

Hochschule Magdeburg-Stendal
Fachbereich Ingenieurwissenschaften und Industriedesign (IWID)
Institut für Elektrotechnik

Bachelorarbeit

zur Erlangung des Grades eines "Bachelor of Engineering"
im Studiengang Elektrotechnik

Thema:

"Erarbeitung einer Übersicht über mögliche Anwendungsgebiete von künftigen Gleichspannungsnetzen über 3,6 kV sowie grundlegender Vergleich von elektrischen, akustischen und optischen Teilentladungsmessmethoden zur Diagnose und Überwachung solcher Netze"

Eingereicht von:	Björn Schiel
Angefertigt für:	IPH Institut "Prüffeld für elektrische Hochleistungstechnik" GmbH, Berlin
Matrikel:	E 2009
Ausgabetermin:	03. Dezember 2012
Abgabetermin:	15. Februar 2013
Schulischer Betreuer:	Herr Prof. Dr.-Ing. Haentzsch
Betrieblicher Betreuer:	Herr Dr. Heidmann

Kurzreferat

In der vorliegenden Arbeit werden die Einsatzmöglichkeiten von Gleichspannungsnetzen, sowie deren grundsätzlicher Aufbau, anhand einer Literaturrecherche herausgestellt. Ebenfalls wird ein wirtschaftlicher Vergleich zwischen Gleich- und Wechselspannungsnetzen durchgeführt. Außerdem wird die Möglichkeit der Diagnose solcher Netze mittels der Teilentladungsmessung bei Gleichspannung mit dem Schwerpunkt auf verschiedene Sensoren, sowie der besonderen Auswertung bei Gleichspannungsmessungen untersucht. Die gewonnenen Ergebnisse zeigen, dass die Auswertung von Gleichspannungsteilentladungsmessungen mittels neuartiger Diagramme möglich ist. Hierfür müssen jedoch noch weitere Erfahrungen für die Interpretation der neuen Darstellungsarten gewonnen werden.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

.....
Ort, Datum

.....
Unterschrift des Verfassers

Erarbeitung einer Übersicht über mögliche Anwendungsgebiete von künftigen Gleichspannungsnetzen über 3,6 kV, sowie grundlegender Vergleich von elektrischen, akustischen und optischen Teilentladungsmessmethoden zur Diagnose und Überwachung solcher Netze

In den kommenden Jahren wird in der elektrischen Energieübertragung und -verteilung die Anwendung der Gleichspannung eine zunehmende Bedeutung erlangen. Neben den bereits diskutierten Anwendungen in der Elektroenergieübertragung über große Entfernungen und der Anbindung von Offshore - Windkraftanlagen wird auch die Errichtung von MS Gleichspannungsnetzen diskutiert.

Ausgehend von möglichen Einsatzbereichen derartiger Netze wird ein angepasster Netzaufbau und dessen Besonderheiten diskutiert und Vorteile gegenüber vergleichbaren Wechselspannungsnetzen dargestellt.

Im Zusammenhang damit erlangt die Einschätzung des Isolationszustandes von feststoffisolierten Gleichspannungsisolierungen eine wachsende Bedeutung. Aufbauend auf im Institut vorliegende Erkenntnisse sollen elektrische mit nichtelektrischen Verfahren zur Ermittlung von Teilentladungen in Prüfkörpern mit definierten Fehlstellen vergleichend untersucht werden. Eine spezielle Bedeutung kommt dabei einer faserakustischen Entladungsdetektion auf Hochspannungspotential zu. Die Ergebnisse sollen ausgewertet und diskutiert werden und zu weitergehenden Erkenntnissen bei der Verwendung von Gleichspannungs-TE-Messungen als vorteilhafte Messmethode beitragen.

Betreuer der Arbeit: Dr. G. Heidmann/IPH

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	1
1 Inhaltlicher Überblick	4
2 Gleichspannungsnetze ab 3,6 kV	5
2.1 Vorwort.....	5
2.2 Aufbau von Gleichspannungsnetzen.....	7
2.3 Besonderheiten von Gleichspannungsnetzen	10
2.3.1 Vorwort.....	10
2.3.2 DC-DC-Konverter	10
2.3.3 Schalteinrichtung für Gleichspannung.....	11
2.3.4 Verhalten von Gleichstromnetzen im Fehlerfall.....	15
2.4 Wirtschaftlicher Vergleich zwischen Gleich- und Wechselspannungsnetzen.....	17
2.5 Zusammenfassung und Ausblicke	19
3 Teilentladungsmessung bei Gleichspannung.....	20
3.1 Grundlagen der Teilentladungsmessung	20
3.2 Besonderheiten von Gleichspannungsteilentladungsmessungen	21
3.2.1 Vorwort.....	21
3.2.2 Kalibrierung des Messsystems.....	21
3.2.3 Messung der Spannung	22
3.3 Auswertung von Gleichspannungsteilentladungsmessungen	24
3.3.1 Vorwort.....	24
3.3.2 Export von Daten.....	24
3.3.3 Darstellung als Pard-Diagramm	25
3.3.4 3-Frequenzmethode (3CFRD).....	26
3.3.5 Bewertung der Impulsform und im Frequenzbereich.....	27
3.3.6 Ladungsdichte	28
3.3.7 Polarität	29
3.3.8 Zeitabhängigkeit.....	29
3.3.9 Statistik.....	32

3.3.10	Zusammenfassung	32
3.4	Begriffsdefinitionen und Erläuterungen	33
4	Messungen	36
4.1	Vorwort	36
4.2	Messaufbau, Messregime und Prüfkörperherstellung	37
4.2.1	Vorwort	37
4.2.2	Messaufbau	37
4.2.3	Prüfkörperherstellung	39
4.2.4	Faser-optisch-akustischer-Sensor	43
4.2.5	Piezo-Sensor	44
4.2.6	Linsensystem	45
4.3	Vorversuche	46
4.3.1	Vorwort	46
4.3.2	Vorversuch 1 - Teilentladungsfreiheit	47
4.3.3	Vorversuch 2 - Untersuchung der Filterfrequenz	48
4.3.4	Vorversuch 3 - Ladungsdiagramm bei inneren und äußeren TE	50
4.4	Versuchsdurchführung	54
4.4.1	Vorwort	54
4.4.2	Darstellung als Pard-Diagramm	54
4.4.3	3-Frequenzmethode	57
4.4.4	Bewertung der Impulsform und im Frequenzbereich	59
4.4.5	Ladungsdichte	61
4.4.6	Polarität	63
4.4.7	Zeitabhängigkeit	65
4.4.8	Statistik	68
4.4.9	Beispiel: Auswertung eines Versuchtages	70
4.5	Auswertung nicht elektrischer Sensoren	76
4.5.1	Faser-optisch-akustischer-Sensor	76
4.5.2	Piezo-Sensor	78
4.5.3	Optische Teilentladungsmessung mittels Digitalkamera	80

4.5.4	Optische Messung mittels Linsensystem	80
4.6	Zusammenfassung und Ausblicke	82
	Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Abkürzung	84
	Verzeichnis der verwendeten Bilder und Tabellen	85
	Literaturverzeichnis	88
	Anlagenverzeichnis	90

1 Inhaltlicher Überblick

Im Zuge des Energiewandels wird nach immer neuen Möglichkeiten der Stromerzeugung gesucht. Hierzu ist als Beispiel der Ausbau der erneuerbaren Energien zu nennen. Ebenfalls wird versucht, wie jeder anhand des Verbotes von Glühlampen nachvollziehen kann, bereits vorhandene Betriebsmittel energiesparrender zu machen. Aus diesem Gesichtspunkt heraus gibt es Überlegungen Stromversorgungsnetze auf Gleichspannung (DC) umzubauen. Eine solche Umstellung bietet Vorteile insbesondere in Bezug auf kapazitive und induktive Blindleistung, Reduktion der Stromwärmeverluste, sowie Reduktion der Verluste bei der Umformung. Obwohl Hochspannungsgleichstromübertragungen (HGÜ) bereits im Einsatz sind, ist der Aufbau von Gleichspannungsnetzen in der Mittelspannung aus technischen Aspekten relativ schwierig. Diesen Problemen, wie der Aufbau von DC-DC-Konvertern, Schalteinrichtungen und grundsätzlicher Aufbau der Netze wird das zweite Kapitel gewidmet. Obwohl dieses Thema sehr aktuell ist und oft diskutiert wird, kann bislang nur auf wenige Forschungsarbeiten (vgl. Kapitel 2.2 - Seite 7) zurückgegriffen werden, da bislang keine praktische Umsetzung bekannt ist.

Im dritten Kapitel dieser Arbeit wird sich der Fehlerdiagnose solcher Gleichspannungskomponenten gewidmet. Hierzu wird auf, das bei Wechselspannung (AC) übliche, Mittel der Teilentladungsmessung (TE-Messung) zurückgegriffen. Trotz der jahrelangen Erfahrungen bei Wechselspannung und der grundsätzlichen Anwendbarkeit der Teilentladungsmessung bei Gleichspannung treten besonders bei der Interpretation der Messwerte Schwierigkeiten auf. Deshalb wird am Anfang des dritten Kapitels auf die Besonderheiten bei der Messung, sowie der Auswertung bei Gleichspannungsmessungen gesondert eingegangen.

Anschließend wird im vierten Kapitel der Messaufbau, sowie die verwendeten Sensoren beschrieben. Im Zuge der Vorbereitung wurden Vorversuche, welche das Ziel hatten das Messsystem kennenzulernen, durchgeführt. Mittels weiterer Messungen werden die Auswertungsmethoden auf ihre Umsetzbarkeit untersucht. Ebenfalls erfolgt eine Bewertung der verschiedenen Sensorarten zur Messung von Teilentladungen.

2 Gleichspannungsnetze ab 3,6 kV

2.1 Vorwort

Wie bereits in Kapitel 1 (Seite 4) angesprochen ist unter anderem aufgrund des Ausbaus von erneuerbaren Energiequellen und den damit verbundenen neuen Energieerzeugungspunkte, wie z.B. Offshore-Windparks, ein Ausbau der Stromnetze zwingend erforderlich. Die Verteilnetzstudie der Deutsche Energie-Agentur (dena) [1] sieht dabei folgende Leitungslängen für AC-Netzen bis 2030 vor:

Tabelle 1 Netzausbau bis 2030 [1]

Jahr		2015	2020	2030
Ausbau	Niederspannung	41.200km	47.600km	57.300km
	Mittelspannung	29.700km	71.000km	117.200km
	Hochspannung	3.000km	10.300km	18.400km
Umbau Hochspannung		8.100km	14.600km	21.100km

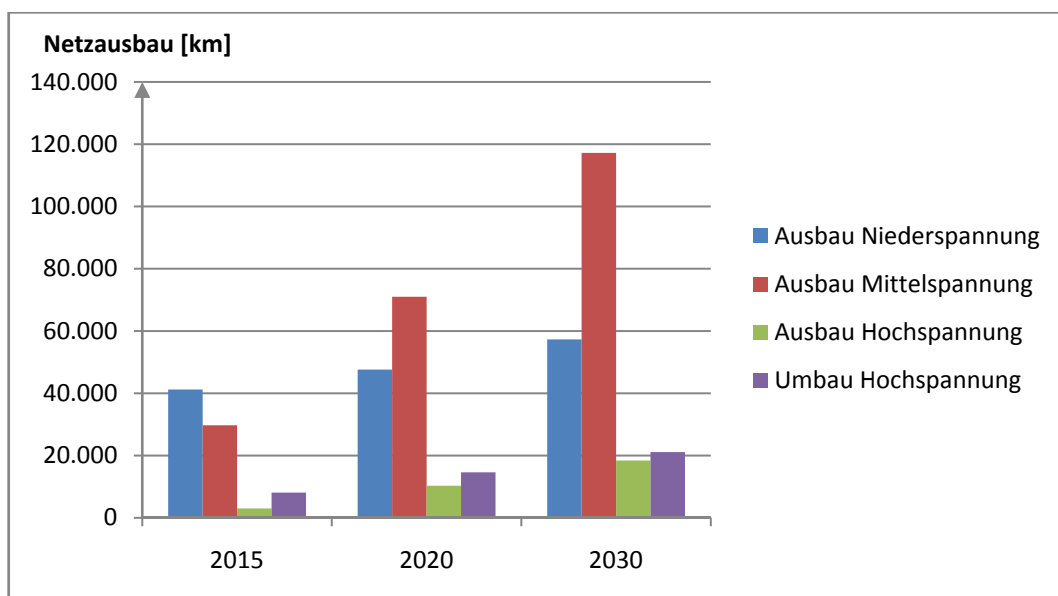


Abbildung 1 Netzausbau bis 2030 nach [1]

Die in Abbildung 1 dargestellten Werte wurden von der dena in Zusammenarbeit mit den Bundesländern ermittelt. Der Netzausbau im Mittelspannungs- und Hochspannungsnetz wird in der Quelle insbesondere damit begründet, dass bei mangelnder regionaler Abnahme der Energie diese in die höheren Spannungsebenen

eingespeist wird. Obwohl der angekündigte Ausbau sich auf Wechselspannungsnetze beschränkt ist es deutlich, dass ein solcher Ausbau nötig ist. Ferner wird der Ausbau von HGÜ-Verbindungen stark diskutiert, da diese große Energiemengen über lange Entfernungen transportieren, Netze von einander entkoppeln und verlustarmer als klassische Wechselspannungsnetze arbeiten können. Eine Weiterentwicklung dieser Technologie wäre ein Aufbau von "reinen" Gleichspannungsnetzen. Da diese Netze gewisse Vorteile haben sollen sie als Bestandteil dieser Arbeit näher untersucht werden. Hierzu wird zunächst der Aufbau solcher Netze, sowie mögliche Einsatzgebiete, beschrieben. Nachfolgend wird auf die Problematik, insbesondere hinsichtlich des Schaltens von Gleichströmen und des Verhaltens bei Fehlerfällen eingegangen. Ebenfalls wird ein Vergleich zwischen Gleich- und Wechselspannungsnetzen unter wirtschaftlichen Aspekten durchgeführt.

Die im Titel der vorliegenden Arbeit gewählte Grenze ab 3,6 kV basiert auf dem zum heutigen Zeitpunkt beherrschbaren Stand der Technik. Zum Beispiel gilt die DIN EN 50123 (Ortsfeste Anlagen - Gleichstrom - Schalteinrichtungen) [2] für Gleichstromschalteinrichtungen und Steuereinrichtungen mit einer Nennspannung von höchstens DC 3000 V, die öffentliche Verkehrsmittel, wie z.B. Eisenbahnfahrzeuge, Straßenbahnfahrzeuge, U-Bahnfahrzeuge und Oberleitungsbusse mit elektrischer Energie versorgen. Im internationalen Vergleich sind Eisenbahnfahrzeuge bis 3,6 kV (z.B. italienische Eisenbahn) Stand der Technik, weshalb in dieser Arbeit zukünftige Netze ab dieser Grenze von 3,6 kV beschrieben werden.

Aufgrund des Umfangs und der zur Verfügung stehenden Mittel, insbesondere hinsichtlich der zur Verfügung stehenden Bearbeitungszeit dieser Arbeit, kann dieses Kapitel nur als Grundlagenarbeit verstanden werden. Auch weil der Hauptschwerpunkt der Arbeit auf der Teilentladungsmessung bei Gleichspannung liegt.

2.2 Aufbau von Gleichspannungsnetzen

Bevor der Aufbau solcher Netze diskutiert werden kann gilt es die zu erwartenden Einsatzgebiete näher zu untersuchen. Da eine komplette Umstellung sämtlicher Stromversorgungsnetze auf Gleichspannung zum aktuellen Zeitpunkt undenkbar ist, werden vom Autor Insellösungen erwartet. Eine denkbare Insellösung wäre zum Beispiel das Verteilnetz eines Offshore Windparks. Dieses Vorgehen wird auch in mehreren Forschungsarbeiten wie "*Key Components for Future Offshore DC Grids*" [3], "*Protection system design for MVDC collection grids for off-shore wind farms*" [4], "*Control and Design of DC Grids for Offshore Wind Farms*" [5] oder "*Wind Farm Configuration and Energy Efficiency Studies - Series DC versus AC Layouts*" [6], aufgegriffen. Neben der Frage, ob zum Beispiel ein Ringnetz einem Strahlennetz vorzuziehen sei, stellt sich bei Gleichspannung insbesondere die Frage an welcher Position im Netz die Spannung transformiert wird. Für die Insellösung des Gleichspannungsnetzes von Offshore-Windparks gibt es hierfür vier Ansätze, welche in Abbildung 2 dargestellt sind.

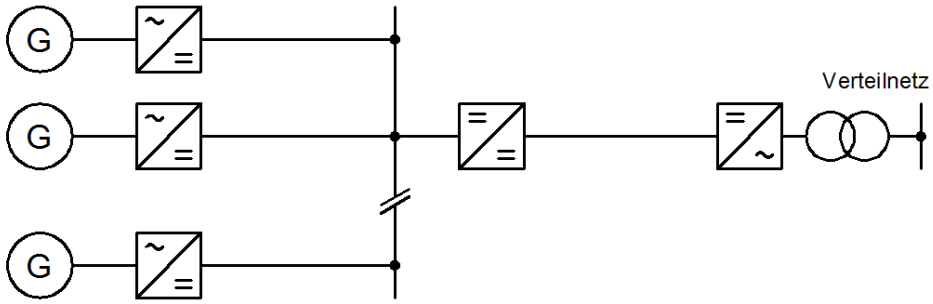
Die Konfiguration a zeigt, dass die Ausgangsspannung der Windenergieanlage gleichgerichtet und anschließend auf einer zentralen Plattform hochtransformiert wird. Von dort aus erfolgt der Energietransport mittels HGÜ zum Festland.

Bei der zweiten Lösung wird die Spannung direkt hinter der Windenergieanlage auf die für den Transport zum Festland gewählten Höchstspannung transformiert. Gegenüber der ersten Konfiguration wird so der Konverter auf der zentralen Plattform eingespart, dafür muss jedoch jede Windenergieanlage mit einem solchen Konverter ausgestattet werden.

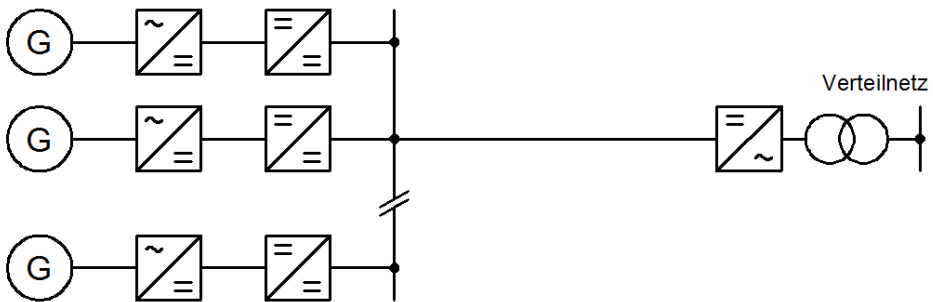
Die Konfiguration c bildet eine Kombination aus den beiden vorangegangenen. Hierbei wird hinter jeder Windenergieanlage die Spannung auf einen Mittelspannungswert transformiert und auf der zentralen Plattform für eine HGÜ erneut hochtransformiert.

Gegenüber der Konfiguration c wird bei der Konfiguration d die Spannung mittels einer Reihenschaltung, auf die für die Verbindung zwischen Windpark und Festland benötigten Spannung, erzeugt.

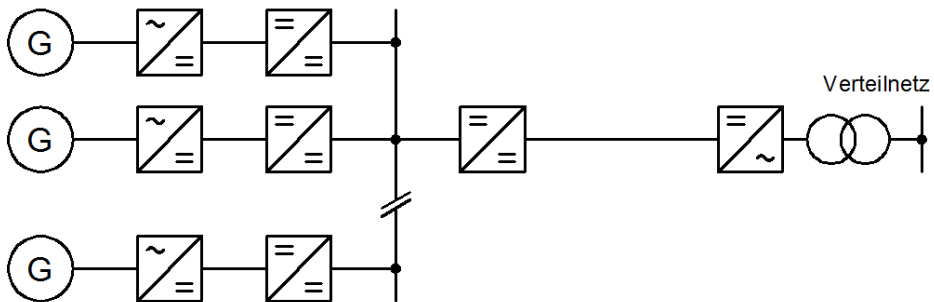
Konfiguration a



Konfiguration b



Konfiguration c



Konfiguration d

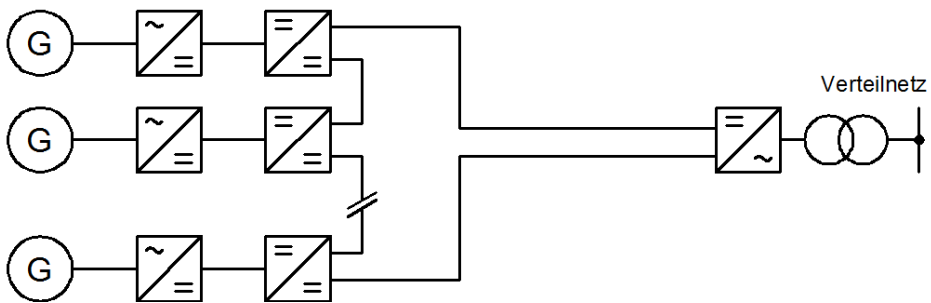


Abbildung 2 Aufbau von Gleichspannungsnetzen nach [3]

Laut [3] bietet die letzte Konfiguration (d) keine praktische Lösung, da es aufgrund von unsymmetrischen Windkraftanlagen zu einer unsymmetrischen Stromverteilung, welche lediglich durch einen Mehraufwand des DC-DC-Konverter kompensiert werden kann, kommt. Da ein solcher Konverter ein wichtiges Element in einem Gleichspannungsnetz darstellt wird er im Kapitel 2.3.2 (Seite 10) gesondert thematisiert.

Für die drei Konfigurationen a, b und c, nach Abbildung 2, führt [5] eine Berechnung der Verlustleistung durch. Diese Berechnung ist in Abbildung 3 zusammengefasst.

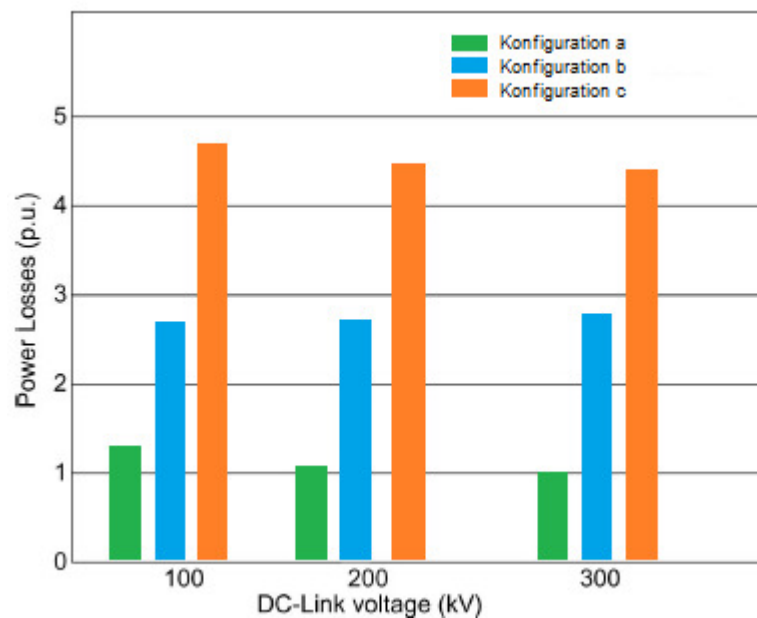


Abbildung 3 Verluste von verschiedenen Gleichspannungsnetzen nach [5]

Es zeigt sich, dass die Konfiguration a mit nur einem zentralen Konverter die geringsten Verluste aufweist. Dies wird damit begründet, dass aufgrund der geringen Ausdehnungen eines Windparks die Einsparung von Leitungsverlusten durch Einführung einer Mittelspannungsebene, wie in der Konfiguration c, die Transformationsverluste nicht wettmacht. Die Verluste der Konfiguration b basieren auf der Tatsache, dass jeder Konverter die verhältnismäßig geringe Leistung einer Windenergieanlage auf das hohe Potential der Verbindung zwischen Windpark und Festland transformieren muss.

2.3 Besonderheiten von Gleichspannungsnetzen

2.3.1 Vorwort

Dieses Kapitel zeigt die Besonderheiten von Gleichspannungsnetzen hinsichtlich der speziellen Schalt- und Transformationselemente. Ebenfalls wird auf das Verhalten im Fehlerfall eingegangen. Hierbei kann insbesondere aus Zeitgründen nur auf die Grundlagen der jeweiligen Gebiete eingegangen werden.

2.3.2 DC-DC-Konverter

Ähnlich einem Transformator im Wechselspannungsnetz ist auch ein DC-DC-Konverter ein wichtiges Element eines Gleichspannungsnetzes. Dieser dient zum Transformieren von Gleichspannungen. Sein grundsätzlicher Aufbau ist in Abbildung 4 dargestellt.

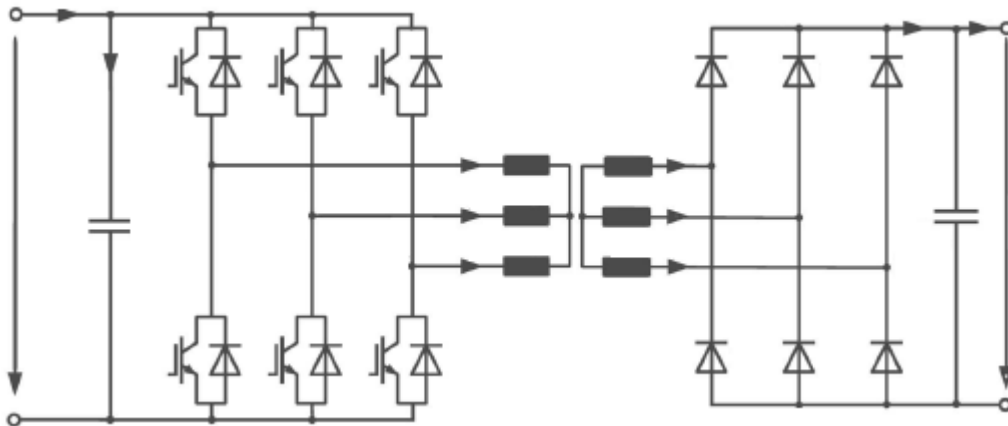


Abbildung 4 Aufbau eines DC-DC-Konverter [5]

Ein DC-DC-Konverter kann in sehr vielen unterschiedlichen Variationen ausgeführt werden. In dieser Arbeit wird der laut [5] für Hoch- und Höchstspannungen geeignetste Aufbau untersucht. Dieser zeichnet sich insbesondere dadurch aus, dass der Stromfluss nur in einer Richtung (hier von links nach rechts) erfolgt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass auf der Sekundärseite für die Gleichrichtung lediglich Dioden verwendet werden. Dies reduziert jedoch erheblich den benötigten Aufwand für eine solche Schaltung. Der grundsätzliche Aufbau basiert darauf, dass auf der Eingangsseite die Gleichspannung in eine rechteckförmige Dreh-

stromspannung zerlegt wird. Diese wird mittels eines Transformators auf das gewünschte Spannungsniveau transformiert und im Anschluss mittels Dioden gleichgerichtet. Mit einem Kondensator erfolgt eine Glättung. Um die Dimensionen des Transformators zu reduzieren ist mit höheren Frequenzen, d.h. größer 50 Hz, zu rechnen. Ferner ist davon auszugehen, dass für Hoch- und Höchstspannungen mehrerer solcher Schaltungen in Reihe und parallel geschaltet werden müssen um die Belastung für die Bauelemente zu reduzieren.

2.3.3 Schalteinrichtung für Gleichspannung

Für das Schalten von Gleichströmen, welche in einem Mittelspannetz erwartet werden, gibt es laut [3] drei grundsätzliche Schalteinrichtungen, welche nachfolgend erörtert werden. Diese besonderen Schalteinrichtungen sind nötig, da bei Gleichspannung ein klassischer, mechanischer Schalter aufgrund des Fehlens des Stromnulldurchganges nicht fehlerfrei funktioniert.

Solid State Circuit Breaker (SSCB)

Dieser Schalter basiert auf Halbleitern, welche laut [3] eine Abschaltung in wenigen μs erlauben. Die Notwendigkeit dieser kurzen Abschaltzeit wird im Kapitel 2.3.4 (Seite 15f.) beschrieben. Der Aufbau eines SSCBs ist in Abbildung 5 dargestellt.

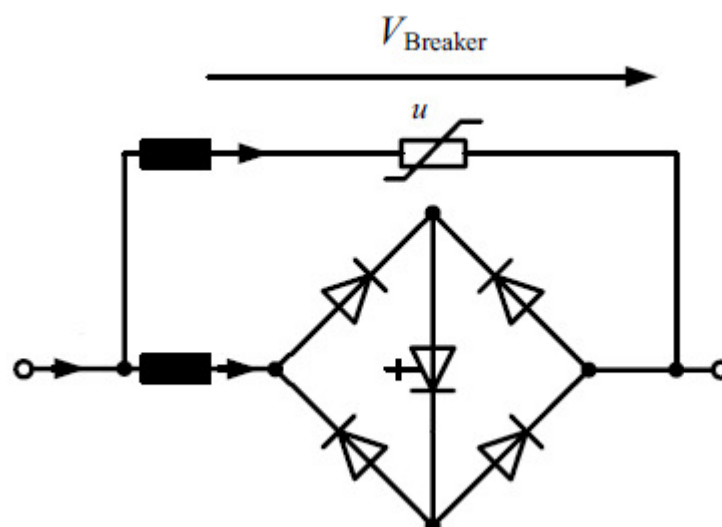


Abbildung 5 Aufbau eines SSCBs [3]

Da ein Stromfluss in beide Richtungen angestrebt wird, sind vier Dioden notwendig, damit der Strom durch das halbleitende Schaltelement (z.B. Thyristor) nur in eine Richtung fließt. Nachdem dieses den Strom ausgeschaltet hat, ist mit einer Spannungserhöhung über dem Schalter (V_{Breaker}) zu rechnen. Aus diesem Grund ist ein Varistor parallel zum Schaltelement angeordnet, welcher im stationären Fall sehr hochohmig ist. Lediglich bei einer zu hohen Abschaltspannung wird dieser leitend um so die Spannung über dem Schaltelement zu begrenzen und dieses vor der Zerstörung zu bewahren.

Die zweite Lösung bietet laut [3] ein **Hybrid Circuit Breaker** (Hybrid), welcher in Abbildung 6 dargestellt wird.

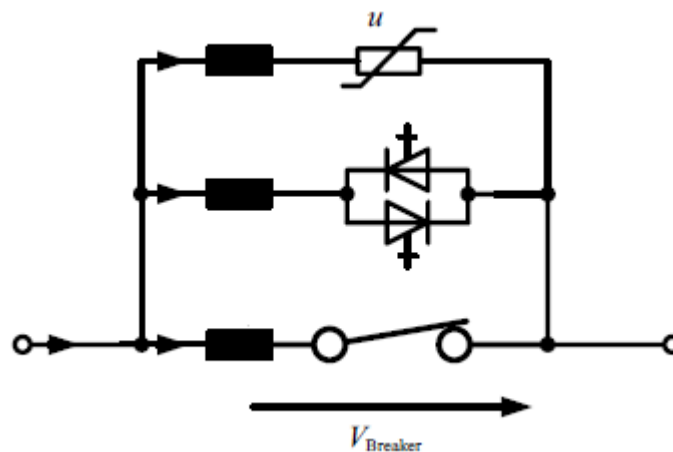


Abbildung 6 Aufbau eines Hybrid Circuit Breakers [3]

Gegenüber eines SSCBs reduziert ein Hybrid Circuit Breaker die Verluste im eingeschalteten Zustand indem zum halbleitenden Schaltelement ein mechanischer Schalter angebracht wird. Dieser dient im eingeschalteten Zustand zur Stromleitung, weshalb keine Verluste im halbleitenden Schaltelement entstehen. Die Ausschaltung erfolgt, indem vor dem Öffnen des mechanischen Schalters, die halbleitenden Elemente leitend werden und somit der mechanische Schalter stromlos öffnen kann. Danach erfolgt die Abschaltung ähnlich eines SSCBs. Durch die Tatsache, dass die halbleitenden Schaltelemente erst eingeschaltet werden müssen, der mechanische Schalter öffnen muss, bevor der Schaltzustand eines SSCBs erreicht wird, mit einer erhöhten Ausschaltzeit gerechnet.

Die dritte Lösung bietet nach [3] ein **Snubbered Mechanical Circuit Breaker (SMCB)**. Der Aufbau eines solchen Schalters ist in Abbildung 7 dargestellt.

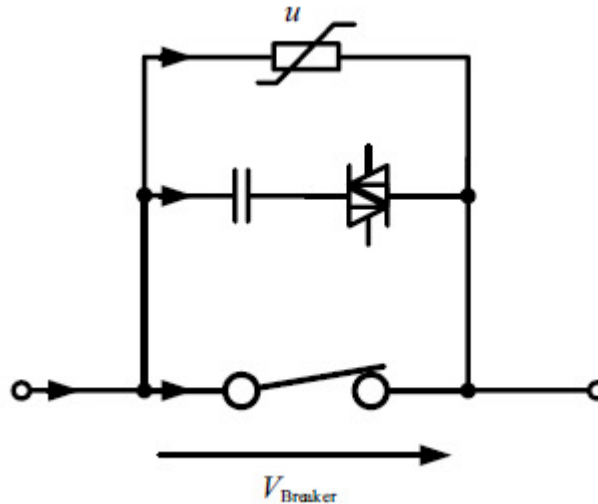


Abbildung 7 Aufbau eines Snubbered Mechanical Circuit Breaker [3]

Dieser Schalter hat im Gegensatz zu einem Hybrid einen Kondensator in Reihe zum schaltenden Halbleiterelement. Sobald der mechanische Schalter öffnet, wird der Kondensator geladen, was zu einer Reduktion des Stromes über den mechanischen Schalter und somit zum Abreißen des entstandenen Lichtbogens führt. Aufgrund der Spannungsüberhöhung während des Abschaltvorganges wird der Kondensator auf eine höhere Spannung als die Netzspannung aufgeladen. Somit käme es beim erzwungenen Nulldurchgang des Stromflusses zu einer Stromrichtungsumkehrung und der Kondensator würde sich in Richtung der Versorgungsspannung entladen. Um ein solches Verhalten zu unterbinden wird ein Halbleiterelement in Reihe zum Kondensator geschaltet, welches öffnet und somit einen Stromfluss in entgegengesetzter Richtung unterbindet.

Im Vergleich zum Hybrid kommt es zu einer Zeitersparnis und somit auch zu einer Begrenzung des maximal auftretenden Stromes im Fehlerfall (vgl. Kapitel 2.3.4 - Seite 15f.), da der mechanische Schalter sofort öffnen kann und sobald dieser geöffnet hat, der gesamte Schaltvorgang beendet ist.

Da im Fehlerfall aus der Zeit, die zum Öffnen benötigt wird, auf den maximal fließenden Strom geschlossen werden kann, lässt sich für die drei diskutierten Schaltelemente der maximal auftretende Fehlerstrom berechnen. Eine solcher Zusammenhang in Abhängigkeit von der Netzspannung ist in [3] angegeben und wird in Abbildung 8 dargestellt.

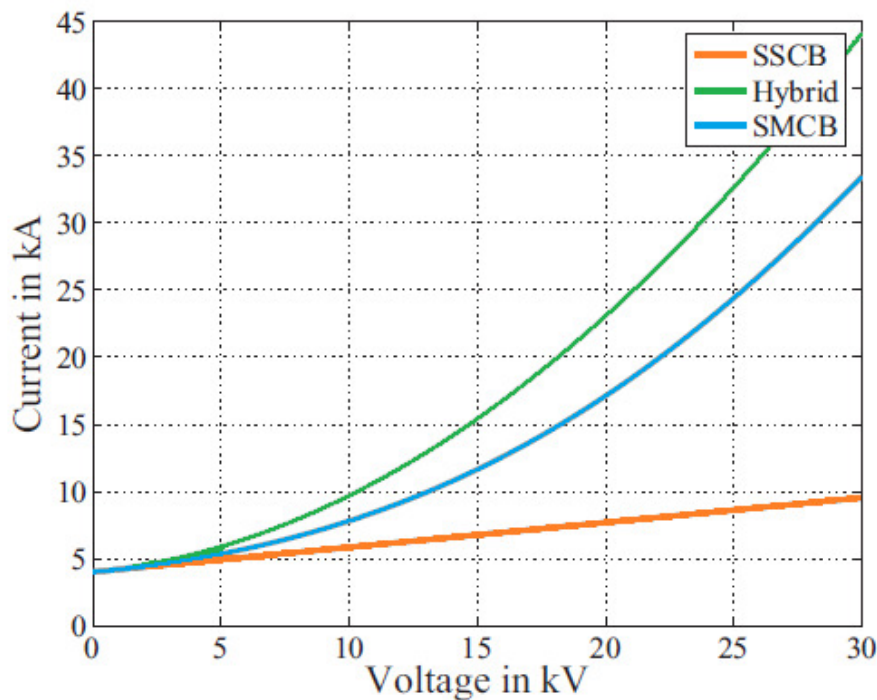


Abbildung 8 Vergleich zwischen Gleichspannungsschaltelementen nach [3]

Aus dieser Abbildung wird deutlich, dass im Mittelspannungsbereich lediglich ein SSCB in der Lage ist den Strom auf ein vertretbares Maß zu reduzieren. Folglich wird diesem Schalter die höchste Bedeutung für zukünftige Gleichspannungsnetze zugeschrieben.

Bei der Auswahl und dem Bau von zukünftigen Gleichspannungsschaltelementen ist zu beachten, dass die hier angesprochenen grundsätzlichen Aufbauten voraussetzen, dass die Halbleiterelemente in der Lage sind, die auftretenden Ströme zu schalten und die dabei entstehenden Spannungen zu isolieren. In den vorliegenden Forschungsarbeiten werden die halbleitenden Schaltelemente und deren Aufbau für die erwarteten Strom-, Spannungs- und Leistungswerte jedoch nicht thematisiert. Ihre fehlerfreie Funktion wird vorausgesetzt.

2.3.4 Verhalten von Gleichstromnetzen im Fehlerfall

In [3] wird eine Berechnung für einen Kurzschluss durchgeführt. Diese Berechnung basiert auf dem Ersatzschaltbild, welches in Abbildung 9 dargestellt wird.

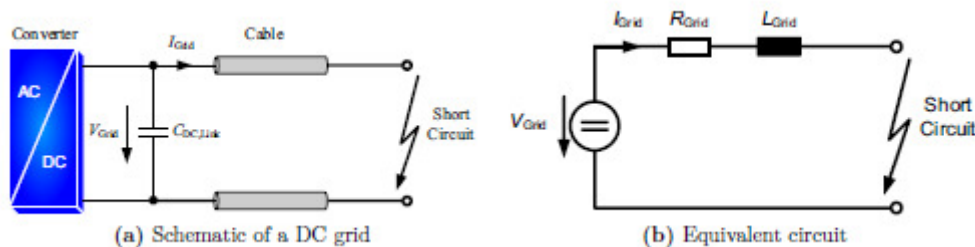


Abbildung 9 Ersatzschaltbild eines Gleichspannungskurzschlusses [3]

Dieses Ersatzschaltbild ersetzt das Kabel durch eine einfache R-L-Reihenschaltung. Für die Berechnung wird eine Spannung von 7000 V zugrunde gelegt. In einem vergleichbaren Wechselspannungsnetz wird in [3] ein Kurzschlussstrom von 17 kA für den stationären Zustand berechnet. Da bei einem Gleichspannungsnetz die Induktivität L_{Grid} lediglich im Einschaltmoment wirkt, ist der Strom im eingeschwungenen Zustand deutlich höher als im Wechselspannungsfall. Der Kurzschlussstrom in Abhängigkeit von der Zeit wird nach (1) berechnet.

$$i_{Grid}(t) = \frac{V_{Grid}}{R_{Grid}} * \left(1 - e^{-\frac{t * R_{Grid}}{L_{Grid}}} \right) \quad (1)$$

mit:

i_{Grid}	Kurzschlussstrom	A
t	Zeit	s
V_{Grid}	Netzspannung	V
R_{Grid}	Leitungswiderstand	Ω
L_{Grid}	Leitungsinduktivität	H

Mit den in [3] gewählten Leitungskennwerten ergibt sich der in Abbildung 10 gezeigte Verlauf des Kurzschlussstromes.

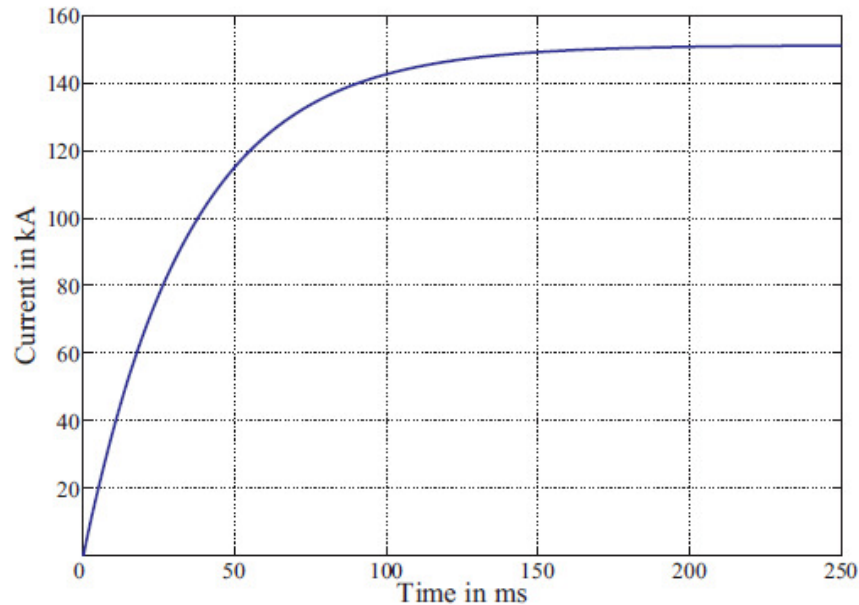


Abbildung 10 Verlauf des Kurzschlussstromes im Gleichspannungsnetz [3]

Aus diesem Verhalten wird deutlich, dass für ein Gleichspannungsnetz die Abschaltung sehr schnell erfolgen muss, da ansonsten das gesamte Netz auf einen im Verhältnis zur Wechselspannung deutlich höheren Kurzschlussstrom ausgelegt sein muss. Dieser Aspekt muss insbesondere bei der Wahl der Schalteinrichtung berücksichtigt werden.

2.4 Wirtschaftlicher Vergleich zwischen Gleich- und Wechselspannungsnetzen

Ein wirtschaftlichen Vergleich zwischen Wechselspannungs- und Gleichspannungsnetzen erfolgt in [6]. Dafür werden die Energieproduktionskosten für sechs verschiedene Windparkkonfigurationen berechnet.

Diese Konfigurationen werden in [6] wie folgt definiert:

"Small AC"

Ein "kleiner Wechselspannungswindpark" zeichnet sich dadurch aus, dass die Windenergieanlagen strahlenförmig zusammengeschaltet sind. Diese Strahlen gehen bei einem "kleinen" Windpark vom Festland aus um die Investitionskosten einer Offshore-Plattform einzusparen.

"Lage AC"

Gegenüber einem kleinen Windpark werden bei diesem Aufbau Windenergieanlagen auf See zusammengefasst und mittels einer höheren Wechselspannung zum Festland übertragen. Hierfür ist mit zusätzlichen Investitionskosten für eine Offshore-Plattform zu rechnen.

"Small DC"

Der Aufbau entspricht dem von "small AC" nur dass die Spannung hinter der Windenergieanlage gleichgerichtet wird.

"Large DC"

Ein "großer Gleichspannungspark" entspricht einem "großen Wechselspannungspark" nur dass die Übertragung mittels Gleichspannung erfolgt.

"AC/DC"

Unter dem Begriff "AC/DC" wird ein Windpark verstanden bei dem die Windenergieanlagen mittels Wechselspannung untereinander verbunden werden. Die Übertragung zwischen der Offshore-Plattform und dem Festland erfolgt mittels Gleichspannung. Diese Konfiguration bedarf jedoch eines erhöhten technischen Aufwandes auf der Offshore-Plattform.

"Serie DC"

Um die Kosten für die Hochtransformation der Gleichspannung einzusparen wird gegenüber dem "AC/DC"-Aufbau eine Reihenschaltung der Windenergieanlagen in Betracht gezogen. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass in [3] einen solcher Aufbau als wirtschaftlich unrentabel bezeichnet wird.

Nachfolgend sind in Abbildung 11 die Energieproduktionskosten in Abhängigkeit von der Übertragungslänge dargestellt. Es wird ein Windpark mit einer Leistung von 160 MW und einer durchschnittlichen Windgeschwindigkeit von 10 m/s zugrundegelegt.

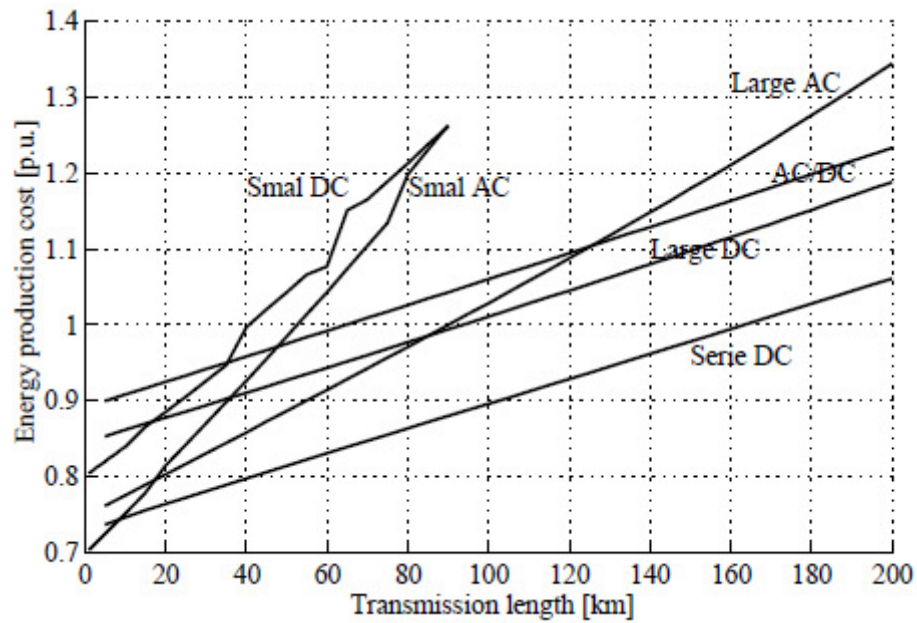


Abbildung 11 Wirtschaftlicher Vergleich zwischen sechs Windparkkonfigurationen [6]

Es ist deutlich, dass mit steigender Übertragungslänge die Übertragung mit Gleichspannung rentabler ist. Bei dem Vergleich zwischen "Serie DC" und "Large DC" ist zu beachten, dass die vorliegenden Daten auf Berechnungen des Jahres 2006 beruhen. Aufgrund der Weiterentwicklungen der Halbleitertechnologien ist zu erwarten, dass die Verlustleistungen der Konverter für heutige Verhältnisse zu hoch angenommen wurden und somit eine Annäherung zwischen "Serie DC" und "Large DC" oder sogar ein umgekehrtes Verhalten zu erwarten ist. Zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit liegen jedoch keine aktuelleren Angaben vor. Ferner ist es aufgrund der zeitlichen Beschränkung dieser Arbeit und der zur Verfügung stehenden Informationen nicht möglich eigene Berechnungen durchzuführen.

2.5 Zusammenfassung und Ausblicke

Insbesondere die wirtschaftlichen Betrachtungen haben verdeutlicht, dass der Einsatz von Gleichspannung bei Inselösungen eine gute Alternative gegenüber dem Einsatz von Wechselspannung bietet. Jedoch haben die vorangegangenen Kapitel ebenfalls gezeigt, dass es bei dem Einsatz von Gleichspannung noch einige technische Probleme zu lösen gilt. Dies wird deutlich wenn berücksichtigt wird, dass die gezeigten Lösungen auf theoretische Arbeiten basieren und zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit keine praktische Umsetzung von Gleichspannungsnetzen mit einer Nennspannung über 3,6 kV bekannt ist.

Da diese Arbeit keine Erkenntnisse, in Bezug auf die Prüfung von Gleichspannungskomponenten, welche für das Institut „Prüffeld für elektrische Hochleistungstechnik“ (IPH) von Interesse sind, liefern konnte, wird vom Autor empfohlen Projekte wie das E.ON Energy Research Center¹ weiter zu verfolgen. Dieses Zentrum ist ein Zusammenschluss aus Industrie und der RWTH Aachen um im Rahmen eines "Forschungscampus - Elektrische Netze der Zukunft", welcher auch seit dem 25.09.2012 durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung subventioniert wird, Probleme zukünftiger Netze zu untersuchen.

¹ <http://www.eonerc.rwth-aachen.de/aw/cms/website/themen/~ukq/home/?lang=en> Stand: 10.02.13

3 Teilentladungsmessung bei Gleichspannung

3.1 Grundlagen der Teilentladungsmessung

In vorangegangenen Abschlussarbeiten, wie zum Beispiel "*Grundlegende Untersuchungen zum Teilentladungsverhalten einer Spitze – Platte Elektrodenkonfiguration bei Gleichspannungsbelastung in unterschiedlichen Isoliermedien*" [7], "*Grundlegende Untersuchungen zum Teilentladungsverhalten einer Spitze-Platte-Elektrodenkonfiguration bei Gleichspannungsbeanspruchung als Nachbildung einer leitenden Fehlstelle in polymeren Isolierungen*" [8] sowie "*Gleichspannungsteilentladungen in modifizierten transparenten Silikonen*" [9] werden einleitend ausführlich die physikalischen Phänomene wie Polarisierungseffekt, Entladungsmechanismen, Ersatzschaltbilder für innere und äußere Teilentladungen, usw. thematisiert. Insbesondere aus Zeitgründen werden diese Eigenschaften hier nicht erörtert, sondern als bekannt vorausgesetzt. Ebenfalls ist zu beachten, dass die, in den oben genannten Arbeiten, erklärten Entladungsmechanismen das Teilentladungsverhalten bei Gleichspannung nicht erklären können.

3.2 Besonderheiten von Gleichspannungsteilentladungsmessungen

3.2.1 Vorwort

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde das zur Detektion von Teilentladungen entwickelte Messsystem MPD 600 der Firma OMICRON electronics GmbH verwendet. Laut Herstellerangaben [10] kann es Teilentladungen sowohl bei Wechselspannung als auch bei Gleichspannung erfassen. Der grundsätzliche Messaufbau ist in beiden Fällen annähernd der selbe.

Nachfolgend werden die Unterschiede einer Gleichspannungsteilentladungsmessung gegenüber einer Messung mit Wechselspannung dargelegt.

3.2.2 Kalibrierung des Messsystems

Standardmäßig wird bei einer Wechselspannungsmessung beim MPD 600 die Funktion "Auto-gain" im PD-Reiter der Software (vgl. Abbildung 12) aktiviert. Dies führt dazu, dass beim Ausbleiben von Teilentladungen die Software probiert das Grundrauschen zu reduzieren indem die Verstärkung erhöht wird.

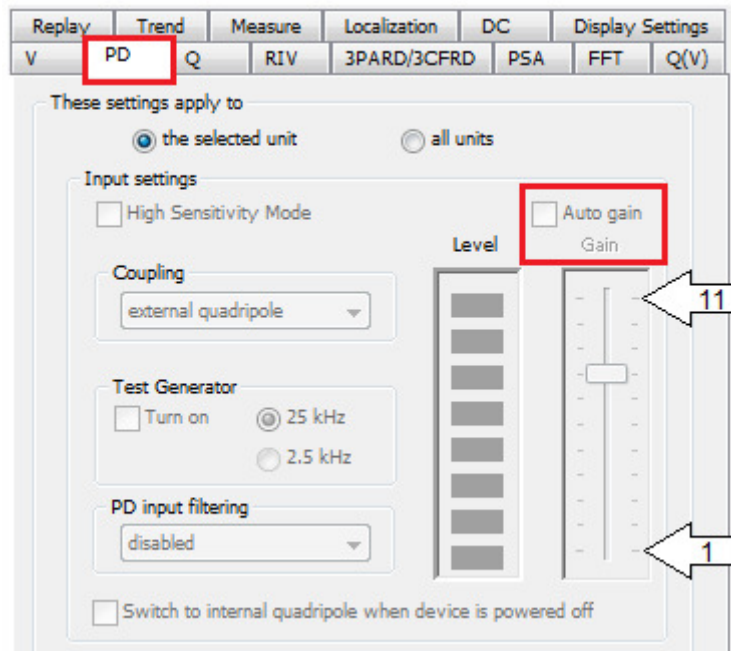


Abbildung 12 Software eines MPD 600 zur Kalibrierung

Laut [10] und [11] treten bei Gleichspannungsmessungen jedoch wenige Impulse im Vergleich zur Wechselspannung auf. Dies führt dazu, dass bei aktiviertem "Au-

to-gain" die Software, beim Fehlen von Teilentladungen, den Verstärkungsfaktor sehr groß wählt. Treten bei dieser Einstellung Teilentladungen auf, können diese gegebenenfalls, aufgrund von Übersteuerungen, nicht richtig bzw. gar nicht erkannt werden. Dieses Problem wird gelöst indem die Messung mit einem konstanten Faktor, das heißt ohne "Auto-gain", durchgeführt wird.

Der Hersteller empfiehlt, den Kalibrator möglichst auf die Höhe der erwarteten Teilentladungen (in dieser Arbeit wird die Einstellung 100 pC verwendet, da sich bei Vorgängerarbeiten dieser Wert bewehrt hat) einzustellen und mittels aktiviertem "Auto-gain" die optimale Verstärkung zu ermitteln. Anschließend ist die Funktion "Auto-gain" zu deaktivieren und eine Kalibrierung nach [12] durchzuführen.

Da in der vorliegenden Arbeit mit verschiedenen Verstärkungsstufen gearbeitet wird, die Software jedoch keine eindeutige Zuordnung erlaubt wird an dieser Stelle eine Nummerierung der verschiedenen Stufen von eins bis elf, wie in Abbildung 12 dargestellt, eingeführt.

3.2.3 Messung der Spannung

Die einzige Änderung im Prüfaufbau zwischen einer Wechselspannungs- und einer Gleichspannungsmessung ist bei der Auskopplung des Spannungssignals für das MPD 600 System. Bei Wechselspannungsmessungen wird standardmäßig auf einen kapazitiven Teiler zurückgegriffen. Dieser kann idealisiert und mit einer Induktivität kompensiert als verlustlos angesehen werden. Er stellt somit keine Belastung für den Prüftransformator dar. Bei Gleichspannung lässt sich dieses Prinzip jedoch nicht umsetzen, da ein Kondensator nach seiner Aufladung einen nahezu unendlichen Widerstand darstellt. Aus diesem Grund muss auf einen Ohmschen Teiler zurückgegriffen werden, welcher jedoch aufgrund seines Ohmschen Verhaltens eine Belastung für den Prüftransformator und insbesondere für den Glättungskondensator nach der Gleichrichtung darstellt. Der verwendete Messaufbau wird im Kapitel 4.2.2 (Seite 37ff.) ausführlich beschrieben.

Ebenfalls muss die Software im V-Reiter (vgl. Abbildung 12) auf das Teilverhältnis eingestellt werden. Dieses kann bei bekannter Spannung von der Software berechnet oder direkt eingetragen werden. Bei dem in der Beuth Hochschule für Technik Berlin verwendeten Messplatz wird, nach Rücksprache mit Herrn Professor Pepper, ein Spannungsfaktor von 5000 verwendet.

Des Weiteren ist die Software aufgrund des Fehlens einer Wechselspannung auf einen internen "Line-Trigger" von z.B. 50 Hz einzustellen.

3.3 Auswertung von Gleichspannungsteilentladungsmessungen

3.3.1 Vorwort

Bei Wechselspannung hat sich in den vergangenen Jahrzehnten eine Auswertung mittels phasenaufgelösten Diagrammen bewehrt. Solche Diagramme können in Echtzeit von der verwendeten Software erstellt werden und ermöglichen einem Experten eine schnelle und gute Einschätzung der Fehlerart. Ebenfalls ist bei geeignetem Prüfaufbau eine Unterscheidung zwischen Teilentladungen durch den Prüfkörper und externen Störungen möglich.

Bei Gleichspannung fehlt dieses Diagramm, weshalb es nötig war, neue Ansätze für die Auswertung von Teilentladungen zu finden. Mögliche Ansätze sind in [10], [13] und [14] aufgeführt. Nachfolgend sollen die grundlegenden Ideen dargestellt und die Umsetzung in dieser Arbeit geschildert werden.

3.3.2 Export von Daten

Aufgrund der neuartigen, im nachfolgenden beschriebenen, Auswertungsmöglichkeiten ist es nötig die Datenexportfunktion der Software zu nutzen. Hierbei wird ein Textdokument erstellt, welches folgende Informationen (vgl. Abbildung 13) beinhaltet und diese durch Komma trennt.

```
time [s],charge [C],DC voltage [V]
0.102472707,-3.48048e-013,0
0.102485207,-3.29088e-013,0
0.102498488,-4.11669e-013,0
0.102508848,-2.1055e-013,0
```

Abbildung 13 Datenexport (Stream 13)

Diese Daten können in diversere Programme (z.B. Microsoft Excel ©) eingefügt und bearbeitet werden. In der vorliegenden Arbeit werden diese Daten durch ein selbst programmiertes Programm, welches in der Anlage 1 (Seite 91f.) beschrieben wird, aufbereitet und in einem für Microsoft Excel © kompatiblen Format gespeichert.

3.3.3 Darstellung als Pard-Diagramm

Die bei einer Wechselspannungsmessung übliche Darstellung, ein Phase Amplitude Relation Diagram (Pard-Diagramm) ist ebenfalls bei Gleichspannung möglich. Hierbei wird als Anhaltspunkt nicht die Phasenlage, sondern ein interner Zeitgeber verwendet. Die Software ermöglicht es ebenfalls, die Restwelligkeit der Gleichspannung abzubilden. Hierbei ist zu beachten, dass die Software keine Skala für die Spannung angibt, weshalb diese Information durch den Autor manuell hinzugefügt wird [rote Umrandung]. Ferner ist zu beachten, dass in der logarithmischen Darstellung der Teilentladungen, ein "Kästchen" nicht der Einheit der Spannung entspricht, sondern sich im Hintergrund eine lineare Einteilung aus acht vertikalen "Kästchen" verbirgt.

Dieses Diagramm kann insbesondere in Hinsicht auf Häufungen untersucht werden, da diese bei Gleichspannung nicht auftreten dürften. Sollte eine solche Häufung dennoch sichtbar sein, ist als mögliche Ursache eine fremde Störquelle auf der Wechselspannungsseite, welche auf die Gleichspannungsseite einkoppelt, denkbar. Eine numerische Auswertung dieses Verfahrens wird im Kapitel 3.3.8 (Seite 29ff.) erläutert.

Nachfolgend wird beispielhaft ein solches Diagramm in Abbildung 14 dargestellt:

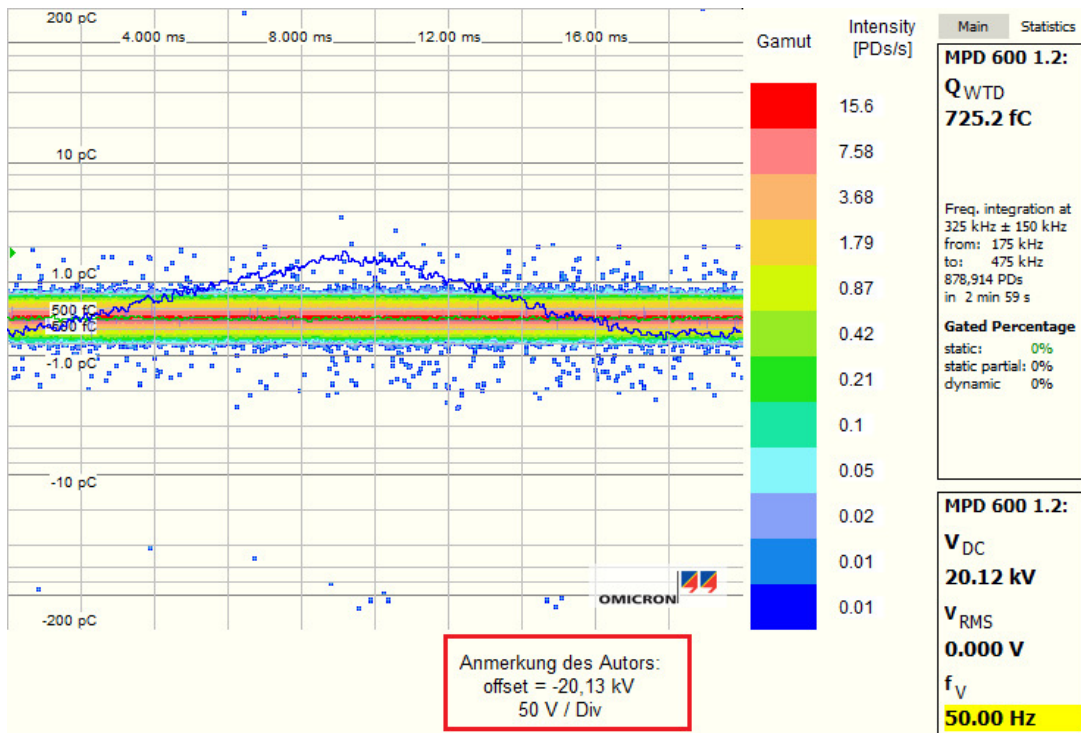


Abbildung 14 Histogramm (Stream 13)

3.3.4 3-Frequenzmethode (3CFRD)

Die verwendete Messtechnik ist in der Lage, bei einer MPD 600 Station in drei verschiedenen Frequenzbereichen zu messen. Dies führt laut [13] dazu, dass eine Unterscheidung zwischen Teilentladungen des Prüfkörpers und externen Störungen möglich ist. Es wird damit begründet, dass unterschiedliche Entladungsformen in verschiedenen Frequenzbändern messbar sind. Die Quelle verwendet, dabei folgende Frequenzbänder:

400 kHz \pm 325 kHz / 4 MHz \pm 325 kHz / 9MHz \pm 325kHz

Einer großer Vorteil dieser Darstellung ist, dass sie in Echtzeit, d.h. während der Messung, erzeugt werden kann.

Das in [13] angegebene Beispiel zeigt Abbildung 15:

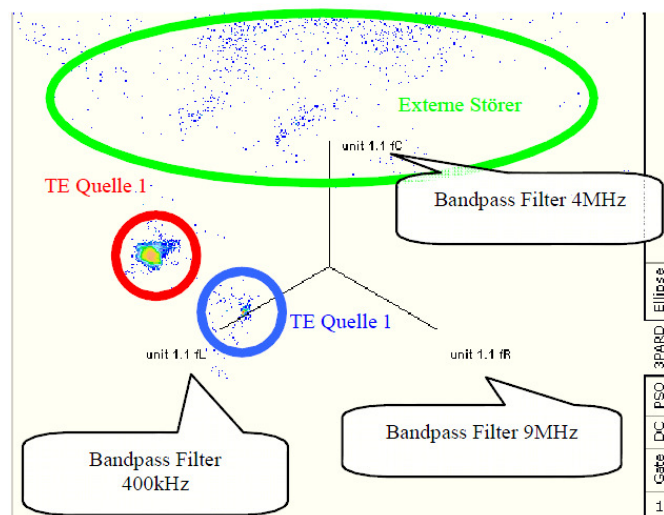


Abbildung 15 Multiple TE-Quellen, dargestellt und separiert durch 3CFRD [13]

Es wird in [13] folgende Auswertung getroffen:

"Die durch den roten und den blauen Kreis markierten Cluster in Abbildung 15 [Änderung des Autors] repräsentieren TE-Aktivität, während das Pulscluster im Bereich der grünen Ellipse externe Störer darstellt, welche für die eigentliche TE-Auswertung nicht weiter berücksichtigt werden."

3.3.5 Bewertung der Impulsform und im Frequenzbereich

Ähnlich dem Kapitel 3.3.4 (Seite 26) kann das unterschiedliche Spektralverhalten verschiedener Teilentladungsquellen dazu genutzt werden, eine Unterscheidung der Quellen zu ermöglichen. Auch diese Methode kann von der Software in Echtzeit zur Verfügung gestellt werden. Ferner kann die Impulsform für einen Impuls exportiert werden und erlaubt so eine nachträgliche Bearbeitung der Daten.

Nachfolgend werden in Abbildung 16 und Abbildung 17 Beispiele für die Darstellungsformen der Software präsentiert:

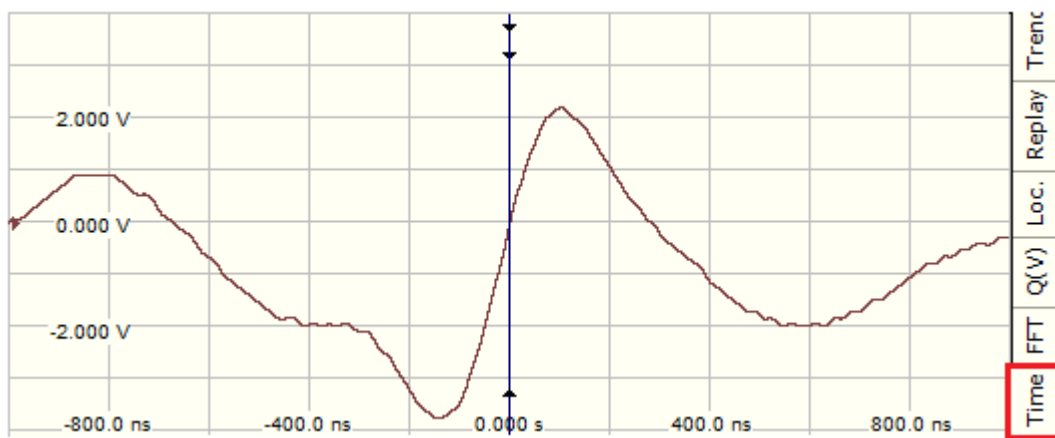


Abbildung 16 Impulsform (Stream 13)

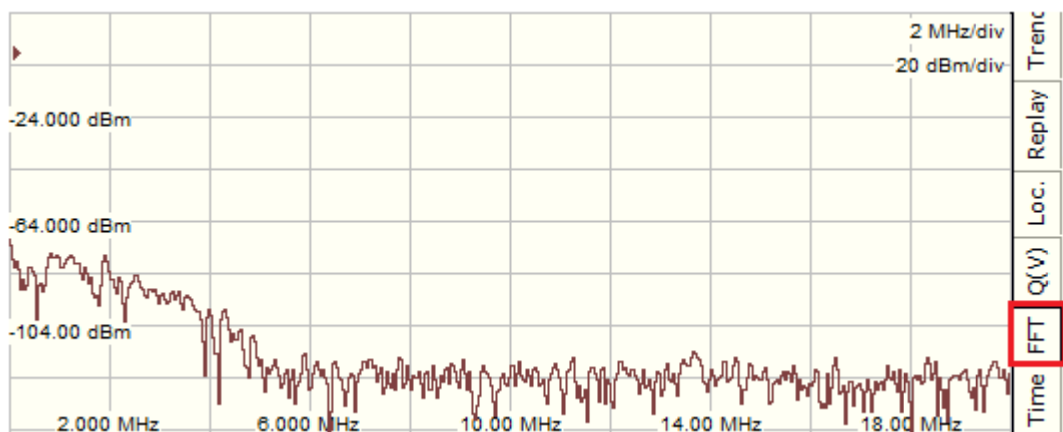


Abbildung 17 FFT (Stream 13)

3.3.6 Ladungsdichte

Durch den Datenexport ist es möglich, auch neuartige Diagramme zu erstellen. Das nachfolgend dargestellte Diagramm der gewichteten Ladung ist prinzipiell bei Wechsel- und Gleichspannung anwendbar [13]. Bei dieser Art der Aufbereitung werden die Daten in Gruppen eingeteilt, das heißt es werden bestimmte Gruppen z.B. $0 \text{ pC} < x \leq 25 \text{ pC}$, $25 \text{ pC} < x \leq 50 \text{ pC}$, $50 \text{ pC} < x \leq 75 \text{ pC}$ usw. erstellt. In den einzelnen Gruppen werden die Anzahl sowie die Höhe der Impulse aufaddiert.

Laut [13] gilt dabei, dass sich innere Teilentladungen durch ein Maximum nahe des Rauschens und äußere Teilentladungen deutlich oberhalb des Rauschens auftreten. In der vorliegenden Arbeit liegt das Rauschen in der Regel bei $\pm 1 \text{ pC}$.

Zur Verdeutlichung der Darstellungsart ist in Abbildung 18 ein solches Diagramm für innere Teilentladungen dargestellt:

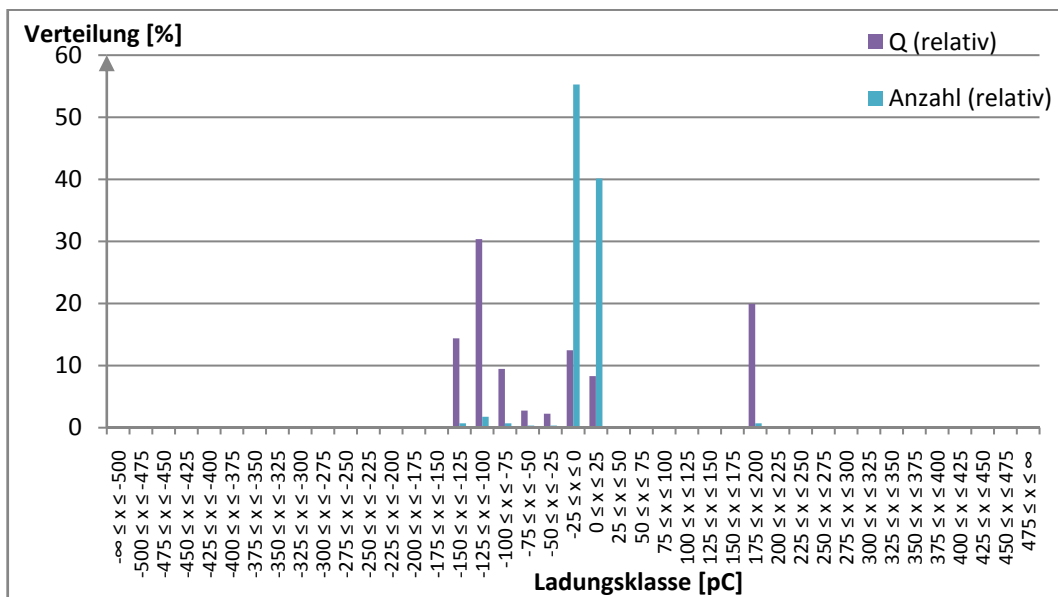


Abbildung 18 Ladungsklasse (Stream 13)

3.3.7 Polarität

Aufgrund der Eigenschaften einer Gleichspannung, ist zu erwarten, dass Teilentladungsimpulse nur mit einer Polarität gemessen werden. Da es grundsätzlich möglich ist, die Teilentladungen mittels des verwendeten Messsystems mit der korrekten Polarität zu messen, jedoch in der vorliegenden Arbeit, sowie in [8] und [9] Teilentladungen beider Polaritäten gemessen wurden, gilt es diese näher zu untersuchen. Eine Untersuchung unter Berücksichtigung des elektrischen Kanals erfolgt in Kapitel 4.4.6 (Seite 63f.). Eine weitergehende Untersuchung möglicher Störungen unter Berücksichtigung von weiteren Sensoren erfolgt in Kapitel 4.4.9 (Seite 70ff.)

3.3.8 Zeitabhängigkeit

Zur Auswertung des Teilentladungsverhaltens unter Berücksichtigung der Zeit gibt es grundsätzlich drei Möglichkeiten. Es kann die Ladung in Abhängigkeit von der Zeit, das Zählen von Impulsen, sowie die Zeit zwischen Impulsen zur Auswertung verwendet werden.

Die Software der Firma OMICRON electronics GmbH bietet zwei Möglichkeiten der Echtzeitauswertung von Messungen. Hierbei ist das Programm in der Lage die **Ladung in Abhängigkeit von der Zeit** darzustellen. Ein solches Q(t)-Diagramm ist in Abbildung 19 nachfolgend dargestellt und erlaubt einen schnellen Überblick über das Teilentladungsverhalten des Prüfkörpers. Insbesondere bei langen Stehspannungsmessungen ist ein Unterschied im TE-Verhalten zwischen Messbeginn und Messende zu erwarten.

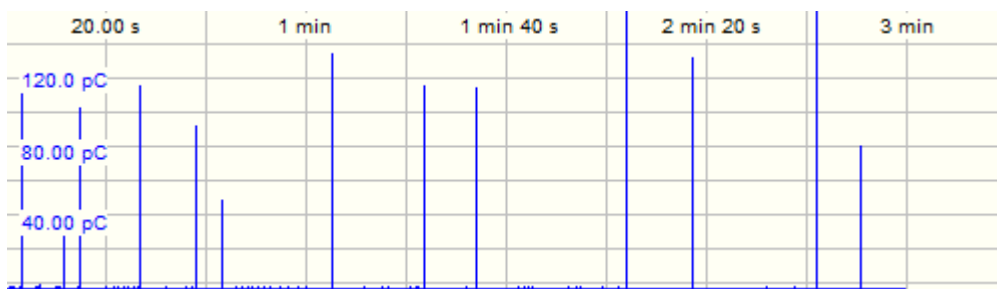


Abbildung 19 Ladung in Abhängigkeit von der Zeit (Stream 13)

Eine weitere Möglichkeit der Darstellung in Abhängigkeit von der Zeit ist das **Zählen von Impulsen** in einem bestimmten Zeitintervall. Diese Darstellung erlaubt ähnlich einem Q(t)-Diagramm einen schnellen Einblick in das Teilentladungsverhalten und insbesondere dessen Veränderung.

Ferner ist eine Aufsummierung über dieses Zeitintervall einstellbar. Die Software lässt sich in Bezug auf die Länge des Zeitintervalls und die Höhe der zu zählenden Impulse konfigurieren. Da die Software diese Einstellungen nicht darstellt (vgl. Abbildung 20) und im IPH aufgrund von fehlenden Erkenntnissen kein Standard bekannt ist, werden diese Informationen vom Autor [rote Umrandung] bei dieser Art der Darstellung hinzugefügt.

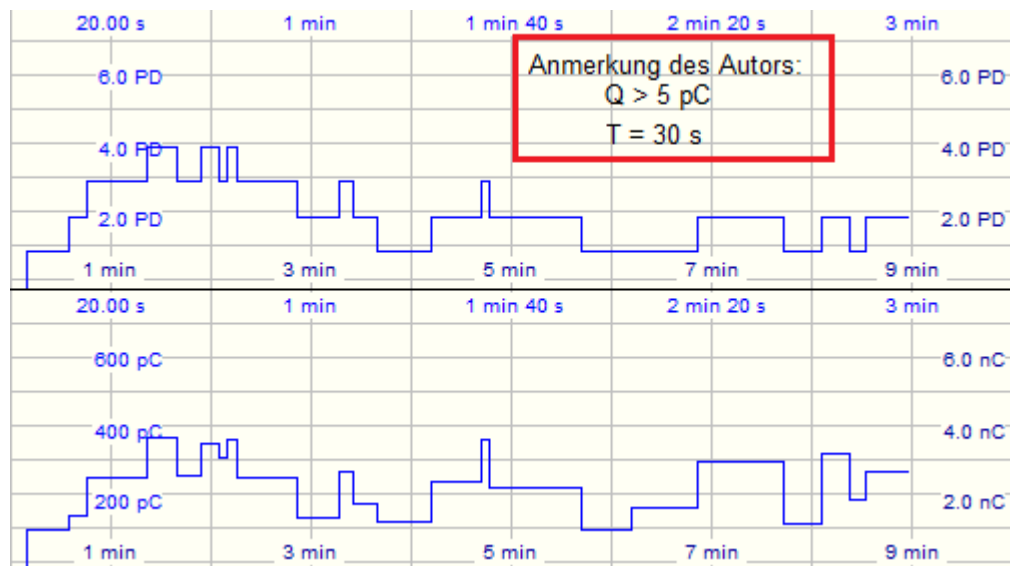


Abbildung 20 Ladungszähler (Stream 13)

Die dritte Art der Auswertung auf Grundlage der Zeit ist das Messen der **Zeit zwischen** einzelnen **Teilentladungsimpulsen**. Eine solche Darstellung wird nicht von der Software direkt unterstützt, sondern in der vorliegenden Arbeit mittels der "Export-Funktion" und Microsoft Excel © realisiert. Diese Art der Darstellung erlaubt einen schnellen Überblick, ob Häufungen im Bereich der Periodendauer bzw. der halben Periodendauer der speisenden Wechselspannung auftreten. Eine solche Häufung kann, wie bereits beschreiben, ein Indiz dafür sein, dass Störungen von der Wechselspannungs- auf die Gleichspannungsseite einkoppeln.

Nachfolgend ist in Abbildung 21 ein solches Diagramm dargestellt:

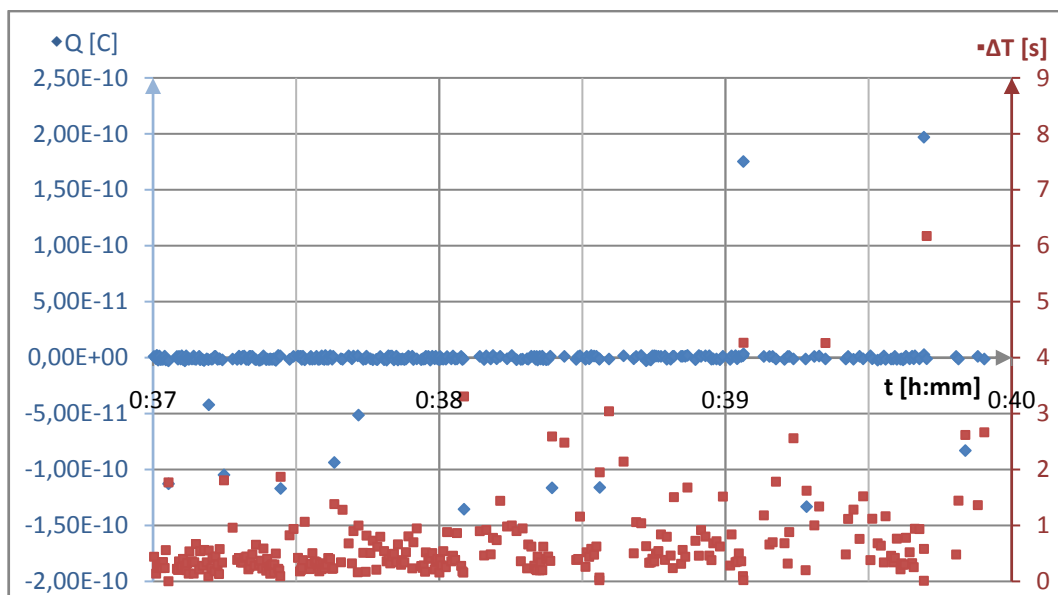


Abbildung 21 Zeit zum nachfolgenden Impuls (Stream 13)

Die Bestimmung der Zeit zum nachfolgenden Impuls kann noch erweitert werden. So ist es z.B. denkbar, dass ähnlich dem Diagramm "Ladungsklassen" Gruppen gebildet werden und die Zeit innerhalb dieser Gruppe bzw. die Zeit zur nächsten Teilentladung gemessen und anschließend in einer solchen Gruppe ein Mittelwert gebildet wird. Ebenfalls kann die Zeit zum vorherigen Impuls zur Auswertung berechnet werden.

3.3.9 Statistik

Das verwendete Messsystem erlaubt eine statistische Erhebung über ein frei wählbares Zeitintervall. In diesem Zeitintervall kann die Impulswiederholrate N sowie der Mittelwert der Ladung bestimmt werden. Beide Größen sind insbesondere bei Langzeitmessungen von großem Interesse und erlauben eine Aussage über das Verhalten des Prüfkörpers in Abhängigkeit von der Belastungsdauer. Bei der Bestimmung des Mittelwerts der Ladung ist zu beachten, dass dieser Mittelwert eine Gewichtung berücksichtigt. Diese Gewichtung ist auf die DIN EN 60270 "Hochspannungs-Prüftechnik-Teilentladungsmessung" [15] zurückzuführen. Dort wird eine Reduktion des Anzeigewertes R in Abhängigkeit von der Impulswiederholungsfrequenz N wie in Tabelle 2 folgt empfohlen.

Tabelle 2 Impulsfolgeantwort von TE-Messgeräten nach [15]

N (1/s)	1	2	5	10	50	≥ 100
R_{\min} (%)	35	55	76	85	94	95
R_{\max} (%)	45	65	86	95	104	105

Ferner heißt es in [15]:

"Diese Eigenschaft [Anmerkung des Autors: die Reduktion des Anzeigewertes] ist notwendig, um die Vergleichbarkeit von Anzeigen zu erreichen, die mit unterschiedlichen Arten von Messgeräten [Anmerkung des Autors: z.B. ein analoges Teilentladungsmessgeräte] gewonnen werden."

3.3.10 Zusammenfassung

Aufgrund des Fehlens der Phasenlage der Teilentladungen wurden die oben geschilderten neuen Auswertungsmöglichkeiten entwickelt. Diese haben grundsätzlich das Potential Teilentladungen nach inneren und äußeren zu unterscheiden und erlauben Informationen über das Verhalten eines Prüfkörpers. Da diese Methoden relativ neu sind liegen derzeit kaum Informationen über die richtige Interpretation dieser Diagramme vor. Ziel dieser Arbeit ist es deshalb diese Art der Auswertung näher zu untersuchen.

3.4 Begriffsdefinitionen und Erläuterungen

Für das Verständnis der vorliegenden Arbeit ist es notwendig bestimmte Begriffe zu definieren und dessen Auslegung in dieser Arbeit zu erörtern. Da für bestimmte Begriffserklärungen andere Definitionen benötigt werden, erfolgen die Definitionen in einer für das Verständnis sinnvollen Reihenfolge.

Stream

Als Stream wird eine durch die verwendete Messsoftware erstellte Datei bezeichnet, die einen Großteil der Messinformationen beinhaltet. Diese Informationen können nachträglich wiedergegeben und ausgewertet werden. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass die Aufzeichnung fehlerfrei beendet wird. Da dies nicht immer gewährleistet werden kann, sondern Programmfehler auftreten können, werden nur Zeitintervalle von wenigen Minuten aufgezeichnet.

Damit die Auswertungen nachvollziehbar sind und die Reproduzierbarkeit gewährleistet ist, werden die Messdaten, d.h. die Streams, den Auswertungen zugeordnet. Um diese Zuordnung in der Arbeit abzukürzen werden die Streams durchnummeriert und in Anlage 2 (Seite 93ff.) den tatsächlichen Dateinamen zugeordnet. Hierbei ist zu beachten, dass nicht jeder Stream im Rahmen der Auswertung explizit angesprochen wird, da bei ähnlichen Messdaten, bzw. Ergebnissen, lediglich ein Stream genannt wird.

Aufzeichnungsphase / Aufzeichnungspause

Eine Aufzeichnungsphase beschreibt einen Zeitraum, indem ein Stream aufgezeichnet wird. Wie im oberen Punkt beschrieben ist es jedoch sinnvoll dazwischen Aufzeichnungspausen einzulegen.

Datenverlust

Datenverlust beschreibt ein Zeitintervall, in dem ein Stream gestartet wurde, jedoch aufgrund eines Programmfehlers nicht beendet werden konnte und somit die aufgezeichneten Daten zur Auswertung nicht zur Verfügung stehen.

Gleichspannung

Da die physikalischen Prozesse, die zu einer Teilentladung bei Gleichspannung führen, bislang nicht geklärt sind, ist es notwendig, Faktoren wie die Restwelligkeit und die Dauer der angelegten Gleichspannung in die Untersuchung mit einzubeziehen. Die Dauer der Gleichspannung ist insbesondere unter dem Aspekt der Polarisierung von Bedeutung. Da bislang keine Informationen vorliegen, welchen Zeitraum diese Polarisierungsvorgänge in Anspruch nehmen und welchen Einfluss sie auf das Teilentladungsgeschehen haben, ist es nötig die Dauer der Gleichspannung in die Auswertung mit einzubeziehen. Ferner ist laut DIN EN 60060 (Hochspannungs-Prüftechnik - Allgemeine Begriffe und Prüfbedingungen) [16] für eine Gleichspannungsprüfung eine maximale Restwelligkeit von 3% zulässig.

Teilentladungseinsatz bei Gleichspannung

In der Literatur (z.B. [11]) wird der Teilentladungseinsatz bei Gleichspannung mit einem Teilentladungsimpuls pro Minute festgelegt. Hierbei wird jedoch nicht erörtert ob dies zwingend ein Impuls pro Minute bedeutet oder ob beispielsweise ein Impuls nach 70 Sekunden und der zweite Impuls nach 100 Sekunden auftreten dürfen. Ferner konnte keine Begründung für das gewählte Zeitfenster von einer Minute gefunden werden. Aus diesen Gründen werden in dieser Arbeit auch Impulse aufgezeigt und bewertet, die nicht dieses Zeitfenster einhalten. Grundvoraussetzung hierfür ist lediglich, dass die Impulse nicht als Störung durch Änderung der Spannung entstehen.

Filtereinstellung

Bevor eine Messstation Informationen über ein Eingangssignal zum Messrechner überträgt, werden diese digitalisiert und anschließend auf ihren Frequenzgehalt überprüft. Diese Überprüfung erlaubt durch die Wahl der Filtereinstellung ungewollte Signale herauszufiltern. Diese Filtereinstellungen können in Form der Grenzfrequenzen f_1 [Hz] und f_2 [Hz] oder durch die Mittenfrequenz f_m [Hz] und die Bandbreite Δf [Hz] angegeben werden.

Dabei gelten folgende Zusammenhänge:

$$\Delta f = f_2 - f_1 \quad (2)$$

$$f_m = f_1 + \frac{\Delta f}{2} = f_2 - \frac{\Delta f}{2} \quad (3)$$

mit:

Δf	Bandbreite	Hz
f_m	Mittenfrequenz	Hz
f_2	obere Grenzfrequenz	Hz
f_1	untere Grenzfrequenz	Hz

4 Messungen

4.1 Vorwort

In diesem Kapitel der Arbeit wird der verwendete Messaufbau, das Messregime, die Prüfkörperherstellung und die Messdurchführung beschrieben. Anschließend erfolgt die Präsentation der Messungen in Form von Messreihen. Diese Messreihen werden nach festgelegten Messzielen aufgenommen. Ein solches Messziel ist zum Beispiel das Erstellen eines "Ladungsdiagramms", weshalb die Messreihen auch nach einer entsprechenden Frage- oder Aufgabenstellung benannt werden. Dieses Herangehen erlaubt eine punktgenaue Bearbeitung von Problemstellungen bezüglich der richtigen Messung bzw. Auswertung von Teilentladungsmessungen bei Gleichspannung. Dies führt dazu, dass die unter einer Messreihe zusammengefassten Auswertungen teilweise auf verschiedene Messtage und auch auf unterschiedlichen Prüfkörpern beruhen. Ferner werden, sofern möglich, die dabei gewonnen Ergebnisse auch zur Auswertung hinsichtlich des Verhaltens der Prüfkörper verwendet, um so gegebenenfalls Anhaltspunkte für die physikalischen Prozesse innerhalb der Prüfkörper zu gewinnen. Im Rahmen dieser Bachelorarbeit ist es jedoch aufgrund der zeitlichen Beschränkung, der hohen Anzahl an benötigten Messungen, sowie der Zielstellung der Arbeit nicht möglich diese physikalischen Prozesse zu erklären.

4.2 Messaufbau, Messregime und Prüfkörperherstellung

4.2.1 Vorwort

Dieses Kapitel widmet sich dem Messaufbau, der eingesetzten Sensoren, sowie der verwendeten Prüfkörper. Hierzu werden insbesondere die Besonderheiten der Gleichspannungsteilentladungsmessung betont sowie auf Schwierigkeiten aufmerksam gemacht.

4.2.2 Messaufbau

Der grundsätzliche Messaufbau an der Beuth Hochschule für Technik Berlin wurde von Herrn Brüggemann im Rahmen seiner Abschlussarbeit [8] konzipiert. Dieser sieht eine Einweggleichrichtung, einen Glättungskondensator, sowie einen Kondensator zum Auskoppeln der Teilentladungsimpulse vor. Der grundlegende Aufbau ist in Abbildung 22 dargestellt.

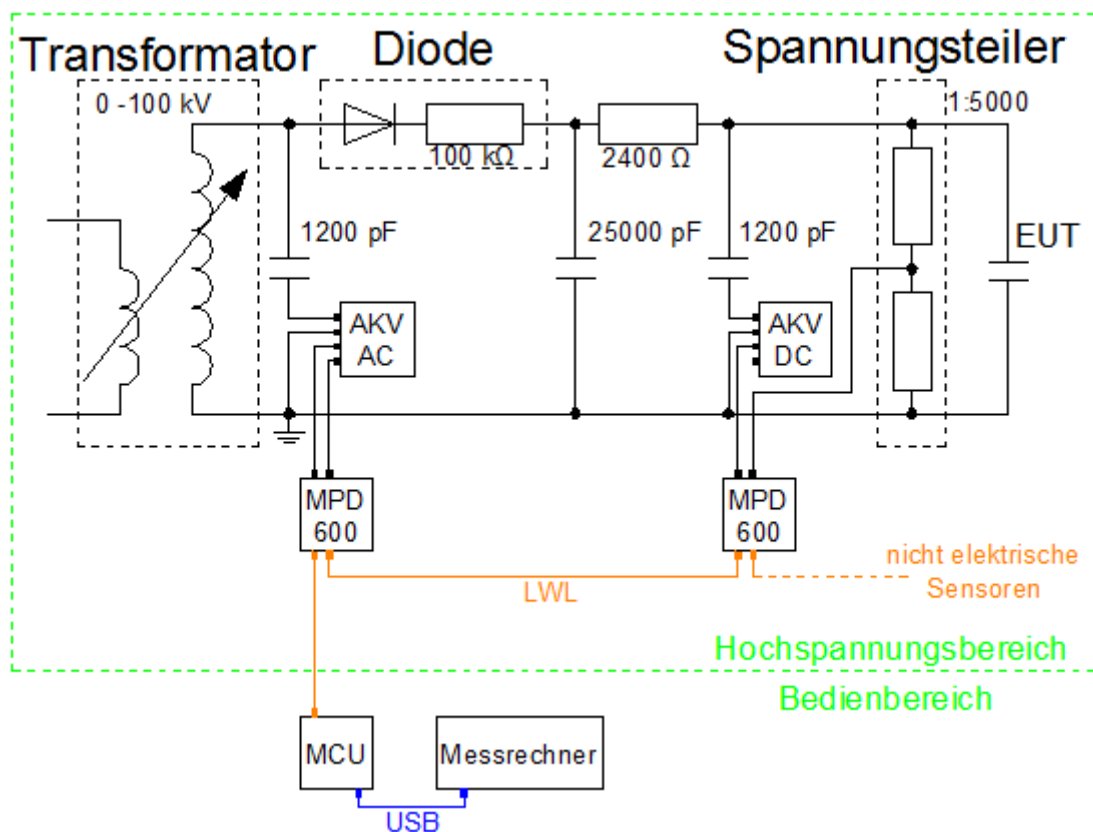


Abbildung 22 Messaufbau

Anmerkungen:

Die Abkürzungen werden wie folgt verstanden:

- AKV: Ankoppelvierpol
- EUT: equipment under test (sonstige Bezeichnung im Text: Prüfkörper)
- LWL: Lichtwellenleiter (aufgrund der Übersichtlichkeit nur einpolig dargestellt)

Die Sensoren, also die verwendeten MPD Stationen, sind hier nur beispielhaft dargestellt. Diese können je nach Messaufbau unterschiedlich angeordnet werden. Bei den meisten Messungen erfolgt keine Messung der Wechsellspannung, sondern diese Station wird für einen zweiten nicht elektrischen Sensor verwendet.

Der grundsätzliche Messaufbau basiert darauf, dass das Teilentladungssignal über den Koppelkondensator und den Ankoppelvierpol zur der Messstation MPD 600 gelangt. Dort wird dieses Signal quantisiert und digitalisiert und über Lichtwellenleiter zur MCU-Station übertragen. Über eine USB-Schnittstelle werden anschließend die Informationen zu einem Messrechner, der diese Daten entsprechend aufbereitet, übertragen.

Die Befestigung des Prüfkörpers erfolgt auf der Hochspannungsseite über die Messingstange, welche in ein Formstück eingeschraubt wird. Dieses Formstück ist auf das verwendete Hochspannungsprüffeld zugeschnitten und erlaubt eine Steckverbindung mit den Hochspannungsbausteinsystem.

Die Gegenelektrode bildet eine handelsübliche Aluminiumfolie, welche mittels einer Montagepaste für Kabelgarnituren auf den Prüfkörper aufgelegt wird. Auf diese Aluminiumfolie wird eine weitere Aluminiumfolie, welche die Erdverbindung realisiert, zusammen mit einem Toroid und einem Gewicht gelegt. Die Abbildung 23 zeigt die Umsetzung der Erdelektrode.

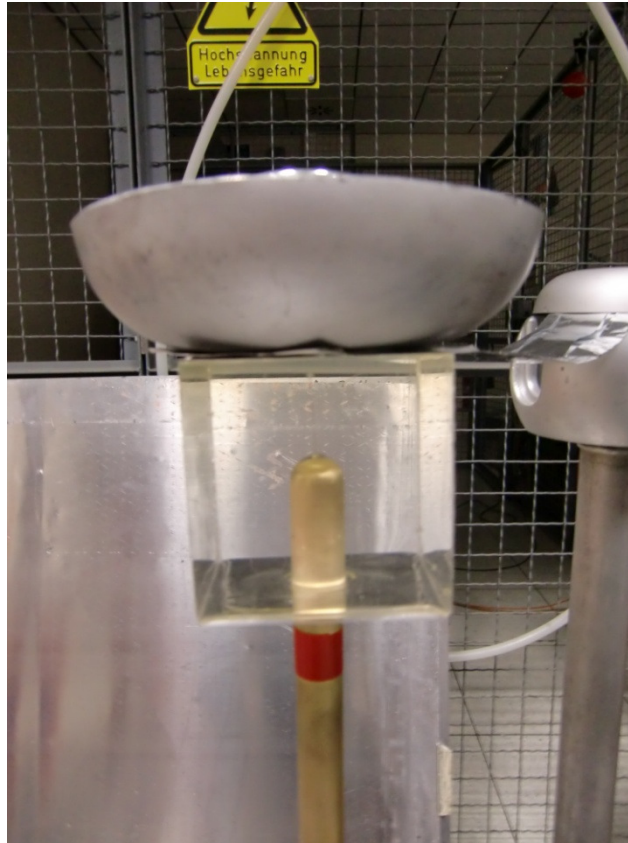


Abbildung 23 Realisierung der Erdelektrode

4.2.3 Prüfkörperherstellung

Da es für die Prüfkörperherstellung diverse Möglichkeiten in Bezug auf die Vernetzungsbedingungen wie Temperatur, Dauer und Evakuierung gibt wird an dieser Stelle das Herstellungsverfahren für die in dieser Arbeit verwendeten Prüfkörper beschrieben. Ebenfalls werden Schwierigkeiten bei der Herstellung der Prüflinge erörtert.

Die **Prüfkörper** werden mittels einer Schablone aus fünf Plexiglas-Platten, welche in einem Quader mit einer Kantenlänge von ungefähr 64 mm angeordnet werden, hergestellt. Diese Plexiglas-Platten werden mittels eines Fugensilikons zusammengeklebt. In diese Form wird die Messingstange mit der kontaktierten Nadelspitze gehängt. Dabei wird der Abstand zwischen der Nadelspitze und der unteren Plexiglas-Platte, welches dem Abstand zwischen Nadelspitze und Gegenelektrode entspricht, als Schlagweite s bezeichnet. Die Form sowie die Messingstange sind in Abbildung 24 abgebildet.

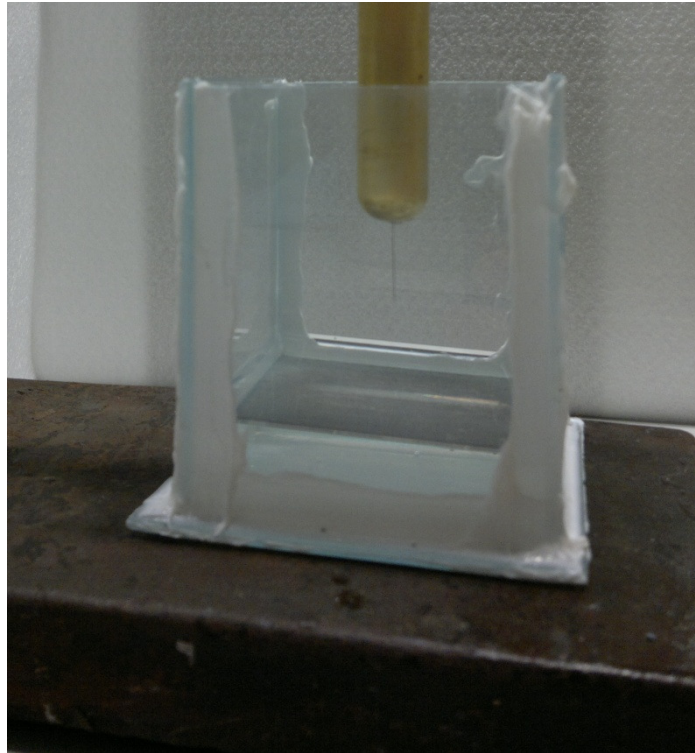


Abbildung 24 Gussform für die Prüfkörperherstellung [8]

Nachdem dem Vermischen der beiden Silikonkomponenten A und B, werden diese bei 400 mbar solange evakuiert bis keine Luft einschüsse im Silikon mehr sichtbar sind. Anschließend wird das Silikon in Form gegossen und mindestens 48 Stunden bei Raumtemperatur vernetzt.

Die Abmessungen des Prüfkörpers sind der Abbildung 25 zu entnehmen.

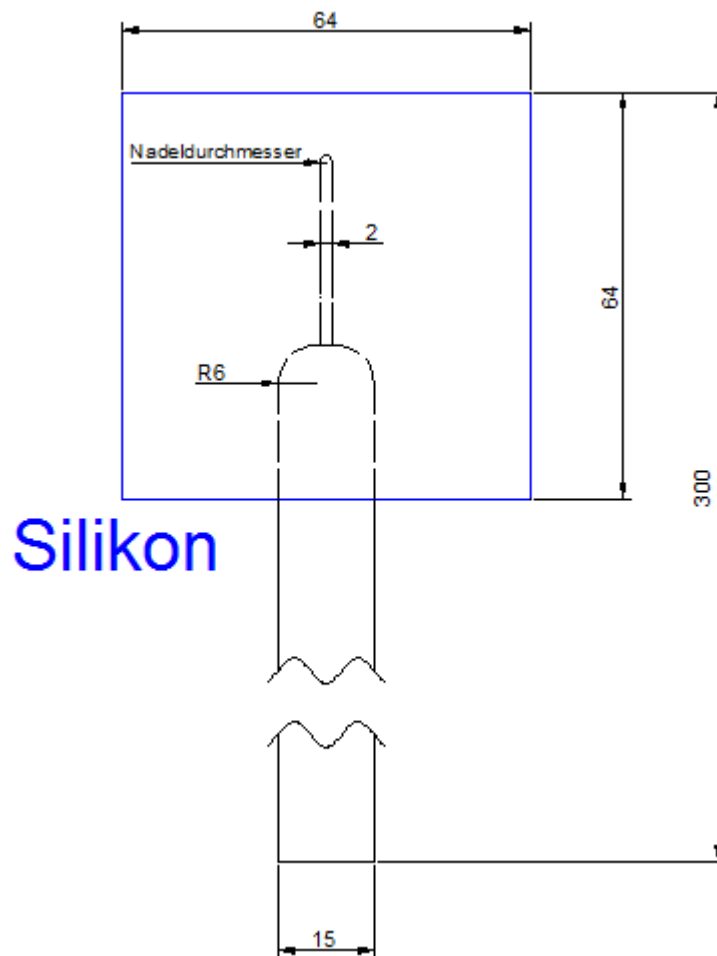


Abbildung 25 Abmessungen des Prüfkörpers

Ein vollständig hergestellter Prüfkörper ist in Anlage 3 (Seite 97) abgebildet.

Da für die Herstellung der Prüfkörper immer die selben **Plexiglas-Platten** verwendet werden weisen diese Beschädigungen der Oberfläche auf, welche bei der Herstellung der Silikonkörper auf diese übertragen werden. Es wird deshalb empfohlen, für Folgearbeiten neue Plexiglas-Platten herzustellen. Ebenfalls wird empfohlen diese aus dickeren Platten herzustellen, damit diese miteinander verschraubt werden können. Ein solches Konzept wird bereits bei der Bundesanstalt für Materialforschung und -Prüfung (BAM) eingesetzt. Diese Maßnahmen würden die Qualität der Prüfkörper erhöhen, sowie die benötigte Zeit für die Herstellung reduzieren.

Die **Abmessungen der Nadelspitzen** werden mittels eines Mikroskops ausgemessen. Diese Messeinrichtung erlaubt, den Nadelspitzendurchmesser mit einer Genauigkeit von $0,01 \mu\text{m}$ anzugeben und basiert auf dem Prinzip, die Nadelspitze mittels eines Kreises darzustellen. Dies kann jedoch nur bei einer geringen Anzahl an Nadelspitzen gewährleistet werden. Ferner wurden unter dem Mikroskop, obwohl die Akupunkturnadeln gerade aus ihrer Verpackung entnommen wurden, Fremdkörper festgestellt. Aus diesen Gründen werden die Nadelspitzen in dieser Arbeit lediglich auf $1 \mu\text{m}$ genau angegeben. Nachfolgend sind in Abbildung 26 vier Nadeln dargestellt, welche zeigen, dass der effektive Spitzenradius mittels eines Mikroskops nur näherungsweise gemessen werden kann. Die Nadeln werden mit einem Buchstaben gefolgt von einer Zahl bezeichnet.

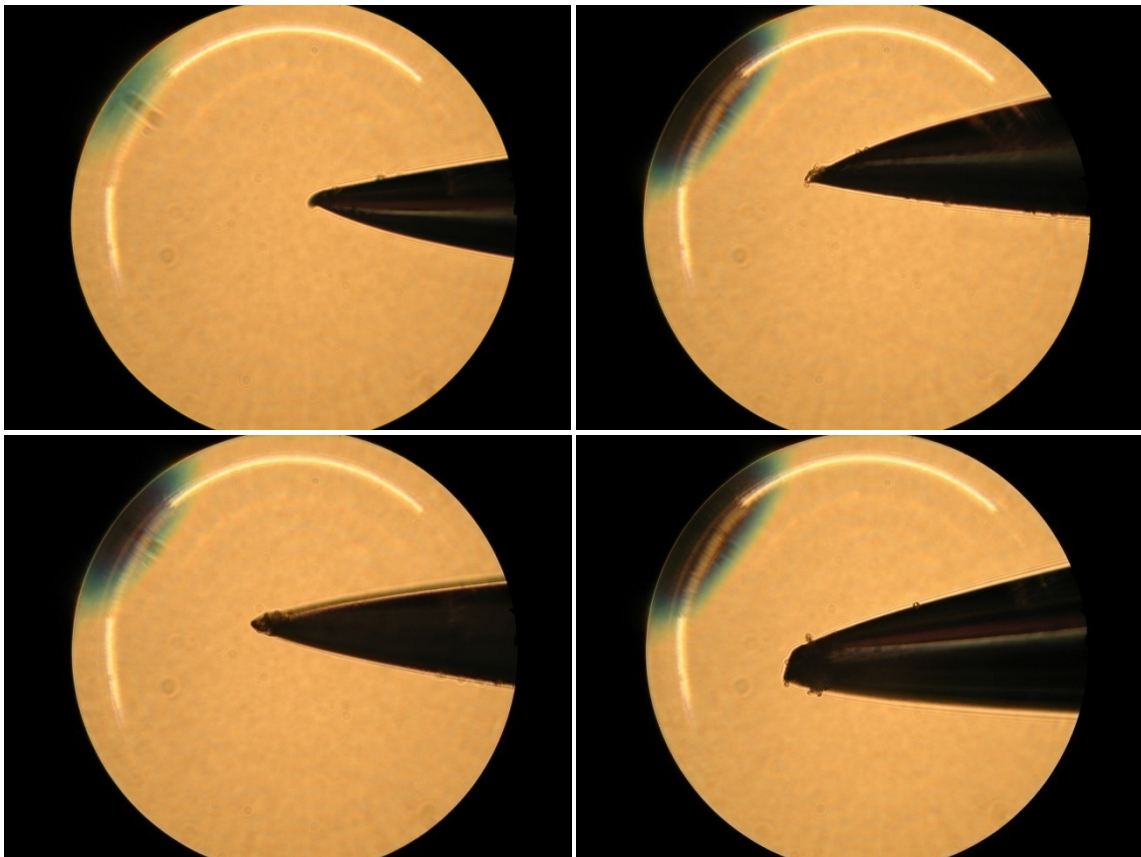


Abbildung 26 Nadeln: oben-links: D16; oben-rechts: D17; unten-links: D19; unten-rechts: D25

4.2.4 Faser-optisch-akustischer-Sensor

Im Rahmen einer Zusammenarbeit zwischen dem IPH und des Fachbereichs 8.6 optische und faseroptische Verfahren der BAM konnte ein Faser-optisch-akustischer-Sensor in dieser Arbeit getestet werden. Dieser Sensor wird von Herrn Dr. rer. nat. Philipp Rohwetter (BAM) derzeit entwickelt. Neben der Überprüfung, ob ein solcher Sensor in zukünftigen Gleichspannungsnetzen zur Detektion von Teilentladungen eingesetzt werden kann, dienen diese Messungen der Charakterisierung dieses Sensors. Diese detaillierte Auswertung des Verhaltens erfolgt durch die Mitarbeiter der BAM. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt lediglich im Kapitel 4.5.1 (Seite 76ff.) eine Auswertung im Vergleich zum elektrischen Kanal.

Nachfolgend wird in Abbildung 27 der grundsätzliche Aufbau eines solchen Sensors dargestellt.

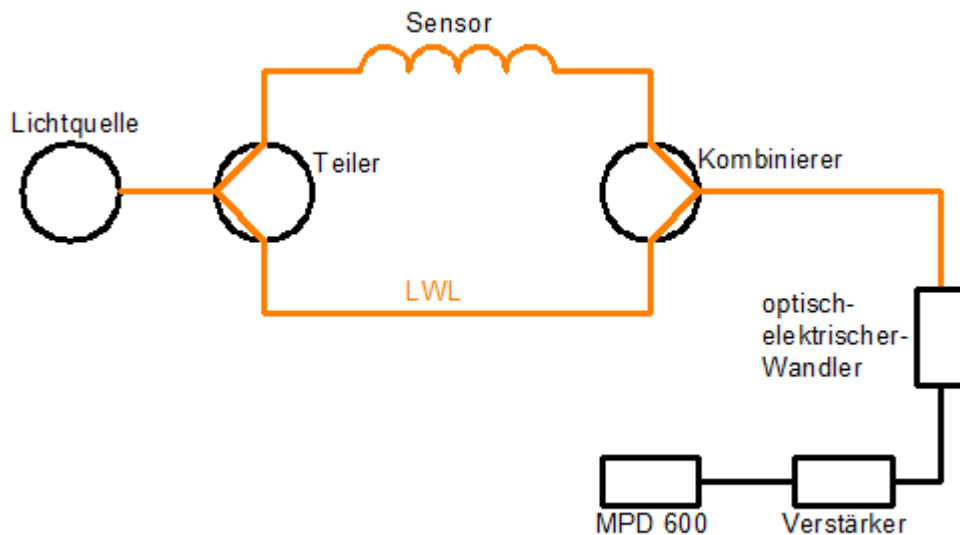


Abbildung 27 Aufbau eines Faser-optisch-akustischen-Sensors

Bei dieser Art von Sensoren wird ein kohärentes Licht erzeugt und mittels eines Teilers aufgespalten und auf zwei unterschiedliche Lichtwellenleiter geleitet. Erfährt der Sensor, welcher Teil eines Lichtwellenleiters ist, aufgrund von akustischen Wellen eine Deformation so wird der Weg, den das Licht im Vergleich zum zweiten Lichtwellenleiter zurücklegen muss, geändert. Indem das Licht mittels eines Kombinierers wieder zusammengeführt wird, kann durch die Phasenverschiebung des Lichts, diese Wegänderung bestimmt werden. Dieses so gewonnene

Signal wird in ein elektrisches Signal gewandelt, anschließend verstärkt und mit dem Teilentladungsmesssystem der Firma OMICRON electronics GmbH verbunden.

4.2.5 Piezo-Sensor

Unter dem Begriff Piezo-Sensor wird ein handelsüblicher piezoelektrisch-akustischer-Sensor mit der Bezeichnung VS-150 M der Firma Vallen Systeme GmbH verstanden. Dieser wird insbesondere zum Vergleich zu dem noch im Entwicklungsstadium befindlichen Faser-optisch-akustischen Sensor verwendet. Er kann über einen Verstärker direkt an das Messsystem der Firma OMICRON electronics GmbH angeschlossen werden. Eine Auswertung dieses Sensors erfolgt im Kapitel 4.5.2 (Seite 78f.).

4.2.6 Linsensystem

Unter dem Begriff Linsensystem wird in dieser Arbeit ein optisches Linsensystem verstanden, welches das Licht mittels Linsen fokussiert und in einen Lichtwellenleiter leitet, verstanden. Nachfolgend zeigt Abbildung 28 ein solches Linsensystem auf einen Prüfkörper ausgerichtet.



Abbildung 28 Ausrichtung des Linsensystems auf einen Prüfkörper [8]

Durch den Lichtwellenleiter wird das Licht in den optisch-elektrischen-Wandler APD - 500 der Firma OMICRON electronics GmbH, geleitet. Dieser wandelt das optische Signal in ein elektrisches Signal um, welches von einer MPD - Station verarbeitet und somit an den Messkreis für die elektrische Teilentladung angeschlossen werden kann. Dier Aufbau erlaubt das zeitsynchrone Messen von Teilentladungen mit optischen und elektronischen Sensoren.

4.3 Vorversuche

4.3.1 Vorwort

Die nachfolgend aufgeführten Vorversuche dienen insbesondere dem Kennenlernen der verwendeten Messtechnik, des Messaufbaus, der Prüfkörperherstellung, sowie der Überprüfung des Datenexports und der damit verbundenen Auswertungsprogramme bzw. Auswertungsmethoden. Ferner sollten mögliche Probleme rechtzeitig erkannt werden.

Es wurden folgende Vorversuche durchgeführt:

Vorversuch 1 - Teilentladungsfreiheit

Vorversuch 2 - Untersuchung der Filterfrequenz

Vorversuch 3 - Ladungsdiagramm bei inneren und äußeren TE

4.3.2 Vorversuch 1 - Teilentladungsfreiheit

Zielsetzung

Die nachfolgende Messung dient zur Überprüfung der Teilentladungsfreiheit des Messaufbaus an der Beuth - Hochschule für Technik Berlin. Hierbei wurde das Linsensystem in einem Abstand von 4 cm zum Prüfkörper positioniert.

Prüfkörper

Silikonquader ohne Fehlstelle

Messregime

Nachfolgend ist in Abbildung 29 das verwendete Messregime und die dabei maximal aufgetretene Teilentladung dargestellt.

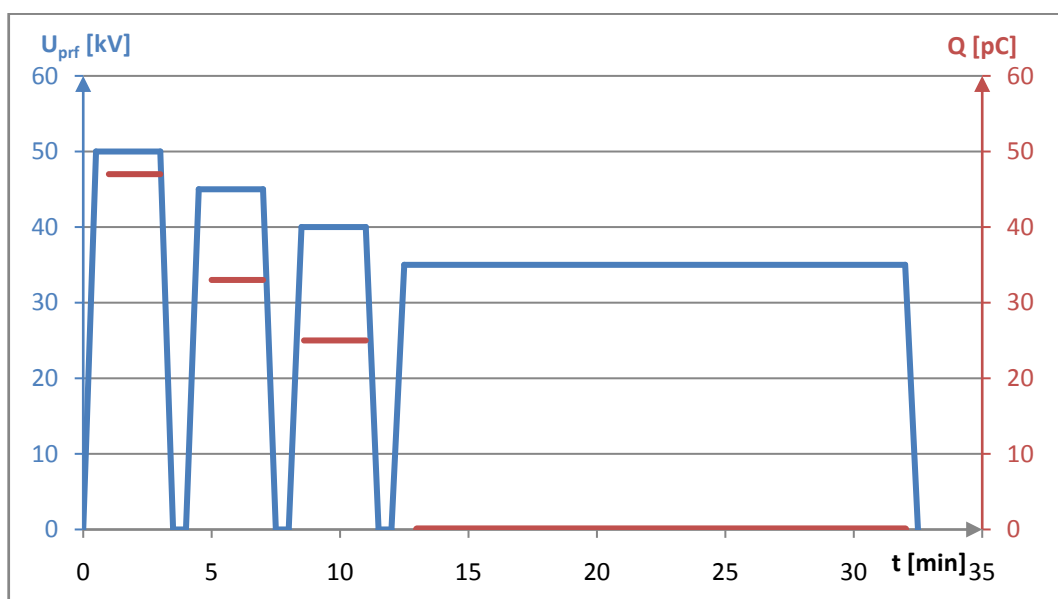


Abbildung 29 Messregime des ersten Vorversuches

Details zur Messreihe

Filtereinstellung : 325 kHz \pm 150 kHz

Verstärkung: 2

keine Streams aufgenommen

Die Messungen zeigen, dass unterhalb einer Prüfspannung (U_{prf}) von 35 kV keine Teilentladungen mehr auftreten. Es wird daher angenommen, dass unterhalb einer Spannung von 30 kV von Teilentladungsfreiheit gesprochen werden kann.

4.3.3 Vorversuch 2 - Untersuchung der Filterfrequenz

Zielsetzung

Ziel dieses Vorversuches ist es den Einfluss der verwendeten Filtereinstellungen auf das Messergebnis zu klären. Hierzu wurde der Filter während einer laufenden Messung umgestellt und die Daten aufgezeichnet (vgl. Abbildung 30). Die gewählten Frequenzeinstellungen sind zur Vorbereitung auf die 3-Frequenzmessung und die dabei von der Software zur Verfügung gestellten Bandbreiten gewählt.

Prüfkörper

Spitze (positiv) - Platte (negativ) in Silikon (s = 20 mm)

Nadel B 186 - 6 µm - Prüfkörper bereits vorgeschädigt

Messregime

Bei dieser Messung ist zu beachten, dass es sich um eine Wechselspannungsmessungen handelt, da diese in ihrem Aufbau einfacher umzusetzen ist und der Teilentladungseinsatz schneller bestimmt werden kann. Ebenfalls wird davon ausgegangen, dass in einem Zeitraum von einigen Minuten das Teilentladungsverhalten bei Wechselspannung konstant ist.

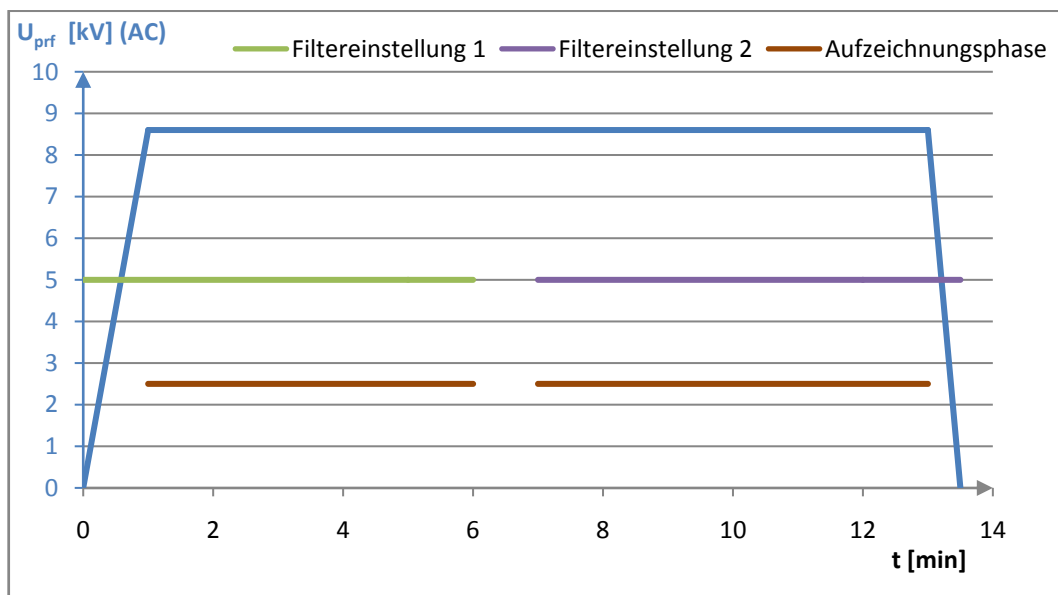


Abbildung 30 Messregime des zweiten Vorversuches (Stream 1-2)

Details zur Messreihe:

Filtereinstellung 1: 325 kHz ± 150 kHz Filtereinstellung 2: 325 kHz ± 80 kHz

Verstärkung: 2

Stream: 1-2

Nachfolgend werden die Impulswiederholrate n , sowie der von der Software generierte Mittelwert Q_{AVG} über ein 30 Sekunden Intervall gebildet. Die Zeit t beschreibt das Ende eines solchen Zeitintervalls. Ebenfalls wird die Summe aller Impulse N_{ges} seit Aufzeichnungsbeginn dargestellt.

Tabelle 3 Auswertung von zwei Filtereinstellungen

t [min]	Einstellung 1 (325 kHz \pm 150 kHz)			Einstellung 2 (325 kHz \pm 80 kHz)		
	N [PD/s]	N_{ges} [PD]	Q_{AVG} [pC]	N [PD/s]	N_{ges} [PD]	Q_{AVG} [pC]
0,5	136,4	4.117	248,3	135,3	4.082	196,8
1,0	141,5	8.390	252,6	137,5	8.206	202,7
1,5	136,7	12.522	254,0	134,9	12.248	197,9
2,0	142,9	16.791	248,2	135,4	16.322	179,3
2,5	144,5	21.163	244,0	140,8	20.617	186,7
3,0	150,2	25.681	242,3	134,6	24.619	191,5
3,5	149,7	30.143	237,6	138,5	28.781	188,8
4,0	136,3	34.281	201,8	139,0	33.007	193,6
4,5	133,8	38.274	195,0	139,7	37.271	190,0
5,0	134,4	42.322	201,6	137,0	41.276	185,4
Mittelwert	140,6	-	232,5	137,3	-	191,3

Es zeigt sich, dass die Impulswiederholrate, sowie die Summe aller Impulse seit Messbeginn bei den beiden Filtereinstellungen annähernd gleich groß sind. Daraus wird geschlossen, dass die Anzahl der erkannten Impulse unabhängig von den beiden gewählten Filtereinstellungen ist.

Beim Vergleich der Mittelwerte der beiden Ladungsmittelwerte Q_{AVG} ergibt sich eine Reduktion auf 82,3 % des Wertes der Filtereinstellung 2 gegenüber der Filtereinstellung 1. Dies ist darauf zurückzuführen, dass keine erneute Kalibrierung nach Änderung der Filtereinstellung erfolgte, da dies nur bei Spannungslosigkeit möglich ist. Nach Beendigung einer Messung exakt den vorherigen Wert in Bezug auf die Impulswiederholrate einzustellen ist jedoch nicht möglich. Deshalb könnte eine Änderung der Impulswiederholrate nicht zwingend in Verbindung mit der Filtereinstellung gebracht werden.

Aus den Messergebnissen wird geschlossen, dass eine Messung auch bei einer Bandbreite von 160 kHz möglich ist, jedoch das Messsystem auf diese Einstellung kalibriert werden muss.

4.3.4 Vorversuch 3 - Ladungsdiagramm bei inneren und äußeren TE

Zielsetzung

In diesem Vorversuch sind innere und äußere Teilentladungen aufgezeichnet, um diese mittels gewichtetem Ladungsdiagramm auszuwerten.

Prüfkörper

- "nur äußere TE" - "Draht" (negativ) in Luft
- "innere & äußere TE" - Spitze (positiv) - Platte (negativ) in Silikon (s = 20 mm)
 Nadel B 186 - 4 µm - Prüfkörper vorgeschädigt
 und "Draht" (negativ) in Luft
- "nur innere TE" - Spitze (positiv) - Platte (negativ) in Silikon (s = 20 mm)
 Nadel B 186 - 4 µm - Prüfkörper vorgeschädigt

Messregime

Das verwendete Messregime zeigt Abbildung 31.

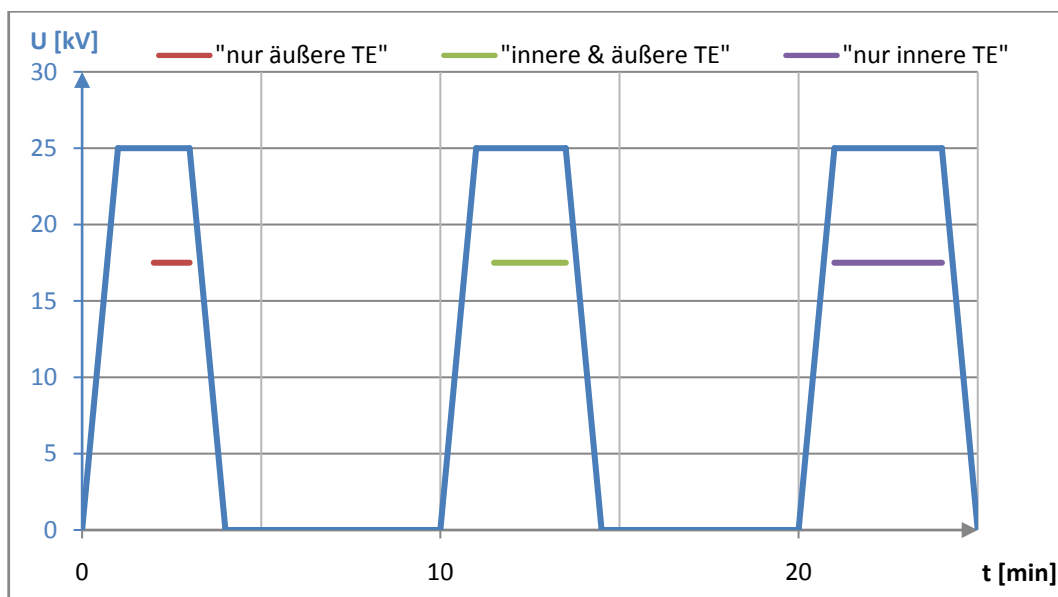


Abbildung 31 Messregime des dritten Vorversuches (Stream 21-23)

Details zur Messreihe:

Filtereinstellung: 325 kHz ± 150 kHz

Verstärkung: 8

Stream: 21-23

Gegenüber dem in Kapitel 3.3.6 (Seite 28) dargestelltem Diagramm (Abbildung 18) hat sich bei der Auswertung der Messwerte gezeigt, dass die Größe der Klassen deutlich kleiner gewählt werden muss. Deshalb wird für die Auswertung eine Klassengröße von 1 pC verwendet. Aufgrund der erhöhten Anzahl an Ladungsklassen ist es nicht mehr möglich die Anzahl und die Ladung in einem Diagramm darzustellen. Dies ist aber auch nicht nötig, da die beiden Kurven einen sehr ähnlichen Verlauf aufzeigen.

Äußere Teilentladungen:

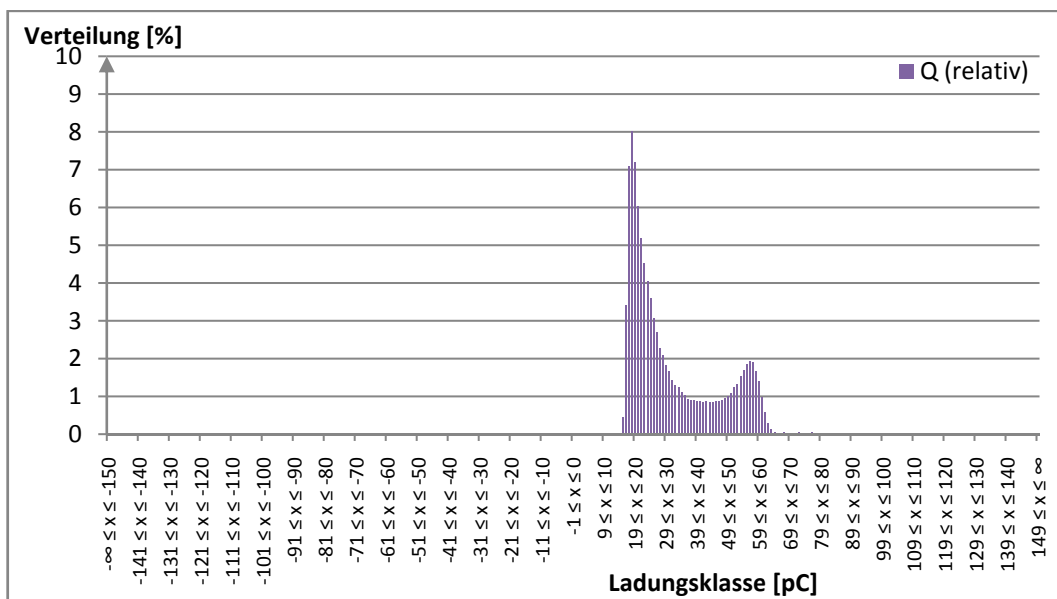


Abbildung 32 Ladungsdiagramm äußere TE (Stream21)

Anmerkung:

Um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten wird nur jede zehnte Beschriftung dargestellt, obwohl sämtliche Gruppen im Diagramm angezeigt werden.

Innere Teilentladungen:

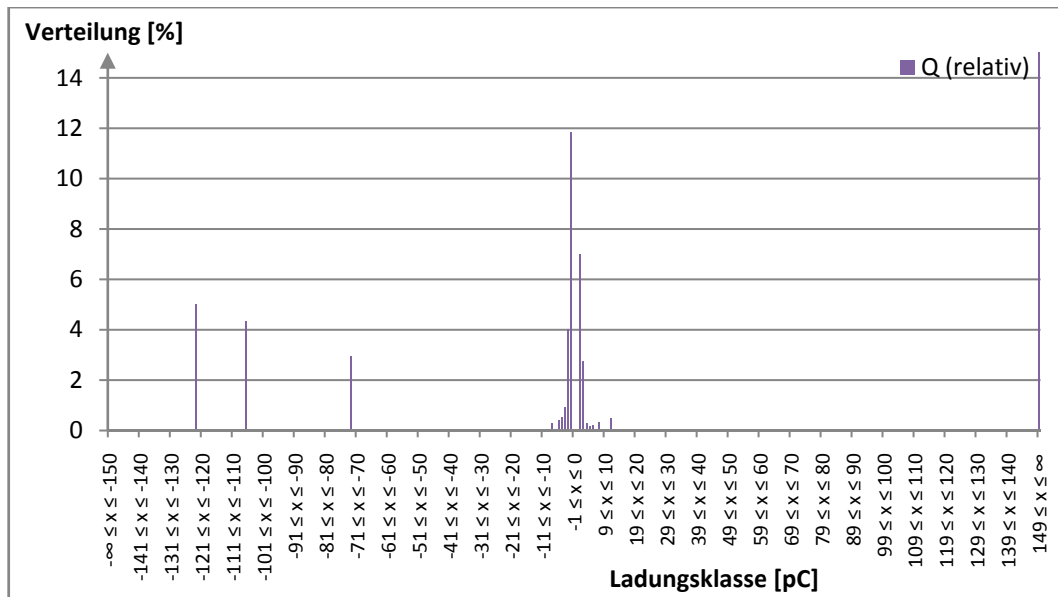


Abbildung 33 Ladungsdiagramm innere TE (Stream 23)

Anmerkung:

Um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten wird nur jede zehnte Beschriftung dargestellt, obwohl sämtliche Gruppen im Diagramm angezeigt werden. Eine Bewertung der Polarität der Impulse erfolgt aus Zeitgründen nicht.

Abbildung 32 zeigt, dass sich die äußeren Teilentladungen über ein breiteres Spektrum als die in Abbildung 33 dargestellten inneren Teilentladungen ausbilden. Eine Darstellung von inneren und äußeren Teilentladungen in einem Diagramm ist nicht zweckmäßig, da das Verhalten grundsätzlich von den äußeren Teilentladungen dominiert wird. Es entsteht deshalb ein Diagramm wie in Abbildung 32. Lediglich durch eine Vergrößerung auf den erwarteten Bereich der inneren Teilentladungen sind diese erkennbar.

Nachfolgend ist diese Vergrößerung in Abbildung 34 dargestellt. Hierbei ist besonders die Skala der Ordinate im Vergleich zu den vorherigen Diagrammen zu beachten.

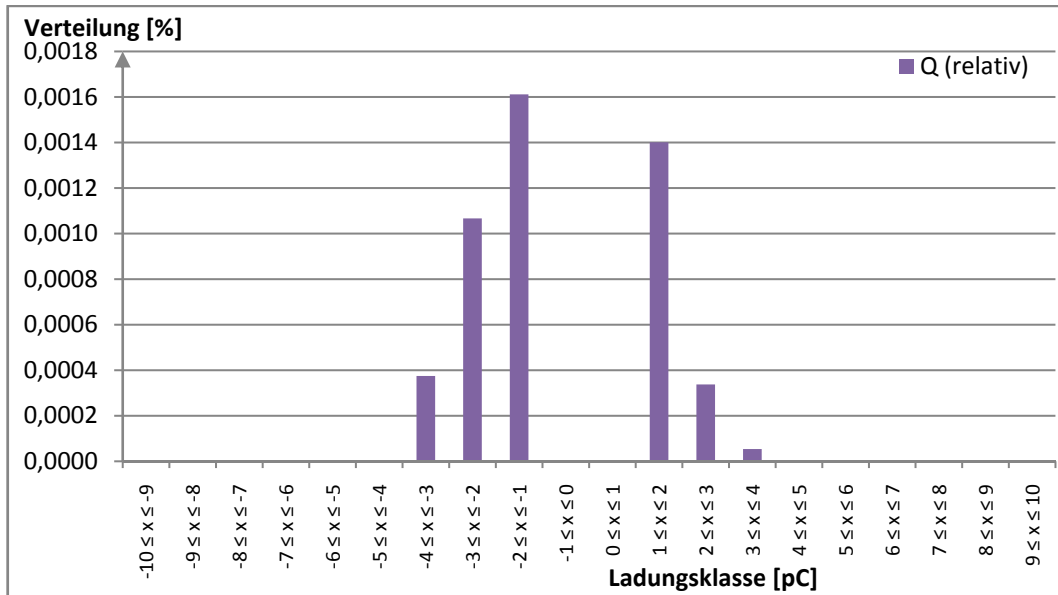


Abbildung 34 Ladungsdiagramm innere & äußere TE (vergrößerte Darstellung auf innere TE)

Anmerkung:

Die Bereiche zwischen $-\infty$ und -10 pC und 10 pC bis $+\infty$ fehlen zwar in der Darstellung sind jedoch Teil der Auswertung, sie sind lediglich nicht dargestellt.

Die Lücke im Bereich zwischen -1 pC und $+1$ pC, welche auch in Abbildung 33 sichtbar ist, entsteht durch das Grundrauschen des Messsystems. Dieses Grundrauschen muss vor der Auswertung herausgeschnitten werden, da es ansonsten das Ergebnis unkontrollierbar verfälscht. Es kann zwar nicht ausgeschlossen werden, dass in diesem Bereich auch Nutzinformationen vorliegen, diese können jedoch nicht aus dem Rauschen herausgefiltert werden.

4.4 Versuchsdurchführung

4.4.1 Vorwort

In dem vorliegenden Kapitel der Arbeit werden die bereits in Kapitel 3.3 (Seite 24ff.) angesprochenen Auswertungsmöglichkeiten, sowie die im IPH gängigen Auswertungsmethoden von Wechselspannungsmessungen, näher betrachtet. Ziel ist es eine Strategie zu entwickeln möglichst effizient die Gleichspannungsteilentladungsmessung für zukünftige Bachelor- und Masterarbeiten im IPH vorzubereiten. Es hat sich gezeigt, dass dies nötig ist, da bislang auf diesem Gebiet erfolgte Bachelor- und Masterarbeiten (vgl. Kapitel 3.1 - Seite 20) überwiegend wie Wechselspannungsteilentladungsmessungen durchgeführt wurden.

4.4.2 Darstellung als Pard-Diagramm

Bei Wechselspannung ist es im IPH üblich Histogramme (Pard-Diagramme) automatisiert in einem Abstand von 30 Sekunden oder einer Minute zu erstellen. Diese Methode wird insbesondere bei Trendmessungen über einen langen Zeitraum angewendet.

Neben dem Verlauf der Teilentladungen (vgl. Abbildung 35) kann hierbei auch noch der Mittelwert Q_{WTD} (alte Bezeichnung: Q_{IEC} [grüne Umrandung]) ausgewertet werden. Dieser Wert entspricht einem nach DIN EN 60270 [15] gewichtetem Mittelwert (vgl. Kapitel 3.3.9 - Seite 32). Dieser gewichtete Mittelwert Q_{WTD} ist bei Gleichspannung kein geeignetes Mittel, da, aufgrund der Gewichtung, dieser sehr kleine Werte von lediglich wenigen femto oder atto Coulomb annimmt. Eine solche Auswertung ist in Anlage 4 (Seite 100) zu sehen. Eine Alternative zu diesem Wert ist in Kapitel 4.4.8 (Seite 68f.) diskutiert. Wird bei der Erstellung der Histogramme das Grundrauschen unterdrückt so kann aus der angegebenen Anzahl der Impulse [rote Umrandung] in diesem Diagramm, sowie aus der eingestellten Zeit [blaue Umrandung] auf die Impulswiederholrate geschlossen werden. Diese Auswertungsmöglichkeit ist auch bei Gleichspannung möglich. Ist bei dieser Darstellung das Grundrauschen nicht herausgefiltert wird die Impulswiederholrate aufgrund der geringen Anzahl der Teilentladungsimpulse bei Gleichspannung im Ergebnis sehr stark verfälscht.

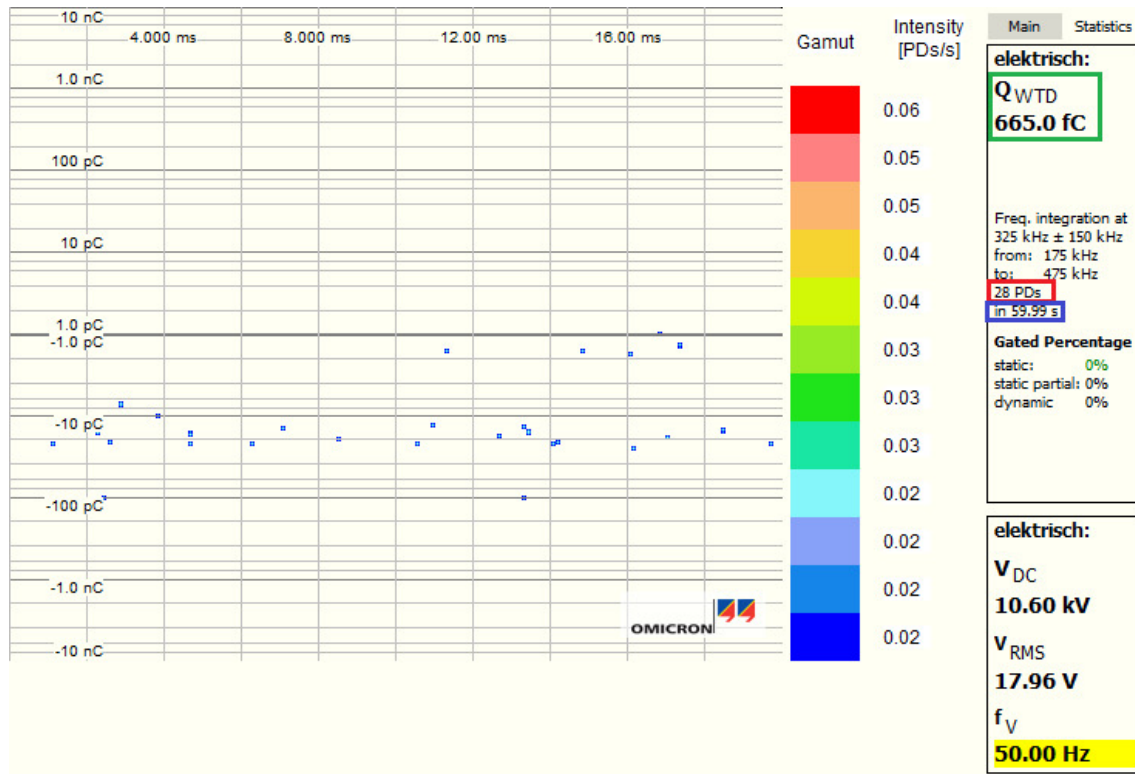


Abbildung 35 Pard-Diagramm (innere TE - Stream 21)

Wie bei Wechselspannung üblich ist auch bei Gleichspannung eine qualitative Beurteilung von Pard-Diagrammen möglich. Bei den im Rahmen dieser Arbeit aufgenommenen Messreihen hat sich gezeigt, dass äußere Teilentladungen (vgl. Abbildung 36) immer deutlich oberhalb des Grundrauschens auftreten. Ebenfalls zeichnen sie sich durch eine deutlich höhere Impulswiederholrate aus. Da im Rahmen dieser Arbeit eine solche Impulswiederholrate bei inneren Teilentladungen nicht einmal ansatzweise erreicht werden konnte, ist eine qualitative Beurteilung in Bezug auf die Art der Teilentladungen möglich.

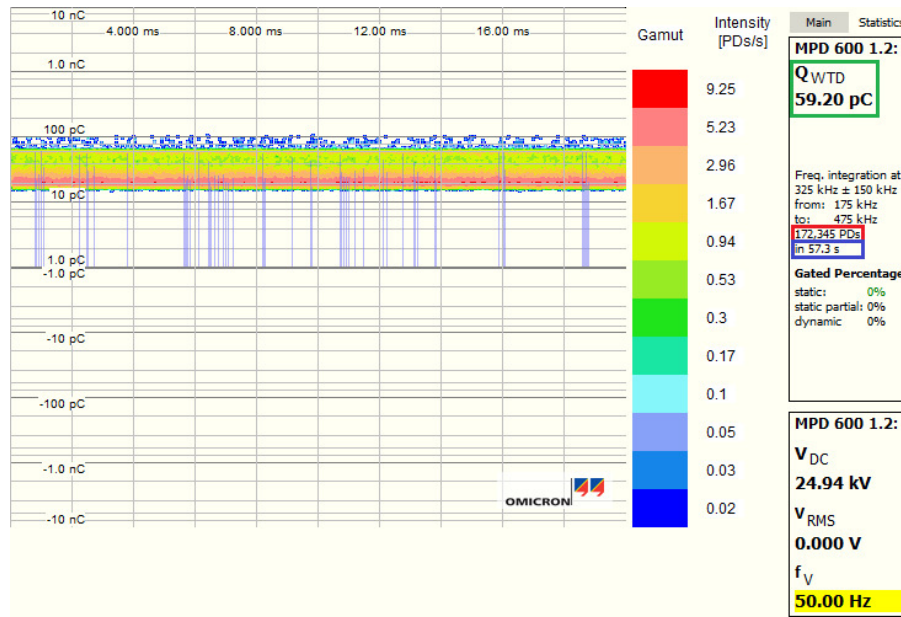


Abbildung 36 Pard-Diagramm (äußere TE - Stream 26)

Anmerkung:

Die blauen Striche zwischen der X-Achse und dem Teilentladungsband entstehen durch die Software, welche die zuletzt dargestellten Teilentladungen mit einer solchen Linie hervorhebt.

Diese Darstellung eignet sich jedoch nicht um das Teilentladungsverhalten eines Prüfkörpers in Abhängigkeit von einer physikalischen Größe (z.B. der Zeit) zu untersuchen. Bei Durchsicht sämtlicher im Rahmen dieser Arbeit und der Vorgängerarbeiten (vgl. Kapitel 3.1 Seite 20) aufgenommenen Pard-Diagrammen konnte dafür keine geeignete Auswertungsmethode entwickelt werden. Es wird daher empfohlen auf diese Art der Darstellung zu verzichten und stattdessen die im Kapitel 4.4.8 (Seite 68f.) diskutierten statistischen Größen näher auszuwerten.

4.4.3 3-Frequenzmethode

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen bestätigen, dass durch eine 3-Frequenzmessung eine Unterscheidung zwischen inneren und äußeren Teilentladungen möglich ist. Dies wird deutlich indem die vier Messungen (Stream 100-103) näher betrachtet werden. Bei diesen Messungen wurden nur innere TE, nur äußere TE und beide gleichzeitig untersucht.

Bei den äußeren TE handelt sich um eine Spitze in Luft. Da im Rahmen der vorliegenden Arbeit keinesfalls das grundsätzliche Verhalten einer Spitze in Luft näher betrachtet wird, ist sie in einem Abstand von ca. 15 cm mit einem Durchmesser von ungefähr 1 mm positioniert. Unter diesen Bedingungen entspricht die Einsatzspannung der äußeren TE einem Spannungswert bei dem deutliche innere TE auftreten.

Für die Erstellung des nachfolgenden Diagramms wurden die bereits in Kapitel 3.3.4 (Seite 26) angesprochenen Filtereinstellungen verwendet.

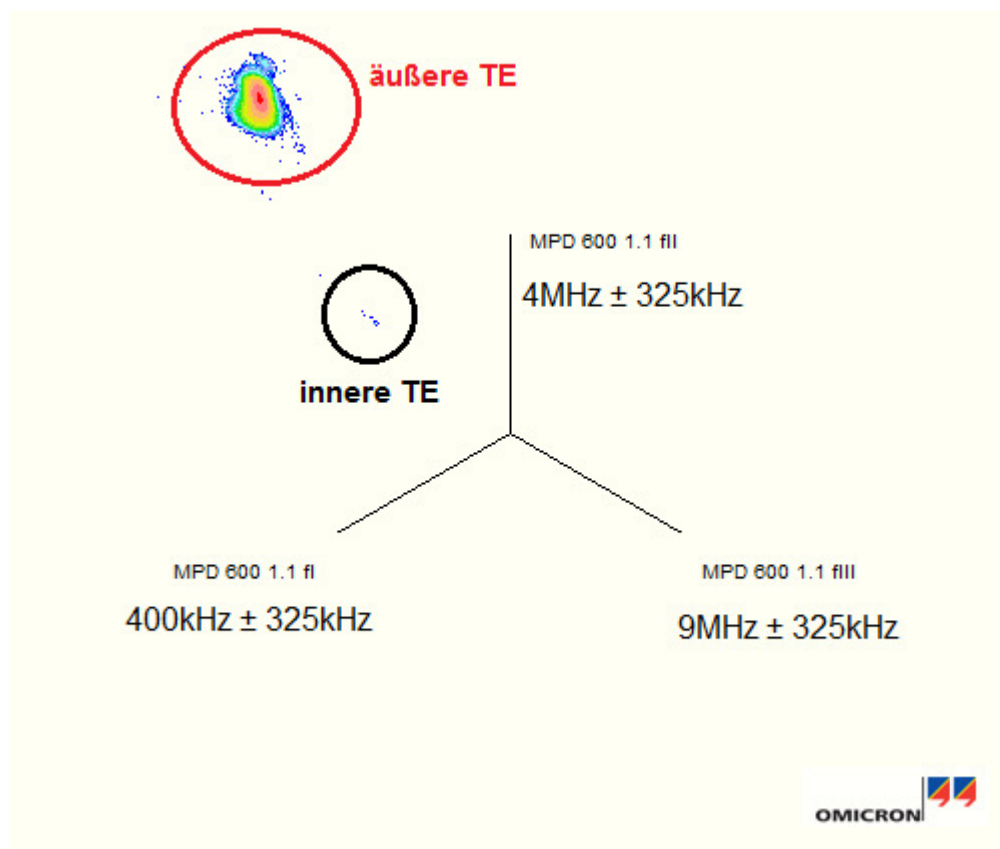


Abbildung 37 3-Frequenzmessung mit inneren und äußeren Teilentladungen (Stream 101)

Zum Vergleich werden in Anlage 5 (Seite 99) die beiden TE-Quellen unabhängig von einander dargestellt. Diese Darstellungen bestätigen lediglich die Position der beiden TE-Quellen.

Da aus den FFT-Darstellungen beider Störquellen keine Auffälligkeiten erkennbar sind, wurde durch experimentelles Vorgehen versucht, die Teilentladungen weiter von einander zu separieren. Dies ist jedoch nicht gelungen, weshalb davon ausgegangen wird, dass die in der Literatur angegebenen Filtereinstellungen sehr gut für eine solche Auswertung geeignet sind.

Aufgrund des Messaufbaus ist es leider nicht möglich, zwei Störquellen in zwei verschiedenen Prüfkörpern zu untersuchen um so das Verhalten einer 3-Frequenzmessung auf zwei ähnliche Störquellen zu untersuchen.

Jedoch kann keinesfalls davon ausgegangen werden, dass die beiden Störquellen gleichwertig sind. Für die beiden Fälle, bei denen jeweils nur **eine** Quelle aktiv ist, werden in einem Zeitraum von einer Minute bei einer Spannung von ca. 15 kV, die in Tabelle 4 dargestellten Werte ermittelt.

Tabelle 4 Elektrische Größen während einer 3-Frequenzmessung (Stream 100, 102)

	innere TE	äußere TE
N_{ges}	12	274.637
$n [1/PD]$	0,21	4575,01
$Q_{mittel} [pC]$	117,36	41,99
$Q_{min} [pC]$	6,03	29,75
$Q_{max} [pC]$	205,85	104,21

Diese Übersicht zeigt auch deutlich die Schwierigkeiten bei dieser Art der Messung. Da beide Arten von Fehlern in einem Diagramm eingetragen werden, sind die äußeren Teilentladungen aufgrund der hohen Teilentladungsrate deutlich zu erkennen. Die inneren Teilentladungen zeichnen sich jedoch nur durch verhältnismäßig wenige Punkte aus.

4.4.4 Bewertung der Impulsform und im Frequenzbereich

Die **Bewertung der Impulsformen** ist schwierig, da die Übertragung der Informationen über die Impulsform lediglich erfolgt, wenn genügend Bandbreite zwischen Messstation und dem Messrechner vorhanden ist. Ebenfalls erfolgt die Übertragung zufällig. Das heißt, dass bei einem standardmäßig aufgenommenen Stream gegebenenfalls auch Rauschsignale übertragen werden. Deshalb wird vom Autor empfohlen, dass, wenn Informationen über die Impulsform in Folgearbeiten gewünscht sind, weitere Sensoren abzuschalten sind, sowie auf die Übertragung des Rauschens zu verzichten ist. Weiter ist zu beachten, dass lediglich Impulsformen jener Impulse übertragen werden, die die Filtereinstellungen erfüllen.

Durch die oben beschriebenen Maßnahmen, ist es gelungen die Impulsform eines inneren Teilentladungsimpulses von ungefähr 450 pC aufzunehmen.

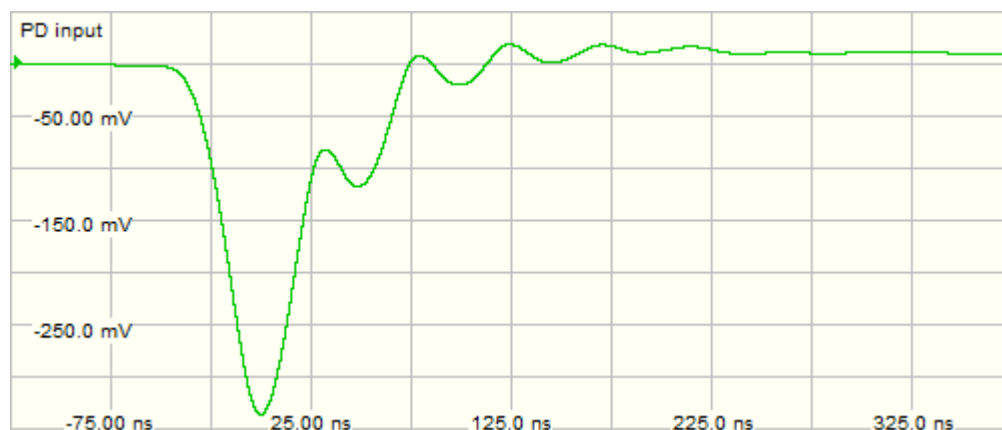


Abbildung 38 Impulsform einer inneren Teilentladung (Stream 82)

Die Auswertung mehrerer Impulsformen einer Fehlerart hat kein erkennbares Muster, welches das Teilentladungsverhalten charakterisiert, gezeigt. Ebenfalls konnte kein Unterschied zwischen inneren und äußeren Teilentladungen gefunden werden. Ferner konnte nicht geklärt werden ob die dargestellten Impulse bereits den digitalen Filter durchlaufen haben und deshalb die Impulsform gegebenenfalls verfälscht dargestellt ist.

Aus den Darstellungen lässt sich jedoch die Impulslänge ableiten. Diese ist insbesondere in Bezug auf die fehlerhaften Erkennungen von Impulsen von Interesse und wird in Kapitel 4.4.6 (Seite 63f.) näher untersucht.

Eine **Bewertung im Frequenzbereich** erfolgt in Echtzeit und wird zu jeder Impulsform gebildet. Nachfolgend ist in Abbildung 39 das Frequenzspektrum einer inneren Teilentladung dargestellt.

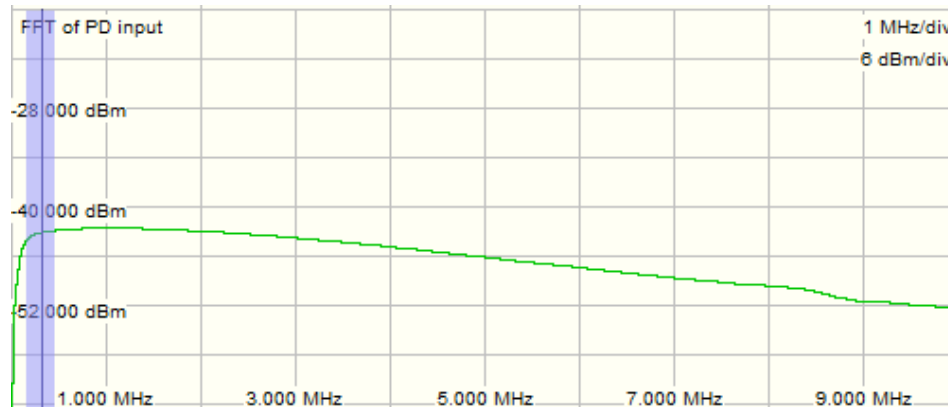


Abbildung 39 FFT einer inneren Teilentladung (Stream 82)

Die Auswertung sämtlicher im Rahmen dieser Arbeit aufgenommenen Impulse bzw. deren Spektren hat keine Auffälligkeiten bzw. Veränderungen in Bezug auf Höhe oder Verteilung in Abhängigkeit der Impulshöhe oder der Teilentladungsart ergeben.

Da die Bewertung auch bei Rauschsignalen erfolgt ist es möglich die Filtereinstellungen anzupassen. Nachfolgend ist in Abbildung 40 im blauen Bereich die beim IPH übliche Filtereinstellung von $325\text{kHz} \pm 150\text{ kHz}$, sowie die FFT des Rauschens, dargestellt. Die FFT zeigt, dass Rauschsignale ein Maximum im niederfrequenten Bereich aufweisen. Durch Wahl der Filtereinstellungen können diese Frequenzen ausgeblendet werden um so die Höhe der Rauschsignale zu reduzieren und so auch geringe Teilentladungsimpulse messen zu können. Es zeigt sich, dass obwohl diese Einstellungen oberhalb der Empfehlung der DIN EN 60270 [15] liegen, sie ein gutes Verhältnis zwischen Rausch- und Nutzsignal bieten.

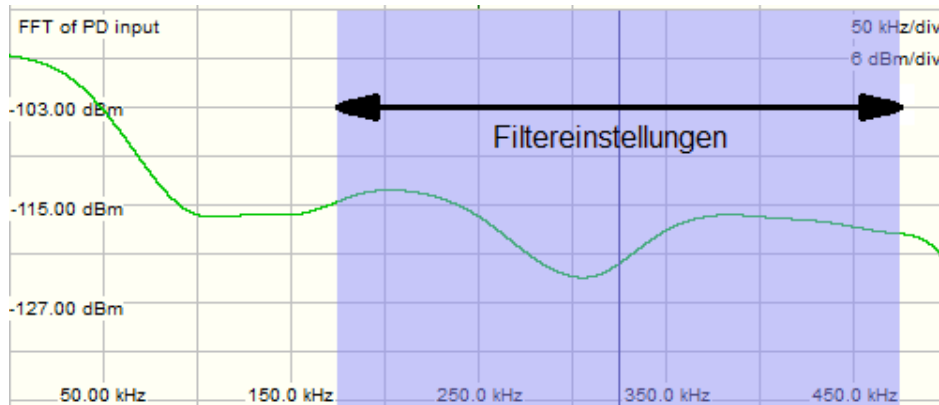


Abbildung 40 FFT des Grundrauschens (Stream 25)

4.4.5 Ladungsdichte

Die grundsätzliche Struktur dieser Art von Diagrammen ist in Kapitel 3.3.6 (Seite 28) bereits beschrieben. Ebenfalls hat der Vorversuch (Kapitel 4.3.4 - Seite 50ff.) aufgezeigt, dass eine Unterscheidung zwischen inneren und äußeren Teilentladungen möglich ist.

Das dargestellte Diagramm der inneren Teilentladung (Abbildung 33 - Seite 52) eignet sich jedoch nicht für die Bewertung von inneren Teilentladungen untereinander, da sich der grundsätzliche Verlauf kaum ändert.

Die Idee "Ladungsklassen" zu bilden wird in dieser Arbeit jedoch erneut aufgegriffen um das Verhalten von inneren Teilentladungen in Abhängigkeit von einer Größe (hier Zeit) darzustellen. Hierbei wird vom Autor empfohlen die Anzahl der Teilentladungen in einem definierten Zeitintervall (hier 3 Minuten) zu betrachten.

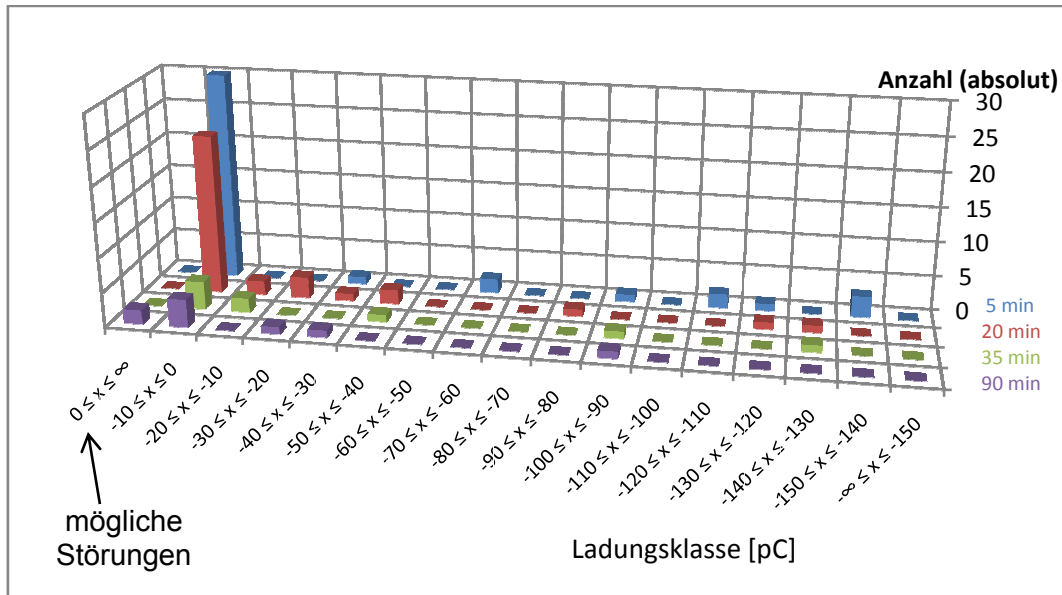


Abbildung 41 3D-Ladungsdiagramm (Anzahl) in Abhängigkeit von der Zeit (Stream 26-29)

Anmerkung:
 vgl. Abbildung 50- Seite 72

Diese Darstellung (Abbildung 41) wurde bei 11 kV aufgenommen und ist nach Meinung des Autors eine gute Ergänzung zur Impulswiederholrate da dadurch gegebenenfalls auch eine Verschiebung der Ladungshöhe erkennbar ist. Aus diesem Diagramm ist nicht nur eine Reduzierung der Impulswiederholrate, sondern auch eine Reduktion der maximal auftretenden Teilentladung, erkennbar.

Wie bereits angesprochen kann diese Darstellung auch in Abhängigkeit von einer anderen Größe, zum Beispiel der Spannung, gebildet werden. Ein solches Diagramm ist auf der folgenden Seite in Abbildung 42 dargestellt.

Auch aus diesem Diagramm können qualitative Rückschlüsse auf das Teilentladungsverhalten gezogen werden. In diesem Fall ist zu erkennen, dass die Anzahl hoher Teilentladungen mit steigender Spannung deutlich zunimmt.

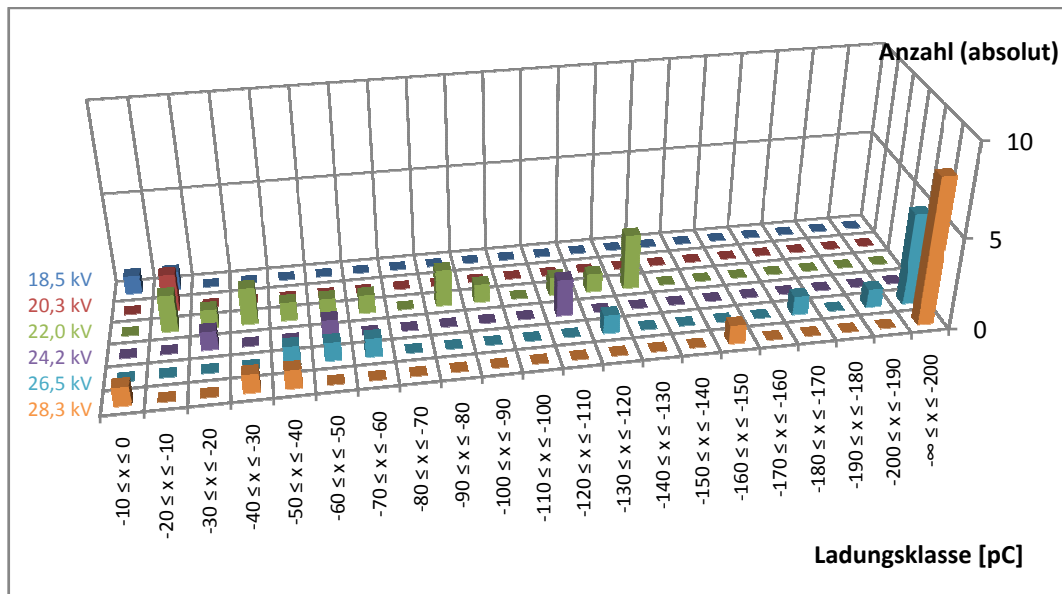


Abbildung 42 3D-Ladungsdiagramm (Anzahl) in Abhängigkeit von der Spannung (Stream 73-76; 79-80)

Anmerkung:

Das gewählte Zeitintervall in Abbildung 42 beträgt zwei Minuten. Dieses Intervall beginnt zwischen 10 und 30 Sekunden nach dem Einstellen der angegebenen Spannung. Der Bereich positiver Entladungen wurde für die diese Darstellung abgeschnitten, da nicht sicher gestellt werden konnte, ob es sich hierbei um Störungen handelt und eine detaillierte Auswertung dieser Teilentladungen aus zeitlichen Gründen nicht möglich ist.

4.4.6 Polarität

Werden bei Gleichspannung Teilentladungen verschiedener Polaritäten gemessen so ist denen durch den Messenden besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Da laut [13] nur Teilentladungen einer Polarität erwartet werden gilt es zu überprüfen ob es sich um innere Teilentladungen oder um Störungen handelt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden bei diversen Messungen Teilentladungen verschiedener Polaritäten gemessen. Zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit ist das Modell der inneren Teilentladungen in Silikon bzw. die genauen physikalischen Vorgänge im Prüfkörper nicht bekannt, weshalb Impulse beider Polaritäten nicht ausgeschlossen werden können. Nachfolgend werden deshalb Indizien aufgezeigt, die dafür sprechen, dass beide Polaritäten im Prüfling auftreten können.

Eine mögliche Ursache der fehlerhaften Erkennung der Polarität liegt in der **Doppelerkennung** eines Teilentladungsimpulses. Treten zwei Impulse in einem Abstand von weniger als 200 ns auf so kann das System keine fehlerfreie Impulserkennung garantieren. Ferner kann ein Impuls, der länger als 6,4 μs andauert eine solche fehlerhafte Erkennung auslösen. Die in Kapitel 4.4.4 (Seite 59f.) ausgewerteten Impulse zeigen jedoch alle eine deutlich kürzere Impulslänge auf. Ob eine solche Doppelerkennung vorliegt lässt sich überprüfen indem die Zeit zum vorherigen und zum nachfolgenden Impuls ausgewertet wird. Eine solche Auswertung ist mittels Datenexport möglich und wird beispielhaft in Anlage 6 (Seite 100) gezeigt. Die ermittelten Zeiten liegen jedoch deutlich oberhalb dieser Grenzzeit.

Eine weitere Ursache für die fehlerhafte Erkennung der Polarität eines Impulses liegt in der Übersteuerung der Messstation. Wird die Verstärkung zu groß gewählt so ist es möglich, dass das Signal nicht mehr richtig verarbeitet werden kann und die Polarität gegebenenfalls falsch erkannt wird. Ein solcher Fehler wird durch den in Abbildung 43 dargestellten Warnhinweis signalisiert.



Abbildung 43 Warnhinweis bei Übersteuerungen

Diese Übersteuerungen können jedoch bei den im Anhang gezeigten Impulsen ausgeschlossen werden. Da durch die Analyse der elektrischen Informationen Teilentladungen beider Polaritäten nicht ausgeschlossen werden können, sondern die Analyse eher dafür spricht das beide Polaritäten auftreten können, werden diese Störungen in Kapitel 4.4.9 (Seite 70 ff.) im Unterpunkt "Störungen" unter Berücksichtigung weiterer Sensoren weitergehend untersucht.

4.4.7 Zeitabhängigkeit

Die Darstellung der **Ladung in Abhängigkeit von der Zeit** bietet auch bei Gleichspannung eine gute Möglichkeit den Prüfling qualitativ zu untersuchen. Es wird vom Autor empfohlen auf die Darstellungsform der Software zu verzichten und stattdessen ein Tabellenkalkulationsprogramm (z.B. Microsoft Excel ©) und den Datenexport zu nutzen. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass so ein Diagramm über den gesamten Zeitraum erstellt werden kann. Ebenfalls ist es möglich, in diesem Diagramm zusätzliche Angaben, wie zum Beispiel die Spannung oder Auswertungspunkte anzugeben. Nachfolgend ist ein solches Diagramm für die Messungen am 10.01.2013 beispielhaft dargestellt.

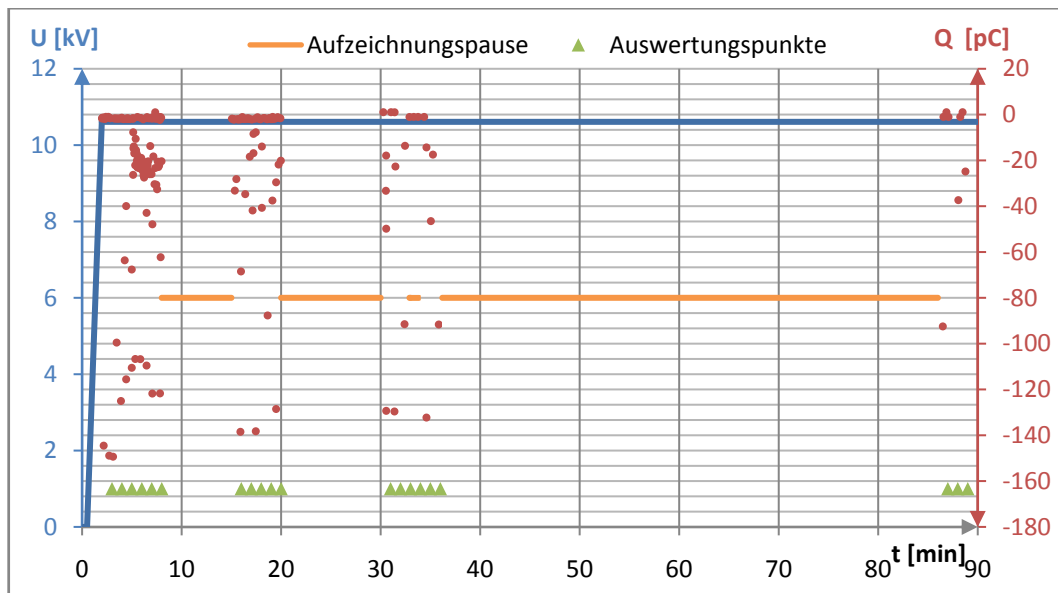


Abbildung 44 Messregime vom 10.01.2013 (Stream 26-29)

Nach Meinung des Autors dient eine solche Darstellung nur der Übersicht. Aus ihr können lediglich qualitative Aussagen gefolgert werden. Eine numerische Auswertung ist im nachfolgenden Kapitel 4.4.8 (Seite 68f.) beschrieben.

Das **Zählen von Impulsen** wird von der Software unterstützt und erlaubt eine Echtzeitanalyse des Teilentladungsverhaltens. Diese Funktion ist insbesondere von Interesse wenn eine Teilentladungsprüfung im Rahmen einer Stück- oder Typprüfung durchgeführt wird. Bei einer solchen Prüfung ist eine Forderung, wie in der DIN EN 62199 (Durchführungen für Gleichspannungsanwendungen) [17] be-

schrieben, dass nur 10 Impulse größer 2000 pC in einem 30 Minuten Fenster auftreten dürfen, möglich.

Bei Forschungsarbeiten, wie der vorliegenden Arbeit, ist eine solche Darstellung nicht zu empfehlen da bei dieser Art der Darstellungen die Information über die tatsächliche Höhe der Teilentladung verloren geht. Deshalb wird vom Autor das Zählen in mehreren "Ladungsklassen", wie im Kapitel 4.4.5 (Seite 61ff.) beschrieben, favorisiert. Neben der dort gezeigten Darstellung ist ebenfalls eine tabellarische Übersicht möglich. Tabelle 5 ist zugehörig der Abbildung 42 (Seite 63) nachfolgend dargestellt.

Tabelle 5 Tabellarische Übersicht über Ladungsklassen (Stream 73-76; 79-80)

U _{prf} [kV]	Ladungsklasse [pC]																						
	-10 ≤ x ≤ 0	-20 ≤ x ≤ -10	-30 ≤ x ≤ -20	-40 ≤ x ≤ -30	-50 ≤ x ≤ -40	-60 ≤ x ≤ -50	-70 ≤ x ≤ -60	-80 ≤ x ≤ -70	-90 ≤ x ≤ -80	-100 ≤ x ≤ -90	-110 ≤ x ≤ -100	-120 ≤ x ≤ -110	-130 ≤ x ≤ -120	-140 ≤ x ≤ -130	-150 ≤ x ≤ -140	-160 ≤ x ≤ -150	-170 ≤ x ≤ -160	-180 ≤ x ≤ -170	-190 ≤ x ≤ -180	-200 ≤ x ≤ -190	-∞ ≤ x ≤ -200		
18,5	1	1																					
20,3		2																					
22,0		2	1	2	1	1	1		2	1		1	1	3									
24,2			1			1						2											
26,5					1	1	1						1					1			1		5
28,3	1			1	1											1							8

Anmerkung:

vgl. Abbildung 42 - Seite 63

Mittels dieser Tabelle kann, ähnlich wie bereits bei Abbildung 42, eine Bewertung des Teilentladungsverhaltens erfolgen. Bei dieser Darstellung sind, aus Gründen der Übersichtlichkeit, die Ladungsklassen nicht zu klein zu wählen und auf die Angabe null zu verzichten.

Wie in Kapitel 3.3.8 (Seite 29ff.) beschrieben ist es möglich, die **Zeit zwischen Impulsen** in Abhängigkeit von der Messzeit aufzutragen. Diese Darstellung (z.B. Abbildung 21 - Seite 31) ist jedoch nur eine erweiterte Darstellung der Impulswiederholrate, da eine Erhöhung der Zeit zwischen Impulsen einem Rückgang der Impulswiederholrate entspricht.

Ebenfalls kann die Zeit zwischen Impulsen in Abhängigkeit von der jeweiligen Ladung abgetragen werden. Eine solche Darstellung erlaubt Rückschlüsse auf das Teilentladungsverhalten. So wird in [14] (vgl. Abbildung 45) der Mittelwert der Zeit zum vorherigen Impuls in einem Hohlraum wie folgt dargestellt.

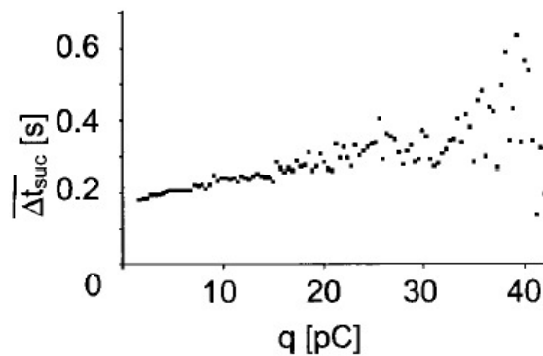


Abbildung 45 Zeit zum vorherigen Impuls [14]

Anmerkung:

Die Bezeichnung Δt_{suc} bezeichnet die Zeit zum vorherigen Impuls. Eine weitere Bezeichnung, die in dieser Arbeit für die Zeit verwendet wird, ist t_{vorher} . Hingegen beschreibt die Zeit t_{nacher} die Zeit zur nachfolgenden Teilentladung.

Aufgrund der geringen Impulswiederholrate sämtlicher in dieser Arbeit durchgeführten Messungen ist eine Mittelwertbildung nicht nötig. Ebenfalls konnte keine gesicherte Aussage über das Verhalten der Prüfkörper getroffen werden. Jedoch ist eine solche Auswertungsmethode in Folgearbeiten durchaus zu berücksichtigen, da wie Abbildung 46 zeigt, eine Initialzündung vor hohen Teilentladungen nicht ausgeschlossen werden kann.

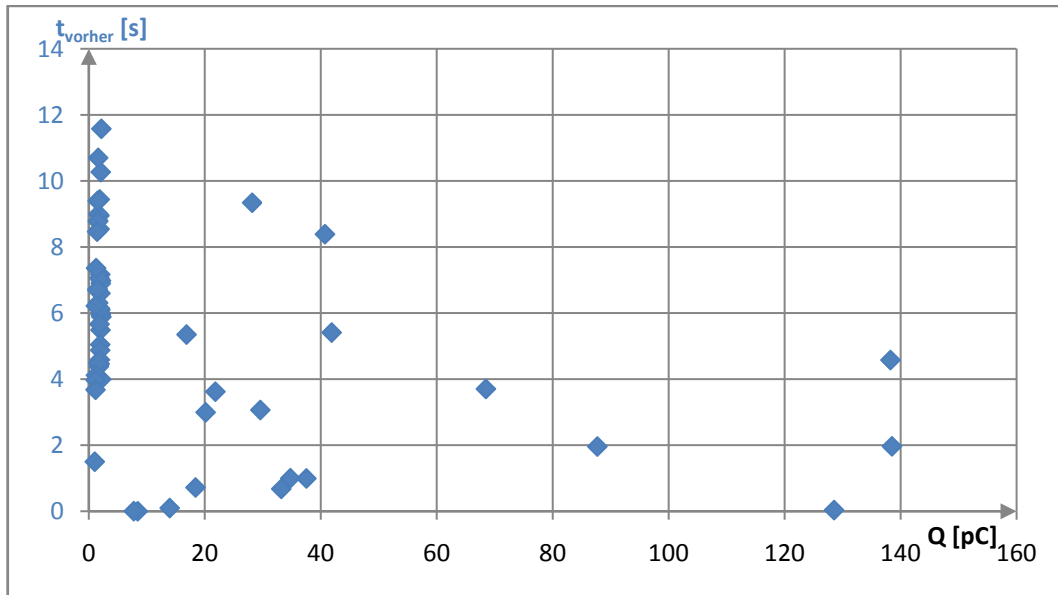


Abbildung 46 Zeit zum vorherigen Impuls in Abhängigkeit von der Ladung (Stream 27)

4.4.8 Statistik

Wie bereits in Kapitel 4.4.2 (Seite 54ff.) erörtert nimmt der gewichtete Mittelwert Q_{WTD} der Software sehr kleine Werte an (vgl Anlage 6 - Seite 100). Aus diesem Grund kann dieser für die Auswertung nicht genutzt werden. Deshalb wurde für das externe Auswertungsprogramm eine Funktion entwickelt, die den arithmetischen Mittelwert bildet. Ebenfalls berechnet dieses Programm die Impulswiederholrate N und bestimmt den größten und kleinsten Teilentladungsimpuls. Da der Einfluss der Polarität nicht geklärt ist geschieht dies separat für positive und negative Impulse, sowie für den Betrag. Je nach Impulswiederholrate wird empfohlen diese Mittelwertbildung in einem Zeitbereich von einer bis zwei Minuten durchzuführen. Dieser Auswertungsmethode wird eine besondere Bedeutung zugeordnet, da sie zum Einen numerisch unterlegt werden kann und zum Anderen, aus der Impulswiederholrate, sowie aus dem Mittelwert der Ladung, ansatzweise auf das schädigende Maß der Teilentladungen geschlossen werden kann. Nachfolgend ist diese Auswertungsmethode, entsprechend den angegebenen Auswertungspunkten der Abbildung 44 (Seite 65), graphisch dargestellt.

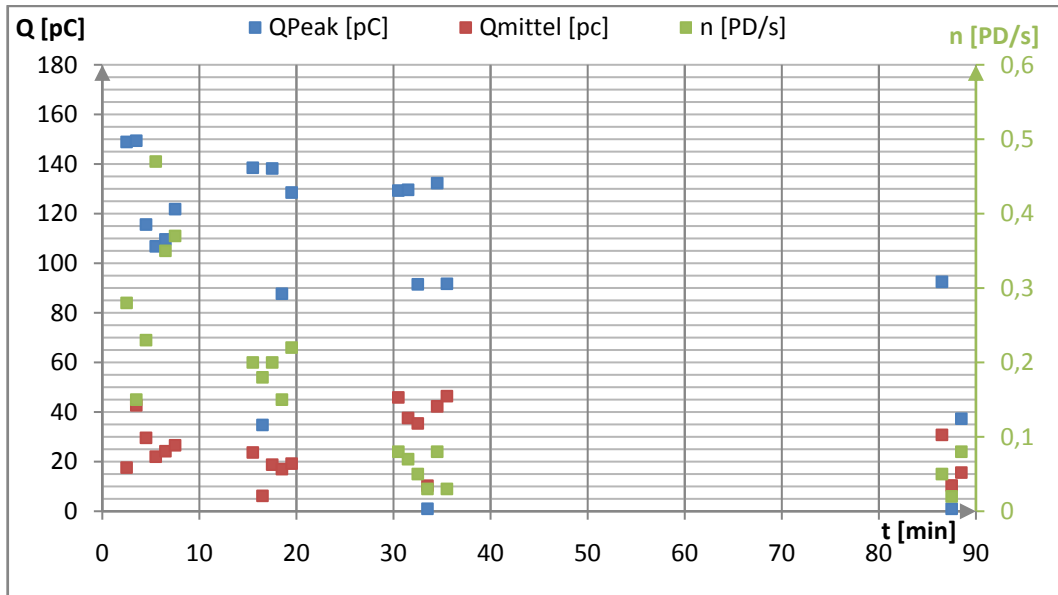


Abbildung 47 Statistische Auswertung des Versuches vom 10.01.2013 (Stream 26-29)

Bei dieser Messung ist zu erkennen, dass die Impulswiederholrate mit steigender Belastungsdauer abnimmt. Ebenfalls nehmen die maximal auftretenden Impulse (Q_{Peak}) ab.

4.4.9 Beispiel: Auswertung eines Versuchtages

Dieses Kapitel fasst die vorher beschriebenen Auswertungsmethoden für einen Versuchstag zusammen. Da im Rahmen dieser Arbeit keine Messungen durchgeführt wurden, die der Untersuchung eines Prüfkörpers (sondern Messungen die für die Untersuchung einer Auswertungsmethode nötig sind) dienen, wird hier beispielhaft eine Messung gezeigt, die dem Messregime einer Prüfkörperuntersuchung sehr nahe kommt. Lediglich die Anzahl der Streams und damit der Auswertungspunkte ist gegebenenfalls zu gering.

Zielsetzung

Hauptziel dieser Messung ist es, das Verhalten des Faser-optisch-akustischen-Sensors zu untersuchen.

Prüfkörper

Spitze (positiv) - Platte (negativ) in Silikon (s = 10 mm)

Nadel B 116 - 5 μm

Prüfkörper war bereits vorgeschädigt

Messregime

Nachfolgend ist das verwendete Messregime und die gemessenen TE dargestellt.

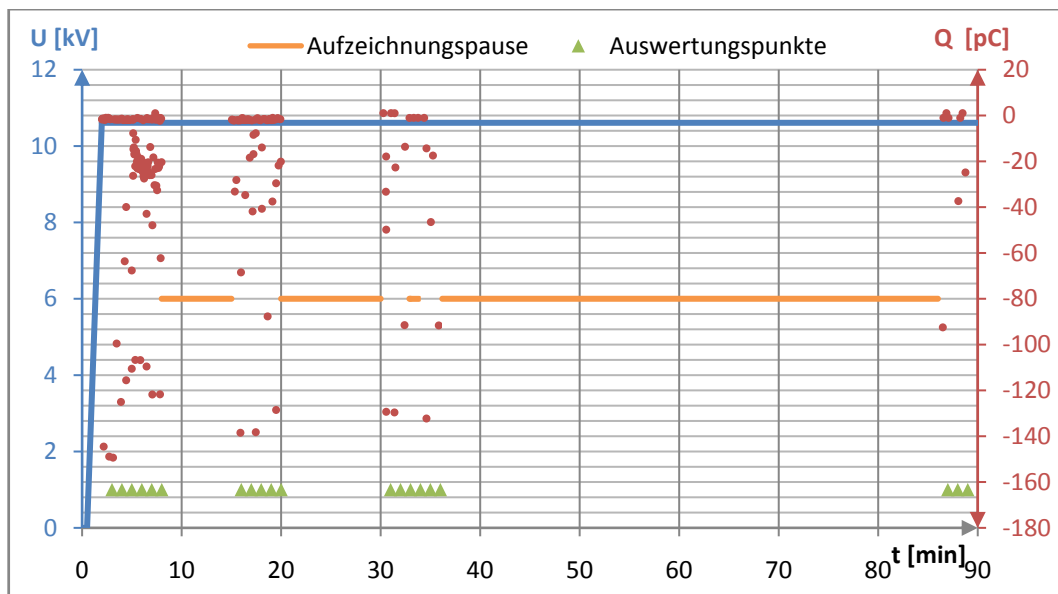


Abbildung 48 Messregime vom 10.01.2013 (Stream 26-29)

Details zur verwendeten Messtechnik

Filtereinstellung: 325 kHz ± 150 kHz

Verstärkung: 7

Stream 26-29

Auswertung statistischer Größen

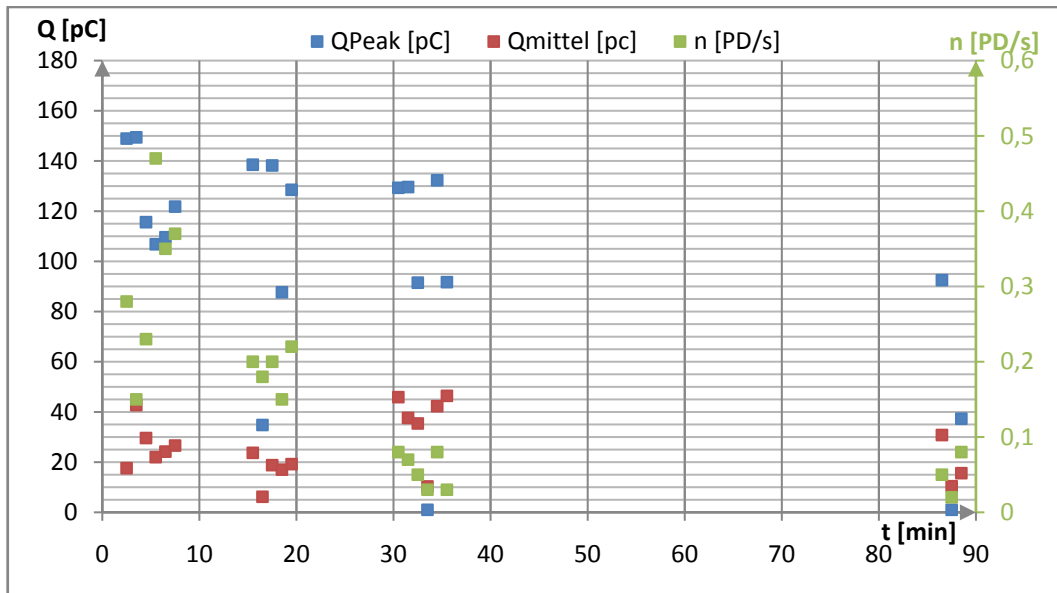


Abbildung 49 Darstellung der wichtiger elektrischer Größen vom 10.01.2013 (Stream 26-29)

Anmerkung:

Die dargestellten Punkte sind die Mittelwerte über ein Zeitfenster von einer Minute und sind am Ende dieses Intervalls dargestellt.

Die Auswertung der statistischen Größen zeigt einen deutlichen Rückgang der Impulsanzahl. Da ebenfalls ein Rückgang der maximal gemessenen Amplitude, jedoch kaum eine Veränderung des Mittelwertes aufgetreten ist, wird nachfolgend ein 3D-Ladungsdiagramm für die einzelnen Streams erstellt.

Auswertung in Ladungsklassen

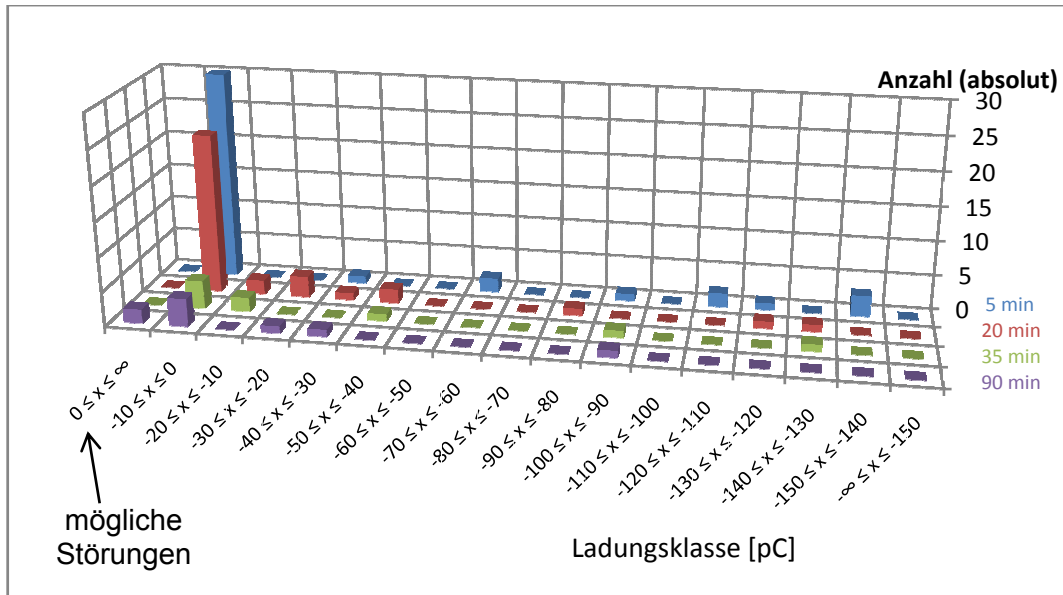


Abbildung 50 3D-Ladungsdiagramm (Anzahl) in Abhängigkeit von der Zeit (Stream 26-29)

Anmerkung:

Für diese Darstellung wurde ein Zeitintervall von drei Minuten gewählt, da dies dem kürzesten aufgenommenem Stream entspricht. Durch Wahl des selben Zeitintervalls ist es möglich die Anzahl, ohne den Umweg über die Impulswiederholrate gehen zu müssen, direkt miteinander zu vergleichen. Da bei dem nachfolgenden Unterpunkt "mögliche Störungen" längere Intervalle berücksichtigt werden, sind dort mehr TE im Bereich der möglichen Störungen dargestellt.

Aus diesem Diagramm ist zu erkennen, dass die Impulsanzahl über die gesamte Höhe der Teilentladungen in Abhängigkeit von der Belastungsdauer abnimmt.

Mögliche "Störungen" während der Messung:

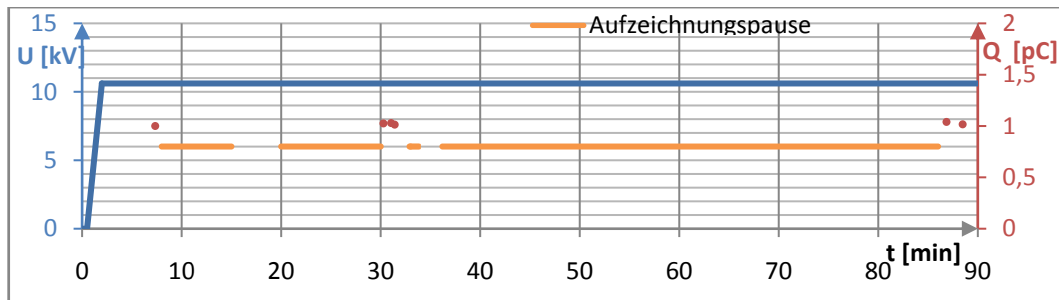


Abbildung 51 Elektrische Impulse mit positivem Vorzeichen (Stream 26-29)

Durch die Variation der Sekundärskala zeigt sich, dass sechs Impulse während den Aufzeichnungsphasen ein positives Vorzeichen haben. Da nicht vollständig geklärt ist ob nur Impulse einer Polarität erwartet werden, sind diese sechs Impulse näher zu untersuchen.

Bei diesen Impulsen handelt es sich um die bereits in Kapitel 4.4.6 (Seite 63f.) elektrisch ausgewerteten möglichen Störung. Die dort aufgezeigten Untersuchungen der elektrischen Signale schließen jedoch Doppelerkennung und Übersteuerung des Verstärkers aus. Ebenfalls können äußere Teilentladungen aufgrund der geringen Impulshöhe und der extrem niedrigen Impulswiederholrate ausgeschlossen werden.

Ein Abgleich mit dem Faser-optisch-akustischen-Sensor zeigt, dass dieser keine entsprechenden Impulse registriert hat, obwohl seine Empfindlichkeit für die Detektion von ~ 1 pC ausreichend ist, sofern diese in der Nähe der Nadelspitze, auf welche der Sensor ausgerichtet ist, auftreten.

Ebenfalls konnte beim Vergleich zum Piezo-Sensor keine Übereinstimmung gefunden werden.

Die Auswertung der Impulse legt nahe, dass es zu ungewollten Teilentladungen im Bereich der Erdelektrode kommt. Hierbei ist zu vermuten, dass die Teilentladungen zwischen der Aluminiumfolie und dem Prüfkörper aufgrund von Unebenheiten in der Oberfläche entstehen. Durch diese Unebenheiten können, trotz sorgfältigem Auflegen der Aluminiumfolie, Hohlräume nicht ausgeschlossen werden.

Diese Hohlräume können zu einer ungewollten Feldstärkeverschiebung und damit zu Teilentladungen in der Nähe der Erdelektrode führen. Um dieses ausschließen zu können, wird vom Autor empfohlen die Erdelektrode in den Prüfkörper mit einzubinden.

Auswertung von Signalen nicht elektrischer Sensoren

Eine Auswertung der beiden akustischen Sensoren, in Bezug auf charakteristische Eigenschaften der Sensoren, die bei der Messung mitgelaufen sind, ist an dieser Stelle nicht nötig, da diese lediglich als Unterstützungen dienen.

Zeit zwischen Impulsen

Eine Auswertung der Zeit zwischen zwei Impulsen erfolgt in Abbildung 52 und Abbildung 53. In der ersten Darstellung wird die Zeit zum vorherigen Impuls, in der zweiten Abbildung die Zeit zum nachfolgendem Impuls, dargestellt.

Zeit zur vorherigen Teilentladung:

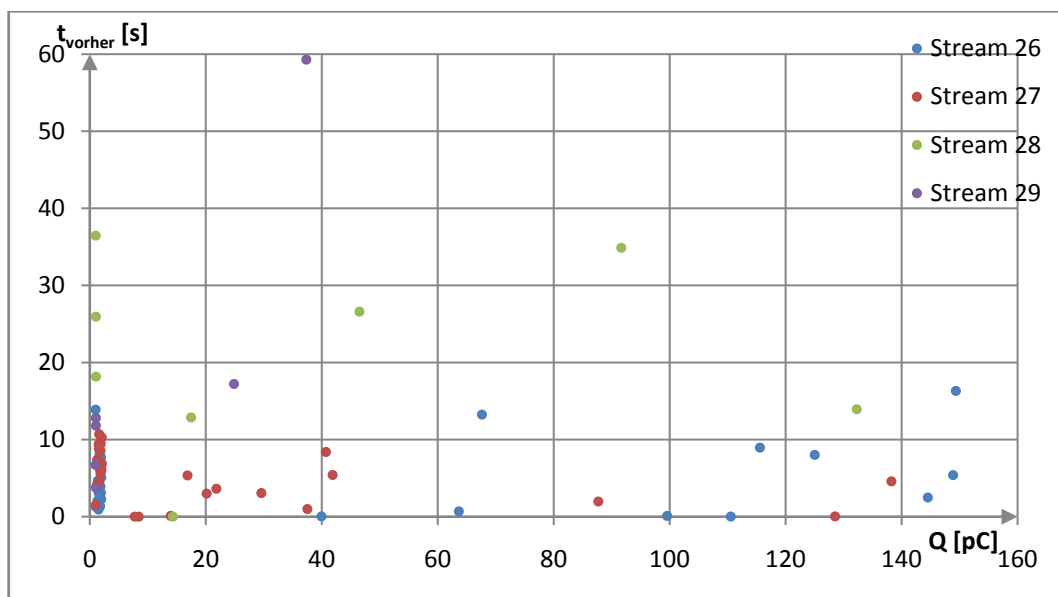


Abbildung 52 Zeit zum vorherigen Impuls in Abhängigkeit von der Ladung (Stream 26-29)

Zeit zur nachfolgenden Teilentladung:

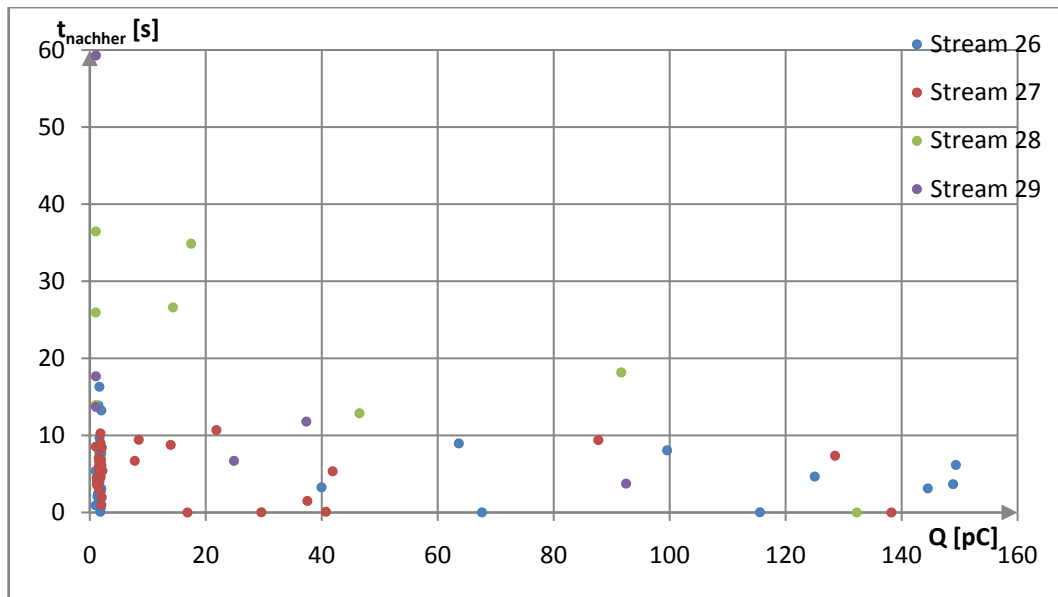


Abbildung 53 Zeit zum nachfolgenden Impuls in Abhängigkeit von der Ladung (Stream 26-29)

Aus beiden Diagrammen ist, wie bereits des Öfteren thematisiert ein Rückgang der Impulswiederholrate ersichtlich. Dieser Rückgang zeigt sich in dieser Art der Darstellung dadurch, dass beim Vergleich der Streams untereinander die Zeit in beiden Diagrammen zunimmt.

Eine gesicherte Aussage, ob eine kleine Teilentladung als Initialzündung für eine hohe TE benötigt wird und ob nach einer hohen Teilentladung eine gewisse Zeit keine Teilentladungen mehr auftreten, kann an dieser Stelle, aufgrund zu weniger identischer Messreihen, nicht getätigt werden. Insbesondere letzteres, dass die Höhe der Teilentladungen einen Einfluss auf die Zeit zur nachfolgenden TE hat wird jedoch eher ausgeschlossen, da in Abbildung 53 die Verteilung der Zeit überwiegend unabhängig von der Ladung ist. Bei genauerer Betrachtung der Abbildung 52 (Seite 74) sprechen die Datenreihen "Stream 27" und "Stream 28" anstattweise dafür dass vor einer hohen Teilentladungen in einem Bereich von wenigen Sekunden vorher eine weitere Teilentladung erfolgt ist.

Bei der Betrachtung dieser Diagramme ist jedoch zu beachten, dass Teilentladungsprozesse grundsätzlich einer gewissen Wahrscheinlichkeit unterliegen!

4.5 Auswertung nicht elektrischer Sensoren

4.5.1 Faser-optisch-akustischer-Sensor

Da die akustischen Sensoren als Ergänzung der elektrischen Teilentladungsmessung angesehen werden, ist eine Auswertung in Bezug auf charakteristische Eigenschaften der Sensoren, sowie auf Parallelen zu Signalen des elektrischen Kanal möglich. Eine detaillierte Auswertung der Eigenschaften und des Verhaltens der akustischen Sensoren wird von Herrn Rohwetter (BAM) durchgeführt.

Bei der akustischen Messung ist zu beobachten, dass es aufgrund von Reflektionen der Schallwellen im Prüfkörper zu Doppelerkennungen einzelner elektrischer Teilentladungsimpulse kommt. Ebenfalls wird der erste akustische Impuls, der zu einem elektrischen Teilentladungsimpuls gehört, zeitverzögert erkannt. Zur Verdeutlichung dieses Verhaltens sind in Abbildung 54 ein einzelner elektrischer Impuls und die dazu gehörigen akustischen Signale dargestellt.

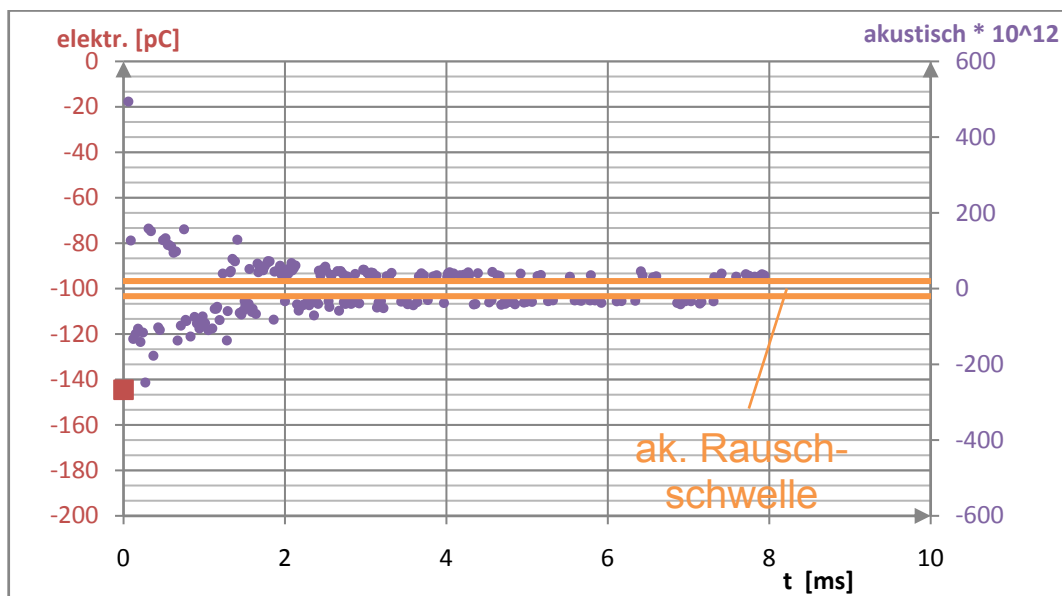


Abbildung 54 Akustische Impulse als Folge einer Teilentladung (Stream 26)

Es zeigt sich, dass die Reflektionen auch bei verhältnismäßig starken elektrischen Impulsen nach einer Zeit von ungefähr 8 ms abklingen. Wird der Sensor lediglich als Unterstützung zum elektrischen Messkanal verwendet, so wird empfohlen das Grundrauschen im akustischen Kanal herauszufiltern und eine Totzeit von 8 ms einzustellen. Diese Einstellungen erlauben es die Anzahl der akustischen Impulse

deutlich zu reduzieren und somit die Auswertung zu erleichtern. Bei dieser Vorgehensweise ist jedoch zu beachten, dass die Informationen über das grundsätzliche Verhalten des Sensors verloren gehen. Auch wenn diese nicht explizit in dieser Arbeit ausgewertet werden, sind die im Rahmen dieser Arbeit aufgenommenen Streams mit sämtlichen Impulsen aufgezeichnet.

Durch eine Funktion des für diese Arbeit entwickelten Programmes ist es möglich, einen Zusammenhang zwischen elektrischen und akustischen Signalen zu schaffen. Dies erlaubt es, die akustischen Impulse in Abhängigkeit von den elektrischen Teilentladungen darzustellen. Eine solche Darstellung erfolgt in Abbildung 55.

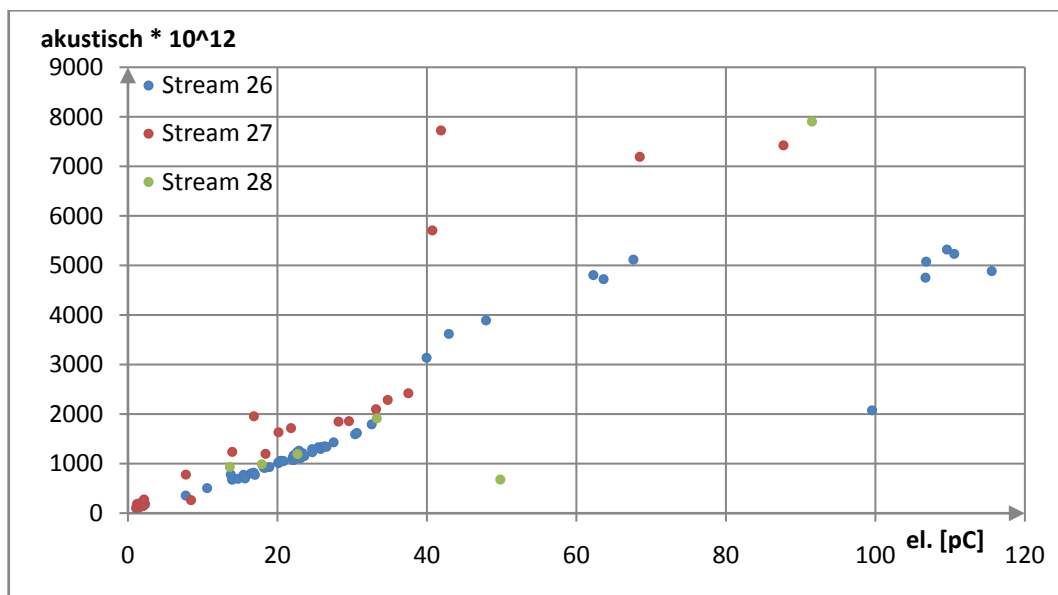


Abbildung 55 Zusammenhang zwischen elektrischen und akustischen Impulsen (Stream 26-28)

Die Anzahl der elektrischen Impulse (Abszisse) zeigt sämtliche im Stream aufgenommenen elektrischen Impulse für die eine akustische Entsprechung gefunden wurde. Das heißt, dass die Lücken im Bereich größer 35 pC durch das Teilentladungsverhalten des Prüfkörpers bedingt sind.

Die Messwerte zeigen, dass der Faser-optisch-akustische-Sensor auch elektrische Impulse von wenigen Piko Coulomb erkennen kann. Die genaue untere Grenze des akustischen Sensors konnte nicht exakt bestimmt werden, da mit dem elektrischen Messkanal lediglich Impulse größer 1 pC ermittelt werden können.

Die Messdaten im akustischen Kanal legen jedoch nahe, dass der akustische Sensor auch kleinere Teilentladungen detektieren kann.

Bei dieser Art der Auswertung ist jedoch zu beachten, dass der Sensor optimal auf die Fehlerstelle ausgerichtet ist. Ebenfalls ist zu berücksichtigen, dass sich zwischen dem Sensor und der Fehlerstelle lediglich eine Schicht Silikon, das heißt ohne weitere Materialgrenzflächen, befindet. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit war eine weitergehende Untersuchung, wie sich der Sensor bei anderer Platzierung oder bei einem anderem Material verhält, zeitlich nicht möglich.

Es ist jedoch deutlich, dass dieser Sensor für diese Art der Untersuchung von Prüfkörpern sehr gut geeignet ist.

4.5.2 Piezo-Sensor

Der Piezo-Sensor zeigt ein ähnliches Verhalten wie der Faser-optisch-akustische-Sensor. Auch bei diesem Sensor treten aufgrund von Reflektionen Doppelerkennung auf.

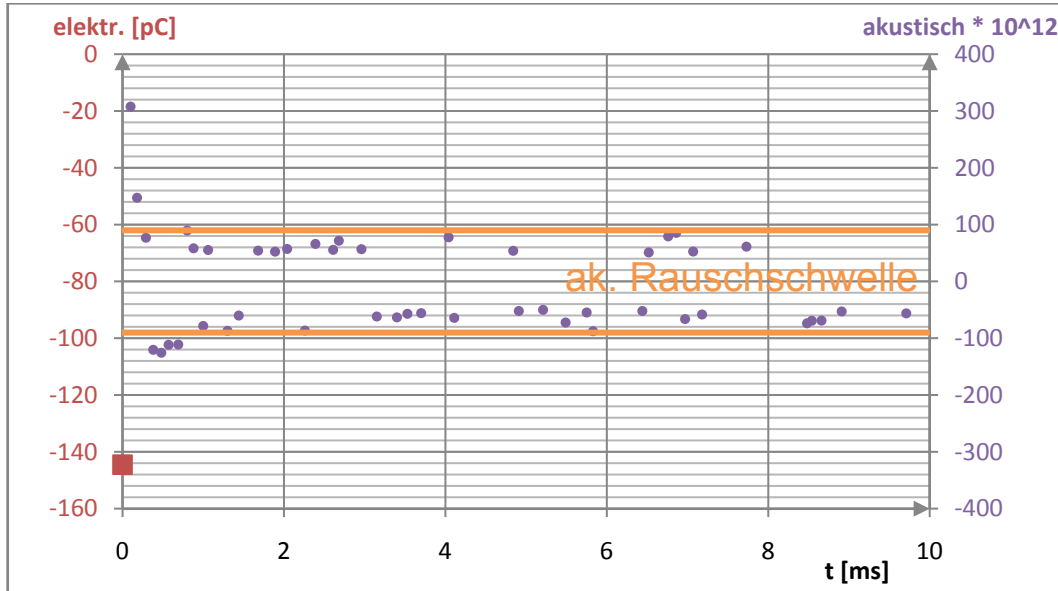


Abbildung 56 Akustische Impulse als Folge einer Teilentladung (Stream 26)

In Abbildung 56 ist zu erkennen, dass die Impulse bereits nach rund 1 ms abklingen. Dies kann damit erklärt werden, dass der Piezo-Sensor unempfindlicher als der Faser-optisch-akustische-Sensor ist und die Reflektionen schlechter erkennt.

Dies wird auch in der nachfolgenden Abbildung 57 deutlich, die die akustischen Impulse in Abhängigkeit von elektrischen Teilentladungen darstellt.

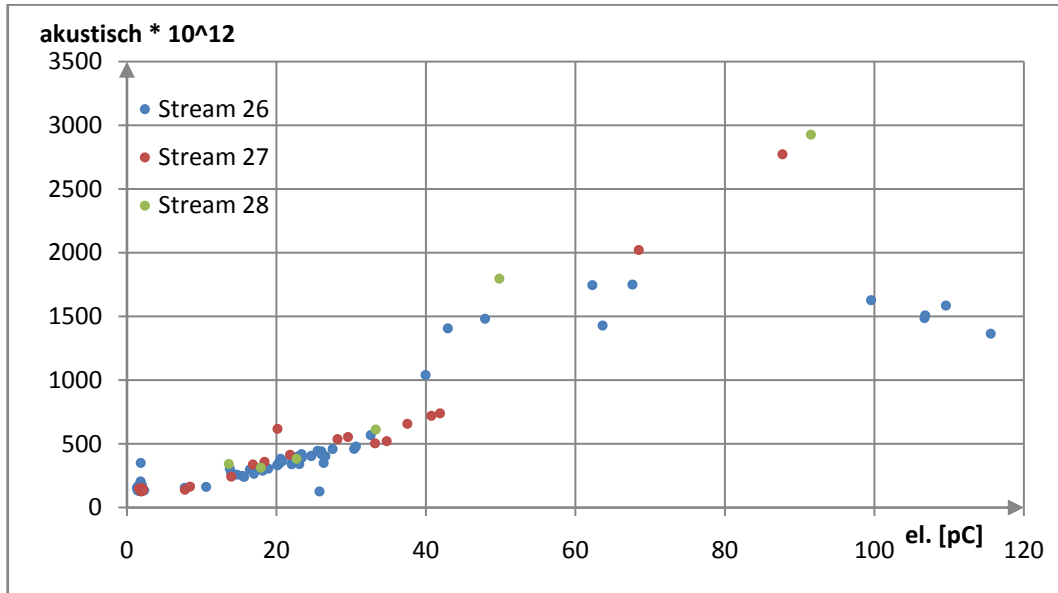


Abbildung 57 Zusammenhang zwischen elektrischen und akustischen Impulsen (Stream 26-28)

Ähnlich dem Faser-optisch-akustischen-Sensor gilt auch für diesen Sensor, dass dieser optimal ausgerichtet ist. Unter diesen Bedingungen können auch diesem Sensor elektrische Teilentladungen von minimal 1,3 pC zugeordnet werden. Dennoch zeigt sich, dass auch dieser Sensor gut für diese Art der Messung geeignet ist. Insbesondere da das Handling mit diesem Sensor im Vergleich zum Faser-optisch-akustischen-Sensor deutlich einfacher ist. Ein deutlicher Nachteil ist, dass der Sensor nicht im elektrischen Feld angeordnet werden kann, da dieser Sensor elektrisch leitende Materialien enthält.

4.5.3 Optische Teilentladungsmessung mittels Digitalkamera

Bei Trendmessungen mit Wechselspannung und transparenten Prüfkörpern werden beim IPH, in völliger Dunkelheit im Messbereich, mit einer Digitalkamera und Belichtungszeiten von bis zu 30 Sekunden Bilder aufgenommen. Diese erlauben, aufgrund der Lichtentwicklung der Teilentladungen das Wachsen eines elektrischen Trees zu untersuchen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist es, aufgrund der geringen Impulswiederholrate bei Gleichspannung, nicht gelungen ein solches Tree-Wachstum durch diese Art der Messung sichtbar zu machen.

4.5.4 Optische Messung mittels Linsensystem

Das im Rahmen dieser Arbeit verwendete optische Messsystem bietet bei Gleichspannung nur eine schlechte Alternative im Vergleich zu den beiden akustischen Sensoren. Unter anderem muss das Linsensystem in einem Abstand von wenigen Zentimetern zum Prüfkörper positioniert werden, damit es optimal auf die Fehlstelle ausgerichtet ist. Bei dieser Entfernung können jedoch Teilentladungen, welche durch das Linsensystem hervorgerufen werden, nicht ausgeschlossen werden. Ebenfalls ist die Ausrichtung dieses Sensor sehr schwierig. Zwar ist es möglich mittels eines Laserpointers rückwärts in den Lichtwellenleiter des Sensors zu leuchten, um dessen Lichtstrahl aus dem Linsensystem heraus zu verfolgen. Diese Methode ist jedoch sehr ungenau, da so der Brennpunkt des Linsensystems nicht exakt bestimmt werden kann. Aus diesen Gründen wurde nach den ersten Messungen auf dieses Messsystem verzichtet und stattdessen die beiden akustischen Sensoren verwendet.

Da es bei dem Sensor nur sehr selten zu Doppelerkennungen kommt, ist es möglich, wenn die Höhe der optischen Impulse deutlich über dem Rauschen liegt, diese den elektrischen Teilentladungen zuzuordnen. Diese Zuordnung ist nachfolgend in Abbildung 58 (Seite 81) dargestellt.

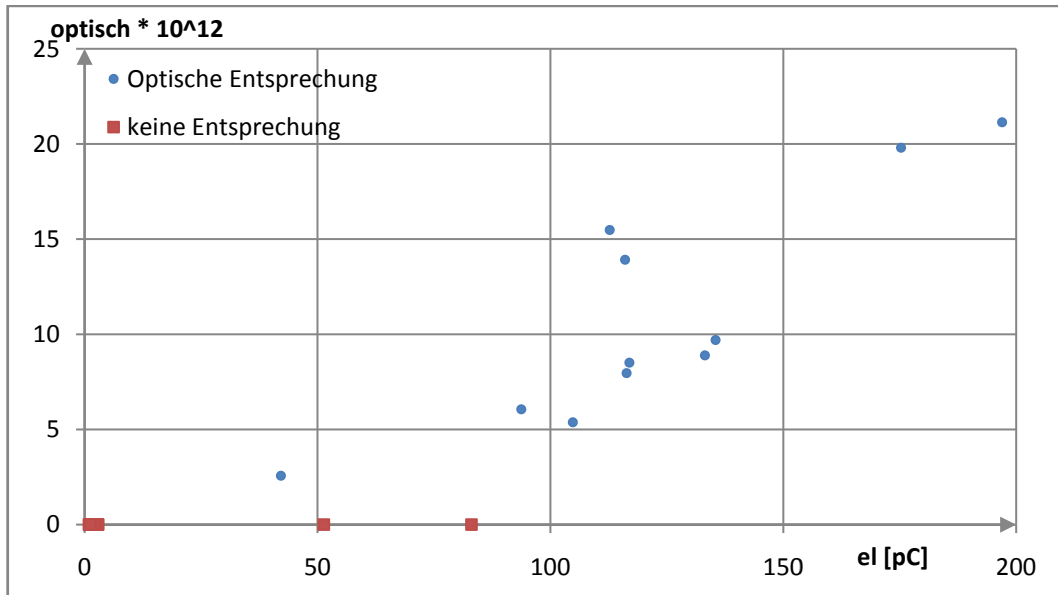


Abbildung 58 Zusammenhang zwischen elektrischen und optischen Impulsen (Stream 13)

Anmerkung:

Bei dieser Darstellung werden auch elektrische Impulse [rote Markierung] dargestellt für die keine optische Teilentladung gefunden wurde.

Die Darstellung verdeutlicht, dass das optische Linsensystem bei Gleichspannung elektrische Teilentladungen erst ab einer Höhe von ~100 pC zuverlässig detektiert. Da diese Detektionsschwelle bei Gleichspannungsmessungen unzureichend ist, wird die Verwendung von akustischen Sensoren empfohlen.

4.6 Zusammenfassung und Ausblicke

Die durchgeführten Messungen verdeutlichen, dass auf dem Gebiet der Teilentladungsmessung bei Gleichspannung bislang wenige Erfahrungen vorliegen. Ebenfalls wurde anhand der Auswertungsmethoden verdeutlicht, dass das verwendete Messprogramm, in der vorliegenden Version 1.6.0, diese Auswertungsmöglichkeiten nur ungenügend unterstützt, weshalb empfohlen wird, in Folgearbeiten den Datenexport zu nutzen um so weitergehende Auswertungsmethoden zu erhalten. Hierbei ist insbesondere das entwickelte 3D-Ladungsdiagrammen (vgl. Kapitel 4.4.5 - Seite 61ff.) sehr vorteilhaft, da diese Darstellung mehr Informationen als nur die Impulswiederholrate beinhaltet. Ebenfalls ist davon auszugehen, dass aus der Summe der Teilentladungen, sowie deren Höhe ein Maß für die Schädigung berechnet werden kann. Außerdem ist anzunehmen, dass die Verteilung im Ladungsdiagramm Rückschlüsse auf das Teilentladungsverhalten erlaubt.

Hierbei ist über eine Weiterentwicklung des bereits des Öfteren angesprochenen Programmes für die Auswertung in Betracht zu ziehen, um die benötigte Zeit für die Auswertung zu senken. Da diese Aufgabe sehr umfangreich ist, wird sogar eine Abschlussarbeit eines Informatikstudienganges angeregt.

Für praktische vor Ort-Messungen, wie sie beim IPH zum Tagesgeschäft gehören, scheint eine 3-Frequenzmessung eine gute Möglichkeit zu sein um zwischen inneren und äußeren Teilentladungen zu unterscheiden. Hierzu sind jedoch weiterführende Messungen unter realistischeren Bedingungen notwendig.

Ferner haben die Messungen verdeutlicht, dass für die Einarbeitung und die Durchführung von Teilentladungsmessungen mehr Zeit als der für eine Abschlussarbeit eingeräumte Zeitraum benötigt wird, weshalb eine sehr enge Verknüpfung aus Praktikum und Bachelorarbeit bei Folgearbeiten empfohlen wird. Ebenfalls wird empfohlen die Veränderungen in der Prüfkörperherstellung sowie eine modifizierte Erdelektrode in Betracht zu ziehen. Ersteres erlaubt die benötigte Zeit für die Herstellung eines Prüfkörpers zu reduzieren. Die Modifikation der Erdelektrode vermag eventuell die Störungen zu verhindern (vgl. Kapitel 4.4.9 - Seite 70ff.).

Neben der elektrischen Teilentladungsmessung hat sich besonders die akustische Teilentladungsmessung als gute Alternative erweisen. Diese Sensoren erreichen bei einer optimalen Ausrichtung auf die Fehlstelle eine ebenso gute Detektion wie der elektrische Kanal. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die in dieser Arbeit verwendeten Prüfkörper optimale Bedingungen für die Schallleitung aufweisen. In diesem Rahmen wären Folgeuntersuchungen in Bezug auf praxisnahe Anwendungen von großem Interesse.

In Bezug auf das Verhalten der Teilentladungen bei Gleichspannung hat sich im Rahmen dieser Arbeit gezeigt, dass bei Trendmessungen mit konstanter Spannung, knapp oberhalb der Einsetzspannung, mit einem Rückgang der Teilentladungen in Abhängigkeit von der Zeit zu rechnen ist. Eine Erhöhung der Spannung zeigt auch eine Erhöhung der Impulswiederholrate, sowie der maximal auftretenden Teilentladungshöhe.

Da es sich bei dem verwendeten Silikon um einen sehr hochohmigen Werkstoff handelt, welcher im Zusammenhang mit Gleichspannungsmessungen bisher nicht untersucht wurde, wird für Folgeuntersuchungen die Untersuchung von praxisnäheren Materialien angeregt.

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Abkürzung

Formelzeichen	Name	Einheit
Δf	Bandbreite	Hz
i_{Grid}	Kurzschlussstrom	A
L_{Grid}	Leitungsinduktivität	H
R_{Grid}	Leitungswiderstand	Ω
f_m	Mittenfrequenz	Hz
V_{Grid}	Netzspannung	V
f_2	obere Grenzfrequenz	Hz
f_1	untere Grenzfrequenz	Hz
t	Zeit	s

Abkürzung

AC	Wechselspannung
AKV	Ankoppelvierpol
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -Prüfung
DC	Gleichspannung
dena	Deutsche Netz-Agentur
EUT	equipment under test
FFT	fast Fourier transformation
HGÜ	Hochspannungsgleichstromübertragung
Hybrid	Hybrid Circuit Breaker
IPH	Institut "Prüffeld für elektrische Hochleistungstechnik" GmbH
LWL	Lichtwellenleiter
pard	phase amplitude relation diagram
SMCB	Snubbed Mechanical Circuit Breaker
SSCB	Solid State Circuit Breaker
TE	Teilentladungen

Verzeichnis der verwendeten Bilder und Tabellen

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Netzausbau bis 2030 nach [1].....	5
Abbildung 2 Aufbau von Gleichspannungsnetzen nach [3].....	8
Abbildung 3 Verluste von verschiedenen Gleichspannungsnetzen nach [5].....	9
Abbildung 4 Aufbau eines DC-DC-Konverter [5].....	10
Abbildung 5 Aufbau eines SSCBs [3].....	11
Abbildung 6 Aufbau eines Hybrid Circuit Breakers [3]	12
Abbildung 7 Aufbau eines Snubbed Mechanical Circuit Breaker [3].....	13
Abbildung 8 Vergleich zwischen Gleichspannungsschaltelementen nach [3].....	14
Abbildung 9 Ersatzschaltbild eines Gleichspannungskurzschlusses [3]	15
Abbildung 10 Verlauf des Kurzschlussstromes im Gleichspannungsnetz [3].....	16
Abbildung 11 Wirtschaftlicher Vergleich zwischen sechs Windparkkonfigurationen [6].....	18
Abbildung 12 Software eines MPD 600 zur Kalibrierung	21
Abbildung 13 Datenexport (Stream 13).....	24
Abbildung 14 Histogramm (Stream 13).....	25
Abbildung 15 Multiple TE-Quellen, dargestellt und separiert durch 3CFRD [13]	26
Abbildung 16 Impulsform (Stream 13)	27
Abbildung 17 FFT (Stream 13).....	27
Abbildung 18 Ladungsklasse (Stream 13)	28
Abbildung 19 Ladung in Abhängigkeit von der Zeit (Stream 13).....	29
Abbildung 20 Ladungszähler (Stream 13).....	30
Abbildung 21 Zeit zum nachfolgenden Impuls (Stream 13)	31
Abbildung 22 Messaufbau.....	37
Abbildung 23 Realisierung der Erdelektrode.....	39
Abbildung 24 Gussform für die Prüfkörperherstellung [8]	40
Abbildung 25 Abmessungen des Prüfkörpers	41
Abbildung 26 Nadeln: oben-links: D16; oben-rechts: D17; unten-links: D19; unten-rechts: D25	42
Abbildung 27 Aufbau eines Faser-optisch-akustischen-Sensors	43
Abbildung 28 Ausrichtung des Linsensystems auf einen Prüfkörper [8]	45
Abbildung 29 Messregime des ersten Vorversuches	47
Abbildung 30 Messregime des zweiten Vorversuches (Stream 1-2).....	48
Abbildung 31 Messregime des dritten Vorversuches (Stream 21-23).....	50
Abbildung 32 Ladungsdiagramm äußere TE (Stream21).....	51
Abbildung 33 Ladungsdiagramm innere TE (Stream 23).....	52
Abbildung 34 Ladungsdiagramm innere & äußere TE (vergrößerte Darstellung auf innere TE).....	53
Abbildung 35 Pard-Diagramm (innere TE - Stream 21)	55

Abbildung 36 Pard-Diagramm (äußere TE - Stream 26).....	56
Abbildung 37 3-Frequenzmessung mit inneren und äußeren Teilentladungen (Stream 101).....	57
Abbildung 38 Impulsform einer inneren Teilentladung (Stream 82).....	59
Abbildung 39 FFT einer inneren Teilentladung (Stream 82).....	60
Abbildung 40 FFT des Grundrauschens (Stream 25).....	61
Abbildung 41 3D-Ladungsdiagramm (Anzahl) in Abhängigkeit von der Zeit (Stream 26-29).....	62
Abbildung 42 3D-Ladungsdiagramm (Anzahl) in Abhängigkeit von der Spannung (Stream 73-76; 79-80).....	63
Abbildung 43 Warnhinweis bei Übersteuerungen.....	64
Abbildung 44 Messregime vom 10.01.2013 (Stream 26-29).....	65
Abbildung 45 Zeit zum vorherigen Impuls [14].....	67
Abbildung 46 Zeit zum vorherigen Impuls in Abhängigkeit von der Ladung (Stream 27).....	68
Abbildung 47 Statistische Auswertung des Versuches vom 10.01.2013 (Stream 26-29).....	69
Abbildung 48 Messregime vom 10.01.2013 (Stream 26-29).....	70
Abbildung 49 Darstellung der wichtiger elektrischer Größen vom 10.01.2013 (Stream 26-29).....	71
Abbildung 50 3D-Ladungsdiagramm (Anzahl) in Abhängigkeit von der Zeit (Stream 26-29).....	72
Abbildung 51 Elektrische Impulse mit positivem Vorzeichen (Stream 26-29).....	73
Abbildung 52 Zeit zum vorherigen Impuls in Abhängigkeit von der Ladung (Stream 26-29).....	74
Abbildung 53 Zeit zum nachfolgenden Impuls in Abhängigkeit von der Ladung (Stream 26-29)....	75
Abbildung 54 Akustische Impulse als Folge einer Teilentladung (Stream 26).....	76
Abbildung 55 Zusammenhang zwischen elektrischen und akustischen Impulsen (Stream 26-28). 77	
Abbildung 56 Akustische Impulse als Folge einer Teilentladung (Stream 26).....	78
Abbildung 57 Zusammenhang zwischen elektrischen und akustischen Impulsen (Stream 26-28). 79	
Abbildung 58 Zusammenhang zwischen elektrischen und optischen Impulsen (Stream 13).....	81

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Netzausbau bis 2030 [1].....	5
Tabelle 2 Impulsfolgeantwort von TE-Messgeräten nach [15].....	32
Tabelle 3 Auswertung von zwei Filtereinstellungen.....	49
Tabelle 4 Elektrische Größen während einer 3-Frequenzmessung (Stream 100, 102).....	58
Tabelle 5 Tabellarische Übersicht über Ladungsklassen (Stream 73-76; 79-80).....	66

Abbildung-Anhang-Verzeichnis

Abbildung-Anhang 1 Darstellung des Prüfkörpers mit der Nadel B218	97
Abbildung-Anhang 2 3-Frequenzmessung mit inneren Teilentladungen (Stream 102).....	99
Abbildung-Anhang 3 3-Frequenzmessung mit äußeren Teilentladungen (Stream 100)	99

Tabellen-Anhang - Verzeichnis

Tabelle-Anhang 1 Übersicht über aufgenommene Streams	93
Tabelle-Anhang 2 Elektrische Kenngrößen des Versuches vom 10.01.2013	98
Tabelle-Anhang 3 Auswertung von Impulsen anderer Polarität	100

Literaturverzeichnis

- [1] Deutsche Energie-Agentur GmbH
dena-Verteilnetzstudie
- [2] DIN EN 50123
Ortsfeste Anlagen - Gleichstrom-Schaltanlagen
- [3] Meyer, C.
Key Components for Future Offshore DC Grids (Dissertation)
Shaker Verlag GmbH
- [4] Ehnberg, J.; Nordlander, T.
Protection system design for MVDC collection grids for off-shore wind farms
[online] http://elforsk.se/Rapporter/?rid=12_02_ [Stand: 10.02.2013]
- [5] Meyer, C.; Höing, M.; Peterson, A.; De Doncker, R.
Control and Design of DC Grids for Offshore Wind Farms
IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 43, 11/12 2007
- [6] Lundenberg, S.
Wind Farm Configuration and Energy Efficiency Studies - Series DC versus AC Layouts (Dissertation)
ISBN 978-91-7291-884-9
- [7] Greisler, S.
Grundlegende Untersuchungen zum Teilentladungsverhalten einer Spitze – Platte Elektrodenkonfiguration bei Gleichspannungsbelastung in unterschiedlichen Isoliermedien (Masterarbeit)
- [8] Brüggemann, M.
Grundlegende Untersuchungen zum Teilentladungsverhalten einer Spitze-Platte-Elektrodenkonfiguration bei Gleichspannungsbeanspruchung als Nachbildung einer leitenden Fehlstelle in polymeren Isolierungen (Masterarbeit)
- [9] Rhode, V.
Gleichspannungs-Teilentladungen in modifizierten transparenten Silikon (Bachelorarbeit)
- [10] Rethmeier, K.
Application Note - Partial Discharge Measurements under DC Test Voltage
OMMICRON electronics GmbH
- [11] Herold, C.; Leibfried, T.; Badent, R.; Hassel, J.; Probol, C.
TE-Messung zur Bewertung von Verschmutzungen bei Gleichspannungen bis 20kV
ETG-Kongress 2009, FT 3+4
Berlin, Offenbach: VDE VERLAG GMBH
- [12] OMMICRON electronics GmbH
Messsystem für elektrische Teilentladung MPD 600 Handbuch
OMMICRON electronics GmbH, 2009
- [13] Rethmeier, K.; Krüger, M.; Küchler, A.; Liebschner, M.; Krause, Ch.
Neue Ansätze zur Interpretation von Teilentladungsmessungen
ETG-Kongress 2009, FT 3+4
Berlin, Offenbach: VDE VERLAG GMBH

- [14] CIGRE Working Group D1.03
Partial Discharges in HVDC Applications
CIGRE 506

- [15] DIN EN 60270
Hochspannungs-Prüftechnik - Teilentladungsmessung

- [16] DIN EN 60060
Hochspannungs-Prüftechnik - Allgemeine Begriffe und Prüfbedingungen

- [17] DIN EN 62199
Durchführung für Gleichspannungsanwendungen

Anlagenverzeichnis

Anlage 1 - Software zur Messwertaufbereitung	91
Anlage 2 - Übersicht über aufgenommene Streams	93
Anlage 3 - Beispielhafte Darstellung eines Prüfkörpers	97
Anlage 4 - Elektrische Kenngrößen vom 10.01.2013	98
Anlage 5 - 3-Frequenzmessung	99
Anlage 6 - Auswertung möglicher Störungen	100

Anlage 1 - Software zur Messwertaufbereitung

Wie bereits in Kapitel 3.3.2 (Seite 24) beschrieben wurde für die Messwertaufbereitung in der Programmiersprache C++ ein Programm entwickelt. Dieses liest die Messdaten ein und gibt diese gegebenenfalls aufbereitet in einem für Microsoft Excel © gültigem Format aus. Dieses Programm wurde mittels selbst erstellten Messwerten auf seine Funktionsfähigkeit überprüft. Eingabefehler, wie zum Beispiel das Eingeben eines Textes, obwohl eine Zahl gefordert ist, werden nicht abgefangen und können zu einem Programmfehler führen.

Die Bedienung erfolgt, indem **eine** Messwertdatei in den Ordner "messwerte" kopiert wird. Anschließend kann das Programm gestartet werden und mittels des Menüs neun verschiedene Funktionen ausgewählt werden. Funktionen, welche z.B. elektrische und akustische Signale in Zusammenhang bringen, benötigen **eine** Datei im Ordner "messwerte2". Nachfolgend werden die neun Funktionen kurz beschrieben.

1 - Filter

Diese Funktion filtert sämtliche Teilentladungen unter der einzugebenden Schwelle heraus und erstellt eine Excel- sowie eine Messwertdatei.

2 - Nur Excel

Erstellt eine Datei, welche von Microsoft Excel (deutsche Version) geöffnet werden kann.

3 - Delta T zwischen TEs

Ermittelt die Zeit zum nächsten Teilentladungsimpuls und erstellt eine Excel-Datei.

4 - Delta T zwischen TEs gleicher Groesse

Es wird die Zeit zur nächsten Teilentladung der selben Höhe berechnet und eine Excel-Datei erstellt.

5 - Anzahl-Verteilung

Diese Funktion erlaubt die Messwertaufbereitung für "Ladungsdiagramme".

6 - In Impulse zerlegen

Erstellt eine Excel-Datei, welche akustische Impulse separiert beinhaltet.

7 - Elektr. - Akustisch

Stellt die Verbindung zwischen elektrischen und akustischen Messwerten her und speichert diese in einer Excel-Datei.

8 - Berechnung wichtiger Groessen

Es werden wichtige elektrischen Größen, wie Impulswiederholrate, Maximum und Mittelwert, im Programmfenster ausgegeben.

9- Zeit zum vorherigen Impuls

Ähnlich der Funktion drei wird bei dieser Funktion die Zeit zum vorherigen Impuls bestimmt und eine Excel-Datei erstellt.

Anlage 2 - Übersicht über aufgenommene Streams

Es folgen sämtliche für diese Arbeit aufgenommen Streams mit einer kurzen Erläuterung, sowie die in der Arbeit verwendeten Nummerierungen.

Folgende Abkürzungen werden verwendet:

.d	Datenverlust
-	nicht belegt
el	elektrischer Sensor, beim Prüfling
el-AC	elektrischer Sensor vor der Gleichrichtung
el3freq	elektrische 3 Frequenzmessung
Faser	Faser-optisch-akustischer Sensor
Linse	Linsensystem
Li-a	Linsensystem, ausgeschalteter Verstärker
Piezo	Piezoelektrischer Sensor
Pi-a	Piezoelektrische Sensor, ausgeschalteter Verstärker

Tabelle-Anhang 1 Übersicht über aufgenommene Streams

Nr.	Ordner	Unter-ordner	Dateiname	Stationen			Bemerkung
				1.1	1.2	1.3	
1	2012.11.30	M1	13.04.42.stm	Pi-a	el	Li-a	Einfluss der Filtereinstellungen
2	2012.11.30	M2	13.10.17.stm	Pi-a	el	Li-a	
3	2012.12.06	M1	18.05.51.stm	el-AC	el	Li-a	Untersuchung von inneren und äußeren TE
4	2012.12.06	M1	18.06.24.stm	el-AC	el	Li-a	
5	2012.12.06	M1	18.06.56.stm	el-AC	el	Li-a	
6	2012.12.06	M2	18.18.57.stm	el-AC	el	Linse	
7	2012.12.06	M2	18.21.35.stm	el-AC	el	Linse	
8	2012.12.06	M3	18.23.38.stm	el-AC	el	Linse	Erstversuch des Faser-optisch-akustischen-Sensor
9	2012.12.14	M1	14.40.35.d.stm	Linse	el	Faser	
10	2012.12.14	M1	15.05.13.stm	Linse	el	Faser	
11	2012.12.14	M1	15.09.14.stm	Linse	el	Faser	
12	2012.12.14	M1	15.12.22.stm	Linse	el	Faser	
13	2012.12.14	M1	15.17.51.stm	Linse	el	Faser	
14	2012.12.14	M1	15.21.32.stm	Linse	el	Faser	
15	2012.12.14	M1	15.29.11.stm	Linse	el	Faser	
16	2012.12.14	M1	15.39.46.stm	Linse	el	Faser	

Nr.	Ordner	Unter- ordner	Dateiname	Stationen			Bemer- kung
				1.1	1.2	1.3	
17	2012.12.14	M1	15.43.27.stm	Linse	el	Faser	wie10-16
18	2012.12.14	M2	15.59.09.stm	Li-a	el3freq	-	3- Frequenz- messung & Impuls- und FFT- Aufzeich- nungen
19	2012.12.14	M2	16.01.48.stm	Li-a	el3freq	-	
20	2012.12.14	M3	16.12.06.stm	Li-a	el	-	
21	2012.12.14	M3	16.19.26.stm	Li-a	el	-	
22	2012.12.14	M3	16.22.46.stm	Li-a	el	-	
23	2012.12.14	M3	16.27.49.stm	Li-a	el	-	
24	2013.01.10	M1	11.22.19.stm	el	Piezo	Faser	Untersu- chung des Faser- optisch- akustischen- Sensors bei niedrigen Teilentla- dungen
25	2013.01.10	M1	11.36.08.stm	el	Piezo	Faser	
26	2013.01.10	M1	11.40.08.stm	el	Piezo	Faser	
27	2013.01.10	M1	11.55.29.stm	el	Piezo	Faser	
28	2013.01.10	M1	12.10.03.stm	el	Piezo	Faser	
29	2013.01.10	M1	12.13.03.stm	el	Piezo	Faser	
30	2013.01.10	M1	13.06.44.stm	el	Piezo	Faser	
31	2013.01.10	M1	13.43.20.stm	el	Piezo	Faser	
32	2013.01.10	M1	13.51.22.stm	el	Piezo	Faser	
33	2013.01.10	M1	14.04.28.stm	el	Piezo	Faser	
34	2013.01.10	M1	14.20.21.stm	el	Piezo	Faser	
35	2013.01.10	M1	14.32.33.stm	el	Piezo	Faser	
36	2013.01.10	M1	14.43.57.stm	el	Piezo	Faser	
37	2013.01.10	M1	14.57.26.stm	el	Piezo	Faser	
38	2013.01.10	M1	14.59.34.stm	el	Piezo	Faser	
39	2013.01.10	M2	15.46.49.stm	el	Piezo	Faser	Untersu- chung des Faser- optisch- akustischen- Sensors im elektrischen Feld
40	2013.01.10	M2	15.48.57.stm	el	Piezo	Faser	
41	2013.01.10	M2	15.59.10.stm	el	Piezo	Faser	
42	2013.01.10	M2	16.07.57.stm	el	Piezo	Faser	
43	2013.01.10	M2	16.30.10.stm	el	Piezo	Faser	
44	2013.01.10	M2	16.42.10.stm	el	Piezo	Faser	
45	2013.01.23	M1	11.00.02.stm	el	Piezo	Faser	Untersu- chung des Faser- optisch- akustischen- Sensors (pos. Spitze)
46	2013.01.23	M1	11.02.17.stm	el	Piezo	Faser	
47	2013.01.23	M1	11.07.06.stm	el	Piezo	Faser	
48	2013.01.23	M1	11.12.37.stm	el	Piezo	Faser	
49	2013.01.23	M1	11.20.33.stm	el	Piezo	Faser	
50	2013.01.23	M2	11.38.55.stm	el	Piezo	Faser	
51	2013.01.23	M2	11.43.25.stm	el	Piezo	Faser	wie 45-49 bei (neg. Spitze)
52	2013.01.23	M2	11.47.16.stm	el	Piezo	Faser	

Nr.	Ordner	Unter- ordner	Dateiname	Stationen			Bemer- kung
				1.1	1.2	1.3	
53	2013.01.23	M2	11.51.13.stm	el	Piezo	Faser	wie 50-52
54	2013.01.23	M2	12.00.10.stm	el	Piezo	Faser	
55	2013.01.23	M2	12.07.23.stm	el	Piezo	Faser	
56	2013.01.23	M3	12.22.10.stm	el	Piezo	Faser	Untersu- chung des Faser- optisch- akustischen- Sensors (pos. Spitze)
57	2013.01.23	M3	12.27.09.stm	el	Piezo	Faser	
58	2013.01.23	M3	12.37.23.stm	el	Piezo	Faser	
59	2013.01.23	M3	12.37.57.stm	el	Piezo	Faser	
60	2013.01.23	M3	12.48.48.stm	el	Piezo	Faser	
61	2013.01.23	M3	13.05.47.stm	el	Piezo	Faser	wie 56-61 bei neg. Spitze
62	2013.01.23	M4	14.14.36.stm	el	Piezo	Faser	
63	2013.01.23	M4	14.24.12.stm	el	Piezo	Faser	Untersu- chung des Faser- optisch- akustischen- Sensors (pos. Spitze)
64	2013.01.23	M5	14.48.28.stm	el	Piezo	Faser	
65	2013.01.23	M5	14.58.14.stm	el	Piezo	Faser	
66	2013.01.23	M5	14.58.21.stm	el	Piezo	Faser	
67	2013.01.23	M5	14.58.32.stm	el	Piezo	Faser	
68	2013.01.23	M5	15.08.14.stm	el	Piezo	Faser	
69	2013.01.23	M5	15.18.25.stm	el	Piezo	Faser	
70	2013.01.23	M5	15.28.44.stm	el	Piezo	Faser	
71	2013.01.23	M5	15.37.39.stm	el	Piezo	Faser	
72	2013.01.23	M5	15.42.27.stm	el	Piezo	Faser	
73	2013.01.23	M5	15.47.05.stm	el	Piezo	Faser	
74	2013.01.23	M5	15.51.32.stm	el	Piezo	Faser	
75	2013.01.23	M5	15.54.08.stm	el	Piezo	Faser	
76	2013.01.23	M5	15.58.08.stm	el	Piezo	Faser	
77	2013.01.23	M5	16.00.20.stm	el	Piezo	Faser	
78	2013.01.23	M5	16.00.34.stm	el	Piezo	Faser	
79	2013.01.23	M5	16.02.39.stm	el	Piezo	Faser	
80	2013.01.23	M5	16.06.15.stm	el	Piezo	Faser	
81	2013.01.23	M5	16.10.05.stm	el	Piezo	Faser	
82	2013.01.23	M5	16.12.26.stm	el	Piezo	Faser	
83	2013.01.23	M5	16.13.38.stm	el	Piezo	Faser	
84	2013.01.23	M5	16.15.05.stm	el	Piezo	Faser	
85	2013.01.23	M5	16.15.53.stm	el	Piezo	Faser	
86	2013.01.23	M5	16.16.38.stm	el	Piezo	Faser	
87	2013.01.23	M5	16.20.09.stm	el	Piezo	Faser	
88	2013.01.23	M5	16.20.38.stm	el	Piezo	Faser	

Nr.	Ordner	Unter- ordner	Dateiname	Stationen			Bemer- kung
				1.1	1.2	1.3	
89	2013.01.23	M5	16.21.22.stm	el	Piezo	Faser	wie 64-88
90	2013.01.23	M5	16.28.18.stm	el	Piezo	Faser	
91	2013.01.25	M1	11.08.24.stm	el	-	-	Innere und äußere TE & FFT und Impulsform
92	2013.01.25	M1	11.11.34.stm	el	-	-	
93	2013.01.25	M1	11.16.46.stm	el	-	-	
94	2013.01.25	M2	11.32.45.stm	el	-	-	
95	2013.01.25	M2	11.43.36.stm	el	-	-	
96	2013.01.25	M2	11.45.55.stm	el	-	-	
97	2013.01.25	M3	13.08.42.stm	el3freq	-	-	3- Frequenz- messung
98	2013.01.25	M3	13.17.30.stm	el3freq	-	-	
99	2013.01.25	M3	13.19.45.stm	el3freq	-	-	
100	2013.01.25	M3	13.22.34.stm	el3freq	-	-	
101	2013.01.25	M3	13.31.05.stm	el3freq	-	-	
102	2013.01.25	M3	13.35.21.stm	el3freq	-	-	
103	2013.01.25	M3	13.41.38.stm	el3freq	-	-	

Anlage 3 - Beispielhafte Darstellung eines Prüfkörpers

Beispielhafte Darstellung des Prüfkörpers mit der Nadel B 218:

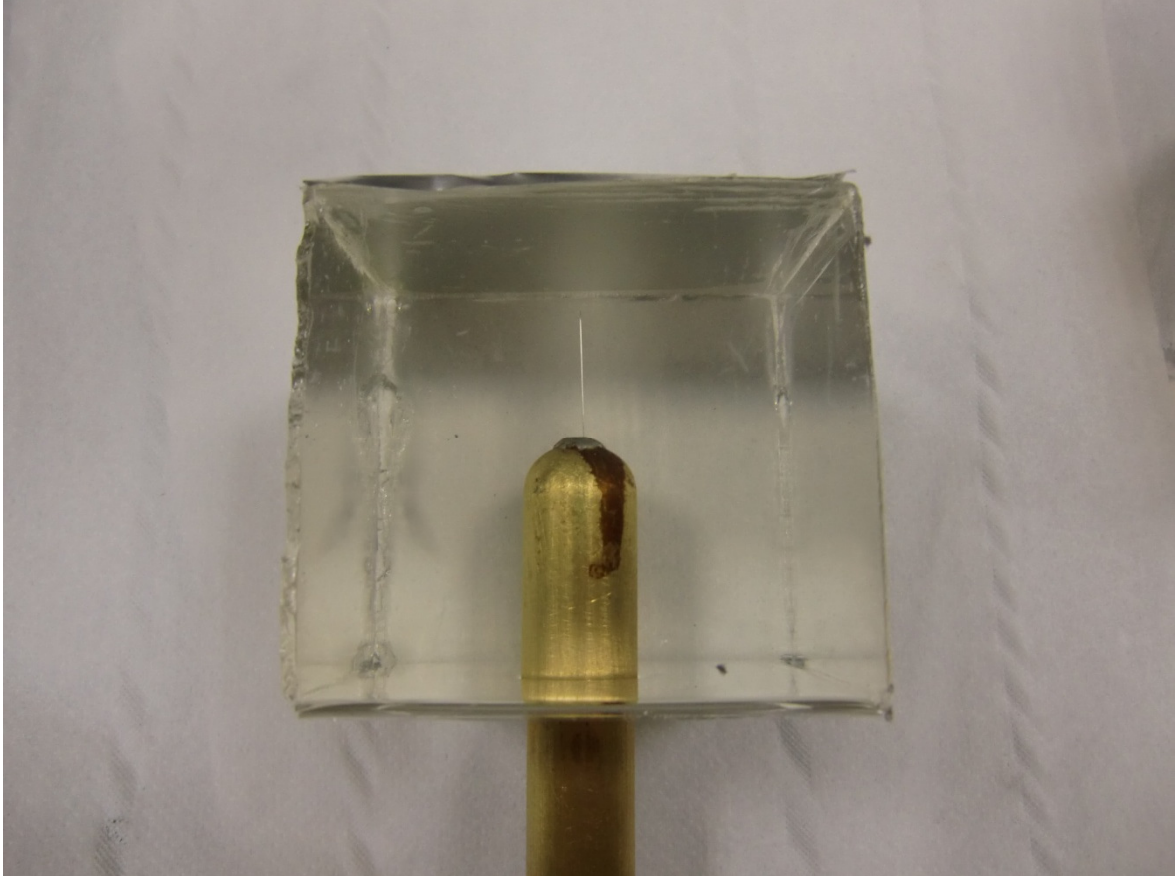


Abbildung-Anhang 1 Darstellung des Prüfkörpers mit der Nadel B218

Anlage 4 - Elektrische Kenngrößen vom 10.01.2013

Nachfolgend sind wichtige elektrische Kenngrößen der Messreihen vom 10.01.13 dargestellt.

Tabelle-Anhang 2 Elektrische Kenngrößen des Versuches vom 10.01.2013

t [min]	Q _{AVG}	Q _{Peak} [pC]	N [PD/s]	Q _{mittel} [pC]
0-2	Spannungseinstellung			
2-3	68,27 fC	148,9	0,28	18,6
3-4	6,82 aC	149,4	0,15	42,7
4-5	6,82 fC	115,6	0,27	35,3
5-6	489,9 fC	106,8	0,47	22,0
6-7	99,51 fC	109,6	0,36	24,2
7-8	56,04 fC	121,8	0,37	26,7
	Aufzeichnungspause			
15-16	6,20 fC	138,5	0,21	23,7
16-17	7,06 fC	34,8	0,22	6,2
17-18	149,90 aC	138,2	0,22	18,8
18-19	104,40 aC	87,7	0,15	17,0
19-20	2,12f C	128,5	0,22	19,2
	Aufzeichnungspause			
30-31	0 C	129,3	0,08	46,3
31-32	0 C	129,6	0,07	38,6
32-33	0 C	91,5	0,05	35,4
33-34	0C	1,0	0,03	1,0
34-35	0 C	132,3	0,08	42,3
35-36	0 C	91,7	0,03	46,4
	Aufzeichnungspause			
86-87	0 C	92,5	0,05	31,5
87-88	0 C	1,0	0,02	1,0
88-89	0,08 aC	37,3	0,08	13,1

Anmerkung:

Die Spalte Q_{mittel} wurde unter Berücksichtigung beider Polaritäten berechnet und stellt einen Mittelwert dar. Der Mittelwert Q_{AVG} wird nach DIN EN 60270 gewichtet. Q_{Peak} bezeichnet die maximal gemessene Teilentladung. Die Impulswiederholrate wird mit N bezeichnet.

Anlage 5 - 3-Frequenzmessung

Zur Verdeutlichung des Verhaltens einer 3-Frequenzmessung sind nachfolgend nur innere und nur äußere Teilentladungen dargestellt. Diese wurden in separaten Messungen ermittelt.

Innere Teilentladungen:

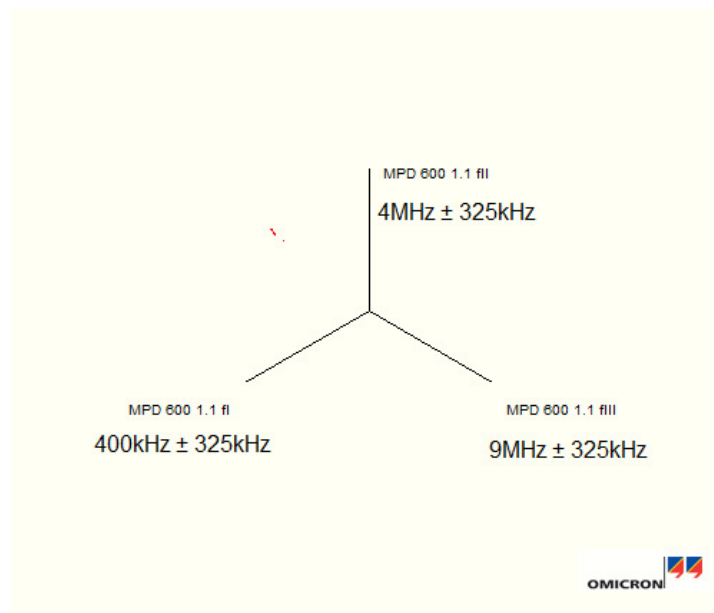


Abbildung-Anhang 2 3-Frequenzmessung mit inneren Teilentladungen (Stream 102)

Äußere Teilentladungen:

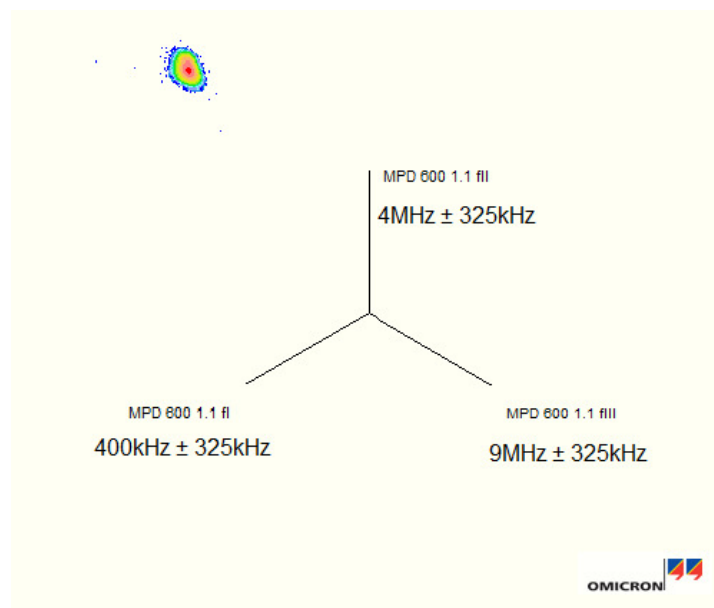


Abbildung-Anhang 3 3-Frequenzmessung mit äußeren Teilentladungen (Stream 100)

Anlage 6 - Auswertung möglicher Störungen

Nachfolgend sind mögliche Störungen [blaue Umrandung] sowie die vorangegangenen und nachfolgenden Teilentladungen dargestellt.

Tabelle-Anhang 3 Auswertung von Impulsen anderer Polarität

Messzeit		Q [pC]	t _{vorher} [s]	t _{nacher} [s]
7 min	16,12 s	-30,39	2,81	3,96
	20,08 s	-23,36	3,96	0,54
	20,62 s	1,00	0,54	3,46
	24,08 s	-1,88	3,46	3,11
	27,19 s	-32,61	3,11	4,85
30 min	16,30 s	1,02	≥16,30	15,51
	31,81 s	-33,28	15,51	1,36
	33,17 s	-17,91	1,36	0,22
30 min	33,39 s	-129,35	0,22	0,00
	33,39 s	-49,82	0,00	29,15
3 min	2,54 s	1,03	29,15	20,81
	23,35 s	-129,63	20,81	0,88
	24,23 s	1,01	0,88	4,75
	28,98 s	-22,68	4,75	54,96
32 min	23,95 s	-91,51	54,96	3,11
86 min	29,64s	-92,48	≥ 29,64	3,75
	33,38 s	-1,04	3,75	17,68
	51,06 s	1,04	17,68	12,81
87 min	3,87 s	-1,04	12,81	59,30
88 min	3,16 s	-37,34	59,30	11,80
	14,96 s	-1,04	11,80	13,71
	28,67 s	1,02	13,71	17,22
	45,89 s	-24,87	17,22	6,70
	52,59 s	-1,00	6,70	-

Formelzeichen:

- Q Ladung [c]
- t_{vorher} Zeit zur vorherigen TE [s]
- t_{nacher} Zeit zur nachfolgenden TE [s]