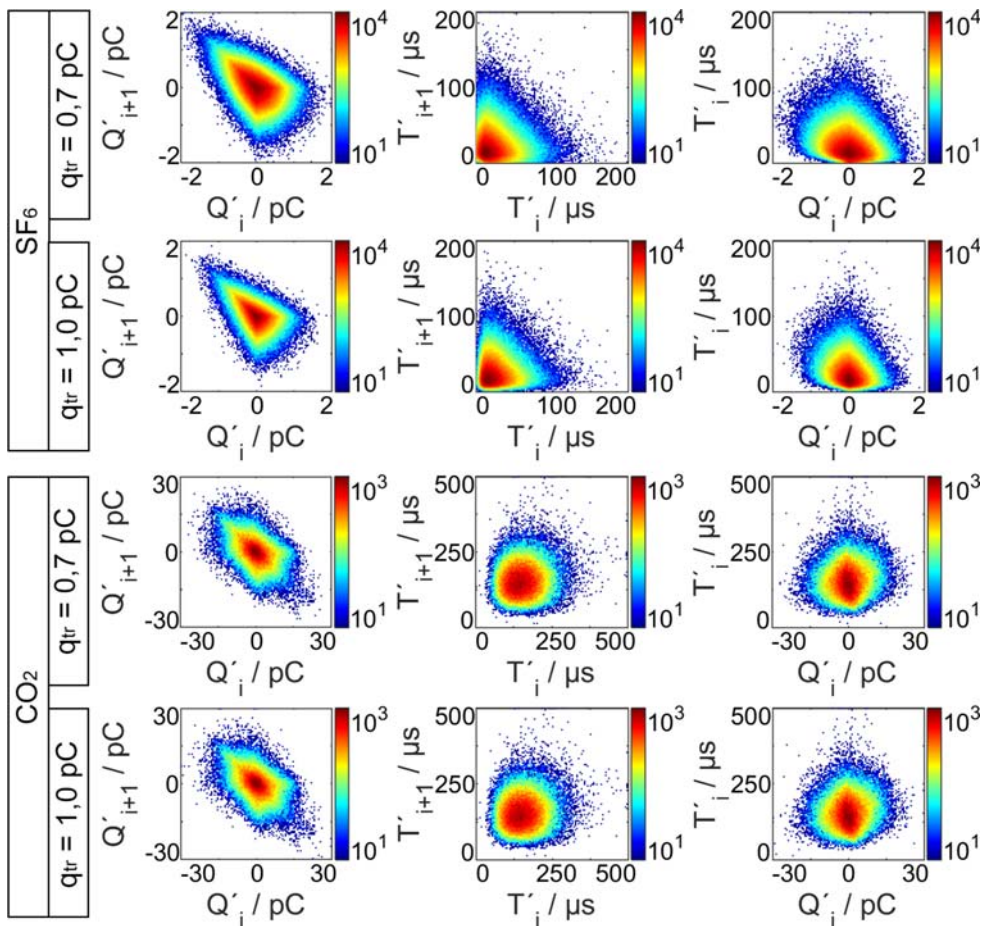


Bild 7.35: NoDi*-Diagramme einer Spitze auf Hochspannung in SF₆ und CO₂ bei einer Triggerschwelle q_{tr} von 0,7 pC und 1,0 pC ($U_{DC} = 1,1 \cdot U_i$, $s = 10$ mm, $r = 50$ μm , $p = 0,1$ MPa)

Einfluss der Triggerschwelle und des Dynamikbereichs auf die NoDi*-Diagramme

Um aussagekräftige NoDi*-Diagramme erzeugen zu können, muss eine möglichst hohe Anzahl an TE-Impulsen korrekt detektiert werden. Besonders bei Defekten mit stark unterschiedlichen Amplituden wie z. B. dem springenden metallischen Partikel oder dem freien Potential ist besonders auf einen ausreichend großen Dynamikbereich des Messsystems zu achten.

Als Beispiel für einen zu geringen Dynamikbereich und eine falsch gesetzte Triggerschwelle sind die schematischen Pulssequenzen und die NoDi*-Diagramme der Messungen an einem springenden metallischen Partikel für unterschiedliche Dynamikbereiche und Triggerschwellen in Bild 7.36 und Bild 7.37 dargestellt.

In Bild 7.36a ist der Dynamikbereich groß genug, um sowohl TE-Impulse mit niedriger als auch hoher Amplitude zu detektieren. Auch die Triggerschwelle ist korrekt oberhalb der Störimpulse des Grundstörspegels gesetzt. Die zugehörigen NoDi*-Diagramme (Bild 7.37a) zeigen ein für das springende Partikel charakteristisches Muster.

Ist der Dynamikbereich zu klein, sodass bei eingestellter Verstärkung für TE-Impulse mit hoher Amplitude die niedrigen Amplituden nicht mehr erfasst bzw. von den Störimpulsen des Grundstörspegels getrennt werden können (Bild 7.36b), führt dies zu einer Veränderung aller charakteristischen Größen. Die NoDi*-Diagramme (Bild 7.37b) verändern sich und eine eindeutige Charakterisierung ist nicht mehr möglich. In diesem Fall könnte, aufgrund des periodischen Auftretens der Impulse im Bereich von 20 ms und dem Dreieck im NoDi_Q*-Diagramm, fälschlicherweise auf Entladungen von der AC-Seite des Prüfaufbaus geschlossen werden.

Wird die Verstärkung bei gleichbleibendem Dynamikbereich auf TE-Impulse mit niedriger Amplitude angepasst (Bild 7.36c), verursacht dies eine Übersteuerung des Verstärkers und TE-Impulse mit hohen Amplituden können nicht mehr richtig aufgelöst werden. Erneut ergeben sich veränderte charakteristische Parameter und die NoDi*-Diagramme werden beeinflusst (Bild 7.37c). Erfahrungen zeigten, dass diese Variante mit einem übersteuerten Verstärker bei langsam aufeinanderfolgenden Impulsen eine korrekte Identifikation der Defekte bei allen vorgestellten Varianten am ehesten zulässt.

Eine unter die Amplitude der Impulse des Grundstörspegels gesetzte Triggerschwelle (Bild 7.36d) verändert die charakteristischen Kenngrößen und das Erscheinungsbild der NoDi*-Diagramme stark. Durch die hohe Anzahl an Störimpulsen geht die Information der differenzierten Amplitude und des zeitlichen Abstands der TE-Impulse vollständig verloren und eine Charakterisierung des Defekts ist nicht mehr möglich (Bild 7.37d).

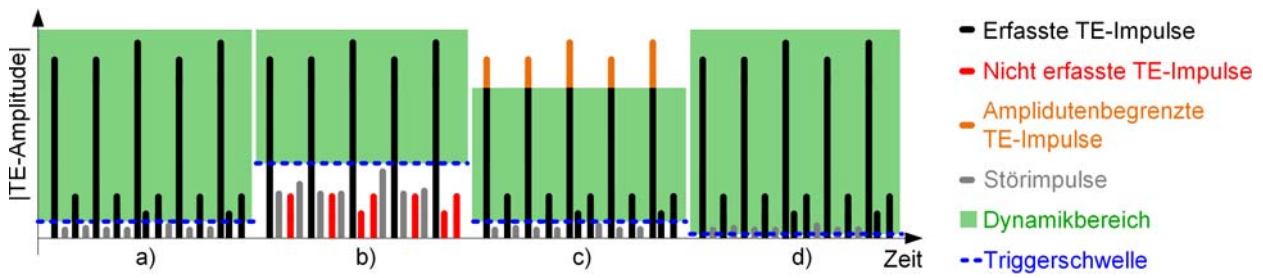
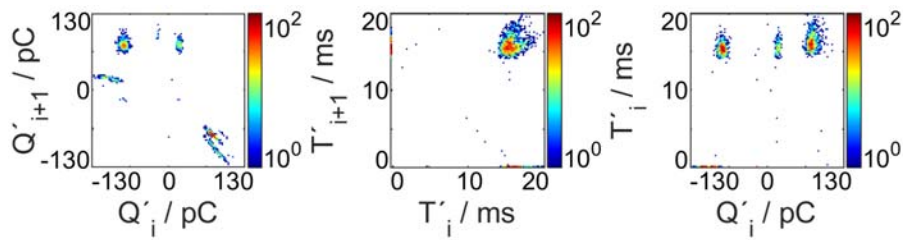
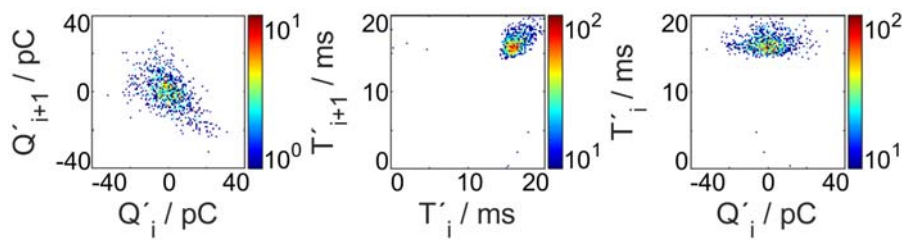


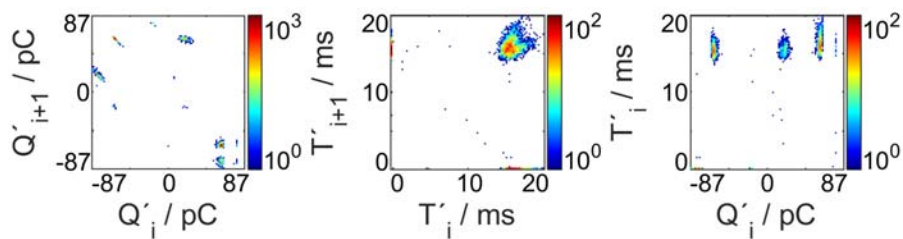
Bild 7.36: Schematische Pulssequenz eines springenden metallischen Partikels mit unterschiedlichen Werten des Dynamikbereichs



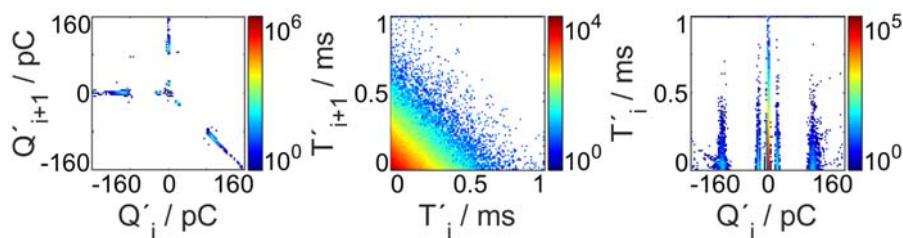
(a) Korrekte Triggerschwelle und ausreichender Dynamikbereich



(b) Zu kleiner Dynamikbereich eingestellt auf Impulse mit hoher Amplitude



(c) Zu kleiner Dynamikbereich eingestellt auf Impulse mit niedriger Amplitude



(d) Zu tief gesetzte Triggerschwelle

Bild 7.37: NoDi*-Diagramme eines springenden Partikels bei unterschiedlichen Einstellungen des Dynamikbereichs und der Triggerschwelle

7.5.2.4 Dämpfung, Reflexion und Überschwingungen

Durch Reflexionen im Prüfling oder Prüfaufbau können reflektierte TE-Impulse als eigenständige TE-Impulse erkannt oder durch Überlagerung beeinflusst werden. Der zeitliche Abstand der reflektierten und gedämpften TE-Impulse zum originalen TE-Impuls liegt im Bereich der Systemlaufzeit, welche auch durch Häufungspunkte in den NoDi*-Diagrammen erkannt werden kann. Besonders bei elektrisch langen Aufbauten, wie z. B. gasisolierten Leitungen oder Kabeln, bei denen die Systemlaufzeit die Totzeit des Messsystems überschreitet, ist dies zu beachten. Zusätzlich kann bei einem vom Aufbau verursachtem Überschwingen der TE-Impulse vorkommen, dass die überschwingenden Impulsanteile bei falsch eingestellter Totzeit als eigenständiger TE-Impuls erkannt werden. Diese falsche Erkennung hat einen Einfluss auf die charakteristischen Kenngrößen sowie die NoDi*-Diagramme.

Zur Veranschaulichung sind in Bild 7.38a die korrekten NoDi*-Diagramme von Koronaentladungen am Endverschluss eines 400 m langen 12/20-kV-AC-Kabels mit offenem Ende bei Gleichspannung zu erkennen. Werden die reflektierten TE-Impulse ebenfalls als eigenständiger TE-Impuls erkannt, kommt es zu Überlagerungen in den NoDi*-Diagrammen (Bild 7.38b) und eine Charakterisierung des Defekts ist nicht möglich. Diese Reflexionen sind jedoch im NoDi_T*- und NoDi_{QT}*-Diagramm als Häufungspunkte im Bereich der Systemlaufzeit und deren Vielfachen (5, 10 und 15 μ s) sowie monoton fallender Amplituden zu erkennen und geben einen Hinweis auf die Mehrfachdetektion von Impulsen.

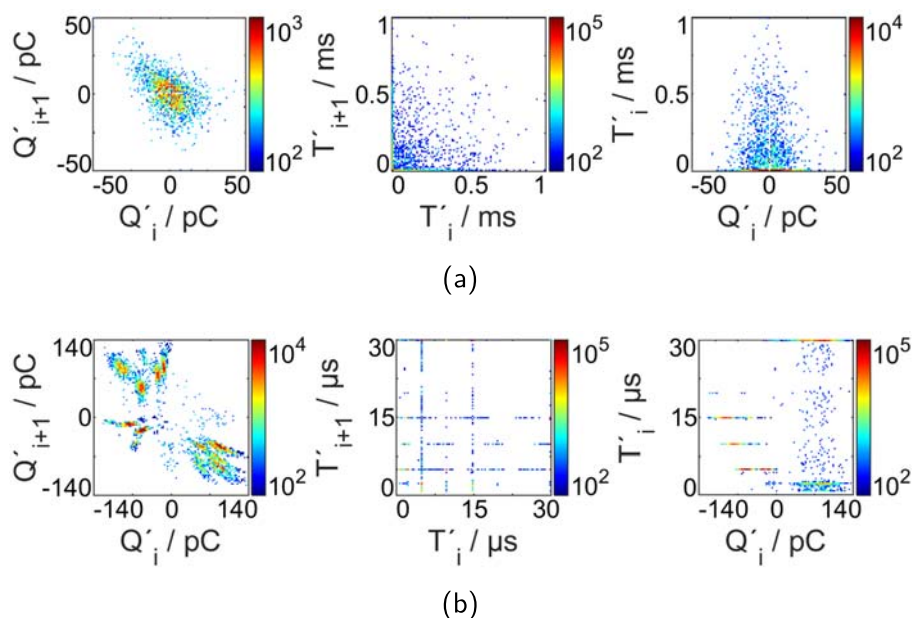


Bild 7.38: NoDi*-Diagramme von Koronaentladungen am Endverschluss eines 400 m langen Kabels mit offenem Ende ohne (a) und mit (b) Detektion der reflektierten TE-Impulse

7.5.2.5 Störimpulse

Störimpulse, die nicht von den TE-Impulsen des Prüflings zu unterscheiden sind, haben besonders auf charakteristische Kenngrößen wie z. B. das Maximum und das Minimum der Amplitude oder den zeitlichen Abstand zwischen zwei Impulsen einen Einfluss. Auch die Auswertungen des Mittelwertes dieser Kenngrößen werden je nach Verhältnis der Anzahl von TE-Impulsen zu Anzahl der Störimpulse beeinflusst. Dadurch ändert sich das Erscheinungsbild der NoDi*-Diagramme und eine Charakterisierung der Defekte wird dadurch erschwert. Besonders eine unter die Amplitude der Impulse des Grundstörpegels gesetzte Triggerschwelle verändert, wie in Kapitel 7.5.2.3 beschrieben, aufgrund der hohen Anzahl an Störimpulsen die charakteristischen Kenngrößen und das Erscheinungsbild der NoDi*-Diagramme.

Die Störimpulse können durch unterschiedliche Abhilfemaßnahmen wie Schirmung des Prüfaufbaus oder bei der Messung durch Filterung oder eine Brückenschaltung unterdrückt werden. Auch in der gemessenen Pulssequenz ist das Filtern und Beseitigen von Störimpulsen in eingeschränkter Form möglich. Neben der nachträglichen Erhöhung der Triggerschwelle und dem Ausblenden von TE-Impulsen unter oder über einem bestimmten Schwellwert ist bei einer Abgrenzung der Amplituden der TE-Impulse zu den Störimpulsen auch ein Ausblenden bestimmter Amplitudenbänder möglich. Zeitlich begrenzte Störimpulse wie z. B. Schalthandlungen oder auch periodisch auftretende Störimpulse können durch das Ausblenden bestimmter Zeitbereiche unterdrückt werden (gating). Dabei gehen jedoch tatsächlich vorhandene TE-Impulse für das gewählte Zeitfenster bzw. den ausgewählten Bereich verloren. Auch für bestimmte Störimpulse charakteristische Größen, wie z. B. ein Bereich zeitlicher Abstände zwischen den Impulsen, kann für eine Filterung hilfreich sein. Typische periodische Störimpulse vom Messaufbau oder auf die Spannungserzeugung zurückzuführende Impulse und eine zu tief gesetzte Triggerschwelle können mithilfe der NoDi*-Diagramme anhand der charakteristischen Muster und Häufungspunkte erkannt werden. Im folgenden werden einige typische NoDi*-Diagramme dieser Störquellen beschrieben.

Koronaentladungen von der AC-Seite des Messaufbaus

Teilentladungen auf der AC-Seite des Prüfaufbaus können bei unzureichender Dämpfung das Messergebnis auf der DC-Seite beeinflussen. Treten beispielsweise Entladungen am Transformator oder der Diode des Gleichrichters auf, können diese durch das periodische Auftreten in der negativen und positiven Halbwelle oder der Überlagerung von abwechselnden positiven und negativen Impulsfolgen erkannt werden. Bild 7.39 zeigt die NoDi*-Diagramme, welche durch starke Entladungen am Eingang des Gleichrichters erzeugt werden. Im NoDi_Q*-Diagramm wird die Überlagerung der beiden Dreiecke sichtbar, welche durch die Koronaentladungen in der positiven und negativen Halbwelle der AC-Spannung hervorgerufen werden. Im NoDi_T*- und NoDi_{QT}*-Diagramm ist ersichtlich, dass der zeitliche Abstand dieser Impulsfolgen im Bereich von 10 ms bzw. 20 ms liegt. Häufungspunkte im Bereich der halben oder vollen Periodendauer der Netzfrequenz geben einen Hinweis auf Entladungen von der AC-Seite des Prüfaufbaus.

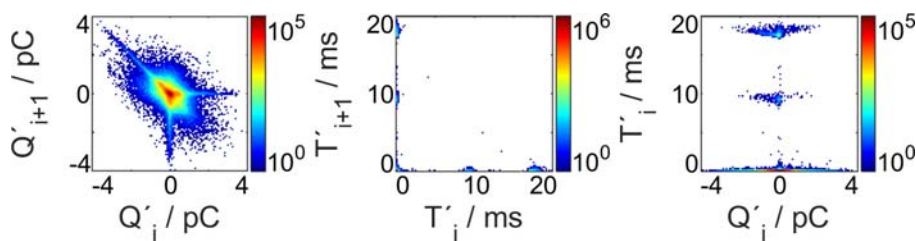


Bild 7.39: NoDi*-Diagramme der Störimpulse von Koronaentladungen auf der AC-Seite des Prüfaufbaus

Schaltimpulse aus Halbwellengleichrichtern

Häufig wird für die Erzeugung von Gleichspannung im Labor ein Einweggleichrichter verwendet. Der Glättungskondensator wird dabei im Bereich des Scheitels der Wechselspannung über die Diode nachgeladen, sobald die Spannung am Kondensator die Spannung der Wechselspannung unterschreitet. Durch das Durchschalten der Dioden treten Stromimpulse auf, die bei unzureichender Dämpfung vom Messsystem als Störimpulse detektiert werden. Diese Impulse treten bei gleichbleibender Last annähernd in der gleichen Phasenlage der Spannung auf. Da der Kondensator nicht in jeder Periode nachgeladen wird, können in den NoDi_T*- und NoDi_{QT}*-Diagrammen scharf voneinander getrennte Häufungspunkte im Bereich des Vielfachen der Periodendauer der Netzfrequenz auftreten (Bild 7.40).

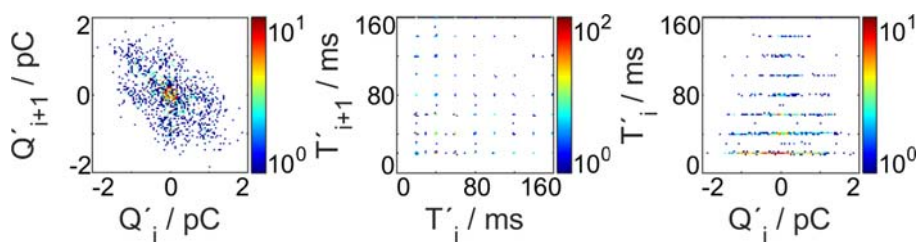


Bild 7.40: NoDi*-Diagramme der Störimpulse eines Einweggleichrichters

Thyristorschalter

Auch thyristorgesteuerte Gleichspannungskaskaden erzeugen aufgrund der charakteristischen und periodischen Pulssequenzen der Schaltimpulse eindeutige NoDi*-Diagramme. In Bild 7.41 sind die NoDi*-Diagramme einer im Leerlauf betriebenen, thyristorgesteuerten 1,5-MV-DC-Kaskade dargestellt. Durch den periodischen Wechsel von mehreren Impulsen mit hoher Amplitude zu mehreren Impulsen mit niedriger Amplitude entsteht ein eindeutiges sternförmiges Muster im

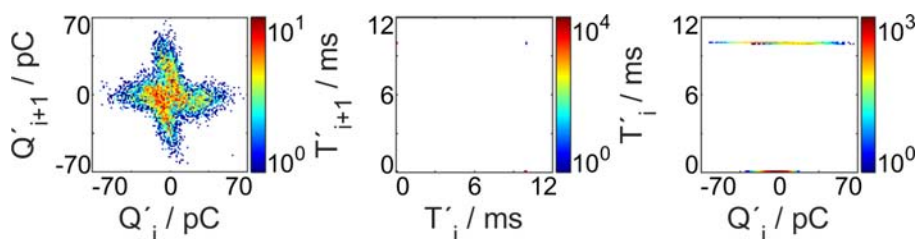


Bild 7.41: NoDi*-Diagramme der Störimpulse einer thyristorgesteuerten Gleichspannungskaskade

NoDi_Q*-Diagramm. Im NoDi_T*- und NoDi_{QT}*-Diagramm sind stark begrenzte Häufungspunkte im Bereich der Zeitkonstante der Schaltfrequenz bei 10 ms zu erkennen. Je nach Topologie der Schaltung entstehen unterschiedliche Muster und Häufungspunkte in den NoDi*-Diagrammen. Aufgrund der Periodizität der Störimpulse können diese bei Kenntnis über die Prüfumgebung auf einfache Weise erkannt werden.

Störimpulse des Grundstörpegels

Bei zu tief gesetzter Triggerschwelle werden vom Messsystem stochastisch auftretende Störimpulse des Grundstörpegels mit positiver und negativer Polarität detektiert. Diese sind in den NoDi*-Diagrammen durch das eindeutige Muster zu identifizieren (Bild 7.42). Dabei sind mit Ausnahme der Bereiche monoton steigender und fallender Impulsfolgen in allen Bereichen des NoDi_Q*-Diagramm Häufungspunkte zu erkennen. Der Abstand dieser Häufungspunkte ist abhängig von der Höhe der Triggerschwelle und der maximalen Amplitude der Störimpulse.

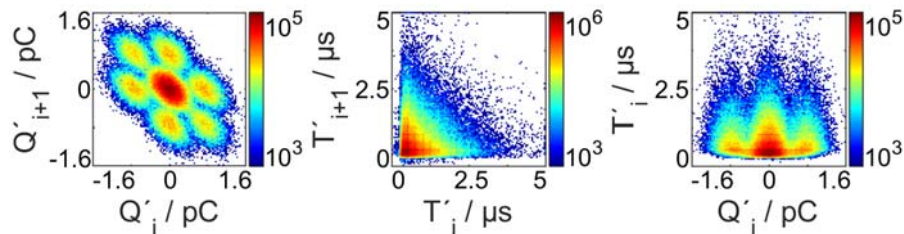


Bild 7.42: NoDi*-Diagramme der Störimpulse des Grundstörpegels bei zu tief gesetzter Triggerschwelle ($q_{tr} = 100 \text{ fC}$, $q_{Stör,max} = 1,1 \text{ pC}$)

7.5.2.6 Raum- und Oberflächenladungen

Bei einigen untersuchten Defekten gasisolierter Systeme konnten aufgrund von Raumladungen im Bereich des Defekts Schwankungen im TE-Verhalten und teilweise aussetzende und wiederkehrende TE-Aktivität beobachtet werden (Bild 7.33). Besonders in Gasen wie Luft oder CO₂ sind diese Änderungen im Entladungsverhalten auch weit oberhalb der Einsatzspannung zu beobachten. Bild 7.43 zeigt die Pulssequenz der Messung einer Spitze auf Hochspannung in synthetischer Luft und die dazugehörigen NoDi*-Diagramme. In der Pulssequenz können über die gesamte Messzeit von zwei Minuten Schwankungen in der Amplitude und dem zeitlichen Abstand der TE-Impulse erkannt werden. Ein Aussetzen und Wiedereinsetzen verschiedener Ladungsbänder und eine Entladungspause von über 20 s ist zu beobachten. Dieser Wechsel im Entladungsverhalten verändert die NoDi*-Diagramme stark und es treten Überlagerungen der einzelnen Abschnitte auf. Eine korrekte Charakterisierung des Defekts wird dadurch verhindert. Dieses Verhalten muss durch eine Auswertung der einzelnen Abschnitte der Pulssequenzen berücksichtigt werden.

Wie weitere Untersuchungen an der Spitze auf Hochspannung zeigten, können Raumladungen einen Defekt gänzlich abschirmen und somit eine Detektion mit Hilfe der TE-Messung in be-

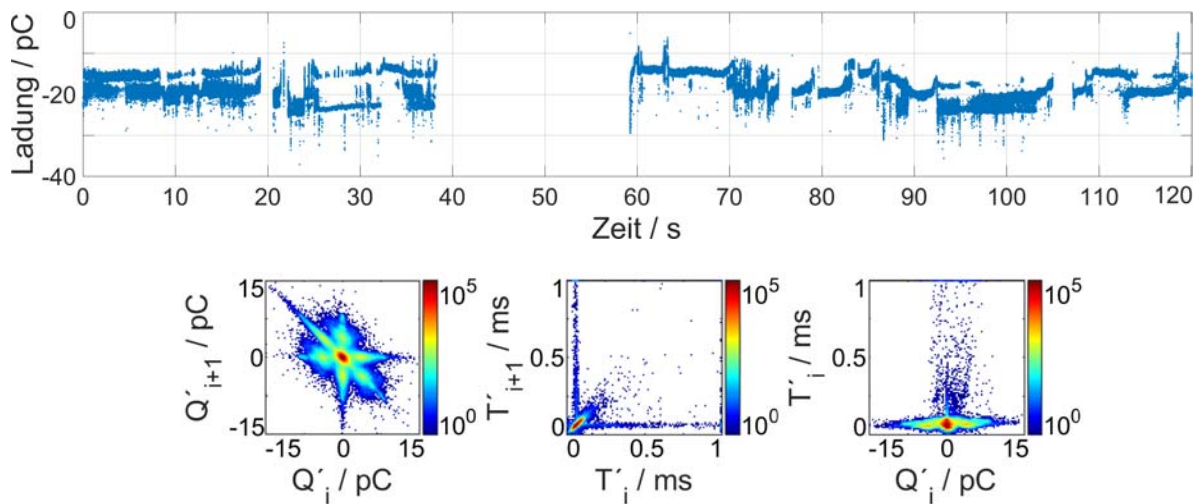


Bild 7.43: Pulssequenz und NoDi*-Diagramme der Spitze auf Hochspannung in synthetischer Luft ($U_{DC} = -5 \text{ kV}$, $s = 17 \text{ mm}$, $r = 50 \mu\text{m}$, $p = 0,1 \text{ MPa}$)

stimmten Bereichen konstanter Spannung oberhalb der Einsetzspannung erschweren (Bild 7.12 in Kapitel 7.5.1.1). Auch ein freies Potential kann nach wenigen Entladungen einen Wert annehmen, welcher keine weiteren Entladungen verursacht oder abschirmende Raumladungen aufbauen, welche das charakteristische TE-Verhalten des Defekts stören. In der Literatur sind Beobachtungen zu finden, bei denen aufgebaute Raumladungen in Hohlräumen oder Oberflächenladungen an Partikeln auf Isolatoren durch eine Abschirmung des Defekts weitere Teilentladungen verhindern [Lem16; Her16]. Messprozeduren mit unterschiedlichen Spannungsrampen oder Polaritätswechsel können diese Raumladungen abbauen oder deren Gleichgewicht stören und die TE-Aktivität kurzzeitig fördern (Kapitel 7.5.1.4 und 7.5.1.5).

Besonders bei Defekten mit geringer TE-Aktivität ergeben sich bezüglich der TE-Freiheit des gesamten Messaufbaus hohe Anforderungen. Die an den Bauteilen, wie z. B. dem Koppelkondensator oder Spannungsteiler und am Messobjekt aufgebauten Oberflächenladungen können nach einer beliebigen Beanspruchungsdauer oder bei einer Spannungsänderung abfließen und werden vom TE-Messsystem als Impulse detektiert. Diese Störimpulse überlagern die auftretenden TE-Impulse der Defekte und die Ergebnisse der TE-Messung werden beeinflusst.

7.5.2.7 Gasart und Gasdruck

Die Art des Gases und der Gasdruck, in denen sich die jeweiligen Defekte befinden, zeigen Einfluss auf das Entladungsverhalten. Die Einsetzspannung sowie Amplitude und Anzahl der TE-Impulse werden dadurch beeinflusst.

Die Unterschiede und der Einfluss auf die NoDi*-Diagramme wurden an drei typischen Defekten (Spitze auf Hochspannung, freies Potential und springendes metallisches Partikel) genauer untersucht. Die verwendeten Gasarten waren synthetische Luft, N_2 , CO_2 und SF_6 bei einem Gasdruck p von 0,1, 0,3 und 0,5 MPa.

Das unterschiedliche Entladungsverhalten der verschiedenen Gasarten und Gasdrücke spiegelt sich neben den unterschiedlichen Einsetzspannungen, Amplituden und Häufigkeiten der TE-Impulse auch in den NoDi*-Diagrammen wider. In Bild 7.44 sind als Beispiel die NoDi*-Diagramme der Spitze auf Hochspannung bei 1,1-facher Einsetzspannung mit negativer Polarität und einem Gasdruck von 0,1 MPa dargestellt. Die in Kapitel 7.5.1.1 beschriebenen charakteristischen Dreiecke bzw. Ellipsen bleiben bei allen Gasarten erhalten. Bei synthetischer Luft ist das Muster, aufgrund der nicht durch die Triggerschwelle begrenzten TE-Impulse im NoDi_Q*-Diagramm symmetrisch. Im NoDi_T*- und NoDi_{QT}*-Diagramm ist der Häufungspunkt infolge der geringeren Streuung der zeitlichen Abstände konzentrierter und auf ca. 40 μ s begrenzt. Die NoDi*-Diagramme der Spitze auf Hochspannung in N₂ sind mit denen in SF₆ vergleichbar, wobei die Anzahl der Impulse geringer ausfällt. In CO₂ tritt im NoDi_Q*-Diagramm ein Dreizack ähnlich dem bei freiem Potential in Erscheinung.

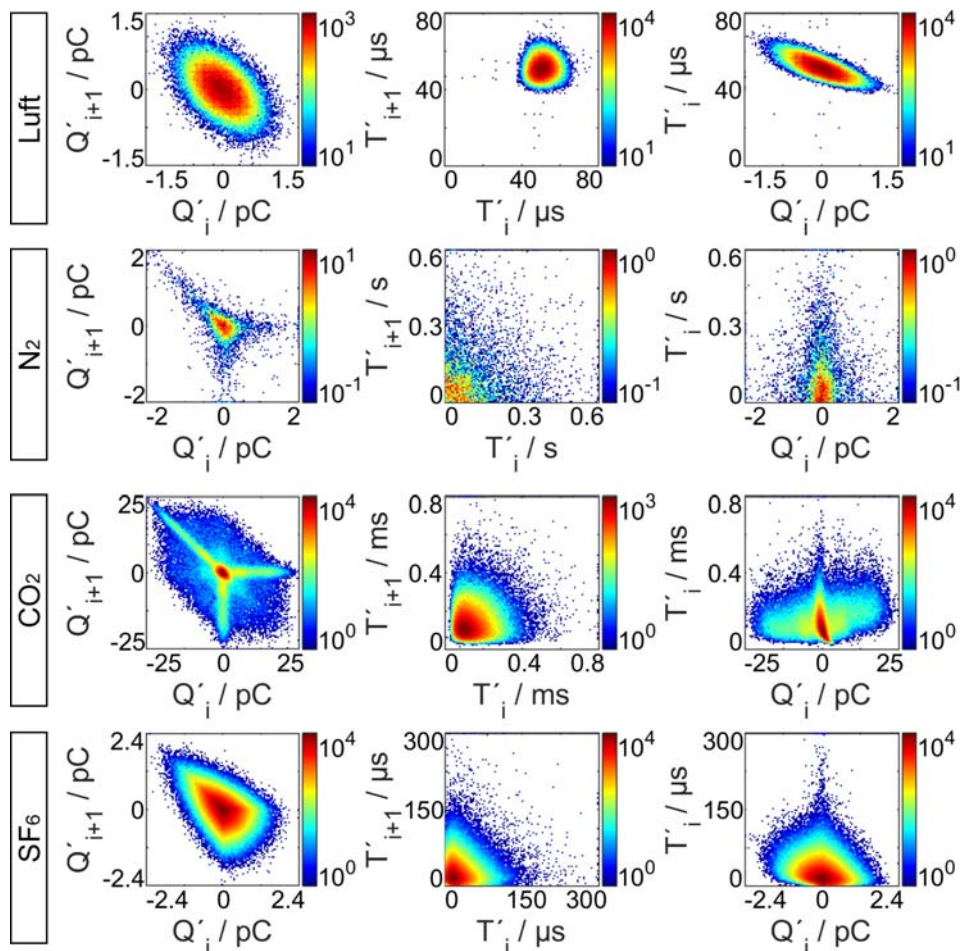


Bild 7.44: NoDi*-Diagramme der Spitze auf Hochspannung in unterschiedlichen Gasarten ($U_{\text{DC}} = 1,1 \cdot U_{i,\text{DC}}$, $s = 17 \text{ mm}$, $r = 50 \mu\text{m}$, $p = 0,3 \text{ MPa}$)

Das freie Potential zeigt bei allen untersuchten Gasarten ein homogenes und periodisches TE-Verhalten. In Bild 7.45 sind die NoDi*-Diagramme des freien Potentials bei den unterschiedlichen Gasarten bei 1,1-facher Einsetzspannung mit positiver Polarität dargestellt, in denen die in Kapitel 7.5.1.2 beschriebenen charakteristischen feinen Strukturen und Häufungspunkte erhalten bleiben.

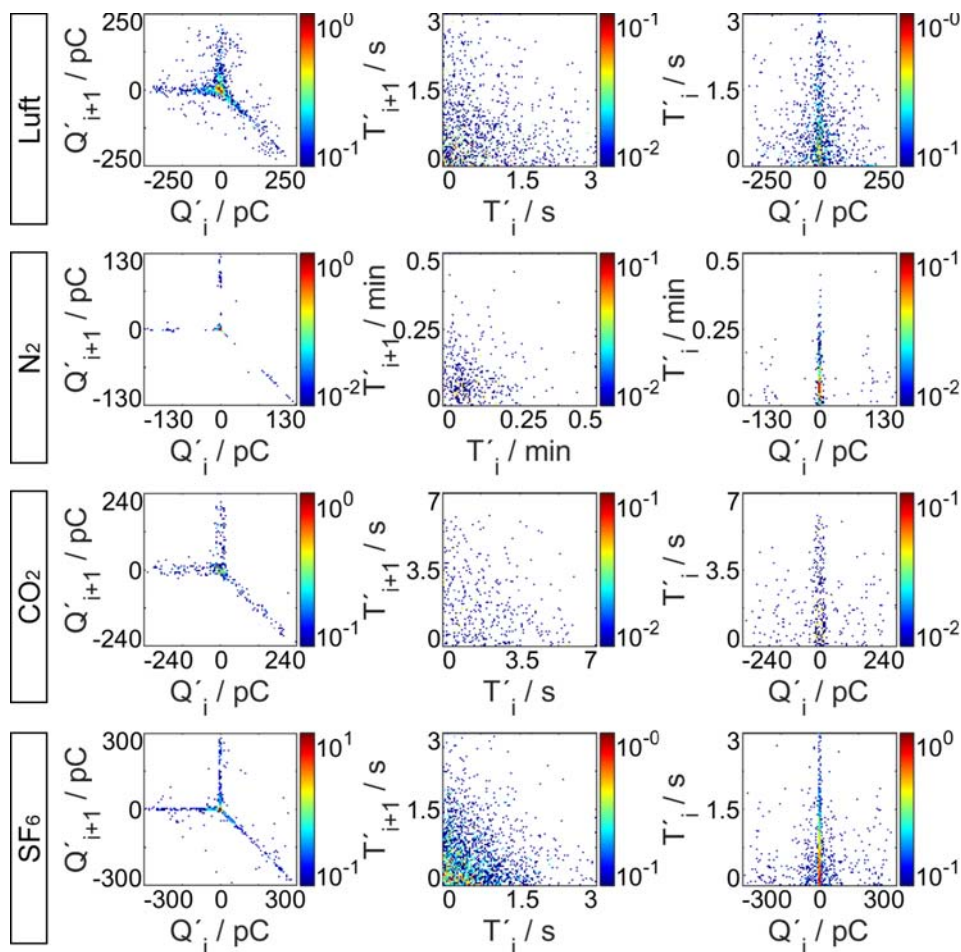


Bild 7.45: NoDi*-Diagramme des freien Potentials in unterschiedlichen Gasarten ($U_{DC} = 1,1 \cdot U_i$, $p = 0,3 \text{ MPa}$)

7.5.3 Automatische Klassifizierung der NoDi*-Diagramme und Pulssequenzen

TE-Monitoringsysteme benötigen Methoden für eine automatische Erkennung und Klassifizierung von Defekten und Störimpulsen. Um grundlegende Möglichkeiten aufzuzeigen und zu testen, wurden Methoden des maschinellen Lernens wie in Kapitel 6.5 beschrieben auf unterschiedliche Features der Pulssequenzen angewandt. Dabei wurden die automatische Klassifizierung der Defekte und die mögliche Unterstützung bei der Charakterisierung mithilfe der NoDi*-Diagrammen untersucht. Als Features kamen statistische Parameter der Pulssequenzen sowie die Pixel-Daten der NoDi*-Diagramme zur Anwendung. Alle drei Arten von Features wurden mit dem beschriebenen ANN-Algorithmus verarbeitet. Der DT-Algorithmus kam aufgrund des höheren Anspruchs in Bezug an die Rechenleistung lediglich bei den statistischen Parametern zum Einsatz.

Wie in Kapitel 6 und 7.5.1 beschrieben zeigen die NoDi*-Diagramme charakteristische Muster und erlauben eine Identifikation der jeweiligen Defekte durch einen menschlichen Experten. Die Daten aus den NoDi*-Diagrammen können auch ein nützliches Merkmal für die automatische Klassifizierung der Defekte sein. Die Pixel-Daten der drei NoDi*-Diagramme wurden mit dem in Kapitel 6.5 beschriebenen Algorithmus des ANN verarbeitet. Beim Training und Test des Algorithmus mit der 10-fachen Kreuzvalidierung und einer Datenbank von insgesamt 190 Datensätzen bzw. NoDi*-Diagrammen konnten die Defekte Spitze auf Hochspannung, freies Potential und springendes Partikel, zu 97,5 % korrekt klassifiziert werden. Ein Nachteil der Pixel-Daten ist, dass sie auch bei Verringerung des Rasters sehr speicherintensiv sind und die NoDi*-Diagramme erst ab einer Anzahl von ca. 1000 TE-Impulsen aussagekräftige Muster erzeugen und erst dann die Wahrscheinlichkeit einer korrekten Klassifizierung auf brauchbare Werte erhöhen.

Dieser Nachteil kann mit Features aus den statistischen Parametern vermieden werden. Beim ANN-Algorithmus wurde die Anzahl der TE-Impulse, welche für die Berechnung der in Kapitel 6.5 beschriebenen statistischen Parameter verwendet wurden, variiert. Ab einer Größe der Pulssequenz von 50 TE-Impulsen zeigte sich keine wesentliche Erhöhung der korrekt klassifizierten Defekte. Beim DT-Algorithmus konnte ab einer Pulssequenz mit 10 TE-Impulsen keine signifikante Änderung der korrekten Klassifizierungen erkannt werden. Bei Untersuchungen der Pulssequenzen der drei untersuchten Defekte, konnte der DT-Algorithmus im Durchschnitt eine höhere Anzahl an Messungen korrekt klassifizieren als der ANN-Algorithmus. In Bild 7.46 ist die Abhängigkeit der korrekt erkannten Defekte über die Anzahl der verwendeten TE-Impulse einer Pulssequenz für den DT- und ANN-Algorithmus dargestellt. Jeder Punkt im Diagramm repräsentiert Daten aus 140 Datensätzen, die nach dem 10-fachen Kreuzvalidierung trainiert bzw. getestet wurden [Kai+17].

Bei einer Erweiterung des Datensatzes mit den Datensätzen des Defekts Partikel in Firefly und mit Störimpulsen des Grundstörpegels wurden die Defekte mithilfe des DT-Algorithmus zu 93 % richtig klassifiziert. In Tabelle 7.3 sind die Ergebnisse dieser Auswertung zusammengefasst. Der größte Fehler trat bei der Klassifizierung der Störimpulse auf. Hier wurden drei von fünfzehn Datensätzen mit Störimpulsen fälschlicherweise als springendes Partikel klassifiziert.

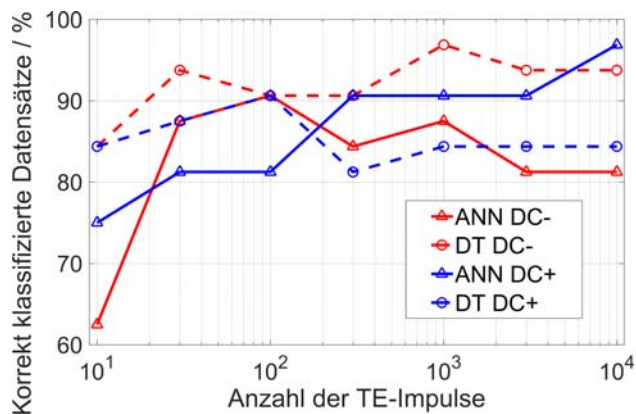


Bild 7.46: Abhängigkeit der korrekten Klassifizierungen von der Anzahl der TE-Impulse für die Auswertung der statistischen Parameter

Tabelle 7.3: Ergebnisse der Klassifizierung unterschiedlicher Defekte mit dem DT-Algorithmus

Defektart	Klassifiziert als					Total
	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	
(A) Freies Potential	24	0	0	0	0	24
(B) Korona	0	22	0	0	2	24
(C) Springendes Partikel	2	0	30	0	0	32
(D) Partikel in Firefly	0	0	1	14	1	16
(E) Störimpulse	0	0	3	0	12	15

Bei Anwendung der DT- und ANN-Algorithmen auf den vorhandenen Datensatz mit 100 TE-Impulsen für die Berechnung der Features zeigte der DT-Algorithmus mit den statistischen Parametern mit 98,3% korrekten Klassifizierungen die besten Ergebnisse. Der ANN-Algorithmus konnte mit den statistischen Parametern 97,7% und mit den Pixel-Daten der NoDi*-Diagramme 97,4% der Defekte korrekt klassifizieren. Die NoDi*-Diagramme wurden bei diesen Untersuchungen für eine Messdauer von 30 Sekunden ausgewertet. Die Rohdaten der TE-Impulse bei Auswertung mit dem ANN-Algorithmus lieferten mit 92,4% die schlechtesten Ergebnisse (Bild 7.47).

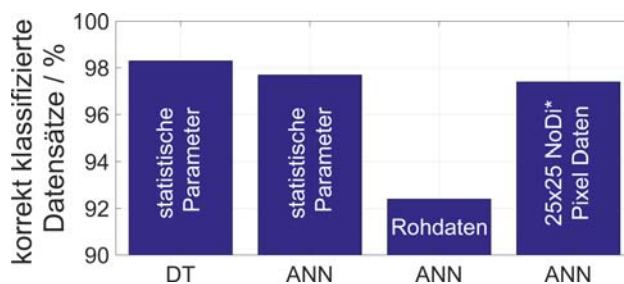


Bild 7.47: Vergleich der Ergebnisse der unterschiedlichen Algorithmen und Features

Die Untersuchungen zeigen, dass schon mit einfachen Algorithmen des maschinellen Lernens eine korrekte Klassifizierung der Pulssequenzen mit einer geringen Anzahl an TE-Impulsen möglich ist. Die Fehleranfälligkeit der Klassifizierung auf Daten, die mit Störimpulsen behaftet sind, wurde nicht weiter untersucht.

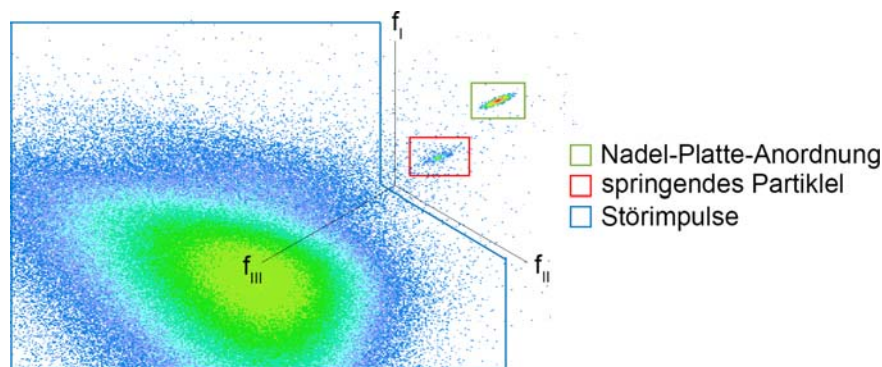
7.5.4 Trennung gleichzeitig auftretender Defekte

Die Kurvenform der TE-Impulse ist von einigen Faktoren wie der Art des Defekts, dem Umgebungsmedium und auch der Laufzeit sowie der Dämpfung der Impulse bis zum Messsystem abhängig. Die Frequenzbereiche der meisten Störimpulse unterscheiden sich von denen der TE-Impulse. Dies kann bei der Trennung von mehreren gleichzeitig auftretenden Defekten oder zur Filterung von Störimpulsen genutzt werden. In der Literatur sind dafür einige unterschiedliche Methoden zu finden [Cac+96; Kyp+06; Ret+10; Twi+10; Ald+17]. Diese Methoden basieren auf dem selben grundlegenden Prinzip. Die Kurvenform bzw. das Frequenzspektrum unterschiedlicher TE-Impulse oder Störimpulse müssen sich ausreichend voneinander unterscheiden, um eine Clusterung der unterschiedlichen Impulse und eine separate Auswertung zu ermöglichen. Die Informationen, die eine Trennung der unterschiedlichen Defekte oder Störquellen ermöglichen, können direkte Parameter der Kurvenform wie z. B. die Anstiegszeit, die Rückenhalbwertszeit oder die Grundfrequenz sein. Eine weitere Möglichkeit ist die synchrone Mehrfrequenz-TE-Messung. Dabei wird an einem Koppelkondensator mit einem Ankoppelvierpol eine TE-Messung in drei unterschiedlichen Frequenzbändern durchgeführt. Durch die Überlagerung der gemessenen Amplituden der in diesen drei Frequenzbändern detektierten TE-Impulse, in einem dreidimensionalen Diagramm entstehen bei voneinander abweichenden spektralen Anteilen der TE-Impulse unterschiedliche Cluster, die separat voneinander ausgewertet werden können [Omi13]. Speziell bei TE-Messungen mit Gleichspannung kann die separate Auswertung von sich überlagernden Pulssequenzen bei der Trennung von Störimpulsen oder mehreren gleichzeitig auftretenden Defekten hilfreich sein. Ein Nachteil dieser Methode ist die geringere Impulsauflösezeit aufgrund der drei unterschiedlichen verwendeten Filter, die sich im Frequenzbereich nicht überlappen dürfen.

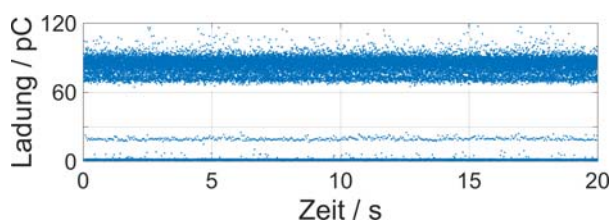
Als Beispiel ist die synchrone Mehrfrequenz-TE-Messung an einer Spitze auf Hochspannung ($s = 500 \text{ mm}$, $r = 50 \text{ }\mu\text{m}$) in Luft bei einem Druck von $p = 0,1 \text{ MPa}$ und der springenden Kugel (K2) in SF_6 bei einem Druck von $p = 0,5 \text{ MPa}$ in Bild 7.48 dargestellt. Zusätzlich wurde die Triggerschwelle des Messsystems auf ca. 90% des Grundstörpegels von $q_{\text{gr}} = 1,5 \text{ pC}$ gesetzt, wodurch somit auch Störimpulse des Grundstörpegels vom Messsystem detektiert werden. Die drei Mittenfrequenzen der Frequenzbänder mit einer Bandbreite von jeweils $\Delta f = 650 \text{ kHz}$ wurden bei dieser Messung mit $f_{\text{I}} = 500 \text{ kHz}$, $f_{\text{II}} = 4,2 \text{ MHz}$ und $f_{\text{III}} = 8,2 \text{ MHz}$ gewählt.

Die Amplitude jedes einzelnen vom Messsystem in den drei unterschiedlichen Frequenzbereichen detektierten Impulses wird nun im 3-Mittenfrequenz-Diagramm vektoriell addiert. Auf diese Weise bilden sich, je nach Frequenzbereich der einzelnen Impulse, unterschiedliche Häufungspunkte. Im Anschluss können diese graphisch in verschiedene Bereiche eingeteilt und separat ausgewertet werden (roter, grüner und blauer Bereich in Bild 7.48a). Dadurch ist eine Zuordnung der einzelnen Impulse aus der Pulssequenz (Bild 7.48b) zu den zugehörigen Bereichen des 3-Mittenfrequenz-Diagramms und eine separate Auswertung der Pulssequenzen möglich (Bild 7.48c).

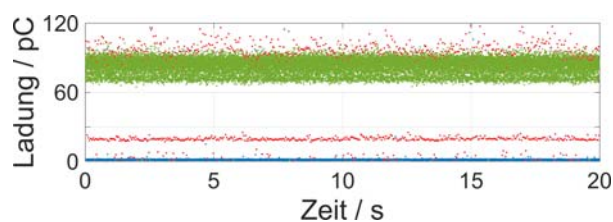
In den NoDi*-Diagrammen verursachen die Überlagerung mehrerer Pulssequenzen und die zu tief gesetzte Triggerschwelle eine Veränderung der charakteristischen Größen und eine Identifikation



(a) 3-Mittelfrequenz-Diagramm und Markierung der Bereiche zur Clusterung der TE-Impulse



(b) Aufgenommene Pulssequenz



(c) Pulssequenzen mit Zuordnung der Bereiche

Bild 7.48: Ergebnisse der synchronen Mehrfrequenz-TE-Messung an einer Spitze auf Hochspannung ($s = 17 \text{ mm}$, $r = 50 \text{ }\mu\text{m}$, Luft, $p = 0,1 \text{ MPa}$) und einem springenden Partikel (Kugel K2, SF_6 , $p = 0,5 \text{ MPa}$) sowie zu tief gesetzter Triggerschwelle bei einer Spannung von $U_{\text{DC}} = 30 \text{ kV}$

der Defekte ist nicht mehr möglich. Die Auswertung der gesamten Pulssequenz sowie die separate Auswertung der einzelnen Pulssequenzen der unterschiedlichen Bereiche aus Bild 7.48 ist in Bild 7.49 dargestellt. Bei der separaten Auswertung können die für den jeweiligen Defekt charakteristischen NoDi*-Diagramme erkannt werden.

In den NoDi*-Diagrammen der Spitze auf Hochspannung sind im Vergleich zur breitbandigen Messung mit 3 MHz die Verringerung der detektierten Impulse bzw. der Stapelhöhe sowie der ausgeprägte Häufungspunkt bei ca. 0,5 ms im NoDi*_T- und NoDi*_{QT}-Diagramm zu erkennen. Die Impulsauflösezeit wird von den Filtern mit 650 kHz auf 1,5 μs begrenzt. Zusätzlich wurde diese durch den hohen Anteil an Störimpulsen in Bezug auf die Erkennung der Impulse der Spitze auf Hochspannung reduziert.

Die NoDi*-Diagramme des springenden Partikels sind mit dem Ergebnis der Messung bei 3 MHz gleichzusetzen. Hervorzuheben sind die Einträge bei kleinen zeitlichen Abständen und negativer differenzierter Ladung im NoDi*_{QT}-Diagramm. Diese sind auf die hohe Anzahl an Impulsen mit niedriger Amplitude im Bereich des Grundstörpegels zurückzuführen, welche durch die synchrone Mehrfrequenz-TE-Messung zusätzlich erkannt werden konnten. Zusätzliche Einträge im NoDi*_T- und NoDi*_{QT}-Diagramm sind auf die falsche Zuordnung einiger TE-Impulse im 3-Mittelfrequenz-Diagramm zurückzuführen.

Auch die Störimpulse im Bereich des Grundstörpegels konnten mit der synchronen Mehrfrequenz-TE-Messung getrennt ausgewertet werden und erzeugen die für diese Pulssequenz charakteristischen NoDi*-Diagramme.

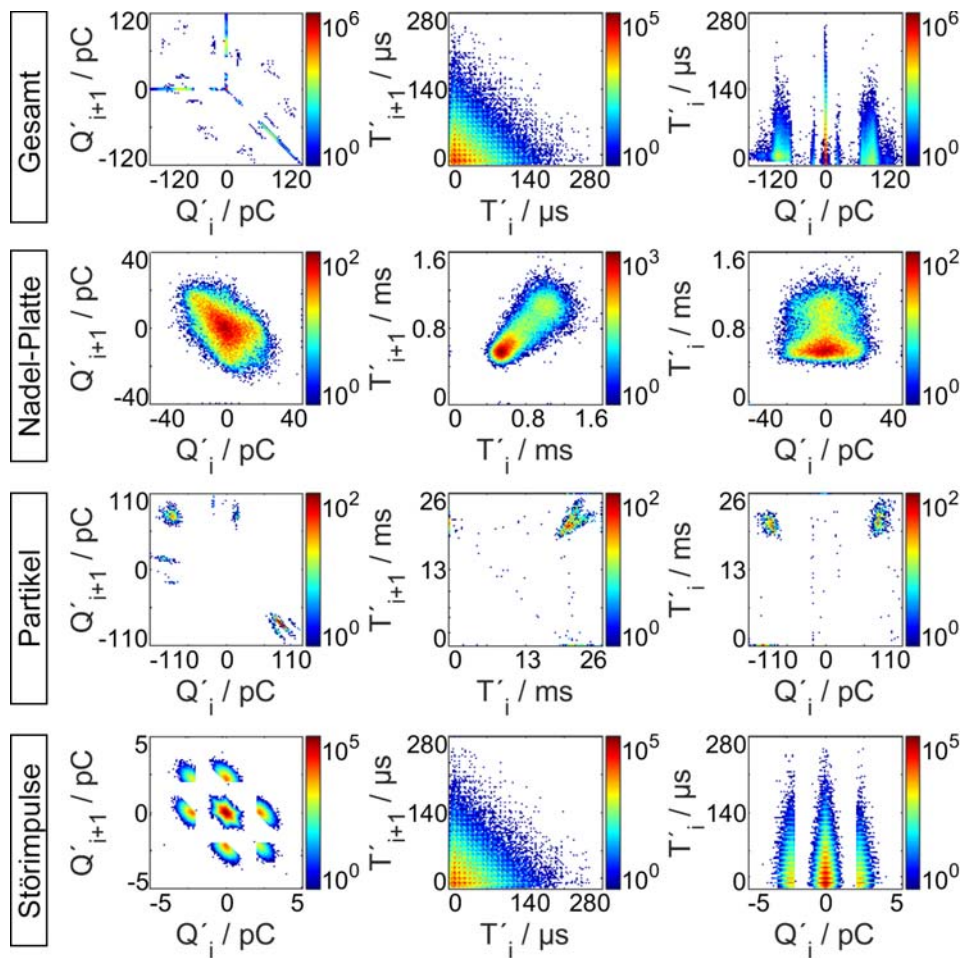


Bild 7.49: NoDi*-Diagramme der synchronen Mehrfrequenz-TE-Messung bei Auswertung der gesamten Pulssequenz und bei separater Auswertung der unterschiedlichen Bereiche

7.6 UHF-TE-Messung

7.6.1 Grundlegende Eigenschaften des UHF-TE-Messsystems

Um die Anwendbarkeit der NoDi*-Diagramme auch bei der UHF-TE-Messung zu überprüfen und mit den Ergebnissen der konventionellen TE-Messung zu vergleichen, wurden die Testzellen einiger typischer Defekte in einer GIS-Sammelschiene platziert und die Pulssequenzen mithilfe eines UHF-TE-Messsystems aufgenommen.

Der Aufbau der GIS-Sammelschiene mit Freiluftdurchführung sowie der nicht gekapselte Hochspannungstransformator mit Gleichrichter (Kapitel 7.2.1) zeigen Störsignale im Frequenzbereich der Mobilfunk-Netze (LTE- bzw. 4G-Netze im Frequenzbereich von 790 – 862 MHz, GSM-Netze im Bereich von 925 – 960 MHz und 1805 – 1880 MHz) sowie zeitweise periodische breitbandige Störsignale aufgrund der Flugsicherungsradargeräte. Das Frequenzspektrum des Grundstörpegels sowie des Signals von TE-Impulsen der springenden metallischen Kugel K2 am Fenstersensor A2 ist in Bild 7.50 dargestellt. Bei eingehenden Messungen wurde bei der UHF-TE-Messung für den im Messsystem vorgegebenen Bandpassfilter mit einer Bandbreite von $\Delta f = 70$ MHz und das Frequenzband mit einer Mittenfrequenz von $f_m = 1,15$ GHz das beste Signal-Rausch-Verhältnisses ermittelt. Diese Einstellungen wurden bei allen nachfolgenden Messungen zum Nachweis der Anwendbarkeit der NoDi*-Diagramme beibehalten.

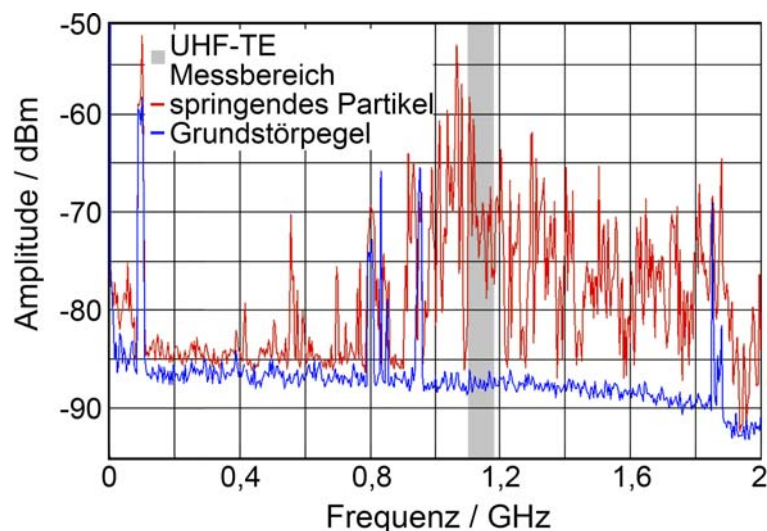


Bild 7.50: Frequenzspektrum (maxhold: 1 Minute) des Grundstörpegels und der TE-Impulse einer springenden metallischen Kugel (K2, $U_{DC} = 45$ kV, SF_6 , $p = 0,5$ MPa) am Sensor A2 mit Markierung des Frequenzbereichs der UHF-TE-Messung

Die bei einem TE-Impuls erzeugten elektromagnetischen Wellen breiten sich entlang der Sammelschiene aus, werden gedämpft und an Stoßstellen wie den Sammelschienenenden, Winkelbausteinen oder Isolatoren reflektiert. Dadurch treten am UHF-Sensor Interferenzen der unterschiedlich gedämpften Wellen auf. Die vom Messsystem detektierten UHF-TE-Impulse besitzen eine größere zeitliche Ausdehnung als konventionell aufgenommene TE-Impulse mit einer Bandbreite $\Delta f \geq 300$ kHz. Besonders bei Defekten mit hoher TE-Impulswiederholrate kommt es durch

Interferenzen der Signale zu einer stärkeren Streuung der Amplitude und TE-Impulse können zeitlich nicht ausreichend aufgelöst werden. Um die zeitliche Ausdehnung und Kurvenform der unterschiedlichen Signalen zu veranschaulichen, sind die einzelnen Signalverläufe der gesamten Signalkette in Bild 7.51 dargestellt. Bild 7.51a zeigt die gemessene Kurvenform eines Impulses des Signalgenerators Cal2B von Power Diagnostix mit einer Amplitude von 50 V und einer Anstiegszeit von 100 ps, welcher am UHF-Sensor A1 eingespeist wurde. Das am Sensor A2 detektierte und um 30 dB verstärkte Signal ist in Bild 7.51b zu sehen und in Bezug auf Schwingungen und Abklingverhalten mit dem Signal eines springenden Partikels gleichzusetzen. Zur Weiterverarbeitung dieses Signals dient der Down-Konverter UHF 620, welcher in einem Messbereich $f_m = 1,15$ GHz und $\Delta f = 70$ MHz das in Bild 7.51c dargestellte Signal zur Impuls-Detektion an das Messsystem liefert. Die physikalisch von der Wellenausbreitung in der GIS-Sammelschiene und dem UHF-Sensor gegebene Impulsauflösezeit liegt im Bereich von 1 μ s. Die vom Messsystem bei dem gewählten Frequenzbereich vorgegebene Totzeit entspricht 1,54 μ s.

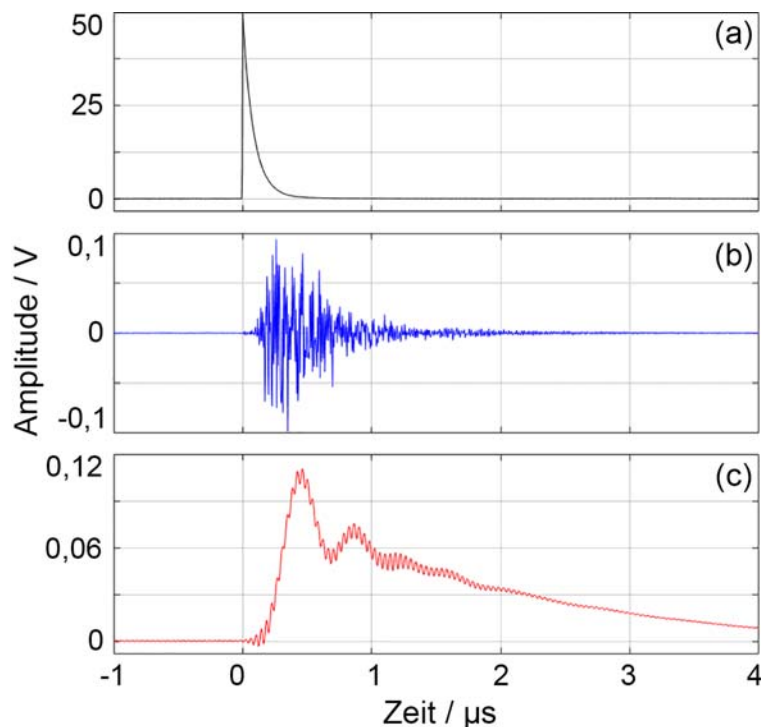


Bild 7.51: Impulsverlauf des Signals vom Signalgenerator Cal2B (a), um 30 dB verstärktes Sensor-signal A2 (b) und Ausgangssignal des Down-Konverters (c)

Bei allen Messungen wurde parallel und zeitsynchron eine konventionelle TE-Messung mit einer Bandbreite von $\Delta f = 1,5$ MHz und Mittenfrequenz von $f_m = 800$ kHz durchgeführt. Die maximal auftretenden Störimpulse des Grundstörpegels lagen bei 5 pC.

Aufgrund der bei der UHF-TE-Messung fehlenden Information über die Polarität der detektierten Impulse wurde für die Auswertung in den folgenden Punkten für den Vergleich mit den Ergebnissen der konventionellen TE-Messung jeweils der Betrag der detektierten Pulssequenzen ausgewertet. Die gewählte Triggerschwelle und Verstärkerstufe am Messsystem sowie die Verstärkung am Vorverstärker wurden bei jeder Messung an die auftretenden TE-Impulse angepasst. Die niedrigsten

Impulse, die vom UHF-TE-Messsystem mit Vorverstärker und maximaler Verstärkung detektiert werden konnten lagen, nach der Bereinigung der durch Flugsicherungsradargeräte erzeugten zeitweise periodischen Störimpulse, im Vergleich zur konventionell gemessenen scheinbaren Ladung der Impulse im Bereich von 30 bis 50 pC.

7.6.2 Spitze auf Hochspannung

Die mit unterschiedlichen Nadel-Platte-Anordnungen erzeugten Koronaentladungen in SF₆ erzeugen TE-Impulse mit mittleren Amplituden der konventionell gemessenen scheinbaren Ladung im Bereich von 1 – 5 pC. Diese Entladungen konnten infolge des gegebenen Grundstörpegels am GIS-Aufbau mit Freiluftdurchführung weder mit dem UHF-TE-Messsystem noch mit dem Spektrumanalysator detektiert werden.

7.6.3 Freies Potential

Die in Kapitel 7.5.1.2 beschriebenen TE-Impulse mit hoher und niedriger Amplitude des freien Potentials konnten mit dem UHF-TE-Messsystem nicht korrekt detektiert werden. Verstärkung und Triggerschwelle wurde auf die Detektion der Impulse mit niedriger Amplitude der Pulssequenz angepasst. Eine Übersteuerung des Verstärkers bzw. Messsystems bei TE-Impulsen mit hoher Amplitude konnte dabei nicht verhindert werden. Dies hat einen Einfluss auf die Streuung der Amplitude und besonders den Maximalwert der Impulse in der Pulssequenz. Beim Vergleich der in Bild 7.52 dargestellten konventionellen und UHF-TE-Pulssequenzen ist die Abweichung der Amplitudenverhältnisse zu erkennen. Die Anzahl der detektierten Impulse mit niedriger Amplitude ist bei der UHF-TE-Messung um die Hälfte geringer.

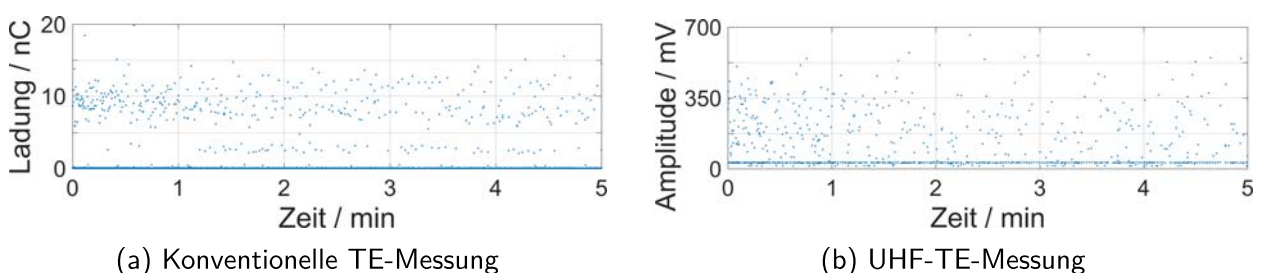


Bild 7.52: Pulssequenz des freien Potentials ($U_{DC} = -40$ kV, SF₆, $p = 0,5$ MPa)

Die NoDi*-Diagramme der UHF-TE-Pulssequenzen besitzen vergleichbare charakteristische Eigenschaften wie die der konventionellen TE-Messung (Bild 7.53). Aus dem periodischen Wechsel von mehreren TE-Impulsen mit niedriger Amplitude und einem einzelnen TE-Impuls mit hoher Amplitude entstehen die feinen Strukturen im NoDi_Q*- und NoDi_{QT}*-Diagramm. Die im Vergleich zu Kapitel 7.5.1.2 auftretenden Einträge im zweiten Quadranten des NoDi_Q*-Diagramms werden durch einen häufigeren Wechsel von TE-Impulsen mit hoher zu niedriger und zurück zu hoher Amplitude hervorgerufen. Die Asymmetrie im NoDi_{QT}*-Diagramm und Häufung der Einträge in der

rechten Hälfte werden durch monoton steigende Pulssequenzen hervorgerufen. Im Vergleich zu Kapitel 7.5.1.2 ist dies auf einen höheren Anteil an Störimpulsen bei dieser Messung und eine nicht exakt gleiche Anordnung der freien Elektrode in der Testzelle zurückzuführen.

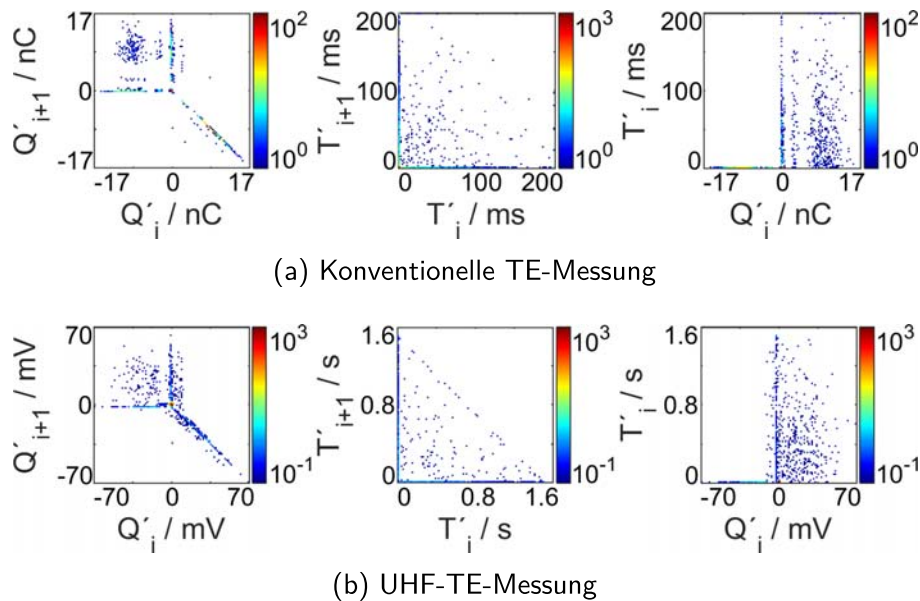


Bild 7.53: NoDi*-Diagramme des freien Potentials ($U_{DC} = -40$ kV, SF_6 , $p = 0,5$ MPa)

7.6.4 Freies metallisches Partikel

Kugel

Wie in Kapitel 7.5.1.3 beschrieben, entstehen bei der gleichmäßigen Bewegung einer springenden Kugel drei Bänder von TE-Impulsen mit unterschiedlicher Amplitude. Aufgrund des höheren Grundstörpegels kann das Band der niedrigen Amplituden bei den Messungen an der GIS nicht erkannt werden. Die beiden Bänder von TE-Impulsen mit höherer Amplitude werden von beiden Messsystemen detektiert. Bei der UHF-TE-Messung ist die Amplitude der detektierten Impulse im Vergleich zur konventionellen TE-Messung besonders bei den Impulsen mit niedriger Amplitude einer größeren Streuung unterworfen (Bild 7.54). Die Anzahl der TE-Impulse ist mit 55,7 Impulsen/s bei der konventionellen TE-Messung und 55,2 Impulsen/s bei der UHF-TE-Messung annähernd identisch.

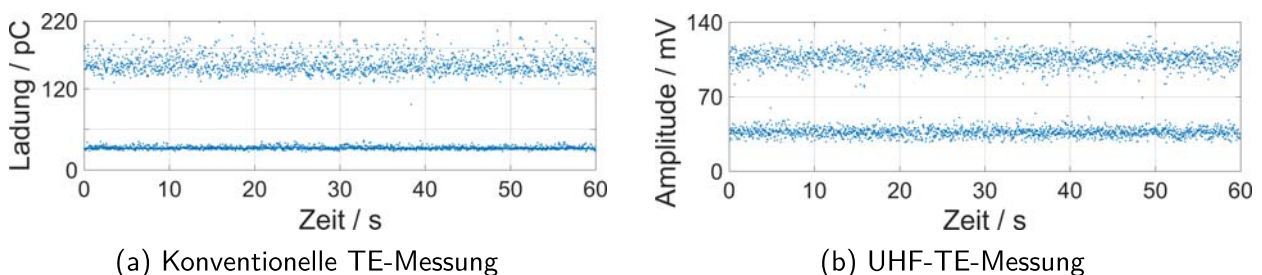
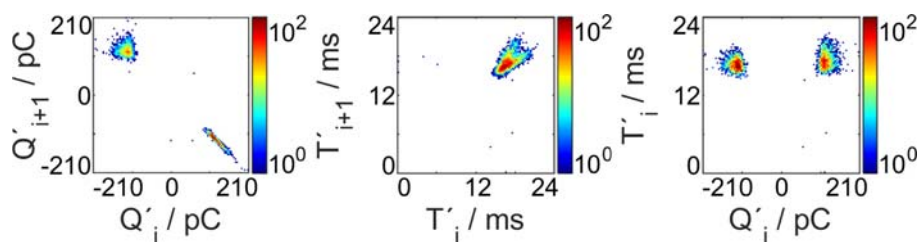
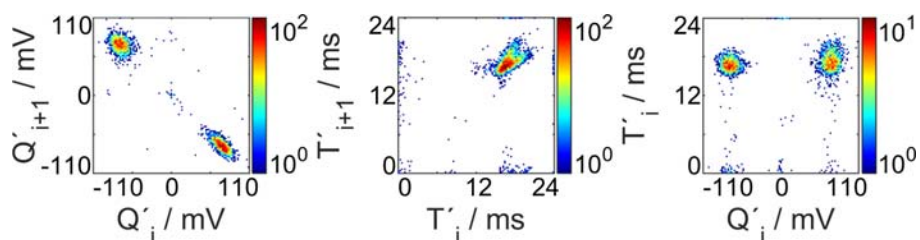


Bild 7.54: Pulssequenz einer springenden Kugel (Kugel K2, $U_{DC} = -40$ kV, SF_6 , $p = 0,5$ MPa)

In den NoDi^* -Diagrammen (Bild 7.55) bleibt das charakteristische Erscheinungsbild des springenden Partikels trotz der größeren Streuung der Amplitude erhalten. Beim Vergleich der $\text{NoDi}_{\text{Q}^-}^*$ - und $\text{NoDi}_{\text{T}^-}^*$ -Diagramme der konventionellen (Bild 7.55a) und der UHF-TE-Messung (Bild 7.55b) werden besonders die breitere Streuung der Impulse mit kleiner Amplitude (negatives Δq) und die zusätzlichen Einträge außerhalb dieser Häufungspunkte sichtbar. Auch im $\text{NoDi}_{\text{T}^-}^*$ sind diese auf Störimpulse bei der UHF-TE-Messung zurückzuführenden zusätzlichen Einträge zu erkennen. Der Bereich der Häufungspunkte der beiden Messungen ist nahezu identisch.



(a) Konventionelle TE-Messung

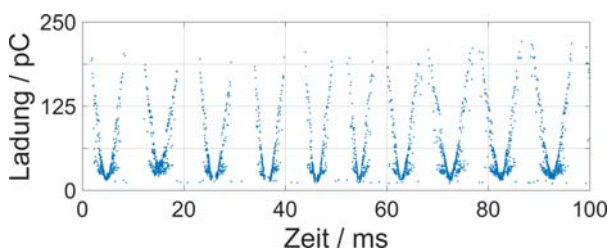


(b) UHF-TE-Messung

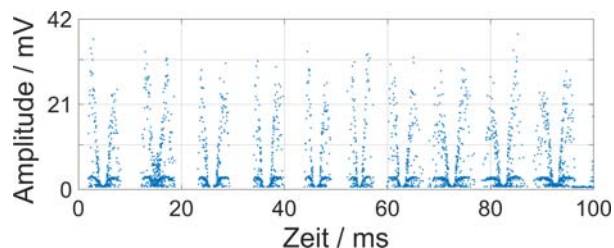
Bild 7.55: NoDi^* -Diagramme der springenden Kugel (K2, $U_{\text{DC}} = -40 \text{ kV}$, SF_6 , $p = 0,5 \text{ MPa}$)

Draht

Das Drahtstück in Firefly verursacht aufgrund der sehr schnell aufeinanderfolgenden TE-Impulse starke Interferenzen der elektromagnetischen Wellen und Impulse in der Datenverarbeitung. Die Anzahl der detektierten TE-Impulse unterscheidet sich dadurch mit ca. $700 \cdot 10^3$ Impulsen/s bei der konventionellen Messung und $150 \cdot 10^3$ Impulsen/s bei der UHF-TE-Messung. Das Erscheinungsbild der beiden Pulssequenzen ist ähnlich (Bild 7.56). Die Streuung der Amplituden der TE-Impulse ist bei der UHF-TE-Messung größer.



(a) Konventionelle TE-Messung

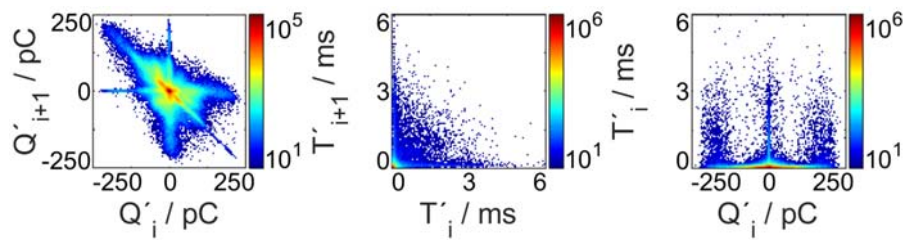


(b) UHF-TE-Messung

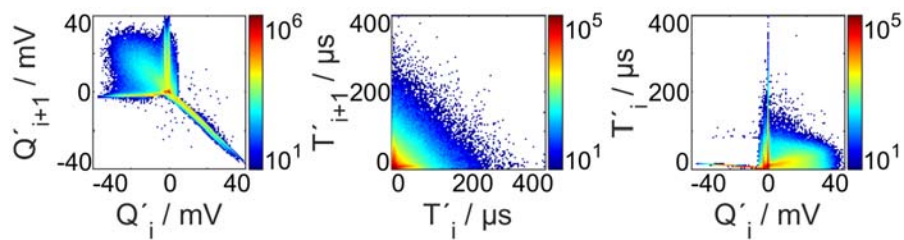
Bild 7.56: Pulssequenz des Drahtstücks in Firefly (Draht D1, $U_{\text{DC}} = -30 \text{ kV}$, SF_6 , $p = 0,1 \text{ MPa}$)

Trotz der ähnlichen Pulssequenzen ist ein deutlicher Unterschied in den NoDi^* -Diagrammen zu erkennen. Im $\text{NoDi}_{\text{Q}^-}^*$ -Diagramm der UHF-TE-Messung fehlt der Teil des überlagerten Dreiecks im

ersten, dritten und vierten Quadranten. Grund dafür sind die unzureichende Auflösung und die Interferenz schnell aufeinanderfolgender Impulse. Diese treten besonders im Nahbereich des Partikels an der Hochspannungselektrode auf (Kapitel 7.5.1.3). Dadurch entsteht eine verhältnismäßig große Anzahl von Impulsfolgen mit wechselnder Amplitude, welche auch die NoDi*-Diagramme dominieren (feine Strukturen). Die Einträge im zweiten Quadranten werden durch die Impulsfolgen der TE-Impulse mit hoher Amplitude erzeugt, die von einem TE-Impuls mit niedriger Amplitude unterbrochen werden. Die starke Asymmetrie im NoDi*_{QT}-Diagramm der UHF-TE-Messung und die breitere Verteilung der Einträge in der rechten Hälfte spiegeln die stärkere Streuung der zeitlichen Abstände bei monoton steigenden Impulsfolgen wider.



(a) Konventionelle TE-Messung



(b) UHF-TE-Messung

Bild 7.57: NoDi*-Diagramme des Drahtstücks in Firefly (Draht D1, $U_{DC} = -30$ kV, SF_6 , $p = 0,1$ MPa)

8 Diskussion und Ausblick

8.1 TE-Verhalten der typischen Defekte bei Gleichspannung

Das Teilentladungsverhalten der typischen Defekte von gasisolierten Systeme bei Gleichspannung unterscheidet sich grundlegend von dem bei Wechselspannung. Neben der Einsetzspannung der Teilentladungen sind auch die grundlegenden Kenngrößen wie der Zeitpunkt und die Amplitude der auftretenden TE-Impulse infolge verschiedener physikalischer Effekte nicht miteinander vergleichbar. Bei Wechselspannung erzeugen die Defekte aufgrund der Periodizität der Spannung meist eine sich wiederholende und im Bezug auf die Phasenlage annähernd gleichbleibende Pulssequenz. Bei Gleichspannung ist diese erzwungene Periodizität nicht gegeben. Ein weiterer grundlegender Unterschied ist, dass die durch Teilentladungen entstehenden freien Ladungsträger bzw. Raumladungen bei Wechselspannung durch den periodischen Wechsel der Polarität der Spannung in jeder Periode nahezu vollständig abgebaut werden. Bei Gleichspannung können die Bereiche der entstandenen Raumladungen große räumliche Dimensionen annehmen und Defekte vollständig abschirmen oder das elektrische Feld in der Anordnung lokal erhöhen, sowie ein Gleichgewicht aus erzeugten und rekombinierenden Ladungsträgern verursachen.

Bei konstanter Gleichspannung oberhalb der Einsetzspannung zeigen die Defektarten, Spitze auf Hochspannung, freie Potential und freies metallisches Partikel eine konstante TE-Aktivität (Kapitel 7.5.1.1, 7.5.1.2 und 7.5.1.3). Ein kurzzeitiges Aussetzen der TE-Impulse oder sprunghafter Wechsel zwischen zwei unterschiedlichen Verhalten der Entladung konnte an der Spitze auf Hochspannung und dem freien metallischen Partikel beobachtet werden (Kapitel 7.5.1.1 und 7.5.1.3). Defektarten wie innere Defekte und Partikel auf Isolatoren verursachen eine geringe Anzahl und schwer identifizierbare TE-Impulse, deren Häufigkeit und Amplitude meist über der Zeit abklingen (Kapitel 7.5.1.4 und 7.5.1.5). Dieses TE-Verhalten wird von den abschirmenden und stabilisierenden Raum- und Oberflächenladungen im Hohlraum bzw. an der Isolatoroberfläche verursacht, welche aus den vom Defekt selbst verursachten freien Ladungsträgern entstehen (Kapitel 3.2.2, 3.3.3 und 3.4.2).

Die typischen Defekte zeigen untereinander sowie abhängig von Spannung, Gasart, Gasdruck und Geometrie des Defekts starke Unterschiede in der Anzahl der auftretenden TE-Impulse von wenigen Impulsen pro Minute bis zu 10^6 Impulsen pro Sekunde. Auch die Amplitude der TE-Impulse kann innerhalb der an einem Defekt detektierten Pulssequenz und bei Variation der Eigenschaften des Defekts um Größenordnungen von vier Zehnerpotenzen schwanken.

Das Aussetzen von Teilentladungen in Bereichen bestimmter Spannungswerte aufgrund von Raumladungserscheinungen und abschirmenden Effekten (Kapitel 7.5.1.1, 7.5.1.4 und 7.5.1.5) oder das Aufladen der Anordnung auf ein Potential, bei dem keine weiteren TE-Impulse auftreten (Kapitel 7.5.1.2), macht eine Erkennung der betroffenen Defekte unter bestimmten Bedingungen und bei konstanter Gleichspannung unmöglich (Kapitel 3.2.2, 7.5.1.1, 7.5.1.2 und 7.5.2.2).

Vorbelastungen der HGÜ-Betriebsmittel mit Gleichspannung beeinflussen durch den langsamen Auf- und Abbau der Raumladungen im Isoliersystem und im Bereich des Defekts das Teilentladungsverhalten bei einer darauffolgenden Teilentladungsmessung (Kapitel 7.5.1.4, 7.5.1.5 und 7.5.2.1).

Das Minimum, der Mittelwert und das Maximum der Amplitude und des zeitlichen Abstands der bei den unterschiedlichen Defekten in SF₆ auftretenden TE-Impulse aller Messungen sind in Tabelle 8.1 zusammengefasst. Dabei muss darauf geachtet werden, dass einige dieser charakteristischen Größen infolge der hohen Wiederholraten der TE-Impulse und des fließenden Übergangs der TE-Impulse mit den Impulsen des Grundstörpegels von der Impulsauflösezeit und Triggerschwelle des Messsystems abhängig sind (Kapitel 7.5.2.2 und 7.5.2.3).

Tabelle 8.1: Größenordnungen der Amplitude und des zeitlichen Abstands der untersuchten Defekte

Defekt	Polarität	$ q_{\min} ^b$	$ \bar{q} $	$ q_{\max} $	Δt_{\min}	$\bar{\Delta t}$	Δt_{\max}
Spitze auf Hochspannung	+	0,2 pC	1 pC ^{a,b}	5 pC	5 μ s ^{a,b}	50 ms ^{a,b}	10 s
	-	0,2 pC	5 pC ^{a,b}	20 pC	20 μ s ^{a,b}	1 ms ^{a,b}	10 s
Freies Potential	\pm	0,2 pC	20 pC	1000 pC	1 μ s	500 ms	5 s
Springendes Partikel	\pm	0,2 pC	50 pC	100 pC	2 μ s	20 ms	50 ms
Partikel in Firefly	\pm	0,2 pC	40 pC	500 pC	200 ns ^a	150 μ s ^a	100 ms
Innerer Defekt ^c	\pm	0,2 pC	3 pC	20 pC	1 μ s	5 s	10 min
Partikel auf Isolator ^c	\pm	0,2 pC	1 pC	10 pC	1 μ s	10 ms	10 min

^a Werte werden durch Impulsauflösezeit beeinflusst.

^b Werte werden durch Triggerschwelle beeinflusst.

^c Geringe Anzahl an Messergebnissen. Einfluss von Störimpulsen kann nicht ausgeschlossen werden.

8.2 Detektion von TE-Impulsen bei Gleichspannung

An die Detektion von TE-Impulsen bei Gleichspannung werden in Bezug auf die Auflösung der Amplitude und die Impulsauflösezeit infolge der in Kapitel 8.1 diskutierten Unterschiede im TE-Verhalten und der Charakterisierung und Bewertung der Defekte hohe Anforderungen gestellt.

Die Bandbreite und die damit verbundene Impulsauflösezeit des Messsystems muss geeignet sein, um die auftretenden TE-Impulsfolgen korrekt aufzuzeichnen und Interferenzen bestmöglich zu vermeiden. Gleichzeitig müssen Möglichkeiten für die Filterung von Störsignalen und Methoden zur Unterdrückung von Störimpulsen gegeben sein (Kapitel 4.5 und 7.5.2.5). Bei Wechselspannung

haben Interferenzen und eine zu geringe Impulsauflösezeit nur einen geringen Einfluss auf die Darstellung und die größte wiederholt auftretende Teilentladungsstärke. Die Verarbeitung und Speicherung der detektierten TE-Impulse für eine weitere Auswertung kann bei Impulsfolgen mit hoher Impulswiederholrate große Anforderungen an die Rechenleistung und den Speicher stellen. Die Bewertung von Pulssequenzen bei Gleichspannung erfordert neue und im Vergleich zur Wechselspannung meist rechenintensive Auswertemethoden des TE-Messsystems.

Neben der korrekten Auflösung der TE-Impulse im Bereich der maximal auftretenden Amplituden ist für eine korrekte Charakterisierung der Defekte auch eine Detektion der TE-Impulse im Bereich der niedrigen Amplituden notwendig. Der Dynamikbereich des Messsystems muss in dieser Hinsicht auf die im Betriebsmittel möglichen TE-Impulse, die für eine eindeutige Charakterisierung der Defekte notwendig sind, angepasst sein.

Die verfügbaren Auswerteverfahren bei Gleichspannung sind empfindlich auf Störimpulse. Die Triggerschwelle ist daher zwingend auf ein Level oberhalb der maximal auftretenden Störimpulse des Grundstörpegels zu setzen (Kapitel 7.5.2.3). Durch unterschiedliche Verfahren der Störimpulsunterdrückung ist es möglich, weitere Störimpulse auszublenden (Kapitel 4.5 und 7.5.2.5). Auch die Detektion der korrekten Polarität der einzelnen TE-Impulse kann bei der Erkennung und Darstellung von Störimpulsen und Reflexionen hilfreich sein (Kapitel 7.5.2.4 und 7.5.2.5). Messsysteme mit schmaler Bandbreite sind dazu meist nicht in der Lage.

Ein weiterer Zusammenhang der sich bei der Detektion von TE-Impulsen mit der Bandbreite des Messsystems, ergibt, ist die Impulsauflösezeit. Diese wird durch die Totzeit des Messsystems begrenzt, um eine Doppelerkennung der TE-Impulse aufgrund des gefilterten, überschwingenden und gestreckten Signals zu vermeiden. Bei schnell aufeinanderfolgenden TE-Impulsen können Interferenzen der einzelnen TE-Impulse im Filter bzw. Messsystem auftreten. Dadurch werden mehrere TE-Impulse fälschlicherweise als einzelner TE-Impuls erkannt. Durch die auftretenden Interferenzen wird auch die Amplitude der detektierten TE-Impulse beeinflusst. In bestimmten Sonderfällen ist es möglich, dass sich einzelne schnell aufeinanderfolgende TE-Impulse sowie Impulsfolgen durch destruktive Überlagerung vollständig auslöschen und eine Detektion des Defekts verhindern (Kapitel 4.2, 7.5.1.1, 7.5.2.2 und 7.6.4).

Ein ähnlicher Effekt kann aufgrund von Resonanzphänomenen sowie Dämpfungen, Verzerrungen, Reflexionen und Interferenzen der TE-Impulse besonders an Prüfobjekten mit langen Signalwegen wie Drosseln, Kabeln oder gasisolierten Leitungen und Sammelschienen, beobachtet werden. Dabei kann die Amplitude der detektierten TE-Impulse neben der Bandbreite des Messsystems zusätzlich nichtlinear von Ort des Defekts abhängig sein.

Vor einer Teilentladungsmessung wird bei Wechselspannung zur Ermittlung des Maßstabsfaktors und zum Nachweis einer korrekten Detektion der Amplituden von Impulsfolgen mit einem zeitlichen Abstand im Bereich von Millisekunden eine Kalibrierung des Messkreises und Messsystems gefordert. Die beschriebenen Einflussgrößen wurden bei der Erstellung der unterschiedlichen Normen

für Wechsellspannung berücksichtigt und haben aufgrund der Periodizität der TE-Impulse bei Wechsellspannung meist einen geringeren Einfluss auf das Ergebnis als bei Gleichspannung. Daher sind besonders bei Gleichspannung die Auswirkungen der beschriebenen Effekte und Einflussgrößen sowie die hohe Wiederholrate der TE-Impulse einiger Defekte bei der Detektion von TE-Impulsen zu überprüfen. Die Grenzen sowie korrekten Einstellungen des Messsystems sollten durch eine vergleichende breitbandige Messung ermittelt werden. Der Einfluss der Dämpfung und Verzerrung kann wie bei Wechsellspannung durch den Vergleich der detektierten Kalibrierimpulse, die an unterschiedlichen Stellen am Prüfling eingespeist werden, ermittelt werden. Reflexionserscheinungen und der Einfluss von Interferenzen können mit Doppelimpuls-Kalibratoren durch Betrachtung der Kurvenform der detektierten Impulse und dem Vergleich der Amplitude der Doppelimpulspakete mit unterschiedlichem zeitlichem Abstand kontrolliert werden. Der zeitliche Abstand zwischen den Impulsen sollte dabei im Bereich der möglichen auftretenden TE-Impulsfolgen liegen. Signalgeneratoren mit kontinuierlichen Impulsfolgen, deren zeitlicher Abstand variabel verändert werden kann, können dabei zusätzlich hilfreiche Informationen liefern.

Für eine korrekte Detektion möglichst aller TE-Impulse der Defekte und der Charakterisierung der unterschiedlichen Defekte ist somit eine TE-Messung mit möglichst hoher Bandbreite zielführend.

8.3 Messprozeduren zur Prüfung von HGÜ-Betriebsmitteln

Ziel der TE-Prüfung von HGÜ-Betriebsmitteln ist es, möglichst alle im Isoliersystem vorhandenen Defekte zerstörungsfrei zu erkennen. Dabei sollte die im Betrieb auftretende maximale Beanspruchung des Isoliersystems erreicht werden. Neben der, durch den resistiv-kapazitiven Übergang und den Aufbau von Raumladungen beeinflussten, stark zeitabhängigen Feldverteilung im Isoliermedium ändert sich die Feldverteilung und somit Beanspruchung eines möglichen Defekts mit der Temperaturdifferenz entlang des Isoliersystems (Kapitel 3.3). Zusätzlich zur Festlegung der ausreichenden Prüfdauer und der Prüfspannung sind daher die kritische Temperaturverteilung in der Komponente und Entstehungsprozesse möglicher Oberflächen- und Raumladungen bei der Prüfung zu berücksichtigen. Durch Heizzyklen ist es möglich, die realen temperaturabhängigen Feldverteilungen zu simulieren. Eine Prüfung der gesamten Komponente bei erhöhter Temperatur, unter Beanspruchung mit Röntgenstrahlung kann die elektrischen Zeitkonstanten der resistiv-kapazitiven und raumladungsbedingten Übergangsvorgänge und somit die notwendigen Messzeiten verkürzen. Auch durch eine kurzzeitige Belastung mit erhöhter Prüfspannung ist kann die Zeitdauer zur Detektion eines Defektes verkürzt werden.

Eine Messprozedur zur Prüfung von HGÜ-Betriebsmitteln mit Teilentladungsmessung bei konstanter Gleichspannung ist aufgrund der geringen TE-Aktivität einiger Defekte nicht zielführend. Messungen zeigen, dass Polaritätswechsel die TE-Aktivität provozieren können (Kapitel 7.5.1.4 und 7.5.1.5). Die Geschwindigkeit der Polaritätswechsel ist dabei auf vorhandene Prüfeinrichtungen abzustimmen. Die infolge der Umschaltung und Umladung der beteiligten Komponenten, sowie die durch Abfließen

der Oberflächen- und Raumladungen hervorgerufenen Störimpulse sind zu vermeiden oder zu dämpfen und dürfen bei der Auswertung nicht berücksichtigt werden (Kapitel 7.5.1.4).

Der Einfluss und das Zusammenspiel der beteiligten Isoliermedien und die unterschiedlichen Zeitkonstanten erfordern eine Anpassung der Messprozeduren auf die jeweiligen Isoliersysteme der unterschiedlichen Betriebsmittel und deren real auftretenden Beanspruchungen. Zur Erkennung und Charakterisierung aller Defekte ist daher eine Messprozedur mit Polaritätswechsel und unterschiedlichen Heizzyklen erfolgversprechend.

8.4 Auswertung der TE-Pulssequenzen zur Charakterisierung von Defekten

8.4.1 Charakteristische Größen und Akzeptanzkriterium

Die Definition der Einsetzspannung für Wechselfeldspannung gemäß der Norm IEC 60270 kann für Gleichspannung nicht übernommen werden. Für die korrekte Bestimmung ist eine stufenweise Erhöhung der Spannung zielführend. Die Stufendauer muss dabei so gewählt werden, dass ein Übergang in eine quasistationäre Feldverteilung im Isoliermedium sichergestellt wird. Die Zeitdauer des Übergangs wird durch die Leitfähigkeit des Isoliermediums und Oberflächen- sowie Raumladungsansammlungen bestimmt (Kapitel 3.3) und kann, besonders bei festen Isolierstoffen, lange Messzeiten in Anspruch nehmen. Beim Übergang von der elektrostatischen Feldverteilung zum quasistationären Strömungsfeld, können je nach den beteiligten Isoliermedien, Störimpulse und auch defektabhängige Teilentladungen auftreten. Ob diese auftretenden TE-Impulse für die Auswertung der Einsetzspannung bei Gleichspannung herangezogen werden sollen, muss für das jeweilige Isoliersystem in Bezug auf die möglichen Quellen und die Auswirkungen dieser Teilentladungen auf die Beanspruchung des Isoliermediums abgewogen werden. In der Literatur wurden für unterschiedliche Defekte Definitionen festgelegt, die auf einer Anzahl von TE-Impulsen über einer Triggerschwelle pro Zeitdauer bei konstanter Gleichspannung basieren (Kapitel 5.1). Bei den in Kapitel 7.5.1 beschriebenen Untersuchungen hat sich für die Defekte, Spitze auf Hochspannung, freies Potential und freie metallische Partikel, die Definition über drei TE-Impulse in einem Zeitfenster von 30 Sekunden bewährt.

Bei der Auswertung und Beurteilung der gemessenen Daten muss aus den grundlegenden Kenngrößen der Pulssequenzen eine davon abgeleitete Kenngröße, die repräsentativ für die Kritikalität des Defekts ist, bestimmt werden. Eine Gewichtung der TE-Impulsfolge gemäß der IEC 60270 zur „größten wiederholt auftretenden Teilentladungsstärke“ ist aufgrund der stark schwankenden TE-Impulswiederholrate nicht zielführend (Kapitel 5.1). Bisher werden in der Literatur für den Vergleich von unterschiedlichen Defekten und zur Beschreibung des Teilentladungsverhaltens statistische Parameter wie der Mittelwert oder das Maximum der Amplitude und der zeitliche Abstand der TE-Impulse herangezogen. Diese Kenngrößen werden jedoch von Störimpulsen und

den Einstellungen des Messsystems stark verändert (Kapitel 7.5.2.2, 7.5.2.3 und 7.5.2.5). Messungen an einer Spitze auf Hochspannung in Luft und Isolatoren mit Hohlraum in unterschiedlichen Laboren zeigten, dass auch die Reproduzierbarkeit dieser Kenngrößen, selbst bei identischen Defekten, Messsystemen, Einstellungen und Messprozeduren, nicht gegeben ist [Har+17; Har+19].

Kenngrößen der Kurvenform der einzelnen TE-Impulse werden teilweise in der Literatur zur Bewertung von Teilentladungen herangezogen. In der Praxis sind diese durch die Veränderung der Kurvenform aufgrund des Signalwegs nur für die Trennung von mehreren gleichzeitig auftretenden Defekten und zur Störpulsunterdrückung hilfreich (Kapitel 3.1, 4.6 und 7.5.4).

Als Akzeptanzkriterium für die Prüfung von HGÜ-Betriebsmittel mit beteiligter Teilentladungsmessung gemäß IEC 60270 bei Gleichspannung ist bisher in unterschiedlichen Normen eine maximale Anzahl an TE-Impulsen größer einer bestimmten Amplitude in einem definierten Zeitfenster festgelegt (Kapitel 5.2). Messungen an handelsüblichen Kondensatoren für Gleichspannung zeigten, dass die Anzahl der detektierten TE-Impulse sowie die Amplitude stark von den Einstellungen des Messsystems, wie z. B. der Bandbreite und dem Prüfaufbau abhängen (Kapitel 7.5.2.2). Die Festlegung von Akzeptanzkriterien, die auf einer Auswertung und Bewertung von einzelnen TE-Impulsen beruhen, ist daher zu hinterfragen. Im Besonderen müssen dabei der genaue Messfrequenzbereich und die Totzeit definiert und auf die jeweilige Komponente sowie den Messaufbau abgestimmt sein, da das Ergebnis zusätzlich durch unterschiedliche Laufwege der TE-Impulse vom Defekt bis zum Messsystem maßgeblich beeinflusst werden kann.

Die wichtigste und bisher nicht vollständig geklärte Frage bezüglich aussagekräftiger TE-Kenngrößen, welche repräsentativ für die Kritikalität eines Defekts ist, sowie den Anforderungen der Unempfindlichkeit auf Störimpulse und Unabhängigkeit von Einstellungen des Messgeräts gerecht wird, ist durch umfangreiche Untersuchungen an unterschiedlichen Isoliersystemen zu beantworten. Ähnlich wie die Gewichtung gemäß der IEC 60270 für Wechselspannung könnte in diesem Zusammenhang eine Funktion bzw. Gewichtung der Pulssequenzen für eine DC-TE-Kenngröße entwickelt werden.

8.4.2 Charakterisierung der Defekte mithilfe der NoDi*-Diagramme und deren Einflussgrößen

Die neu entwickelten NoDi*-Diagramme ermöglichen eine einfache und durch menschliche Experten erfassbare Darstellung der Pulssequenzen, welche eine physikalische Interpretation und Charakterisierung der Messergebnisse erlaubt. Durch die unterschiedlich gefüllten Bereiche in den NoDi*-Diagrammen ist eine Erkennung der Abfolge von Impulsen der aufgenommenen Pulssequenzen möglich. Neben dem Zusammenhang der differenzierten Amplitude und dem zeitlichem Abstand mit deren Vorgängerwerten werden diese Parameter auch vergleichend gegenübergestellt (Kapitel 6). Die daraus entstehenden drei NoDi*-Diagramme, das NoDi_Q*, NoDi_T*- und NoDi_{Q-T}*

Diagramm, besitzen je nach analysierter Pulssequenz besondere Vorteile bei der Charakterisierung von Defekten und bei der Erkennung von Störimpulsen (Kapitel 6.3).

Mithilfe der NoDi*-Diagramme ist es möglich, die Defekte, Spitze auf Hochspannung, Freies Potential sowie Springendes metallische Partikel und das Partikel in Firefly zu identifizieren (Kapitel 7.5.1). Neben diesen Defekten können auch unterschiedliche Störquellen, wie beispielsweise Störimpulse von der Wechselspannungsseite oder von Gleichrichtern, erkannt werden (Kapitel 7.5.2.5). Dabei müssen einige Einflussfaktoren wie eine für die möglichen Defekte ausreichende Impulsauflösezeit und ein ausreichender Dynamikbereich des Messgeräts berücksichtigt werden (Kapitel 4.5, 6.4 und 7.5.2). Basierend auf den in dieser Arbeit untersuchten Defekten wird für eine eindeutige Charakterisierung dieser Defekte und von Störimpulsen mithilfe der NoDi*-Diagramme eine erforderliche Impulsauflösezeit von mindestens 1 μ s abgeschätzt. Für eine genaue physikalische Interpretation der TE-Impulsfolgen der untersuchten Defekte ist eine Impulsauflösezeit von mindestens 300 ns notwendig. Diese Impulsauflösezeiten können beim verwendeten Messsystem mit einer Bandbreite von 1 MHz bzw. 3 MHz bewerkstelligt werden.

Störimpulse können das Erscheinungsbild der NoDi*-Diagramme verzerren und eine Charakterisierung der Defekte verhindern. Die Auswirkungen der Störimpulse hängen dabei stark vom Anteil an der gesamten Pulssequenz ab. Überschreitet dieser ca. 10 % nicht wesentlich und ist die Amplitude der Störimpulse kleiner oder gleich der Amplitude der TE-Impulse, bleibt das grundsätzliche Erscheinungsbild der NoDi*-Diagramme erhalten. Einzelne Störimpulse mit Amplituden, die signifikant höher sind als die maximalen Amplituden der TE-Impulse, sowie Pausen der TE-Aktivität, führen zu einer Stauchung der NoDi*-Diagramme. Dies kann durch die Vorgabe fester Grenzen der Achsen behoben werden.

Die logarithmische Farbskala der Stapelhöhe und Normierung auf Einträge pro Minute ermöglicht ein eindeutiges Erkennen von Häufungspunkten und einen direkten Vergleich von Messungen mit unterschiedlicher Messdauer.

Die Anzahl der notwendigen TE-Impulse zur Erzeugung von charakteristischen NoDi*-Diagrammen hängt stark vom jeweiligen Defekt und der Ausprägung der Häufungspunkte ab. Für aussagekräftige NoDi*-Diagramme welche die untersuchten Defekte charakterisieren wird die Anzahl von TE-Impulsen mit mindestens 1000 abgeschätzt. Ist die Anzahl geringer bilden sich Häufungspunkte in den NoDi*-Diagrammen nur schwach aus und eine eindeutige Unterscheidung der Defekte ist nicht in allen Fällen möglich. Bei den meisten Defekten ist diese Anzahl an Impulsen innerhalb einer Messdauer von wenigen Sekunden bis Minuten erreicht. Lediglich bei inneren Defekten und dem Partikel auf Isolator sind hierfür lange Messzeiten erforderlich.

Zur Unterstützung der Charakterisierung von TE-Defekten anhand der NoDi*-Diagramme können unterschiedliche Methoden des maschinellen Lernens hilfreich sein (Kapitel 6.5 und 7.5.3). Bei einer statistischen Auswertung der Pulssequenzen und Weiterverarbeitung mit Algorithmen des maschinellen Lernens ist eine Charakterisierung von drei der untersuchten Defekten mit von Störimpulsen befreiten Datensätzen die 10 TE-Impulse beinhalten möglich. Gegenüber der Cha-

rakterisierung der Defekte mit den NoDi*-Diagrammen und einem menschlichen Experten sind daher entsprechend weniger Daten notwendig. Hinsichtlich unvorhersehbarer Störimpulse und den unterschiedlichen Einflussgrößen auf die gemessenen Pulssequenzen auf die der Algorithmus nicht trainiert werden kann, sowie bei der Fehlersuche und physikalischen Interpretation bietet die Anwendung der NoDi*-Diagramme und Charakterisierung mithilfe eines menschlichen Experten jedoch wesentliche Vorteile.

Besonders bei Defekten wie Hohlräumen in Isolatoren oder Partikeln auf Isolatoren ist aufgrund der geringen Anzahl an auftretenden TE-Impulsen und der schwierigen Unterscheidung zu Störimpulsen eine Darstellung der Defekte mit den NoDi*-Diagrammen nicht möglich. Durch Messprozeduren mit Polaritätswechsel und die Auswertung der von Störimpulsen getrennten TE-Impulse während und kurz nach einem Polaritätswechsel oder während Spannungsänderungen könnte die Charakterisierung dieser Defekte ermöglicht werden (Kapitel 7.5.1.4 und 7.5.1.5).

9 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit behandelt das Thema der Teilentladungsmessung bei Gleichspannung unter besonderer Berücksichtigung der Bewertung und Charakterisierung von typischen Defekten in gasisolierten Systemen.

Ausgehend von einem Überblick über die Entwicklung der weltweiten HGÜ-Verbindungen und Ausblick zu den HGÜ-Netzen der Zukunft wird im speziellen auf gasisolierte Systeme für Gleichspannung und auf deren typische Defekte eingegangen. Für einen wirtschaftlichen Betrieb dieser Netze und Übertragungstrecken ist die Prüfung und die Kenntnis des aktuellen Zustands der beteiligten Betriebsmittel von großer Bedeutung. Dabei übernimmt die Teilentladungsmessung eine wichtige Rolle. Die Möglichkeiten zur Erkennung und Bewertung von Defekten in gasisolierten Systemen durch die Teilentladungsmessung werden aufgezeigt. Zusätzlich werden im theoretischen Teil der Arbeit die grundlegenden physikalischen Vorgänge bei Teilentladungen, die Verteilung des elektrischen Feldes im Isoliersystem sowie die in der Literatur beschriebenen unterschiedlichen Modelle von äußeren und inneren Teilentladungen zusammengefasst. Die für gasisolierte Systeme relevanten TE-Messmethoden und Kenngrößen der Teilentladungsmessung werden dargelegt und auf die allgemeinen Anforderungen an die Teilentladungsmessung bei Gleichspannung wird in einem weiteren Kapitel genauer eingegangen. Nach der Zusammenfassung der in der Literatur beschriebenen Auswertemethoden für Teilentladungen bei Gleichspannung werden die neu entwickelten NoDi*-Diagramme vorgestellt und charakterisiert sowie ein Ansatz für die automatische Klassifizierung der Defekte für Monitoringsysteme dargestellt.

Die NoDi*-Diagramme erlauben eine physikalische Interpretation der gemessenen TE-Pulssequenzen bei Gleichspannung und eine Charakterisierung von drei typischen Defekten gasisolierter Systeme. Erprobt und verifiziert wurde die NoDi*-Diagramme mit der konventionellen TE-Messung und der UHF-TE-Messung an den typischen Defekten gasisolierter Systeme. Ein besonderes Augenmerk wurde dabei auf das unterschiedliche TE-Verhalten der Defekte bei verschiedenen Messprozeduren mit Gleichspannung gelegt und Einflussfaktoren sowie auftretende physikalische Effekte wurden genauer untersucht.

Die Ergebnisse der Arbeit liefern einen Beitrag zur Charakterisierung und Bewertung von Defekten gasisolierter Systeme bei Gleichspannung. Durch die Beobachtungen des TE-Verhaltens der Defekte bei den unterschiedlichen Messprozeduren und durch die aufgezeigten allgemeinen Einflussfaktoren auf die TE-Messung können Ansätze für die Entwicklung von Prüfprozeduren, Akzeptanzkriterien und Monitoringsystemen abgeleitet werden.

TE-Verhalten und charakteristische Größen typischer Defekte bei Gleichspannung

Die TE-Messungen wurden an Testzellen mit unterschiedlichen Defekten in SF₆ gemäß der Norm IEC 60270 und mithilfe der UHF-TE-Messung an einer GIS-Sammelschiene durchgeführt. Zur Detektion und Aufzeichnung der Pulssequenzen kam das MPD 600 der Firma Omicron zur Anwendung. Für die Auswertung der Messdaten sowie zur Erstellung der in der Literatur zu findenden Darstellungsarten und im Besonderen zur Entwicklung der NoDi*-Diagramme wurde ein Software-Tool entwickelt. Ein Überblick der charakteristischen NoDi*-Diagrammen ist im Anhang zu finden. Das typische Teilentladungsverhalten und die charakteristischen Muster der NoDi*-Diagramme der unterschiedlichen Defekte können folgendermaßen zusammengefasst werden:

Spitze auf Hochspannung

- Die Einsetzspannung ist eindeutig bestimmbar und unabhängig von der gewählten Messprozedur oder von der Vorbelastung.
- Das Verhalten bei konstanter Gleichspannung ist durch stochastisch auftretende TE-Impulse und eine breite Streuung der Amplitude gekennzeichnet. Im Bereich der Einsetzspannung ist eine unregelmäßige, teilweise aussetzende und wiederkehrende TE-Aktivität zu beobachten.
- Spannungsänderungen oder Polaritätswechsel haben keinen Einfluss auf das TE-Verhalten bei darauffolgender konstanter Gleichspannung.
- In bestimmten Spannungsbereichen ist eine Abnahme der Amplitude der TE-Impulse und teilweises Aussetzen der TE-Aktivität zu erkennen. Grund dafür ist die Koronastabilisierung oder eine fehlerhafte Messung des Messsystems aufgrund der begrenzten Messbandbreite.
- Die NoDi*-Diagramme sind durch charakteristische Dreiecke in allen drei unterschiedlichen NoDi*-Diagrammen gekennzeichnet.

Freies Potential

- Die Einsetzspannung ist bei der untersuchten Anordnung eindeutig bestimmbar und zeigt keine Abhängigkeit von der gewählten Messprozedur oder entladungsfreien Vorbelastung.
- Charakteristisch für das TE-Verhalten des freien Potentials bei konstanter Gleichspannung sind wiederholende Impulsfolgen mit einer breiten Streuung der zeitlichen Abstände der TE-Impulse.
- Bei bestimmten geometrischen Anordnungen der Elektroden auf freiem Potential traten bei konstanter Gleichspannung ohne vorhergehenden Teilentladungen Durchschläge auf. Zur Detektion dieser Defekte kann eine Messprozedur mit Spannungsänderungen oder Polaritätswechsel mit einer Auswertung der TE-Impulse während des Übergangs hilfreich sein.
- Die NoDi_Q*- und NoDi_{QT}*-Diagramme weisen feine Strukturen auf. Im NoDi_T*-Diagramm bildet sich aufgrund der breiten Streuung der zeitlichen Abstände der TE-Impulse ein Dreieck.

Freie metallische Partikel

- Die Einsetzspannung ist eindeutig bestimmbar und zeigt keine Abhängigkeit von der gewählten Messprozedur oder entladungsfreien Vorbelastung.

- Zwei unterschiedliche Effekte mit sich wiederholenden Impulsfolgen sind zu beobachten. Zum einen das Springen des Partikels mit Pseudoresonanz zwischen den Elektroden, welches durch drei unterschiedliche Amplitudenbänder der TE-Impulse zu erkennen ist. Sowie der Firefly-Effekt an der Elektrode mit negativer Polarität, welcher periodisch auf- und abklingende Amplituden und eine TE-Impulswiederholrate im Bereich von 10^6 Impulsen pro Sekunde zeigt.
- Nach Spannungsänderungen oder Polaritätswechsel stellt sich nach einer Übergangszeit im Bereich von Millisekunden ein von der Vorbelastung unabhängiges TE-Verhalten ein.
- Die Art des auftretenden Effekts ist von der Geometrie des Partikels und vom Gasdruck abhängig. Der Firefly-Effekt zeigt sich bei der verwendeten Testzelle ausschließlich an scharfkantigen Partikeln und bei einem Gasdruck kleiner gleich 0,1 MPa.
- Die NoDi*-Diagramme der springenden Partikel sind durch ausgeprägte Häufungspunkte im Bereich der Zeitkonstante der Pseudoresonanz und im Bereiche der Differenzen der beiden Amplitudenbänder gekennzeichnet. Beim Firefly-Effekt entsteht eine Überlagerung der feinen Strukturen ähnlich dem freien Potential und den Dreiecken der Spitze auf Hochspannung.

Innere Defekte

- Die Einsetzspannung ist aufgrund der langen Zeitkonstanten beim Übergang der Verteilung des elektrischen Feldes von der Stufendauer der Messprozedur und der Vorbelastung abhängig und erfordert für die korrekte Bestimmung lange Messzeiten. Zusätzlich sind infolge der geringen Anzahl an TE-Impulsen, Methoden zur Störimpulsunterdrückung notwendig.
- Bei konstanter Gleichspannung ist die Anzahl der auftretenden TE-Impulse gering und ändert sich über der Messzeit. Die Vorbelastung der Isolatoren hat zusätzlich einen starken Einfluss auf das TE-Verhalten bei darauffolgender konstanter Gleichspannung. Durch Polaritätswechsel werden TE-Impulse des Defekts auch für längere Zeit nach dem Polaritätswechsel hervorgerufen.
- Eine Eindeutigkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse konnte bei den untersuchten Defekten nicht festgestellt werden.
- Eine Auswertung der Pulssequenzen mit dem NoDi*-Diagrammen ist aufgrund der geringen Anzahl an TE-Impulsen, der beteiligten Störimpulse und der fehlenden Reproduzierbarkeit nicht zielführend.

Partikel auf Isolator

- Bei konstanter Gleichspannung und Spannungsstufen gleicher Polarität konnten keine TE-Impulse detektiert werden.
- Durch einen Polaritätswechsel nach jeder Spannungsstufe konnten TE-Impulse auch für längere Zeit nach dem Polaritätswechsel hervorgerufen werden. Die Amplitude und Anzahl der TE-Impulse nimmt anschließend über der Zeit ab.
- Die Ergebnisse der untersuchten Defekte waren trotz gleichbleibender Prüfbedingungen nicht reproduzierbar.
- Die NoDi*-Diagramme zeigten aufgrund der zeitlichen Veränderungen in der Pulssequenz, der beteiligten Störimpulse und der fehlenden Reproduzierbarkeit keine charakteristischen Muster.

Die NoDi*-Diagramme erlauben die Charakterisierung der TE-Defekte, „Spitze auf Hochspannung“, „Freies Potential“ und „Freies metallisches Partikel“ sowie das Erkennen von typischen Störquellen. Eine Trennung und separate Auswertung von gleichzeitig auftretenden Defekten, welche TE-Impulse in unterschiedlichen Frequenzbereichen erzeugen, ist mithilfe der synchronen Mehrfrequenz-TE-Messung möglich. Die NoDi*-Diagramme der UHF-TE-Messung sind mit den Ergebnissen der konventionellen TE-Messung gleichzusetzen, solange die Impulsauflösezeit des Messsystems die Impulswiederholrate der Defekte abdeckt. Auch eine automatische Klassifizierung der untersuchten Defekte mithilfe von unterschiedlichen Features und Methoden des Maschinellen Lernens ist möglich. Mit 98,3% korrekt klassifizierten Datensätzen lieferte dabei der DT-Algorithmus mit statistischen Parametern als Feature die besten Ergebnisse.

Einflussfaktoren auf das Ergebnis der Teilentladungsmessung bei Gleichspannung

Bei der Messung und Aufzeichnung der Pulssequenzen zur Erstellung der NoDi*-Diagramme und korrekten Klassifizierung der Defekte sowie bei der Entwicklung einer Messprozedur zur Prüfung von HGÜ-Betriebsmitteln sind folgende Einflussfaktoren zu berücksichtigen:

- Für Untersuchungen bei reiner Gleichspannungsbeanspruchung muss der Übergang vom kapazitiven zum resistiven Feld abgewartet werden. Auch die Vorbelastung des Defekts bzw. Prüflings hat einen zeitabhängigen Einfluss auf das TE-Verhalten einiger Defekte. Diese Abhängigkeit kann zur Detektion von Defekten wie z. B. dem Partikel auf Isolator beitragen.
- Die Bandbreite des Messsystems beeinflusst die TE-Kenngrößen, sobald die TE-Impulswiederholrate die Impulsauflösezeit des Messsystems überschreitet. Die Ergebnisse von Prüfungen und das Erscheinungsbild der NoDi*-Diagramme werden dadurch verändert. Die Bandbreite ist daher auf die bei den möglichen Defekten maximal auftretende TE-Impulswiederholrate anzupassen.
- Die Triggerschwelle muss eine Trennung der Störimpulse des Grundstörpegels von den TE-Impulsen gewährleisten. Heben sich die Amplituden der TE-Impulse nicht ausreichend von den Amplituden der Störimpulse ab, so hat eine Veränderung der Triggerschwelle eine Beeinflussung der TE-Kenngrößen zufolge. Bei vergleichenden Messungen ist daher ein genauer Wert der Triggerschwelle festzulegen.
- Der Dynamikbereich des Messsystems muss ausreichend groß sein, um die vom Defekt verursachten TE-Impulse mit niedriger als auch hoher Amplitude korrekt zu detektieren. Kann dies nicht gewährleistet werden, erzielt für die Charakterisierung mithilfe der NoDi*-Diagramme die Variante mit übersteuertem Verstärker die akzeptabelsten Ergebnisse.
- Durch Reflexionen im Prüfobjekt oder Prüfaufbau können die reflektierten TE-Impulse als eigenständige TE-Impulse erkannt oder eine Überlagerung hervorrufen. Durch eine entsprechende Totzeit des Messsystems, eine Dämpfung oder ein Abschluss im Messaufbau und entsprechender Filterung bei der Datenauswertung kann dies verhindert werden.
- Störimpulse haben einen direkten Einfluss auf die TE-Kenngrößen und das Erscheinungsbild der NoDi*-Diagramme. Die NoDi*-Diagramme behalten meist ihr charakteristisches Muster, solange der Anteil an Störimpulsen ca. 10% der Anzahl an TE-Impulse nicht überschreitet.

- Bei einigen untersuchten Defekten konnten aufgrund von Raumladungen im Bereich des Defekts Schwankungen im TE-Verhalten und teilweise aussetzende und wiederkehrende TE-Aktivität beobachtet werden. Um eine Charakterisierung des Defekts zu ermöglichen, sind diese Bereiche der Pulssequenz separat auszuwerten.
- Die unterschiedlichen Entladungsverhalten bei verschiedenen Gasarten erzeugen Unterschiede in den NoDi*-Diagrammen. Die für die Defekte charakteristischen Muster bleiben jedoch erhalten.
- Zur Erstellung von ausgeprägten und für die Defekte eindeutigen NoDi*-Diagrammen ist eine Pulssequenz mit mindestens 1000 TE-Impulsen notwendig.

Eigenschaften, Messprozeduren, Darstellungsarten und Akzeptanzkriterien der Teilentladungsmessung bei Gleichspannung

Zusammenfassend können aus den Untersuchungen der unterschiedlichen Darstellungsarten der Pulssequenzen sowie den TE-Messungen und den Beobachtungen des TE-Verhaltens der typischen Defekte von gasisolierten Systemen bei Gleichspannung folgende Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst werden:

- Im Vergleich zu Wechselspannung unterscheidet sich das TE-Verhalten der typischen Defekte bei Gleichspannung hinsichtlich der Anzahl und Amplitude der auftretenden TE-Impulse. Bei einigen Defekten ist eine Abhängigkeit von der Messdauer und Vorbelastung festzustellen.
- Die NoDi*-Diagramme ermöglichen es die Ergebnisse der TE-Messung bei Gleichspannung darzustellen, physikalisch zu interpretieren sowie drei der fünf typischen Defekte von gasisolierten Systemen und Störquellen mit unterschiedlichen TE-Messmethoden eindeutig zu charakterisieren. Die in der IEC 60270 beschriebenen Darstellungsarten sind hierfür unzureichend.
- An das Messsystem sind bei der Erfassung der TE-Impulse bei Gleichspannung zur Charakterisierung der Defekte hohe Anforderungen in Bezug auf die Impulsauflösezeit, die Polaritätserkennung, den Dynamikbereich und die Störimpulsunterdrückung gestellt. Die korrekte Detektion der von den möglichen Defekten verursachten schnellen Impulsfolgen ist auch im Zeitbereich im Zuge der IEC 60270 konformen Kalibrierung des Messaufbaus zu überprüfen. Die ausschließliche Ermittlung des Maßstabsfaktors und der Nachweis der Detektion eines bestimmten Ladungswertes eines Impulses oder eines Doppelimpulspakets sind nicht ausreichend.
- Die Begrenzung der Bandbreite des Messsystems gemäß der Empfehlung nach IEC 60270 ist bei TE-Impulsfolgen eines Defekts mit Wiederholraten im Bereich der Impulsauflösezeit zu hinterfragen. In diesem Fall sollten die Ergebnisse mit einem Messsystem mit entsprechender Bandbreite überprüft werden.
- Die Aussagekraft der NoDi*-Diagramme, die erfassten primären und daraus abgeleiteten TE-Kenngrößen und die bisher angewandten Akzeptanzkriterien sind von unterschiedlichen Einflussgrößen und von Einstellungen des Messsystems abhängig. Bei der Definition von Akzeptanzkriterien sind daher für eine eindeutige und reproduzierbare Aussage exakte Einstellungen bzw. Anforderungen an die TE-Messung festzulegen und die TE-Kenngrößen müssen klar definiert sein.

- Bei der Entwicklung von Messprozeduren zur TE-Messung an HGÜ-Betriebsmittel ist die reale Beanspruchung und Feldverteilung im Isoliersystem zu berücksichtigen. Dabei ergeben sich aus den physikalischen Zeitkonstanten der Isoliermedien und der geringen TE-Aktivität einiger Defekte lange notwendige Messzeiten. Mehrere Spannungsrampen mit Polaritätswechsel können die Messzeiten verkürzen und eine Erkennung aller Defekte ermöglichen.

Ausblick auf die TE-Messung bei Gleichspannung

Die Teilentladungsmessung bei Gleichspannung wird als Diagnosemethode bei der Prüfung, der Zustandsbewertung und dem Monitoring von HGÜ-Komponenten eine immer wichtigere Rolle übernehmen. Dafür sind neben Methoden zur Charakterisierung von verschiedenen TE-Defekten für die Bewertung der Kritikalität dieser Defekte in unterschiedlichen Isoliermedien bei Gleichspannung aussagekräftige TE-DC-Kenngrößen zu entwickeln. Diese Kenngrößen sollten den Anforderungen hinsichtlich der Unempfindlichkeit auf Störimpulse und der Unabhängigkeit von Einstellungen des Messsystems gerecht werden. In diesem Zusammenhang wäre ähnlich wie die Gewichtung der Pulssequenz gemäß der IEC 60270 für Wechselspannung („größte wiederholt auftretenden Teilentladungsstärke“) eine durch umfangreiche Untersuchungen an unterschiedlichen Isoliersystemen entwickelte Gewichtungsfunktion der Pulssequenzen für eine DC-TE-Kenngröße zielführend, die von den beschriebenen Einflussgrößen unabhängig und auf Störimpulse unempfindlich ist.

Das TE-Pulssequenzen während Spannungsänderungen oder beim Polaritätswechsel könnten wichtige Hinweise bei der Charakterisierung und Bewertung der Defekte, „Partikel auf Isolator“ und „Innerere Defekte“ liefern. Dafür sind Methoden und Messaufbauten zur eindeutigen Trennung von TE-Impulsen und während der Spannungsänderung bzw. des Polaritätswechsels auftretenden Störimpulsen zu entwickeln.

Unterschiedliche Methoden des maschinellen Lernens können die Charakterisierung der Defekte in Expertensystemen für das Monitoring bewerkstelligen und die Charakterisierung durch einen menschlichen Experten unterstützen. Neben der Qualität der Messdaten hängt der Erfolg dieser Systeme zusätzlich stark von Methoden zur Unterdrückung von Störimpulsen ab.

Literatur

- [Abb19] ABB: "Tomorrow's HVDC Grid - ABB's Hybrid HVDC Breaker", News and Highlights Online, www.new.abb.com/systems/hvdc/tomorrow-s-hvdc-grid, 30.10.2019
- [Ach+05] Achatz N., Gorablenkow J., Schichler U., Hampton B. and Pearson J.: "Features and Benefits of UHF Partial Discharge Monitoring Systems for GIS", International Symposium on Electrical Insulating Materials, pp. 722-725, Kitakyushu, Japan, 2005
- [Ach+08] Achillides Z., Georghiou G. and Kyriakides E.: "Partial Discharges and Associated Transients: The Induced Charge Concept Versus Capacitive Modeling", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 15, No. 6, pp. 1507-1516, 2008
- [Ald+17] Aldrian R., Montanari G. C., Cavallini A. and Suwarno H.: "Signal Separation and Identification of Partial Discharge in XLPE Insulation under DC Voltage", 1st International Conference on Electrical Materials and Power Equipment, pp. 53-56, Xi'an, China, 2017
- [Asa+97] Asano K., Anno K. and Higashiyama Y.: "The Behavior of Charged Conducting Particles in Electric Fields", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, No. 3, pp. 679-686, 1997
- [ASTM13] ASTM D1868-13: "Test Method for Detection and Measurement of Partial Discharge Pulses in Evaluation of Insulating Systems", 2013
- [Aus+44] Austen A. and Hackett W.: "Internal Discharges in Dielectrics: Their Observation and Analysis", Journal of the Institution of Electrical Engineers - Part I: General, Vol. 91, No. 44, pp. 298-312, 1944
- [Aus+76] Austin J. and James R.: "On-Line Digital Computer System for Measurement of Partial Discharges in Insulation Structures", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 11, No. 4, pp. 129-139, 1976
- [Aus19] Austrian Power Grid: „Netzentwicklungsplan 2019 für das Übertragungsnetz der Austrian Power Grid AG“, 2019
- [Bac16] Backhaus K.: „Das dielektrische Verhalten der Öl-Papier-Isolierung bei Belastung mit hoher Gleichspannung“, Dissertation, Technische Universität Dresden, 2016
- [Bei+98] Beierl O., Hücker T., Katschinski U., Neumann C., Ostermaier A. and Rudolph T.: "Intelligent Monitoring and Control Systems for Modern AIS and GIS Substations", Cigre Session Paris, Report 34-113, 1998
- [Bev85] Bever R. S.: "Ramp Technique for DC Partial Discharge Testing", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 20, No. 1, pp. 38-46, 1985
- [Bey02] Beyer J.: "Space Charge and Partial Discharge Phenomena in High Voltage DC Devices", PhD Thesis, Delft University of Technology, 2002
- [Cac+96] Cacciari M., Contin A., Mazzanti G. and Montanari G. C.: "Identification and Separation of Two Concurrent Partial Discharge Phenomena", Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 476-479, Millbrae, USA, 1996
- [Cas+19] Castro Heredia L. C. and Mor A. R.: "HFCT-Based Detection of Partial Discharge Currents on GIS Enclosures", 2nd International Conference on Electrical Materials and Power Equipment, pp. 102-105, Guangzhou, China, 2019

- [Cav+05] Cavallini A., Montanari G. C., Puletti F. and Contin A.: "A new Methodology for the Identification of PD in Electrical Apparatus: Properties and Applications", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12, No. 2, pp. 203-215, 2005
- [Cav+08] Cavallini A., Chen X., Niu H. and Montanari G. C.: "Strategies for PD Source Identification in HVDC Systems", International Conference on High Voltage Engineering and Application, pp. 649-652, Chongqing, China, 2008
- [Cav+11] Cavallini A., Montanari G., Tozzi M. and Chen X.: "Diagnostic of HVDC Systems Using Partial Discharges", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 18, No. 1, pp. 275-284, 2011
- [Cha+91] Chang J.-S., Lawless P. A. and Yamamoto T.: "Corona Discharge Processes", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 19, No. 6, pp. 1152-1166, 1991
- [Che+16] Chen Z. N., Liu D., Nakano H., Qing X. and Zwick T.: "Handbook of Antenna Technologies", Springer Science+Business Media Singapore, 2016
- [Che+17] Chen M., Liu X., Ma J., Zhang L., Wen T. and Zhu Z.: "Defect Diagnosis of HVDC Bushings based on SF₆ Decomposition and Partial Discharge Characteristics", 1st International Conference on Electrical Materials and Power Equipment, pp. 675-679, Xi'an, China, 2017
- [Che+19] Chen S., Li K. and Nijdam S.: "Transition Mechanism of Negative DC Corona Modes in Atmospheric Air: From Trichel Pulses to Pulseless Glow", Plasma Sources Science and Technology, Vol. 28, No. 5, pp. 550-560, 2019
- [Cig69] Cigre WG 23-01: "Recognition of Discharges", Cigre Electra, No. 11, pp. 39-61, 1969
- [Cig98] Cigre WG 15.03: "Cigre Data Format for GIS Partial Discharge Software Application", Cigre Electra, No. 177, pp. 86-93, 1998
- [CTB366] Cigre WG D1.33: "Guide for Partial Discharge Measurements in Compliance to IEC 60270", Cigre Technical Brochure No. 366, 2008
- [CTB406] Cigre JWG A2/B4.28: "HVDC Converter Transformers - Design Review, Test Procedures, Ageing Evaluation and Reliability in Service", Cigre Technical Brochure No. 406, 2010
- [CTB444] Cigre WG D1.33: "Guidelines for Unconventional Partial Discharge Measurements", Cigre Technical Brochure No. 444, 2010
- [CTB506] Cigre WG D1.03.: "Gas Insulated System for HVDC: DC Stress at DC and AC Systems", Cigre Technical Brochure No. 506, 2012
- [CTB525] Cigre WG D1.03: "Risk Assessment on Defects in GIS based on PD Diagnostics", Cigre Technical Brochure No. 525, 2013
- [CTB533] Cigre WG B4-52: "HVDC Grid Feasibility Study", Cigre Technical Brochure No. 533, 2013
- [CTB646] Cigre JWG A2/D1.41: "HVDC Transformer Insulation: Oil Conductivity", Cigre Technical Brochure No. 646, 2016
- [CTB654] Cigre WG D1.25: "UHF Partial Discharge Detection System for GIS: Application Guide for Sensitivity Verification", Cigre Technical Brochure No. 654, 2016
- [CTB662] Cigre WG D1.37: "Guidelines for Partial Discharge Detection using Conventional (according IEC 60270) and Unconventional Methods", Cigre Technical Brochure No. 662, 2016
- [Coo+77] Cooke C. M., Wootton R. E. and Cookson A. H.: "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

- [Cor+16] Corr E., Siew W. H. and Zhao W.: "Long Term Testing and Analysis of Dielectric Samples under DC Excitation", IEEE Electrical Insulation Conference, pp. 484-487, Montreal, Canada, 2016
- [Dak+60] Dakin T. W. and Malinaric P. J.: "Capacitive Bridge Method for Measuring Integrated Corona Charge Transfer", Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, Vol. 79, No. 3, 1960
- [Deu18] Deutsches Museum München: „Erzeugung and Verteilung elektrischer Energie sowie ihre Umwandlung in nutzbringende Wirkungen“, Ausstellung Werkstoffe, Energie - Starkstromtechnik, München, Deutschland, 2018
- [Deu19] Deutsche Übertragungsnetzbetreiber: „Netzentwicklungsplan Strom 2030“, Entwurf 1, Version 2019
- [Dod02] Dodd S. J.: "A Deterministic Model for the Growth of Non-Conducting Electrical Tree Structures", Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 36, No 2, pp. 129-135, 2002
- [Dor16] Dorn J.: „Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) - eine Schlüsseltechnologie für unsere Stromversorgung“, Energietag des Arbeitskreises Energie der Österreichischen Physikalischen Gesellschaft, Beitrag ET2016-3, 2016
- [Dua+19] Duarte R. M., Villanueva J., de Souza Neto J., Macedo E. and de Medeiros R. P.: "Hybrid Radiometric Location of Partial Discharge Sources", 4th International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers, pp. 31-46, 2019
- [Eck05] Eckert K.: „Grundlagen and Geschichte der HGÜ-Technologie“, Energie and Management, Vol. 6, S. 4, 2005
- [Ele84] Electrosuisse.: „Rene Thury“, Pioniere der Elektrotechnik - Bulletin SEV/VSE, 1984
- [Fai19] Fairley P.: "A Grid as Big as China", IEEE Spectrum online, <https://spectrum.ieee.org/energy/the-smarter-grid>, 29.10.2019.
- [Fer09] Fermit O. P.: "HVDC Historical Advances. Development Review of High Voltage DC Transmission - Early Stages to Modern Day Application", 3rd Australasian Engineering Heritage Conference, Dunedin, New Zealand, 2009
- [Fro+94] Fromm U. and Gulski E.: "Statistical Behaviour of Internal Partial Discharges at DC Voltage", 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, pp. 670-673, Brisbane, Australia, 1994
- [Fro56] Frommhold L.: „Das Potential einer Ladung innerhalb paralleler Platten und Randeffecte bei Elektronenlawinen“, Zeitschrift für Physik, Vol. 145, No. 3, S. 324-340, 1956
- [Fro95] Fromm U.: "Partial Discharge and Breakdown Testing at High DC Voltage", PhD Thesis, Delft University of Technology, 1995
- [Gän53] Gänger B.: „Der elektrische Durchschlag von Gasen“, Springer Berlin Heidelberg, 1. Edition, 1953
- [Gel15] Gellings C. W.: "A Globe Spanning Super Grid", IEEE Spectrum, Vol. 52, No. 8, pp. 48-54, 2015
- [Gem+32] Gemant A. and Philipoff W.: "Die Funkenstrecke mit Vorkondensator", Zeitschrift für technische Physik, Vol. 13, S. 425-430, 1932
- [Gov+19] Govindarajan S., Subbaiah J., Cavallini A., Krithivasan K. and Jayakumar J.: "Partial Discharge Random Noise Removal using Hankel Matrix based Fast Singular Value De-

- composition", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 11, No. 4, pp. 99-105, 2019
- [Gre+16] Gremaud R., Doiron C., Baur M., Simka P., Teppati V., Kallstrand B., Johansson K., Kosse M., Speck J., Großmann S., Riechert U. and Straumann U.: "Solid-Gas Insulation in HVDC Gas-Insulated System: Measurement, Modeling and Experimental Validation for Reliable Operation", Cigre Science and Engineering, Vol. 7, pp. 133-142, 2016
- [Gro16] Gross D.: "Acquisition and Location of Partial Discharge - Especially in Transformers", PhD Thesis, Graz University of Technology, 2016
- [Hae04] Haefely Hipotronics: "DDX 9121: Manual", Basel, 2004
- [Hal+09] Hall M., Frank E., Holmes G., Pfahringer B., Reutemann P. and Witten I. H.: "The WEKA Data Mining Software: An Update", ACM SIGKDD Explorations Newsletter, Vol. 11, No. 1, pp. 10-18, 2009
- [Ham+12] Hammons T. J., Lescale V. F., Uecker K., Haeusler M., Retzmann D., Staschus K. and Lepy S.: "State of the Art in Ultrahigh-Voltage Transmission", Proceedings of the IEEE, Vol. 100, No. 2, pp. 360-390, 2012
- [Har+17] Hartje, M. Kästingschäfer L., Farahani M., Werle P., Pirker A. and Schichler U.: "Applicability of IEC 60270 for Partial Discharge Measurements under DC Voltage - Results of a Round Robin Test", 20th International Symposium on High Voltage Engineering, Buenos Aires, Argentina, 2017
- [Har+19] Hartje M., Pirker A., Schober B., Schichler U., Saadati H. and Werle P.: "Comparison and Analysis of PD Measurements under DC Voltage in Different HV Laboratories", 21st International Symposium on High Voltage Engineering, Budapest, Hungary, 2019
- [Har+75] Hara M., Oda K., Kanda K., Oshiget T. and Akazaki M.: "Calculation of Field Strength and Force Acting on Conducting Sphere in Gaps and its Application for Prediction of Gaseous Breakdown Voltage", IEEE Transactions on Fundamentals and Materials, Vol. 95, No. 12, pp. 525-532, 1975
- [Har71] Harrold R.: "Voltage Vector Analysis for Corona Location in Transformers", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 90, No. 5, pp. 2339-2348, 1971
- [Has13] Hassan J. M.: "Corona Stabilization and Electrical Breakdown of Gases in Nonuniform Fields", PhD Thesis, University of Baghdad, 2013
- [Haw+64] Hawley R. and Jiniswale S.: "Measuring Partial Discharges", Electrical Times, Vol. 146, pp. 711-714, 1964
- [Hed+96] Hedenqvist M., Angelstok A., Edsberg L., Larsson P. T. and Gedde U. W.: "Diffusion of Small-Molecule Penetrants in Polyethylene: Free Volume and Morphology", Polymer Papers, Vol. 37, No. 14, pp. 2887-2902, 1996
- [Her+17] Hering M., Juhre K., Secklehner M. and Hinrichsen V.: "Requirements on Solid Insulating Materials and Gas-Solid Interfaces in Compact HVDC GasInsulated Systems", 20th International Symposium on High Voltage Engineering, Buenos Aires, Argentina, 2017
- [Her16] Hering M.: „Überschlagsverhalten von Gas-Feststoff-Isoliersystemen unter Gleichspannungsbelastung“, Dissertation, Technische Universität Dresten, 2016
- [Hin02] Hinterholzer T.: „Der Durchschlag in SF₆ unter Einfluss der Raumladungsstabilisierung“, Dissertation, Technischen Universität München, 2002

- [Hof+18] Hofer L. and Kindersberger J.: "Partial Discharges under DC Voltage Stress - Simulation and Measurement", International Conference on High Voltage Engineering and Application, Athens, Greece, 2018
- [Hoo+96] Hoogenraad G., Morshuis P. and Petrarca C.: "Classification of Partial Discharges for DC Equipment", Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 110-112, San Francisco, USA, 1996
- [IEC18] IEC White Paper: "Global Energy Interconnection", 2018
- [IEC270] IEC Publication 270: "Partial Discharge Measurements", Edition 1.0, 1968
- [IEC60060] IEC 60060-1: "High-Voltage Test Techniques - Part 1: General Definitions and Test Requirements", Edition 3.0, 2010
- [IEC60076a] IEC 60076-6: "Power Transformers - Part 6: Reactors", Edition 1.0, 2007
- [IEC60076b] IEC/IEEE 60076-57-129: "Power Transformers - Part 57-129: Transformers for HVDC Applications", Edition 1.0, 2017
- [IEC60270] IEC 60270+A1: "High-Voltage Test Techniques - Partial Discharge Measurements", Edition 3.1, 2015
- [IEC61287] IEC 61287-1: "Railway Applications - Power Convertors Installed on Board Rolling Stock - Part 1: Characteristics and Test Methods", Edition 3.0, 2014
- [IEC65700] IEC/IEEE 65700-19-03: "Bushings for DC Application", Edition 1.0, 2014
- [IEE67] IEEE Committee Report.: "Guide for Calibration of Test Equipment and Circuits for Measurement of Corona Pulses", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 86, No. 10, pp. 1185-1191, 1967
- [Jo+15] Jo H.-E., Wang G., Kim S.-J. and Kil G.-S.: "Comparison of Partial Discharge Characteristics in SF₆ Gas under AC and DC", Transactions on Electrical and Electronic Materials, Vol. 16, No. 6, pp. 323-327, 2015
- [Jos+18] Josefsson J., Riechert U., Plet C., Mebrahtu-Melake S. and Hassanpoor A.: "Performance Demonstration of HVDC Substation Equipment", Stuttgarter Hochspannungssymposium, 2018
- [Jud+97a] Judd M. and Farish O.: "FDTD Simulation of UHF Signals in GIS", 10th International Symposium on High Voltage Engineering, Montreal, Canada, 1997
- [Jud+97b] Judd M., Farish O. and Coventry P.: "UHF Couplers for GIS-Sensitivity and Specification", 10th International Symposium on High Voltage Engineering, Montreal, Canada, 1997
- [Kai+17] Kainaga S., Pirker A. and Schichler U.: "Identification of Partial Discharges at DC Voltage using Machine Learning Methods", 20th International Symposium on High Voltage Engineering, Buenos Aires, Argentina, 2017
- [Kim+12] Kim J., Kim D., Nam K., Choi W., Lee B. and Koo J.: "Characteristics of Partial Discharge by AC and DC", International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, pp. 489-492, Bali, Indonesia, 2013
- [Kin+08] Kindersberger J. and Lederle C.: "Surface Charge Decay on Insulators in Air and Sulfurhexafluorid - Part II: Measurements", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 15, No. 4, pp. 949-957, 2008
- [Kin72] Kind D.: „Einführung in die Hochspannungs-Versuchstechnik: Lehrbuch für Elektrotechniker“, Vieweg+Teubner Verlag, 2. Ausgabe, 1972

- [Klu+13] Klueter T., Wulff J., Jenau F. and Wienold D.: "Evaluation of Surface- and Corona Discharges at DC Voltage", International Conference on Environment and Electrical Engineering, Wroclaw, Poland, 2013
- [Kon+78] Kondo Y., Ushiroda S., Kajita S. and Miyoshi Y.: "Space-Charge-Limited Current Flow of a Pulseless Corona in a Negative Point-to-Plane Gap", Electrical Engineering in Japan, Vol. 98, No. 1, pp. 9-16, 1978
- [Kos+18] Kosse M., Juhre K., Secklehner M. and Hinrichsen V.: "Requirements on Solid Insulating Materials and Gas-Solid Interfaces in Compact HVDC Gas Insulated Systems", Cigre Science and Engineering, Vol. 11, pp. 54-61, 2018
- [Kön93] König D.: "Partial Discharges in Electrical Power Apparatus", 1. Edition, VDE-Verlag, 1993
- [Kre64] Kreuger F. H.: "Discharge Detection in High Voltage Equipment", London: Temple Press-Books Ltd, 1964
- [Kre89] Kreuger F. H.: "Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment", Butterworth-Heinemann Ltd, 1989
- [Küc17] Küchler A.: „Hochspannungstechnik“, 4. Auflage, Springer-Verlag, 2017
- [Küp74] Küpfmüller K.: „Die Systemtheorie der elektrischen Nachrichtenübertragung“, 4. berichtigte Auflage, Stuttgart: Hirzel, 1974
- [Kyp+06] Kyprianou A., Lewin P. L., Efthimiou V., Stavrou A. and Georghiou G. E.: "Wavelet Packet Denoising for Online Partial Discharge Detection in Cables and its Application to Experimental Field Results", Measurement Science and Technology, Vol. 17, No. 9, pp. 236-247, 2006
- [Lag+81] Laghari J. and Qureshi A.: "A Review of Particle-Contaminated Gas Breakdown", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 16, No. 5, pp. 388-398, 1981
- [LaK63] La Koste.: "Review, Progress and Trends in Partial Discharges in France", Electrical Research Association, IB-2187, 1963
- [Lem12] Lemke E.: "A Critical Review of Partial-Discharge Models", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 28, No. 6, pp. 11-16, 2012
- [Lem13] Lemke E.: "Analysis of the Partial Discharge Charge Transfer in Extruded Power Cables", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 29, No. 1, pp. 24-28, 2013
- [Lem16] Lemke E.: "Using a Field Probe to Study the Mechanism of Partial Discharges in Very Small Air Gaps under Direct Voltage", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 32, No. 4, pp. 43-51, 2016
- [Leo+18] Leon-Garzon A. R., Dotelli G., Villa A., Barbieri L., Gondola M. and Cavallotti C.: "Thermodynamic Analysis of the Degradation of Polyethylene Subjected to Internal Partial Discharges", Chemical Engineering Science, Vol. 180, pp. 121-130, 2018
- [Li+07] Li X., Wu G., Zhang X. and Bian S.: "Partial Discharge Pulse Shape Detection and Analysis under DC Condition in Typical Defect Models", Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 188-191, Vancouver, Canada, 2007
- [Lim+01] Lim Y., Koo J., Lee J. and Kang W.: "Chaotic Analysis of Partial Discharge (CAPD) - A Novel Approach to Identify the Nature of PD Source", Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 324-328, Kitchener, Canada, 2001

- [Lin+94] Lindroth A. and JWG 12/14.10.: "The Relationship Between Test and Service Stresses as a Function of Resistivity Ratio for HVDC Converter Transformer and Smoothing Reactors", *Cigre Electra*, Vol. 157, pp. 33-47, 1994
- [Liu+16] Liu Y., Xiao Y., Su Y., Chen X., Zhang C. and Li W.: "Electrical Treeing Test of DC Cable XLPE Insulation under DC Voltage and High Temperature", *International Conference on Dielectrics*, pp. 752-755, Montpellier, France, 2016
- [Lun+00] Lundgaard L. E., Skyberg B., Diessner A. and Schei A.: "Method and Instrumentation for Acoustic Diagnoses in GIS", *Cigre Session Paris*, Report 15-309, 2000
- [Mac+90] Macur J., Domansky K. and Sikula J.: "Stochastic Character of Partial Discharges in Insulators", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 67, No. 1, pp. 540-542, 1990
- [Mal+87] Malik N. and Alrainy A.: "Statistical Variation of DC Corona Pulse Amplitudes in Point-to-Plane Air Gaps", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 22, No. 6, pp. 825-829, 1987
- [Man55] Manual DI061: "Radio Interference Measurements", *Post Office Electrical Engineers Journal*, Vol. 50, No. 2, pp. 88-94, 1955
- [Mar+12] Martin Y., Li Z., Tsutsumi T., Shou R., Nakano M., Suehiro J. and Ohtsuka S.: "Detection of SF₆ Decomposition Products Generated by DC Corona Discharge Using a Carbon Nanotube Gas Sensor", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 19, No. 2, pp. 671-676, 2012
- [Mas49] Mason J.: "Sequence and Location of Partial Discharges in Dielectrics", *Electrical Research Association*, LT-210, 1949
- [Mes01] Messerer F.: "Gas-Insulated Substations (GIS) for HVDC", *Dissertation, Technische Universität München*, 2001
- [Mon+17] Montanari G. C., Negri F. and Ciani F.: "Noise Rejection and Partial Discharge Identification in HVDC Insulation Systems", *Electrical Insulation Conference*, pp. 425-428, Baltimore, USA, 2017
- [Mon13] Montanari G. C.: "Notes on Theoretical and Practical Aspects of Polymeric Insulation Aging", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 29, No. 4, pp. 34-44, 2013
- [Mor+14] Morshuis P., Montanari G. C. and Fornasari L.: "Partial Discharge Diagnostics - Critical Steps Towards On-Line Monitoring", *Power and Energy Society Conference and Exposition*, Chicago, USA, 2014
- [Mor+17] Mor A. R., Castro Heredia L. C. and Munoz F. A.: "New Clustering Techniques Based on Current Peak Value, Charge and Energy Calculations for Separation of Partial Discharge Sources", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 24, No. 1, pp. 340-348, 2017
- [Mor+96] Morshuis P. and Hoogenraad G.: "Partial Discharge Diagnostics for DC Equipment", *International Symposium on Electrical Insulation*, pp. 407-410, Montreal, Canada 1996
- [Mor+97] Morshuis P., Jeroense M. and Beyer J.: "Partial Discharge. Part XXIV: The Analysis of PD in HVDC Equipment", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 13, No. 2, pp. 6-16, 1997
- [Mor93] Morshuis P.: "Partial Discharge Mechanisms: Mechanisms Leading to Breakdown, Analyzed by Fast Electrical and Optical Measurements", *PhD Thesis, Delft University of Technology*, 1993

- [Mra+16] Mraz P., Treyer P. and Hammer U.: "Evaluation and Limitations of Corona Discharge Measurements - An Application Point of View", International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Xi'an, China, 2016
- [Mtr04] Mtronix: "Advanced PD Analysis System MPD 540", Product Brief and Technical Specification, 2004
- [Nat93] Natrass D. A.: "Partial Discharge. XVII. The Early History of Partial Discharge Research", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 9, No. 4, pp. 27-31, 1993
- [NEM40] NEMA 107-1940: "Methods of Measurement of Radio Influence Noise, 1940
- [Nie95] Niemeyer L.: "A Generalized Approach to Partial Discharge Modeling", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 4, pp. 510-528, 1995
- [Niu+09] Niu H., Cavallini A., Montanari G. C. and Zhang Y.: "Noise Rejection Strategy and Experimental Research on Partial Discharge at DC Voltage", 9th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric, pp. 489-492, Harbin, China, 2009
- [Noa+17] Noah, P. Mbolu, S., Zavattoni L., Agnel S., Notinger P., Laurentie J. C., Guille O., Vinson P. and Girodet A.: "Measurement of Space Charge Distribution in Alumina Filled Epoxy Resin for Application in HVDC GIS", Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomenon, pp. 613-616, Fort Worth, USA, 2017
- [Oht+11] Ohtsuka S., Fukuda K. and Sogabe A.: "Measurement of PD Current Waveform in SF₆ Gas with a Super High Frequency Wide Band Measurement System", 17th International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Deutschland, 2011
- [Oka07] Okabe S.: "Phenomena and Mechanism of Electric Charges on Spacers in Gas Insulated Switchgears", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 14, No. 1, pp. 46-52, 2007
- [Omi13] Omicron: "MPD 600 - User Manual", AE.7, 2013
- [Ous+17] Ouss E., Zavattoni L., Beroual A., Girodet A. and Vinson P.: "Measurement and Analysis of Partial Discharges in HVDC Gas Insulated Substations", 20th International Symposium on High Voltage Engineering, Buenos Aires, Argentina, 2017
- [Ovs+17] Ovsyannikov A. G., Korobeynikov S. M. and Vagin D. V.: "Simulation of Apparent and True Charges of Partial Discharges", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 24, No. 6, pp. 3687-3693, 2017
- [Ped+91] Pedersen A., Crichton G. C. and McAllister I. W.: "The Theory and Measurement of Partial Discharge Transients", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 26, No. 3, pp. 487-497, 1991
- [Ped+94] Pedersen A., Crichton G. C. and McAllister I. W.: "PD-Related Stresses in the Bulk Dielectric for Ellipsoidal Voids", Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 79-84, Arlington, USA, 1994
- [Ped+95] Pedersen A., Crichton G. C. and McAllister I. W.: "The Functional Relation Between Partial Discharges and Induced Charge", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 4, pp. 535-543, 1995
- [Ped87] Pedersen A.: "Partial Discharges in Voids in Solid Dielectrics. An Alternative Approach", Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Gaithersburg, USA, 1987

- [Pie+17] Pierri E., Binder O., Hemdan N. G. and Kurrat M.: "Challenges and Opportunities for a European HVDC Grid", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 70, pp. 427-456, 2017
- [Pih+18] Pihera J., Hornak J., Kupka L., Millerova E. and Haller R.: "Modified Pulse Sequence Analysis for PD measurement at DC", 2nd International Conference on Dielectrics, pp. 101-104, Budapest, Hungary, 2018
- [Pow19] Power Diagnostix Systems: "ICMsystem: Product Brief", Archen, 2019
- [Pra75] Praehauser T.: "Calibration of Partial Discharge Measuring Circuits-Estimate of Errors", 2nd International High Voltage Symposium, EI-33, Zurich, Switzerland, 1975
- [Qi+19] Qi Y., Fan Y., Bing G., Jia R., Sen W., Wei S. and Jadoon A.: "Design of Ultra-Wide Band Metal-Mountable Antenna for UHF Partial Discharge Detection", *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 60163-60170, 2019
- [Rah+15] Rahimi M. R., Javadinezhad R. and Vakilian M.: "DC Partial Discharge Characteristics for Corona, Surface and Void Discharges", 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials, pp. 260-263, Canberra, Australia, 2015
- [Rei+06] Reid A. J., Judd M. D., Stewart B. G. and Fouracre R. A.: "Partial Discharge Current Pulses in SF₆ and the Effect of Superposition of their Radiometric Measurement", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 39, No. 19, pp. 4167-4177, 2006
- [Ret+10] Rethmeier K., Krüger M., Kraetge A., Rickmann J., Schuchardt M., Twittmann J. and Balkon C.: „DC-Teilentladungsmessungen am Beispiel eines 660 kV Teilers“, ETG-Fachtagung - Isoliersysteme bei Gleich- and Mischfeldbeanspruchung, Berlin, Deutschland, 2010
- [Ret06] Rethmeier K. „Neue Auskoppelverfahren und Sensoren zur Vor-Ort-Teilentladungsmessung an Hochspannungs-Kabelanlagen“, Dissertation, Technische Universität Berlin, 2006
- [Rey08] Rey M. A.: "Transport d'euergie Moutiers-Lyon", *Bulletin Mensuel de l'Association des Anciens Eleves de l'Ecole Centrale Lyonnaise*, Vol. 56, 1908
- [Rie+14] Riechert U. and Steiger U.: „Schaltanlagen and Leistungsschalter für HGÜ-Anwendungen“, Stuttgarter Hochspannungssymposium, Deutschland, 2014
- [Rie+16] Riechert U., Straumann U. and Gremaud R.: "Compact Gas-Insulated Systems for High Voltage Direct Current Transmission: Basic Design", *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, Piscataway, USA, 2016
- [Rod+18] Rodrigo Mor A., Castro Heredia L. and Munoz F.: "A Novel Approach for Partial Discharge Measurements on GIS Using HFCT Sensors", *Sensors*, Vol. 18, pp. 4482-4487, 2018
- [Rog+60] Rogers E. C. and Skipper D. J.: "Gaseous Discharge Phenomena in High-Voltage D.C. Cable Dielectrics", *IEE Part A: Power Engineering*, Vol. 107, No. 33, pp. 241-246, 1960
- [Roh+03] Rohwetter P., Habel W. R., Heidmann G. and Pepper D.: "Fibre-Optic Acoustic Detection of Damage Processes in Elastomeric Insulation under AC and DC Stress", 18th International Symposium on High Voltage Engineering, Budapest, Hungary, 2003
- [Rom+19] Romano P., Imburgia A. and Ala G.: "Partial Discharge Detection Using a Spherical Electromagnetic Sensor", *Sensors*, Vol. 19, No. 5, pp. 200-216, 2019
- [Sak+99] Sakai K., Tsuru S., Abella D. L. and Hara M.: "Conducting Particle Motion and Particle-Initiated Breakdown in DC Electric Field Between Diverging Conducting Plates in Atmo-

- spheric Air”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 6, No. 1, pp. 122-130, 1999
- [Sal+66] Salvage B. and Steinberg N. R.: “Discharge Repetition in an Air-Filled Cavity in a Solid Dielectric under Direct-Voltage Conditions”, Electronics Letters, Vol. 2, No. 11, pp. 432-439, 1966
- [Sal+67] Salvage B. and Sam W.: “Detection and Measurement of Discharges in Solid Insulation under Direct-Voltage Conditions”, Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, Vol. 114, No. 9, pp. 1334-1338, 1967
- [San+16] Sanchez-Uran M. A., Garnacho F., Alvarez F., Donoso G. and Ortego J.: “Signal Processing and Study of the Ripple Influence in PD Patterns for Measurements under HVDC Stress”, Cigre Session Paris, Report D1-307, 2016
- [Sch+03] Schwarz R., Muhr M. and Pack S.: “Partial Discharge Detection and Localisation for Application in Transformers”, 13th International Symposium on High Voltage Engineering, Delft, Netherlands, 2003
- [Sch+09] Schichler U., Reuter M. and Gorablenkow J.: “Partial Discharge Diagnostics on GIS using UHF and Acoustic Method”, 16th International Symposium on High Voltage Engineering, Cape Town, South Africa, 2009
- [Sch16] Schon K. „Hochspannungsmesstechnik: Grundlagen - Messgeräte - Messverfahren“, 1. Auflage, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016
- [Sch74] Schulz P. „Elektronische Vorgänge in Gasen und Festkörpern“, 2. neubearbeitete Auflage, Wissenschaftliche Bücherei Karlsruhe, 1974
- [Seo+16] Seo I. J., Lee Y. J., CHOI W., Lee B. W., Koo J. Y. and Kim J. T.: “A Development of DC PD Pattern Recognition Method using Modified CAPD Together with PD Funding for Gas Insulated Apparatus under DC Voltage”, Cigre Session Paris, Report D1-306, 2016
- [Sie+15] Siebler D., Rohwetter P., Brusenbach R. and Plath R.: “Optical-Only Detection of Partial Discharge with Fluorescent Polymer Optical Fiber Sensors”, Procedia Engineering, Vol. 120, pp. 845-848, 2015
- [Sie19] Siemens Energy: „Gleichspannungsschaltanlagen für bis zu ± 550 kV, 5000 A: 8DQ1 DC: Maximale Leistung, minimaler Platzbedarf“, Produktbeschreibung, 2019
- [Sko+06] Skog J., Koreman K., Pääjärvi B., Worzyk T. and Andersröd T.: “The Norned HVDC Cable Link - A Power Transmission Highway between Norway and the Netherlands”, Energex, pp. 11-16, Trondheim, Norway, 2006
- [Sta12] State Grid Corporation of China: “Southern Hami-Zhengzhou ± 800 kV UHVDC Transmission Project, Second Xinjiang-Northwest Main Grid 750 kV HVDC Transmission Line Start Construction to Build the Silk Road of Electricity Connecting the Western Frontier with the Central Plains”, Corporatenews from State Grid, www.sgcc.com.cn/ywlm/mediacenter/corporatenews/05/272889.shtml, 14.05.2012
- [Stu+15] Stuckenholz C. H., Gamlin M. and Mraz P.: “PD Performance of UHV-DC Test Equipment”, 19th International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, Czech Republic, 2015
- [Sun+18] Sun J., Chen W., Bian K., Li Z., Yan X. and Xu Y.: “Movement Characteristics of Ball Metallic Particle Between Ball-Plane Electrodes under DC Voltage”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 25, No. 3, pp. 1047-1055, 2018

- [Tak+01] Takahashi T., Hayakawa N., Yuasa S., Okabe S. and Okubo H.: "Space Charge Behaviour and Corona Stabilization Effect in SF₆ Gas Viewed from Sequential Generation of a DC Partial Discharge", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 34, No. 15, pp. 1878-1882, 2001
- [Tak+16] Takahashi T., Wibowo A. S., Cavallini A., Montanari G. C., Boyer L., Luton M.-H. and Mirebeau P.: "AC and DC Partial Discharge Measurements on Defective Cables", *Electrical Insulation Conference*, pp. 375-378, Montreal, Canada, 2016
- [Tak+99] Takahashi T., Yamada T., Hayakawa N., Yuasa S., Okabe S. and Okubo H.: "Corona Stabilization Effect in SF₆ Gas Viewed from Sequential Generation of Partial Discharge", *11th International Symposium on High Voltage Engineering*, London, United Kingdom, 1999
- [Tan+18] Tang G., Wang G., He Z., Pang H., Zhou X., Shan Y. and Li Q.: "Research on Key Technology and Equipment for Zhangbei 500 kV DC Grid", *High Voltage Engineering*, Vol. 44, No. 7, pp. 2097-3003, 2018
- [Tri38] Trichel G. W.: "The Mechanism of the Negative Point to Plane Corona Near Onset", *Physical Review*, Vol. 55, No. 12, pp. 1078-1084, 1938
- [Twi+10] Twittmann J., Balkon C., Broniecki U., Kalkner W., Netzl T., Schuchardt M. and Plath R.: „Optimierung von Prüfaufbauten bei Teilentladungsmessung unter Höchstspannungs-DC-Beanspruchung“, *ETG-Fachtagung Isoliersysteme*, Köln, Deutschland, 2010
- [Van+80] Van Brunt R. J. and Misakian M.: "Comparison of DC and 60 Hz AC Positive and Negative Partial Discharge Inceptions in SF₆", *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pp. 461-469, Boston, USA, 1980
- [Van91] Van Brunt R. J.: "Stochastic Properties of Partial-Discharge Phenomena", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 26, No. 5, pp. 902-948, 1991
- [VDE+07] VDE, ETG und Deutsches Museum: „125 Jahre elektrische Energieübertragung - Miesbach - München 1882“, *Geschichte der Elektrotechnik*, VDE-Verlag, 2007
- [VDE0434] VDE 0434-1966: „Richtlinien für Teilentladungsprüfungen an Betriebsmitteln mit Wechselspannung bis 500 Hz“, VDE-Verlag, 1966
- [Wan+16] Wang G., Jo H.-E., Kim S.-J., Kim S.-W. and Kil G.-S.: "Measurement and Analysis of Partial Discharges in SF₆ Gas under HVDC", *Measurement*, Vol. 91, pp. 351-359, 2016
- [Wan+18] Wang Y., Li X., Gao Y., Zhang H., Wang D. and Jin B.: "Partial Discharge Ultrasound Detection Using the Sagnac Interferometer System", *Sensors*, Vol. 18, No. 5, pp. 351-359, 2018
- [Wee85] Weedy B. M.: "DC Conductivity of Voltalit Epoxy Spacers in SF₆", *Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education, Reviews*, Vol. 132, No. 7, pp. 450-459, 1985
- [Wen+08] Wenrong S., Junhao L., Peng Y. and Yanming L.: "Digital Detection, Grouping and Classification of Partial Discharge Signals at DC Voltage", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 15, No. 6, pp. 1663-1674, 2008
- [Wen+18] Wenger P., Beltle M. and Tenbohlen S.: „TE-Charakterisierung frei beweglicher Partikel in HVDC-GIS mittels UHF-Messtechnik and Hochgeschwindigkeitskamera-Aufnahmen“, *VDE-Fachtagung Hochspannungstechnik*, Berlin, Deutschland, 2018

- [Win+02] Winter A. and Kindersberger J.: "Surface Charge Accumulation on Insulating Plates in SF₆ and the Effect on DC and AC Breakdown Voltage of Electrode Arrangements", Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 757-761, Cancun, Mexico, 2002
- [Win+14] Winter A. and Kindersberger J.: "Transient Field Distribution in Gas-Solid Insulation Systems under DC Voltages", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 21, No. 1, pp. 116-128, 2014
- [Wu+09] Wu G., Bian S., Zhou L., Zhang X., Ran H. and Yu C.: "Pattern Recognition of Typical Defects in High-Voltage Storage Capacitors Based on DC Partial Discharge", Science in China Series E: Technological Sciences, Vol. 52, No. 12, pp. 3729-3735, 2009
- [Wu+15] Wu M., Cao H., Cao J., Nguyen H.-L., Gomes J. B. and Krishnaswamy S. P.: "An Overview of State-Of-The-Art Partial Discharge Analysis Techniques for Condition Monitoring", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 31, No. 6, pp. 22-35, 2015
- [Wu+17] Wu Z., Zhang Q., Song J., Ma J., Du Q., Gao C., Wang G. and Zhang Y.: "Simulation and Motion Analysis of Spherical Free Conducting Particle Between Coaxial Electrodes", 1st International Conference on Electrical Materials and Power Equipment, pp. 324-327, Xi'an, China, 2017
- [Yos+97] Yoshida Y., Yamaji K., Hatano M., Rokunohe T., Yamagiwa T. and Endo F.: "Enhancing Insulation Reliability towards Particles in 500 kV DC GIS", 10th International Symposium on High Voltage Engineering, Montreal, Canada, 1997
- [You+17] You H., Zhang Q., Guo C., Xu P., Ma J., Qin Y., Wen T. and Li Y.: "Motion and Discharge Characteristics of Metal Particles Existing in GIS under DC Voltage", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 24, No. 2, pp. 876-885, 2017
- [Yus+16] Yusoff N. A., Isa M., Hamid H., Adzman M. R., Rohani M., Yii C. C. and Ayop N. N.: "Denoising Technique for Partial Discharge Signal: A Comparison Performance Between Artificial Neural Network, Fast Fourier Transform and Discrete Wavelet Transform", International Conference on Power and Energy, pp. 311-316, Melaka, Malaysia, 2016
- [Zar+97] Zargari A. and Blackburn T.: "Partial Discharge Detection in SF₆ GIS using Optical Fibre Techniques", 10th International Symposium on High Voltage Engineering, Montreal, Canada, 1997
- [Zhe+19] Zheng H., Chen G. and Rowland S. M.: "The Influence of AC and DC Voltages on Electrical Treeing in Low Density Polyethylene", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 114, 2019

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen mit Einheit und Kurzbeschreibung

α	°	Spitzenwinkel der Nadel
α_e		Ionisierungskoeffizient
η		Homogenitätsgrad
μ	Ams	Dipolmoment
ρ_g	kg/m ³	Dichte des Gases
A	m ²	Oberfläche des Partikels
C_1	F	Glättungskondensator
C_2	F	Koppelkondensator
C_a	F	Parallelkapazität des intakten Dielektrikums im a-b-c-Modell
C_b	F	Serienkapazität des intakten Dielektrikums im a-b-c-Modell
C_c	F	Kapazität des Hohlraums im a-b-c-Modell
C_k	F	Koppelkapazität
C_p	F	Prüflingskapazität
d	m	Charakteristischer Durchmesser des jeweiligen TE-Defekts
D_1		Diode des Gleichrichters
\vec{E}	V/m	Elektrisches Feld
$F(f)$		Amplitudendichte
$F(j\omega)$		Komplexe Amplitudendichte
\vec{F}	N	Kraft auf das Partikel
\vec{F}_{coul}	N	Coulomb-Kraft auf das Partikel
\vec{F}_{grad}	N	Kraft aufgrund der Ladungsverschiebung im Partikel
\vec{F}_{visk}	N	Gegenkraft, hervorgerufen durch die Viskosität
f_1	Hz	Untere Grenzfrequenz des TE-Messsystems
f_2	Hz	Obere Grenzfrequenz des TE-Messsystems
f_m	Hz	Mittenfrequenz des TE-Messsystems
f_r	Hz	Pseudoresonanzfrequenz des springenden Partikel
f_I	Hz	Erste Mittenfrequenz der synchronen Mehrfrequenz-TE-Messung
f_{II}	Hz	Zweite Mittenfrequenz der synchronen Mehrfrequenz-TE-Messung
f_{III}	Hz	Dritte Mittenfrequenz der synchronen Mehrfrequenz-TE-Messung
Δf	Hz	Bandbreite des TE-Messsystems
\vec{G}	N	Gewichtskraft auf das Partikel
i	A	Strom
i_d	A	Verschiebungsstrom
I_{DC}	A	Gleichstrom durch Prüfling
k		Maßstabsfaktor der TE-Messung
$k_s(r)$		Korrekturfaktor aufgrund der Spiegelladung

l	m	Charakteristische Länge des jeweiligen Defekts
m		Impulszahl, Anzahl der Impulse im festgelegten Zeitraum
m_P	kg	Masse des Partikels
m_i	C/s	Differenzenquotient des Impulses Nr. i
n	1/s	Impulswiederholrate
p	Pa	Gasdruck in der Testzelle
q	C bzw. V	Scheinbare Ladung bzw. Amplitude eines TE-Impulses
Q	C	Größte wiederholt auftretenden Teilentladungsstärke
$Q(r)$	C	Ladung des Partikels im Bereich r
q_0	C	Ladung der Kalibrierimpulse
q_a	C	Äußere bzw. influenzierte Ladung
q_{gr}	C bzw. V	Maximale Amplitude der Störimpulse des Grundstörpegels
q_{tr}	C bzw. V	Triggerschwelle
q_i	C bzw. V	Amplitude des TE-Impulses Nr. i
Δq_i	C bzw. V	Differenzierte Amplitude der TE-Impulse
Q'_i	C bzw. V	Differenzierte und graphisch normierte Amplitude der TE-Impulse
r	m	Charakteristischer Radius des jeweiligen Defekts
R_1	Ω	Dämpfungswiderstand
R_2	Ω	Oberer Teilwiderstand des ohmschen Teiler
R_3	Ω	Unterer Teilwiderstand des ohmschen Teiler
R_a	m	Außenradius der Zylinderanordnung
R_D	Ω	Dämpfungswiderstand der Diode
R_i	m	Innenradius der Zylinderanordnung
Re		Reynolds-Zahl
s	m	Charakteristische Schlagweite des jeweiligen Defekts
t	s	Zeit
T_2	s	Rückenhalbwertszeiten
t_f	s	Abfallzeit des TE-Impulses
T_P	s	Scheitelzeit
T_r	s	Zeitkonstante der Pseudoresonanzfrequenz
T'_i	s	Differenzierte und graphisch normierter Zeitpunkte der TE-Impulse
t_r	s	Anstiegszeit des TE-Impulses
t_{pw}	s	Pulsbreite des TE-Impulses
t_i	s	Zeitpunkt des TE-Impulses Nr. i
Δt_d	s	Zeitdauer zwischen Doppelimpulspaket
Δt_{m1}	s	Stufendauer bei Ermittlung der Einsetzspannung
Δt_{m2}	s	Stufendauer bei der TE-Messung
Δt_i	s	Differenzierter Zeitpunkt des TE-Impulses Nr. i
U_a	V	Spannung am Prüfling
U_c	V	Hohlraumspannung

U_i	V	TE-Einsatzspannung
$U_{AC,HV}$	V	Wechselspannung zur Gleichrichtung
U_{AC}	V	Speisespannung des Prüftransformators
U_{DC}	V	Spannung am Prüfling
U_{i-}	V	TE-Einsatzspannung bei Gleichspannung mit negativer Polarität
U_{i+}	V	TE-Einsatzspannung bei Gleichspannung mit positiver Polarität
U_Z	V	Zündspannung
ΔU_1	V	Stufenhöhe bei Ermittlung der Einsatzspannung
v	m/s	Geschwindigkeit des Partikels
v_e	m/s	Driftgeschwindigkeit

Abkürzungen

AC	Wechselspannung (alternating current)
AKV	Ankoppelvierpol
ANN	Artificial Neural Network
CD	Coupling Device
DC	Gleichspannung (direct current)
CO ₂	Kohlendioxid
DLA	Dielektrischer Verlustanalysator
DT	Decision Tree
GIL	Gasisolierte Leitung (gas insulated line)
GIS	Gasisolierte Schaltanlage (gas insulated switchgear)
HF	Hochfrequenz (high frequency)
HFCT	Hochfrequenz-Stromwandler (high frequency current transformers)
HGÜ	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung
HVDC	Hochspannungs-Gleichstrom (high voltage direct current)
LWL	Lichtwellenleiter
N	Stickstoff
PRPD	Phase Resolved Partial Discharge
SF ₆	Schwefelhexafluorid
TE	Teilentladung
TE-Welle	Transversal-elektrische Welle
TEM-Welle	Transversalelektromagnetische Welle
TM-Welle	Transversal-magnetische Welle
UHF	Ultrahochfrequenz (ultra high frequency)
UV	Ultra Violett
VHF	Ultrakurzwelle (very high frequency)
WEKA	Maschinelle Lernsoftware (Waikato environment for knowledge analysis)

Anhang: Übersicht der typischen NoDi*-Diagramme

In den Bildern A.1, A.2, A.3, A.4 und A.5 sind die NoDi*-Diagramme der konventionellen TE-Messung gemäß IEC 60270 der unterschiedlichen Defekte und typischen Störquellen zusammengefasst.

Bild A.1 zeigt die NoDi*-Diagramme einer Spitze auf Hochspannung bei unterschiedlichen Spannungen und Schlagweiten. Die charakteristischen Dreiecke sind bei allen untersuchten Konfigurationen zu erkennen. Die Umkehr der Polarität der Spannung hat eine Spiegelung der Diagramme um deren Ursprung zufolge.

In Bild A.2 sind die NoDi*-Diagramme eines freien Potentials bei unterschiedlichen Spannungen und Gasdrücken dargestellt. Bei der untersuchten Anordnung entstehen die charakteristischen feinen Strukturen im NoDi_Q*- und NoDi_{QT}*-Diagramm. Die Umkehr der Polarität der Spannung hat eine Spiegelung der Diagramme um deren Ursprung zufolge.

Die NoDi*-Diagramme der verschiedenartigen metallischen Partikel (K1, D1 und S1) in Abhängigkeit der Spannung sind in Bild A.3 zusammengefasst. Zu erkennen sind die Häufungspunkte im Bereich der Zeitkonstante der Pseudoresonanz und die Verschiebung zu geringeren Zeitwerten bei höheren Werten der Spannung. Beim springenden Draht D1 und Span S1 ist die Streuung der Häufungspunkte aufgrund der chaotischen Bewegung, besonders nach dem Stoß mit der geerdeten Elektrode, ausgeprägter.

Die von den unterschiedlichen Partikel in Firefly erzeugten NoDi*-Diagramme sind in Bild A.4 zusammengefasst. Beim Drahtstück D2 und einer Spannung von $U_{DC} = -33 \text{ kV}$ sowie dem Span S1 wurde der Firefly-Effekt durch kurze Phasen des springenden Partikels unterbrochen. Die daraus resultierenden längeren zeitlichen Abstände der TE-Impulse und charakteristischen Muster sind im NoDi_T*- und NoDi_{QT}*-Diagramm zu erkennen. Aufgrund der beim Firefly-Effekt verursachten dominanten TE-Impulse zeigt das NoDi_Q*-Diagramm in allen Konfigurationen das selbe Muster.

NoDi*-Diagramme, die von Störimpulsen aus der Messschaltung zur Erzeugung der Gleichspannung oder von Störimpulsen des Grundstörpegels erzeugt werden sind in Bild A.5 dargestellt. Besonders durch ausgeprägte Häufungspunkte im Bereich der Netzfrequenz oder deren Vielfachen können diese auf einfache Weise erkannt werden.

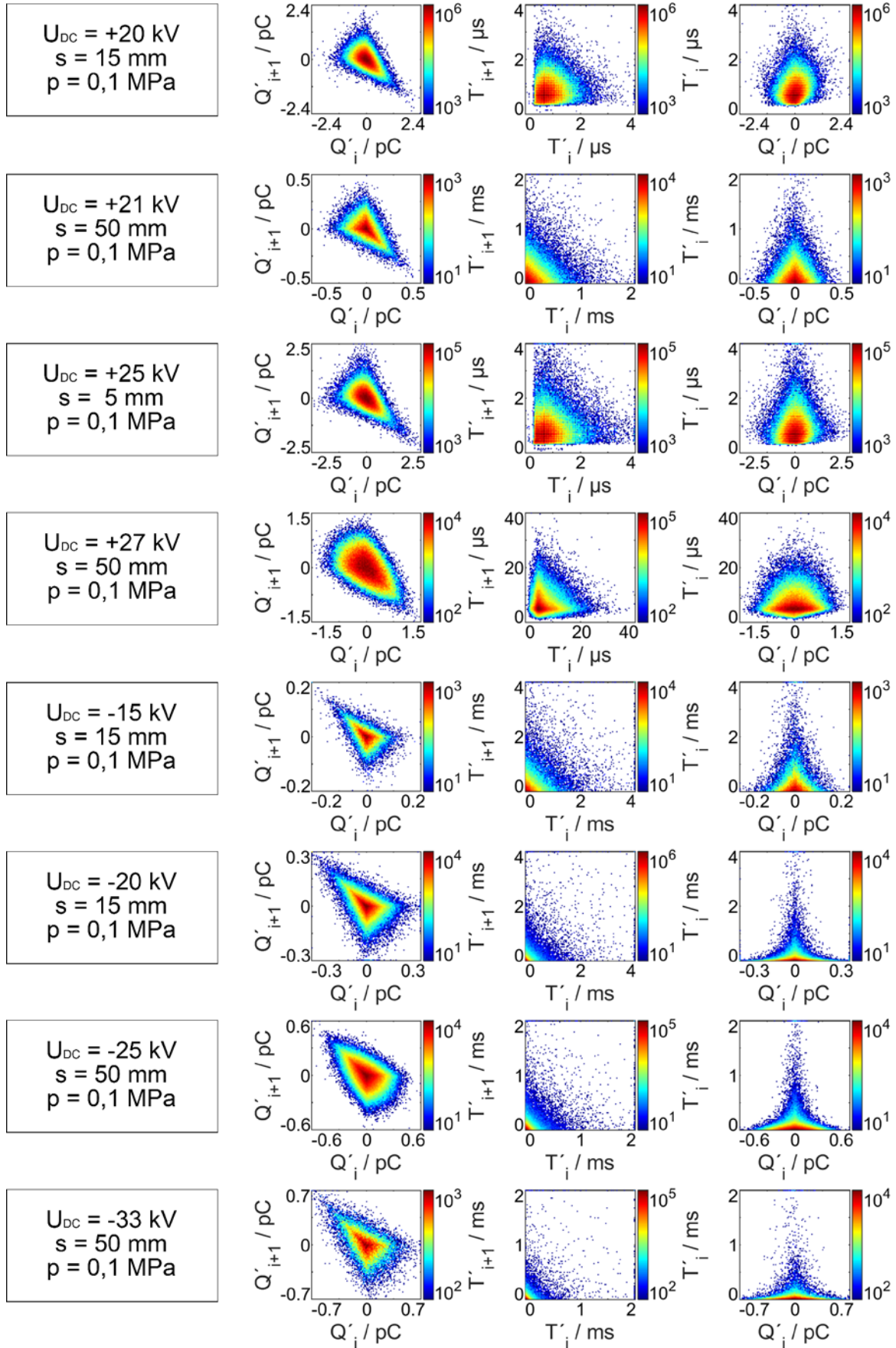


Bild A.1: NoDi*-Diagramme einer Spitze auf Hochspannung ($r = 50 \mu\text{m}$, SF_6) bei unterschiedlichen Spannungen und Schlagweiten

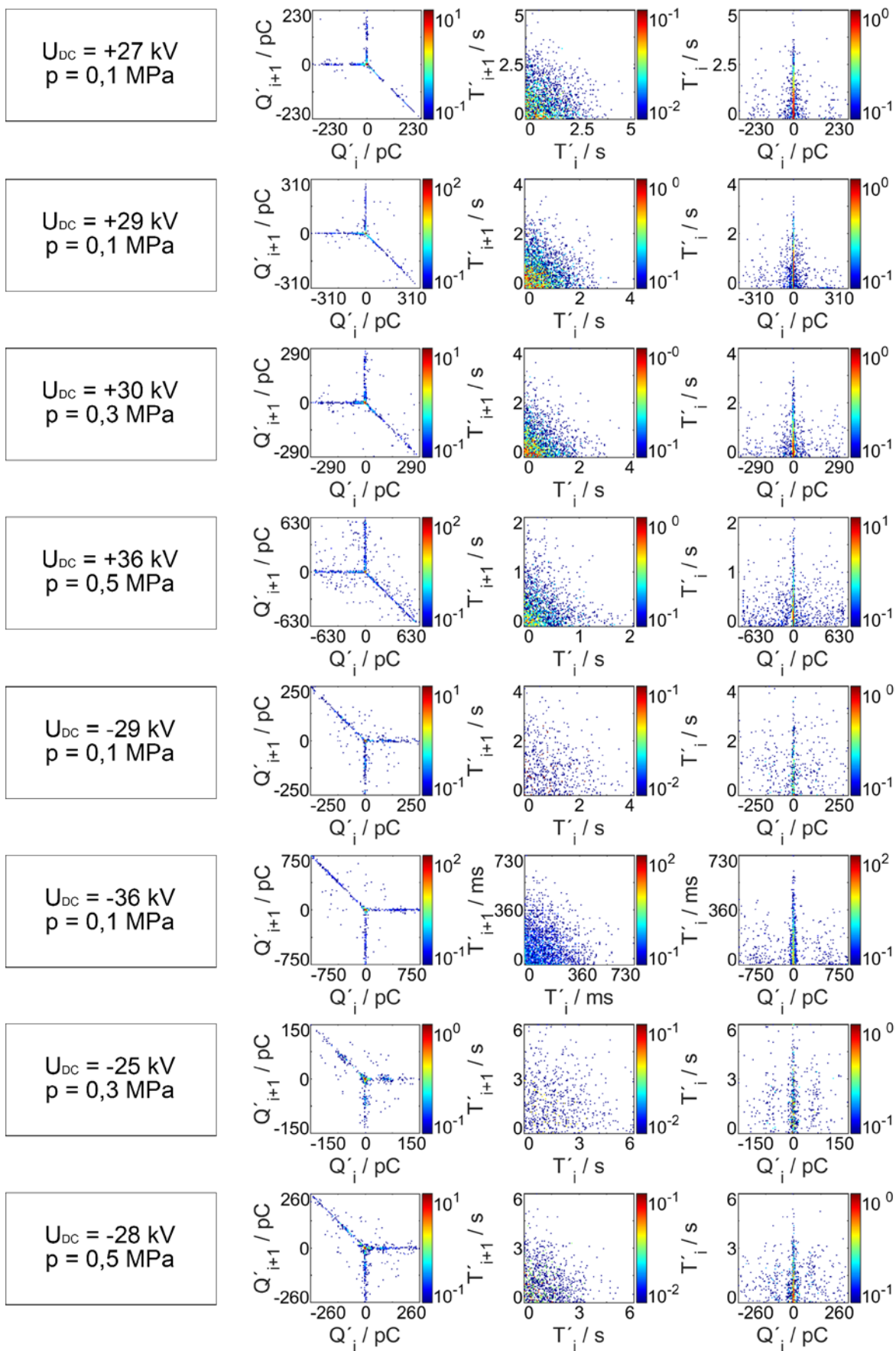


Bild A.2: NoDi*-Diagramme eines freien Potentials in SF₆ bei unterschiedlichen Spannungen und Gasdrücken

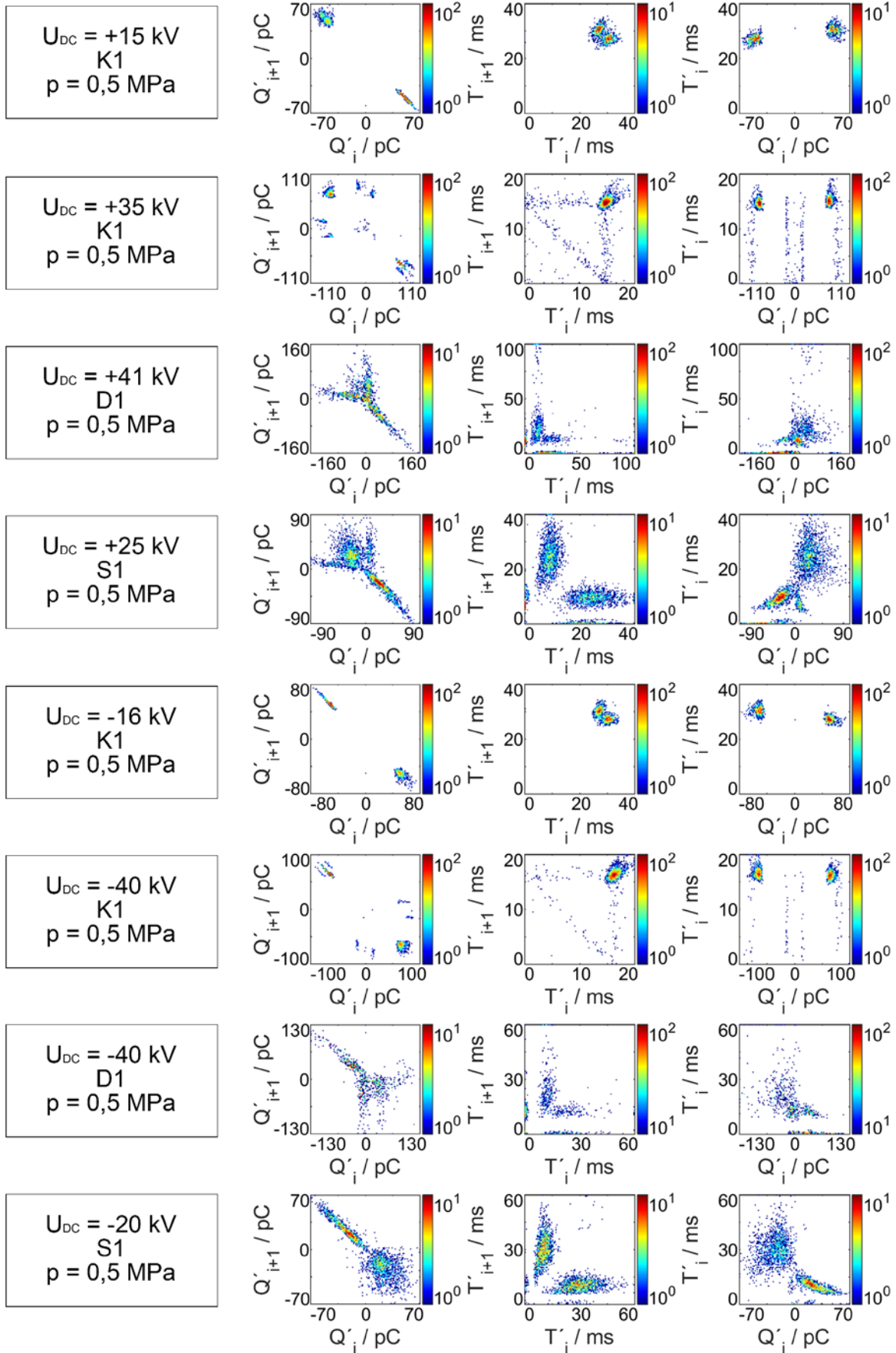


Bild A.3: NoDi*-Diagramme der verschiedenartigen metallischen springenden Partikel in SF_6 bei unterschiedlichen Spannungen

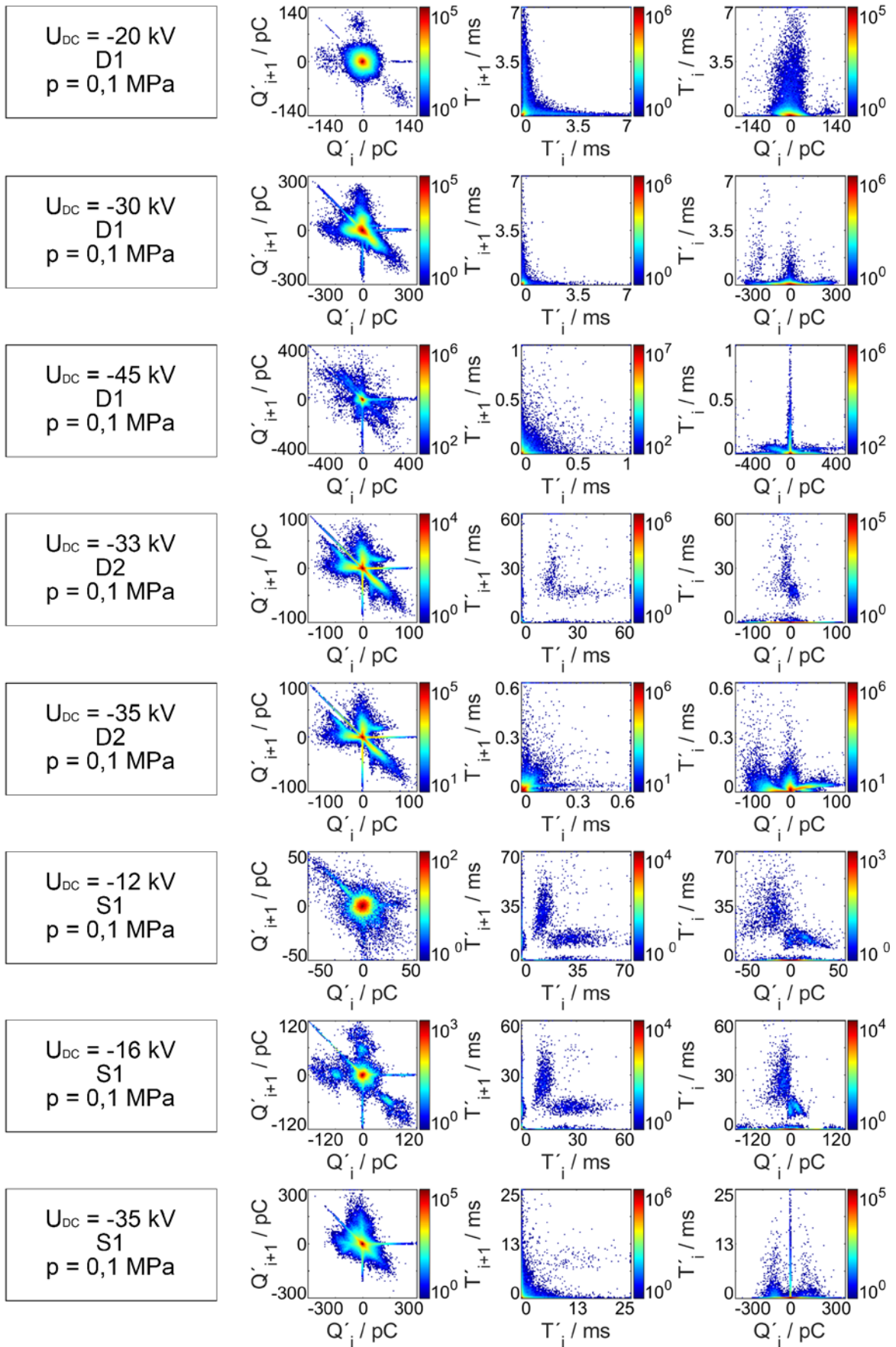


Bild A.4: NoDi*-Diagramme der verschiedenartigen metallischen Partikel in Firefly in SF₆ und bei unterschiedlichen Spannungen

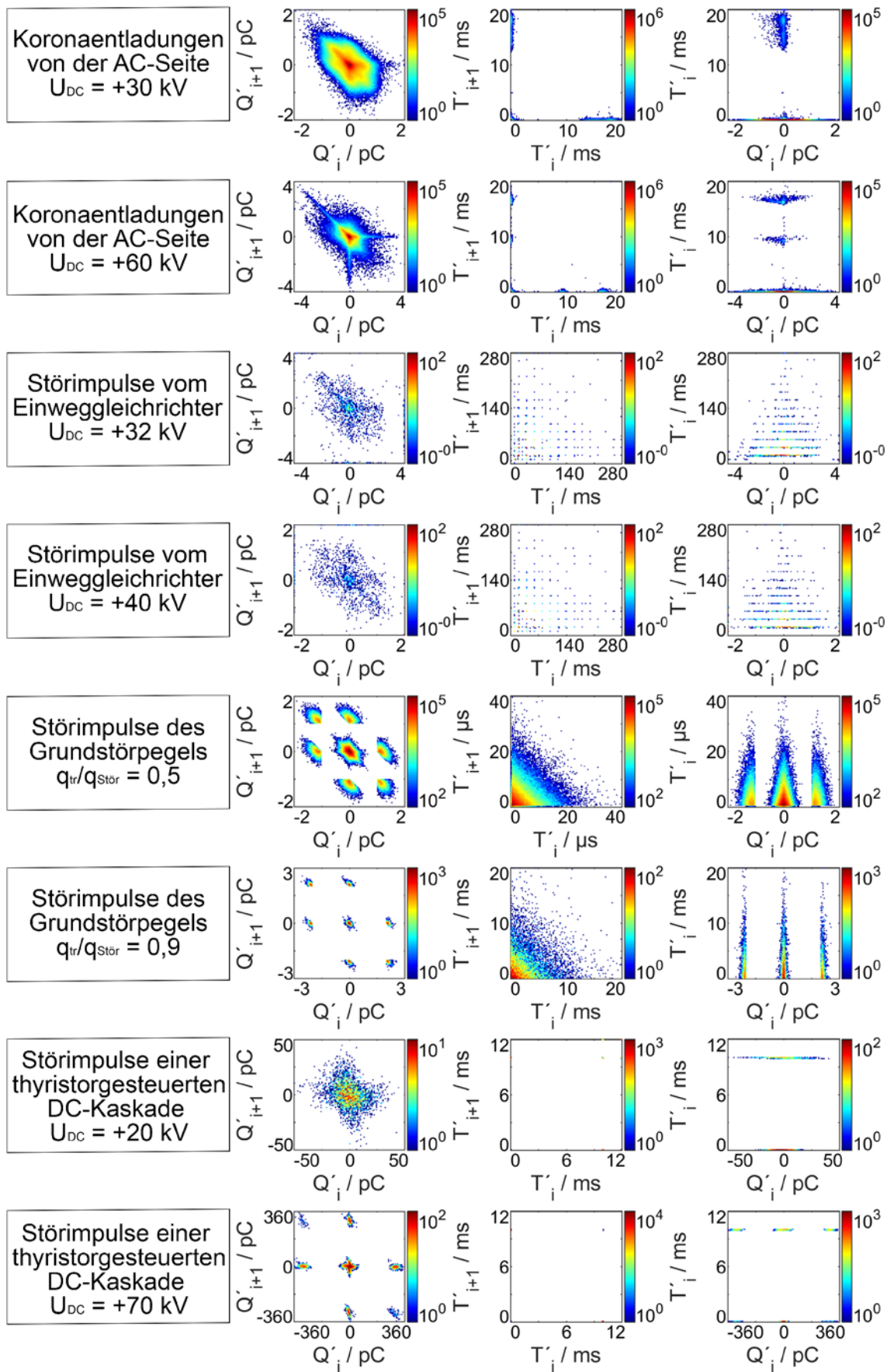


Bild A.5: NoDi*-Diagramme der Störimpulse typischer Störquellen

Eigene Veröffentlichungen

- Cigre WG D1.63: "Progress on Partial Discharge Detection under DC Voltage Stress", Cigre India Colloquium SCA2-B2-D1, New Delhi, India, 2019
- Pirker A., Schober B., Schichler U.: "PD Monitoring of HVDC GIS/GIL", Cigre Chengdu Symposium, Chengdu, China, 2019
- Pirker A., Schichler U.: "Application of NoDi* Pattern for UHF PD Measurement on HVDC GIS/GIL", 5th International Conference on Condition Monitoring, Diagnosis and Maintenance, Bucharest, Romania, 2019
- Hartje M., Pirker A., Schober B., Schichler U., Saadati H. and Werle P.: "Comparison and Analysis of PD Measurements under DC Voltage in Different HV Laboratories", Cigre Science and Engineering, Vol. 16 - Special Edition ISH, pp. 44-51, 2019
- Pirker A., Schichler U.: „Anforderungen an die TE-Erfassung bei Gleichspannung für die Erstellung von NoDi*-Diagrammen“, VDE-Fachtagung Hochspannungstechnik, Berlin, Deutschland, 2018
- Hassan S., Werle P., Huntke M., Hartje M., Pirker A., Schichler U.: "Reproducibility of the Results of Partial Discharge Measurements according to IEC 60270 at DC and AC Voltage", VDE-Fachtagung Hochspannungstechnik, Berlin, Deutschland, 2018
- Pischler O., Pirker A., Schichler U.: „Erzeugung von Mischspannungen mit einer modifizierten Greinacherkaskade“, VDE-Fachtagung Hochspannungstechnik, Berlin, Deutschland, 2018
- Pirker A., Schichler U.: "Partial Discharge Measurement at DC Voltage - Evaluation and Characterization by NoDi* Pattern", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 25, No. 3, pp. 883-891, 2018
- Pirker A., Schichler U.: "Partial Discharges of Defects in Different Insulating Gases: N₂, CO₂, Dry Air and SF₆", 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials, Xi'an, China, 2018
- Riedmann C., Pirker A., Schichler U.: „Monitoring elektrischer Betriebsmittel im Übertragungsnetz“, 15. Symposium Energieinnovation, Graz, Österreich, 2018
- Pirker A., Pischler O., Schichler U., Fink H., Ramsauer F.: "Test Circuits for Repetitive Impulse Testing of HV Winding Bars with Different Fitting Systems", Cigre Colloquium - Study Committee A1 "Rotating Electrical Machines", Viena, Austria, 2017
- Hartje M., Kästingschäfer L., Farahani M., Werle P., Pirker A. and Schichler U.: "Applicability of IEC 60270 for Partial Discharge Measurements under DC Voltage - Results of a Round Robin Test", 20th International Symposium on High Voltage Engineering, Buenos Aires, Argentina, 2017
- Pirker A., Schichler U.: "HVDC GIS/GIL - PD Identification by NoDi* Pattern", 20th International Symposium on High Voltage Engineering, Buenos Aires, Argentina, 2017
- Kainaga S., Pirker A., Schichler U.: "Identification of Partial Discharges at DC Voltage using Machine Learning Methods", 20th International Symposium on High Voltage Engineering, Buenos Aires, Argentina, 2017
- Pirker A., Schichler U.: "Partial Discharges at DC Voltage - Measurement and Pattern Recognition", Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Xi'an, China, 2016
- Pirker A., Schichler U.: „NoDi*-Diagramm zur Visualisierung von TE bei Gleichspannung“, VDE-Fachtagung Hochspannungstechnik, Berlin, Deutschland, 2016

- Woschitz R., Komar G., Pirker A., Schichler U.: „FEM-Simulation des thermischen Langzeit-Verhaltens von Hochspannungs-Kabeln für Windparksanlagen“, VDE-Fachtagung Hochspannungstechnik, Berlin, Deutschland, 2016
- Pischler O., Pirker A., Schichler U.: „Geräuschemissionen von Freileitungen“, VDE-Fachtagung Hochspannungstechnik, Berlin, Deutschland, 2016
- Siregar M. S., Woschitz R., Pirker A., Schichler U., Suwarno: “Partial Discharge Patterns on Cross-Linked Polyethylene DC Power Cables”, 3rd IEEE Conference on Power Engineering and Renewable Energy, Yogyakarta, Indonesia, 2016
- Schichler U., Woschitz R., Pirker A., Reich K., Leonhardsberger M., Oberzaucher O.: “Audible Noise Performance of OHL Conductor Bundles”, First South East European Regional Cigre Conference, Portoroz, Slovenia, 2016.
- Komar G., Woschitz R., Pirker A., Schichler U.: „FEM-Simulation des thermischen Langzeitverhaltens von Hochspannungskabelanlagen bei Laständerungen“, 14. Symposium Energieinnovation, Graz, Österreich, 2016
- Pirker A., Schichler U., „Zustandsbewertung elektrischer Betriebsmittel als Basis für eine sichere Energieübertragung“, 14. Symposium Energieinnovation, Graz, Österreich, 2016
- Schichler U., Pirker A.: „PD Measurement at DC Voltage on Typical Defects of GIS/GIL“, Cigre SCD1 Colloquium, Rio de Janeiro, Brazil, 2015
- Pirker A., Woschitz R., Steuerer H., Hesse M.: “Method to Evaluate the Live Time Extension of Medium Voltage Cables”, Höfler’s Days, Portoroz, Slovenia, 2015
- Pirker A., Woschitz R.: „Stoßspannungsprüfung an Kabeln zur Qualitätssicherung und als Nachweis der Wirksamkeit einer Kabelsanierung“, Highvolt-Kolloquium, Dresden, Deutschland, 2015
- Pirker A., Woschitz R., Steuerer H., Hesse M.: “Lifetime Extension of Medium Voltage Cables”, International Conference on Insulated Power Cables, Paris, France, 2015
- Judendorfer T., Pirker A., Muhr M.: “Conductivity Measurements of Electrical Insulating Oils”, IEEE International Conference on Dielectric Liquids, Trondheim, Norway, 2011

Auszeichnungen

- Best Student Paper: “HVDC GIS/GIL- PD Identification by NoDi* Pattern”, 20th International Symposium on High Voltage Engineering, Buenos Aires, Argentina, 2017
- Excellent Student Paper: “Partial Discharges at DC Voltage - Measurement and Pattern Recognition”, Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Xi’an, China, 2016
- Young Author Award: „Zustandsbewertung elektrischer Betriebsmittel als Basis für eine sichere Energieübertragung“, 14. Symposium Energieinnovation, Graz, Österreich, 2016

Betreute Masterarbeiten

- Windisch B.: „TE-Messung an Mittelspannungskabeln mit 0,1 Hz und 50 Hz bei Verwendung von HFCT“, Masterarbeit, Technische Universität Graz, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, in Druck
- Schober B.: „Software zur Erstellung von Live NoDi*-Diagrammen bei Teilendladungsmessungen mit Gleichspannung“, Masterarbeit, Technische Universität Graz, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, 2018
- Prasser M.: „FDS-Diagnostik an kunststoffisolierte Mittelspannungskabeln“, Masterarbeit, Technische Universität Graz, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, 2017
- Rothleitner H.: „Automatisierung eines Hochspannungsprüfplatzes zur TE-Messung“, Masterarbeit, Technische Universität Graz, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, 2017
- Riedmann C.: „Detektierbarkeit von Defekten in gasisolierten HVDC Systemen“, Masterarbeit, Technische Universität Graz, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, 2016

Betreute Bachelorarbeiten

- Brankovic D.: „Unterdrückung von Störimpulsen bei der TE-Messung unter DC-Spannung“, Bachelorarbeit, Technische Universität Graz, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, 2018
- Schmidinger T.: „Untersuchung von Störimpulsen bei der UHF-TE-Messung an HVDC GIS/GIL“, Bachelorarbeit, Technische Universität Graz, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, 2018
- Rothschedl H.: „Analyse, Konstruktion und Erprobung von Komponenten für das HV-Baukastensystem“, Bachelorarbeit, Technische Universität Graz, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, 2017
- Prohammer A.: „TE-Messung bei Gleichspannung an inneren Defekten“, Bachelorarbeit, Technische Universität Graz, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, 2017
- Resch M.: „UHF-TE-Messungen bei Gleichspannung“, Bachelorarbeit, Technische Universität Graz, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, 2016
- Mak F.: „Inbetriebnahme eines UHF-TE-Monitoringsystems“, Bachelorarbeit, Technische Universität Graz, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, 2015
- Buchner A.: „Partial Discharge Measurement under DC“, Bachelor Thesis, Graz University of Technology, Institute of High Voltage Engineering and System Performance, 2015
- Rossmann J.: „Koronakäfig für die Qualifizierung von Freileitungsseilen“, Bachelorarbeit, Technische Universität Graz, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, 2015
- Rosenzopf A.: „Teilendladungsmessungen bei Gleichspannung“, Bachelorarbeit, Technische Universität Graz, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, 2015
- Rothleitner H.: „SW-Tool zur Darstellung von Teilendladungen bei Gleichspannung“, Bachelorarbeit, Technische Universität Graz, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, 2015