

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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

Datum

Unterschrift

Danksagung

An dieser Stelle gilt mein recht herzlicher Dank meinem Betreuer und Begutachter Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Schichler sowie meinem Betreuer Herrn Dipl.-Ing. BSc Alexander Pirker für die Möglichkeit meine Masterarbeit am „Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement“ zu schreiben und die tatkräftige Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit.

Einen ganz besonderen Dank gilt meiner Familie, die es mir ermöglicht hat meinem Studium an der TU Graz nachzugehen und mich schon von Beginn an in meiner schulischen sowie akademischen Bildung gefördert und unterstützt hat. Ohne sie wäre ich nicht an dem Punkt in meinem Leben angelangt, an dem ich heute stehe.

Weiter gilt ein spezieller Dank meiner lieben Joanea, welche mich bei meinem persönlichen und akademischen Werdegang stets unterstützt hat und mir in jeder Lebenslage Halt gegeben hat.

Darüber hinaus möchte ich mich noch bei meinen Kommilitonen und meinen Freunden bedanken, die mit mir gemeinsam so manche Hürde des Studiums bewältigt und Freude des Alltags gefeiert haben.

Kurzfassung

Die Versorgung mit elektrischer Energie stellt ein zentrales Element unserer Gesellschaft dar. Ohne eine sichere und zuverlässige Versorgung mit elektrischer Energie können in der heutigen Zeit die wenigsten Erzeugungs- und Dienstleistungsprozesse ordnungsgemäß funktionieren. Aus diesem Grund ist es von zentraler Bedeutung, dass Fehler in Übertragungskomponenten frühzeitig erkannt werden. Eine für die Wechselspannung gängige Methode der Fehlererkennung ist die Teilentladungsmessung. Bei der Verwendung von Gleichspannung besteht hier noch Forschungsbedarf bezüglich der auftretenden Phänomene.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit ausgewählten Defekten in gasisolierten Systemen unter Gleichspannung. Es wird im Speziellen der Einfluss der Polarität der Gleichspannung, der Einfluss des Gasdrucks, sowie der Unterschied zwischen Stickstoff und Schwefelhexafluorid untersucht. Als orientierende Messungen für weiterführende Forschungen wird der Einfluss der Vorbelastung kurz betrachtet. Die ermittelten Ergebnisse der Messung werden anschließend gegenübergestellt. Darüber hinaus werden erste Schlussfolgerungen bezüglich deren Detektierbarkeit und Einflussparameter aufgestellt, sowie die zugrundeliegenden Phänomene diskutiert.

Schlüsselwörter: Hohe Gleichspannung, Defekte, GIS, GIL, Spitze auf Hochspannung, Freies Potential, Partikel auf einem Isolator, Stickstoff, Schwefelhexafluorid

Abstract

Supply of electrical energy is a central pillar of our society. Without reliable supply, more or less no production processes or services can take place. Due to this fact, it is relevant that failures in transmission lines and associated components are detected early. In the case of high voltage alternating current these failures are detected by partial discharge diagnostic. In the case of high voltage direct current, there is still a need for research, especially in the case of such phenomena.

This master thesis deals with selected defects in gas insulated systems under DC voltage. The influences of the voltage polarity, of gas pressure and the differences between nitrogen and sulphur hexafluoride are being described. Furthermore, some measurements for future studies with pre stress are being presented. The results of the measurements are then compared for the different parameters. Finally, the results are analysed in terms of their detectability and occurring phenomena are discussed.

Keywords: high voltage alternating current, defects, GIS, GIL, protrusion on high voltage, floating potential, particle on insulator surface, nitrogen, sulphur hexafluoride

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Grundlagen und Begriffe.....	3
2.1	Gasisolierte Systeme.....	3
2.1.1	Vergleich der Übertragungssysteme.....	3
2.1.2	Aufbau eines gasisolierten Systems.....	3
2.2	Hohe Gleichspannung.....	5
2.3	Isoliergase.....	5
2.4	Entladungsmechanismen in Isoliergasen.....	6
2.4.1	Einführung in die Thematik der Entladungsmechanismen.....	6
2.4.2	Entladungsmechanismus nach Townsend.....	7
2.4.3	Gesetz von Paschen.....	9
2.4.4	Kanalentladung nach Raether (Streamer-Mechanismus).....	9
2.4.5	Polaritätseffekt.....	11
2.5	Elektrische Felder bei Gleichspannung.....	12
2.5.1	Belastungszustände.....	12
2.5.2	Raum- und Oberflächenladungen.....	14
2.5.3	Kapazitiv-Resistive-Felder und deren Übergang.....	15
2.5.4	Koronastabilisierung.....	17
2.6	Defekte in gasisolierten Systemen.....	17
2.7	Definition der Detektierbarkeit.....	19
3	Teilentladungen und Teilentladungsdiagnostik.....	21
3.1	Definition von Teilentladungen.....	21
3.2	Teilentladungsmessung.....	21
3.2.1	Übersicht über gängige Messverfahren.....	21
3.2.2	Konventionelle Teilentladungsmessung nach IEC 60270.....	21
3.3	Teilentladungen in gasisolierten Systemen bei Gleichspannung.....	24
3.3.1	Innere Teilentladungen.....	24
3.3.2	Bewegliche und haftende Partikel (Oberflächenentladungen).....	28
3.3.3	Korona-Entladungen.....	33
4	Messaufbau und Durchführung.....	36
4.1	Messaufbau.....	36
4.1.1	Teilentladungsmessung.....	36
4.1.2	Prüfung des Messkreises.....	37
4.2	Messprozeduren.....	37
4.3	Prüfobjekte.....	40
4.3.1	Testzellen.....	40

4.3.2	Untersuchte Defekte	41
4.4	Durchgeführte Messungen	44
5	Messergebnisse und Interpretation.....	46
5.1	Übersicht	46
5.2	Spitze auf Hochspannung	49
5.2.1	Vergleich der Teilentladungseinsetzspannung und der Durchschlagsspannung	49
5.2.2	Entladungsintensität.....	53
5.2.3	Weitere Auffälligkeiten	55
5.3	Freies Potential.....	57
5.3.1	Vergleich der Teilentladungseinsetzspannung und der Durchschlagsspannung	57
5.3.2	Entladungsintensität.....	60
5.4	Metallischer Partikel auf Isolator	61
5.4.1	Vergleich der Teilentladungseinsetzspannung und der Durchschlagsspannung	61
5.4.2	Entladungsintensität.....	63
5.5	Weitere orientierende Messungen.....	64
5.5.1	Wechselspannungsmessungen	64
5.5.2	Einfluss der Vorbelastung.....	67
5.5.3	Einfluss von Elektrodenabständen.....	69
6	Bedeutung für die praktische Anwendung	74
6.1	Aktuelle Verfahren, Methoden und Kennwerte bei der Prüfung	74
6.2	Detektierbarkeit der untersuchten Defekte für eine 420-kV-GIL	75
7	Ausblick	77
8	Zusammenfassung.....	79
	Literaturverzeichnis.....	81
	Abbildungsverzeichnis	85
	Tabellenverzeichnis.....	89
	Abkürzungsverzeichnis	90
	Anhang A1 - Messergebnisse.....	91
	Anhang A2 - Dimensionierung - Große Testzelle.....	115
	Anhang A3 - Abschaltung.....	117
	Anhang A4 - Berechnung der maximalen Feldstärken	119

1 Einleitung

In der heutigen Zeit ist die Versorgung mit elektrischer Energie ein essentielles wirtschaftliches und gesellschaftliches Gut. Heutzutage werden die meisten Erzeugungs- und Dienstleistungsprozesse elektronisch gesteuert und überwacht. Darüber hinaus ist die Verwendung von elektrischer Energie in unseren Haushalten – angefangen von der Nahrungszubereitung und Beleuchtung bis hin zu Unterhaltungselektronik – nicht mehr wegzudenken.

In den letzten 40 Jahren hat sich der Energieverbrauch in Österreich verdoppelt und im Speziellen der Endenergieverbrauch an elektrischer Energie beinahe verdreifacht. So stieg dieser von 72.792 TJ im Jahre 1970 auf 217.193 TJ im Jahre 2010 an [1].

Um diese großen Mengen an benötigter elektrischer Energie den Endnutzern zur Verfügung stellen zu können ist ein zuverlässiges und sicheres Übertragungsnetz nötig. Zur Gewährleistung dieser zuverlässigen Bereitstellung wird das europäische Versorgungs- und Übertragungsnetz ständig modernisiert und erweitert. Die Grenzen der wirtschaftlich übertragbaren Leistungen mit den etablierten Technologien sind nahezu erreicht. Mögliche Alternativen zur Übertragung der elektrischen Energie bieten die Verwendung von hoher Gleichspannung (High Voltage Direct Current, HVDC), die Verwendung von gasisolierten Systemen sowie der Kopplung dieser beiden Technologien. Vor allem die Kopplung stellt eine neue Herausforderung an die Wartung, Instandhaltung und die Fehlererkennung dar [2 - 4].

Eine Möglichkeit der Fehlererkennung sowie des Monitorings von Übertragungseinheiten ist die Teilentladungsmessung (TE-Messung), welche bei hoher Wechselspannung (High Voltage Alternating Current, HVAC) schon seit den 1940er Jahren etabliert ist. Im Bereich der hohen Gleichspannung sind die entsprechenden Verfahren, Messprozeduren sowie deren Interpretation noch nicht ausreichend fundiert. Es ist somit von essentieller Bedeutung die Möglichkeiten in diesem Bereich auszuloten, entsprechende Verfahren zu etablieren und deren umfassende Korrektheit nachzuweisen [2, 3, 5].

Ziel der vorliegenden Masterarbeit ist es abzuklären, ob ausgewählte Defekte (Spitze auf Hochspannung, Freies Potential und metallische Partikel auf einer Isolatoroberfläche) bei hoher Gleichspannung in gasisolierten Systemen durch Teilentladungs-Einsatzspannung (Partial Discharge Inception Voltage – PDIV, U_i) und Durchschlagsspannung (Break Down Voltage – BDV, U_{bd}) erkannt werden können, um frühzeitig Maßnahmen für den einwandfreien Betrieb einleiten zu können.

Das Verhältnis von TE-Einsatzspannung zu Durchschlagsspannung abhängig von verschiedenen Parametern (Art des Defekts, Polarität der Gleichspannung, Druck, Isoliergas und Vorbelastung) ist zu analysieren und zu interpretieren.

Eine graphische Übersicht über den Inhalt der vorliegenden Arbeit ist Bild 1-1 zu entnehmen.

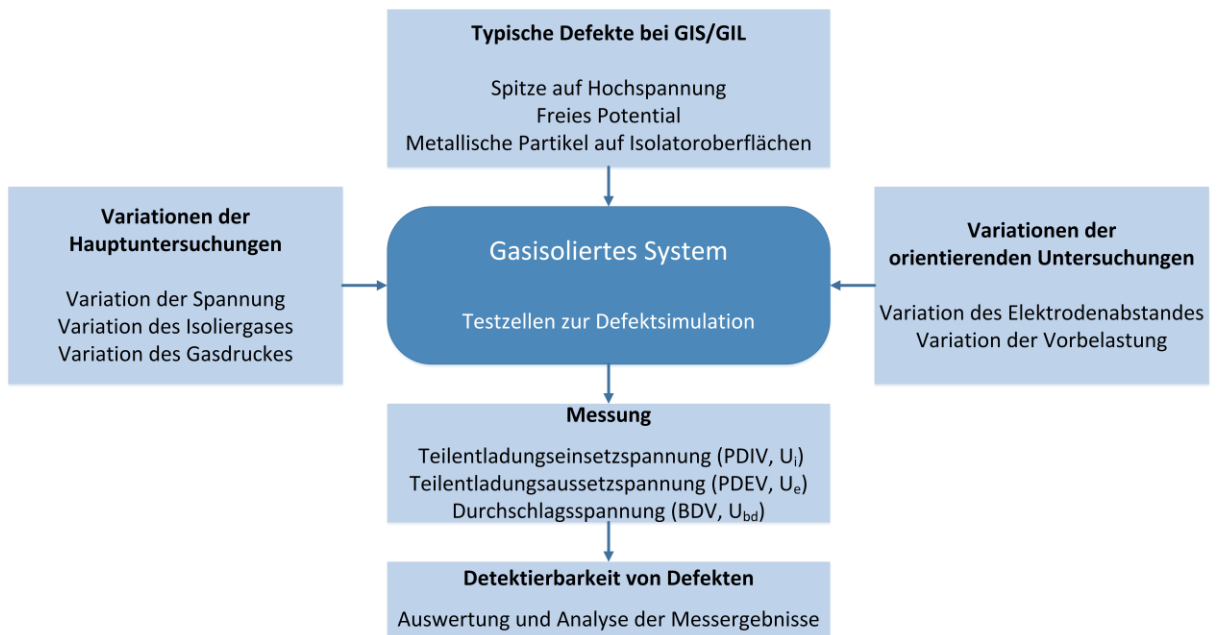


Bild 1-1: Zielsetzung der vorliegenden Masterarbeit

2 Grundlagen und Begriffe

2.1 Gasisolierte Systeme

2.1.1 Vergleich der Übertragungssysteme

Unter gasisolierten Systemen (GIS, GIL) werden jene elektrischen Aufbauten verstanden, welche als primäres Isoliermedium ein Gas verwenden. Sie werden aktuell in der Regel für Schaltanlagen in Ballungsräumen und für kurze Übertragungstrecken mit hohen Ansprüchen eingesetzt. Darüber hinaus gibt es Bestrebungen GIL auch für längere Übertragungstrecken zu verwenden [6].

Gasisolierte Leitungen sowie gasisolierte Schalter und Messeinrichtungen sind metallgekapselte Rohrleitungsaufbauten, welche mit Isoliergas unter Druck gefüllt sind. Hierbei liegt ein innerer Leiter auf Hochspannung und die äußere metallische Kapselung auf Erdpotential. GIS stellen durch ihren kompakten Aufbau aufgrund der hohen elektrischen Festigkeit eine platzsparende Alternative zu luftisolierten Systemen dar [6, 7].

Es gibt prinzipiell drei Möglichkeiten zur Übertragung der elektrischen Energie über große Distanzen mit Hilfe von Hochspannung. Dies sind einerseits die Hochspannungsfreileitung und das Hochspannungskabel sowie andererseits die gasisolierte Übertragungsleitung. Die **Hochspannungsfreileitung** ist die kostengünstigste Variante mit dem geringsten technischen Aufwand. Neben den verhältnismäßig geringen Kosten ist ein weiterer Vorteil die hohe Energieübertragungsfähigkeit über weite Distanzen. Der größte Nachteil liegt neben der optischen Beeinträchtigung bei dem hohen Wartungsaufwand. Das am meisten verbreitete System ohne optische Beeinflussung ist die Verlegung von **Hochspannungskabeln**. Dieses Übertragungsmedium hat jedoch deutlich höhere Investitionskosten und weist bei Fehlern oft längere Instandsetzungszeiten auf. Die größten Nachteile sind die hohen Kapazitäten und die damit verbundenen Ladeleistungen, welche die Kabelstrecken folglich auch in ihrer Länge beschränken. Bei **gasisolierten Übertragungssystemen** ergeben sich deutlich geringere Verluste und Ladeleistungen als bei Kabeln, wodurch höhere Leistungen übertragen werden können. Der Vorteil der Erdverlegung und somit der wegfallenden optischen Beeinträchtigung ist auch hier gegeben. Darüber hinaus ist die elektromagnetische Belastung durch die gekapselte Bauweise geringer als bei Freileitungen. Ein wesentlicher Nachteil sind die hohen Investitionskosten [6].

2.1.2 Aufbau eines gasisolierten Systems

Die einzelnen Phasen der gasisolierten Leitung bestehen aus einem inneren Hohlleiter auf Hochspannung und einer auf Erdpotential liegenden metallischen Kapselung aus einer Aluminiumlegierung. Der Innenleiter wird über Stützisolatoren in Position gehalten und der vorhandene Raum ist mit Isoliergas gefüllt.

Bei gasisolierten Übertragungsleitungen (GIL) der ersten Generation wurde als Isoliergas reines Schwefelhexafluorid (SF_6) verwendet. Heute ist ein Gemisch aus Stickstoff (N_2) und SF_6 üblich. Die Drücke variieren üblicherweise zwischen 7 und 10 bar. GIL werden im Allgemeinen nach dem Bausteinprinzip gefertigt. Die standardisierten Bausteine werden mit Hilfe von speziellen Trennbausteinen verbunden, welche an den Verbindungspunkten Gassperren aufweisen. Diese dienen dazu eine Entleerung des gesamten Gasraumes zu verhindern und darüber hinaus ermöglichen sie eine stückweise Prüfung [6-9].

Der prinzipielle Aufbau eines geraden Leitungsbausteins einer GIL ist in Bild 2-1 graphisch dargestellt.

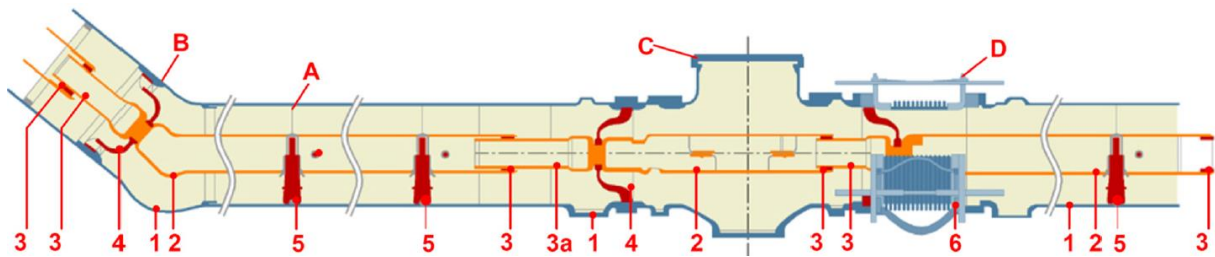


Bild 2-1: A Gerader Leitungsbaustein, B Eckbaustein, C Trennbaustein, D Kompensationseinrichtung, 1 Metallgehäuse, 2 Innenleiter, 3 Gleitkontaktstecker/Gleitkontaktbuchse, 4 gasdurchlässige Isolator, 5 Stützisolator, 6 Längskompensation [9]

GIS weisen nach aktuellem Stand der Technik die folgenden wesentlichen Merkmale auf [7, 10, 11]:

- **Gute elektrische Eigenschaften**
 - geringe Übertragungsverluste,
 - geringe Kapazitäten,
 - hohe Nennleistungen bis 2000 MVA,
 - sehr geringe elektromagnetische Beeinflussung,
- **Gute mechanische Eigenschaften**
 - unempfindlich gegen Verschmutzung,
 - geringes Gewicht bei hoher mechanischer Festigkeit,
- **Sicherheitsaspekte**
 - Berührungsschutz durch geerdete Kapselung,
 - Gasraumüberwachung zur Detektion von Lecks,
- **Ökonomische und soziale Aspekte**
 - platzsparendes Design,
 - geringe optische und akustische Beeinflussung,
 - leichter Transport durch Bausteinprinzip,
 - geringe Instandhaltungskosten und lange Lebensdauern,
 - höhere Errichtungskosten als bei anderen Übertragungsmedien

Bei Beanspruchung von GIS/GIL mit hoher Gleichspannung treten noch nicht ausreichend erforschte Phänomene auf. Bei hoher Wechselspannung werden diese Phänomene oftmals vernachlässigbar und spielen im Allgemeinen eine untergeordnete Rolle. Beispielhaft sind an dieser Stelle Raumladungseinflüsse, Aufladungserscheinungen an Grenzschichten und der Kapazitiv-Resistive-Übergang des elektrischen Feldes erwähnt. Darüber hinaus müssen die Polaritätsumkehr und die Überlagerung verschiedener Spannungskomponenten genauer betrachtet werden [12].

2.2 Hohe Gleichspannung

Die Motivation zur Errichtung von Netzen bzw. Leitungen, welche mit hoher Gleichspannung betrieben werden, ist einerseits das Wegfallen der dielektrischen Übertragungsverluste und der Ladeleistungen und andererseits die größere Übertragungskapazität.

Zurzeit wird die Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) vor allem für die Energieübertragung über lange Distanzen bzw. zur Verbindung unterschiedlicher Netze (unterschiedliche Frequenz oder Stabilität) in Form von Kurzkupplungen eingesetzt. Die HGÜ wird aufgrund der kostenintensiven Umrichterstationen erst ab einer Länge von rund 600 km wirtschaftlich rentabel. Weiter spielt die hohe Gleichspannung eine wesentliche Rolle in alternativen Bereichen wie der Medizin und den Mobilitätstechnologien [13-17].

Die HGÜ weist gewisse technische Besonderheiten gegenüber der Hochspannungsdrehstromübertragung (HDÜ) auf

- Keine Übertragung, Aufnahme oder Abgabe von Blindleistung, keine dielektrischen Verluste und keine Übertragung von Kurzschlussleistungen.
- Da sich die Übertragungsleistung nur durch die Spannungsdifferenz der Enden definiert, gibt es bei dieser Übertragungsform keine natürliche Leistung und keine Stabilitätsprobleme.
- Es tritt bei HVDC kein Skineffekt auf.
- Die HGÜ weist nur eine kurze Überlastfähigkeit auf.
- Bidirektionale Lastflusskontrolle ist möglich.
- Es treten geänderte Belastungsverhältnisse der Isolationsmedien im Vergleich zu HVAC auf.

2.3 Isoliertgase

Isolationsmedien werden meist nach ihren Aggregatzuständen in feste, flüssige oder gasförmige Isolierungen eingeteilt. Sie können darüber hinaus viele weitere Unterscheidungsmerkmale bezüglich der chemischen, thermischen und elektrischen Eigenschaften aufweisen.

Der größte Vorteil von gasförmigen gegenüber festen Isoliermedien ist die Fähigkeit zur Selbstheilung. Dies bedeutet, dass die durch einen Lichtbogen beschädigte Isolierstrecke durch Nachströmen von Isoliergas wieder ihre ursprüngliche elektrische Festigkeit erhält [18, 19].

Das am häufigsten verwendete Isoliergas ist die atmosphärische Luft. Sie weist jedoch im Vergleich zu anderen Gasen eine geringe Durchschlagsfestigkeit auf. In gekapselter Ausführung wird hingegen in technischen Anwendungen meist SF_6 oder ein SF_6 -Gemisch unter Druck verwendet. Die Erhöhung des Drucks führt zu einer deutlichen Steigerung der Durchschlagsfestigkeit des Isoliergases [18].

SF_6 ist wegen seiner starken Elektronegativität ein häufig verwendetes Isoliergas mit hoher elektrischer Festigkeit. Die Elektronegativität beschreibt die Fähigkeit eines Gases freie Elektronen anzuziehen und zu binden. Die gebundenen Elektronen stehen somit nicht mehr für den Lawineneffekt zur Verfügung und können keine neuen Startelektronen bilden. Im Allgemeinen wird heutzutage jedoch oftmals ein Gemisch aus N_2 und SF_6 verwendet (Bild 2-2) [18-22].

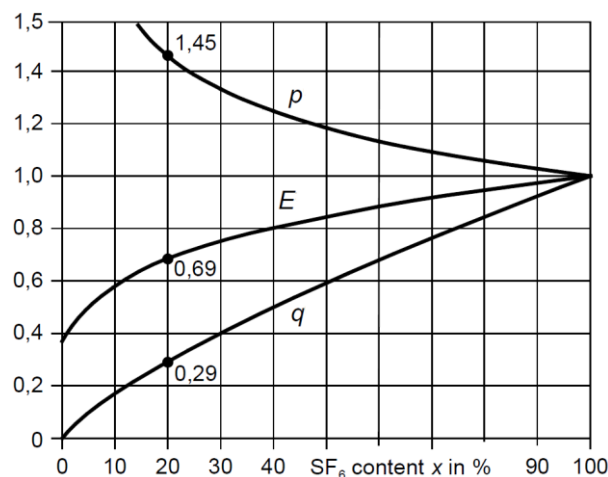


Bild 2-2: Normierte elektrische Festigkeit E , benötigter Druck p für konstante dielektrische Festigkeit und damit verbundene Menge q an SF_6 für N_2/SF_6 Gasgemische [23]

2.4 Entladungsmechanismen in Isoliergasen

2.4.1 Einführung in die Thematik der Entladungsmechanismen

In der Hochspannungstechnik wird zwischen der selbstständigen und der unselbstständigen Entladung unterschieden. Im Bereich der unselbstständigen Entladung entstehen die Ladungsträger im Isoliergas durch Strahlung (Photoionisation) oder durch Stöße aufgrund thermischer Bewegungen (Thermoionisation). Erst bei hohen Feldstärken kommt es zur selbstständigen Entladung, bei welcher durch Stöße (Stoßionisation) neue Ladungen erzeugt werden. Die entsprechenden Bereiche sind in Bild 2-3 dargestellt [18].

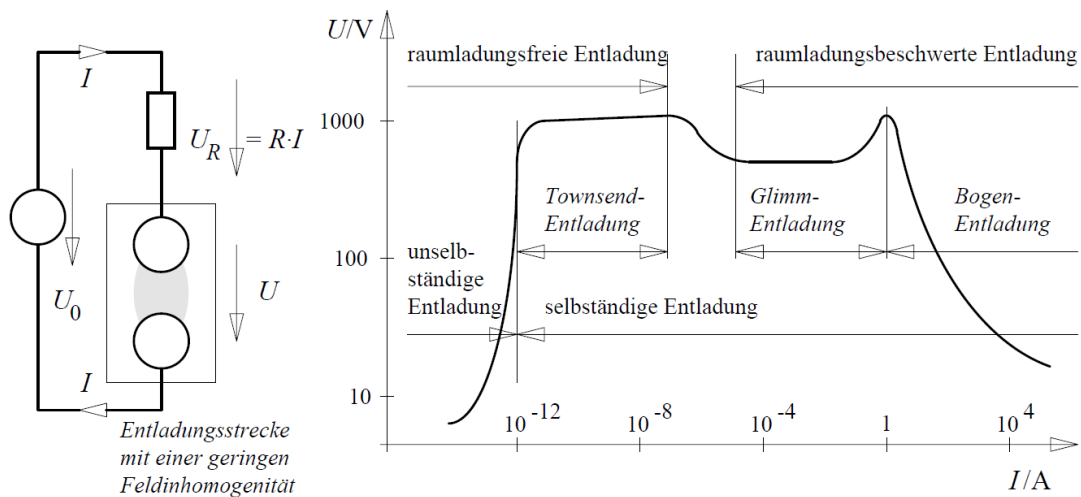


Bild 2-3: Unselbstständige und selbstständige Entladung in Gasen [18]

Für das Einsetzen von Entladungserscheinungen gelten im Allgemeinen zwei Bedingungen. Einerseits muss ein entsprechend starkes elektrisches Feld in der Isolieranordnung vorhanden sein und andererseits muss sich ein Startelektron in der Isolationsanordnung befinden. Unter Ionisierung wird der Vorgang verstanden in welchem ein Elektron über äußere Energiezufuhr die Bindung zu seinem Atom verliert. Nach dem Atommodell von Bohr-Rutherford befinden sich die Elektronen auf Bahnen verschiedenen Abstands um den Kern. Durch Zuführung von Energie können die Elektronen auf ein höheres Niveau gebracht werden und unter Umständen das Atom verlassen (größte benötigte Energiezufuhr) [15, 18].

2.4.2 Entladungsmechanismus nach Townsend

Die nachfolgenden Betrachtungen von Townsend gelten nur für näherungsweise homogene Felder und raumladungsfreie Verhältnisse. Der Generationenmechanismus nach Townsend läuft in folgenden Schritten ab (Bild 2-4) [15, 18, 24]:

- Durch externe Ionisierung (z. B. Kosmische-Strahlung) oder durch einen von thermischen Schwingungen ausgelösten Stoß wird ein Startelektron von der Kathode gelöst oder von einem Gasmolekül getrennt. Dieses Startelektron erfährt aufgrund des anliegenden elektrischen Feldes eine Beschleunigung in Richtung der Anode.
- Bei den auf dem Weg zur Anode stattfindenden elastischen Stößen mit den Gasmolekülen verliert das Elektron keine Energie. Die Energie des Elektrons steigert sich mit der Beschleunigung durch das elektrische Feld bis sie groß genug ist (Ionisierungsenergie), um bei einem weiteren Stoß (Stoßionisierung) neue Elektronen aus einem Gasmolekül zu lösen.
- Die neuen Elektronen werden wiederum beschleunigt und der Vorgang wiederholt sich. Es entsteht eine erste Elektronenlawine.

- d) Die durch das Ablösen der Elektronen von den Gasmolekülen erzeugten positiven Ionen bewegen sich durch das elektrische Feld in Richtung der Kathode und lösen beim Auftreffen auf diese weitere Startelektronen und somit neue Lawinen aus.

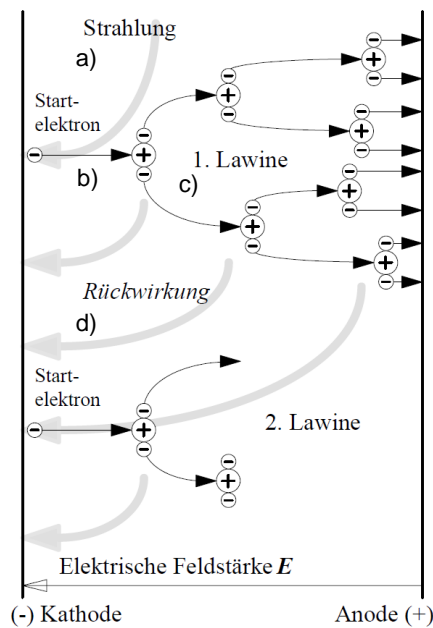


Bild 2-4: Entladungsmechanismus nach Townsend [18]

Es sind somit zwei Bedingungen für das Fortschreiten des Generationenmechanismus gegeben. Einerseits ist dies der Vermehrungsvorgang bei Stößen zwischen den Elektronen und den Gasmolekülen (Townsend'scher-Ionisationskoeffizient α) und andererseits die Rückwirkung der durch die Stöße verursachten Ionen zur Freisetzung neuer Startelektronen aus der Kathode (Rückwirkungskoeffizient γ). Daraus ergibt sich die in Formel (1) angegebene Zündbedingung nach Townsend.

$$\gamma * (e^{\alpha*d} - 1) \geq 1 \quad (1)$$

α entspricht dem Ionisationskoeffizient, das heißt der von einem Elektron in einer gewissen Längeneinheit neu erzeugten Elektronen, und d entspricht der Anzahl der Längeneinheiten zwischen den beiden Elektroden. Ein Startelektron erzeugt folglich $(e^{\alpha*d} - 1)$ neue Elektronen. Der Rückwirkungskoeffizient (Oberflächenionisationszahl) gibt die von einem positiven Gasion erzeugten neuen Startelektronen an, das heißt nach Formel (1) muss jedes Startelektron wiederum mindestens ein neues Startelektron erzeugen. Dem Ionisationskoeffizient α wirkt der Anlagerungskoeffizient η entgegen. Die Summe der beiden Faktoren ergibt den effektiven Ionisationskoeffizient $\alpha_{effektiv}$ [18].

2.4.3 Gesetz von Paschen

Das Gesetz von Paschen gibt, auf der Basis des Grenzfalls der Zündbedingung nach Townsend (Formel (2)), die Durchschlagsspannung als Funktion von Gasdruck und Elektrodenabstand ($p \cdot d$) an. Folgend ergibt sich dann die empirisch ermittelte Näherungslösung 1. Ordnung nach Formel (3).

$$\alpha_{effektiv} * d = \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) \quad (2)$$

$$U_{bd} = \frac{B * pd}{\ln \left(\frac{A * pd}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right)} \right)} \quad (3)$$

$$\alpha * d = \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) = A * e^{-\frac{B}{(E/p)}} * pd \quad (4)$$

Hierbei wird γ als konstant angenommen. Die Gaskonstanten A , B und (E/p) sind abhängig vom verwendeten Isoliergas und können über Durchschlagsversuche ermittelt werden. In Bild 2-5 sind gemessene Kennlinien der Durchschlagsspannung in Abhängigkeit von pd angegeben [18].

2.4.4 Kanalentladung nach Raether (Streamer-Mechanismus)

Ab einer gewissen Anzahl an, von einem Startelektron ausgelösten, Elektronen ist der Raumladungseffekt nicht mehr zu vernachlässigen und der Generationenmechanismus nach Townsend trifft nur noch bedingt zu. Bei großen Abständen zwischen den Elektroden ergibt sich im Bereich der Anode eine hohe Anzahl an Elektronen in der Lawine. Alternativ können auch stark gekrümmte Elektroden zu einer erhöhten Freisetzung von Startelektronen und somit zu Lawinen mit hoher Elektronenzahl führen. Die von der Lawine erzeugte Raumladung beeinflusst das elektrische Feld in der Umgebung der Lawine. Der Kopf der Lawine ist hierbei negativ geladen, da die Elektronen eine höhere Beweglichkeit als die positiv geladenen Gasionen aufweisen. Daraus folgt eine Verzerrung des elektrischen Feldes und resultierend eine Erhöhung der Feldstärke im Bereich des Lawinenkopfes (Bild 2-6) [18].

Der Streamer-Mechanismus führt meist in sehr kurzer Zeit zur Ausbildung eines Entladungskanals wohingegen die Townsend-Entladungen über lange Zeitperioden stabil sein können. Der resultierende Streamer-Entladungsmechanismus läuft wie folgt ab [18, 20]:

- Heranwachsen der Elektronenlawine auf etwa 10^6 bis 10^8 Elektronen und somit Erhöhung der Raumladung im Lawinenkopf. Es resultiert eine Feldverzerrung in diesem Bereich.
- Erhöhung der Stoßionisation im Bereich des Lawinenkopfs durch Erhöhung der Feldstärke und damit einhergehend erhöhte Aussendung von Lichtquanten.
- Durch die Photoionisation anhand der ausgesandten Lichtquanten werden Startelektronen für weitere Lawinen, welche im Gasraum starten bereitgestellt. Durch die große Anzahl an Lawinen kommt es rasch zur Ausbildung eines leitfähigen Kanals.

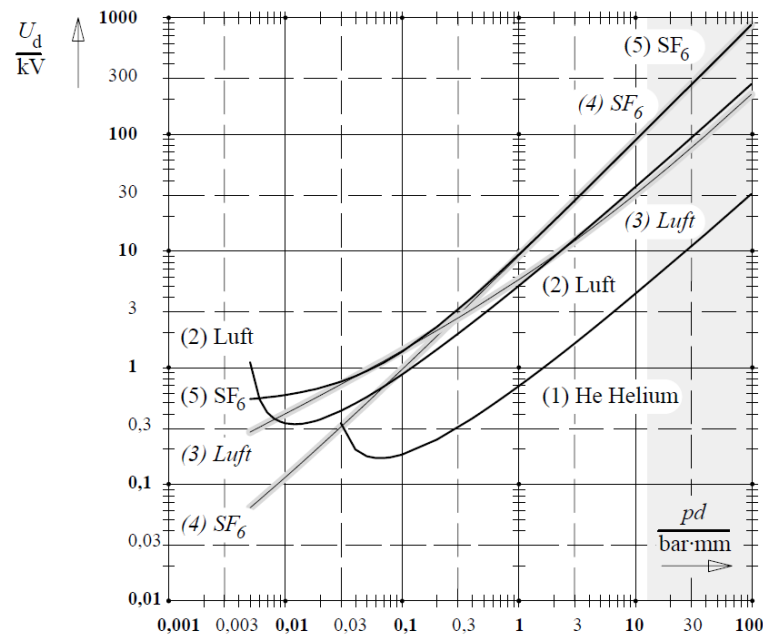


Bild 2-5: Paschenkurven unterschiedlicher Isoliergase [18]

Voraussetzung für die Bildung eines leitfähigen Kanals ist einerseits, dass mehr Elektronen durch Stoßionisation erzeugt werden als sich anlagern ($\alpha_{effektiv} > 0$) und andererseits muss die Zahl der Elektronen einen kritischen Wert ($N_{krit} = 10^6 - 10^8$) überschreiten. Daraus ergibt sich die Streamer-Zündbedingung nach Formel (5).

$$e \int_0^d \alpha_{effektiv} dx \geq N_{krit} \quad (5)$$

Ein wesentlicher Bestandteil dieses Mechanismus ist, dass dieser auch für inhomogene Felder angewendet werden kann. In Gebieten mit hoher Feldstärke überwiegt die Ladungsträgerbildung durch Stoßionisation und in den Gebieten mit niedriger Feldstärke die Anlagerung der Elektronen [18, 24].

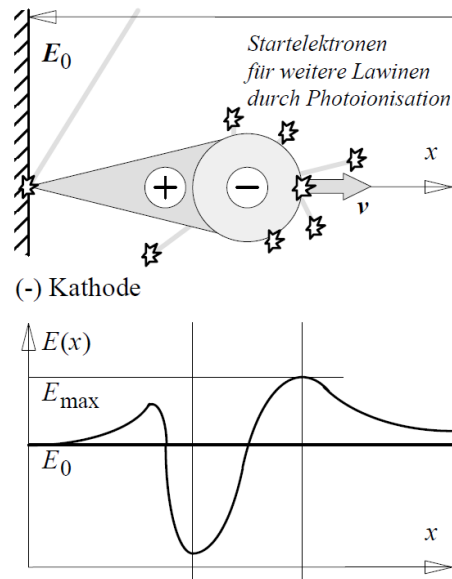


Bild 2-6: Feldverzerrung durch die Elektronenlawine [18]

2.4.5 Polaritätseffekt

Der Polaritätseffekt beschreibt das unterschiedliche Verhalten von TE-Einsatzspannung und Durchschlagsspannung bei positiver und negativer Polarität der Spannung. Hierbei ist U_i bei negativer Polarität der Spannung betragsmäßig geringer und U_{bd} betragsmäßig größer als bei positiver Polarität. Begründet ist dieses Verhalten in der Ausbildung von Raumladungen im Bereich der Elektrode mit geringerem Oberflächenradius, wie in Bild 2-7 grafisch verdeutlicht und anschließend beschrieben [18].

Bei **positiver Spitze** bilden sich die Startelektronen im feldschwachen Bereich der Kathode durch äußere Ionisation. Die Elektronenlawine wächst in Richtung der positiven Spitze, an der die Elektronen von der Anode absorbiert werden und die langsameren positiven Ionen in der Anordnung verbleiben. Die aus dieser Lawine resultierende Raumladungsverteilung (Bild 2-7) führt zu einer Erhöhung der elektrischen Feldstärke $E(x)$ ab einem relativ kleinen Bereich von der positiven Spitze (Bild 2-7). Bei Überschreitung einer kritischen Feldstärke E_0 kommt es zu einer erhöhten Ionisierung. Wird nun die Spannung weiter gesteigert, wird das Gebiet, in welchem die Ionisierungszahl größer als die Anlagerungszahl ist, ausgedehnt und es kommt vergleichsweise rasch zu einem Durchschlag. Bei **negativer Spitze** treten die Startelektronen im feldstarken Bereich der Spitze aus der Kathode aus oder werden durch Ionisation in diesem Bereich gebildet. Die Elektronen der Lawine bewegen sich rasch in Richtung der Anode und hinterlassen langsamere positive Ionen im Bereich der Spitze, welche sich auf diese zubewegen. Die aus der entstehenden Lawine resultierende Raumladungsverteilung (Bild 2-7) führt zu einer weitgehenden Homogenisierung des elektrischen Feldes und einer raschen Abnahme der elektrischen Feldstärke im Bereich der Kathode. Daraus resultiert, dass die kritische Feldstärke nur in einem kleineren Gebiet überschritten wird und höhere Spannungen für einen elektrischen Durchschlag nötig sind [15, 18, 20].

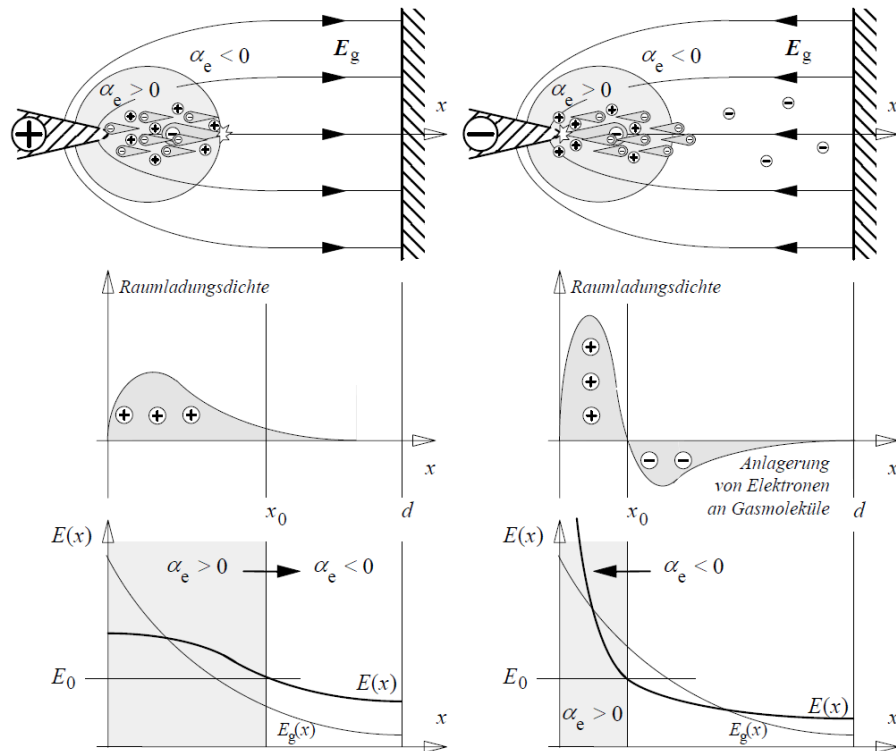


Bild 2-7: Polaritätseffekt bei einer Spitzen-Platten-Anordnung [18]

Je größer der Unterschied der beiden Elektroden und der Schlagweite desto ausgeprägter ist der Polarisierungseffekt [18, 20].

2.5 Elektrische Felder bei Gleichspannung

2.5.1 Belastungszustände

Um die unterschiedlichen Feldkonfigurationen leichter beschreiben zu können sind in Bild 2-8 die verschiedenen Belastungszustände bei Gleichspannung graphisch dargestellt. Die durchgezogene Linie beschreibt die äußeren Spannungsverhältnisse und die strichlierte Linie die internen Ladungsverhältnisse. Das linke Bild zeigt das Ein- und Ausschalten eines Systems und das rechte Bild eine Polaritätsumkehr.

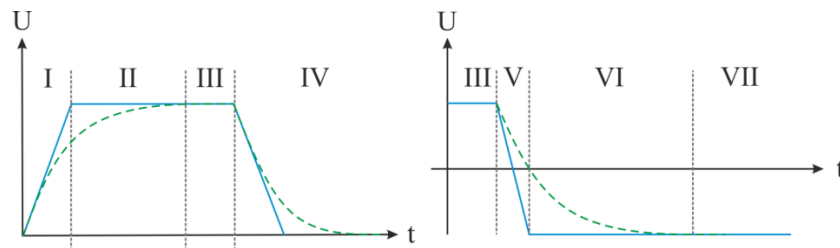


Bild 2-8: Betriebszustände bei Gleichspannung, nach [25]

Nachfolgend sind die einzelnen Betriebszustände nach [15, 22, 24, 26, 27] erklärt:

- Zustand I:** Im ersten Augenblick des Einschaltens sowie eine gewisse Zeitdauer danach herrschen kapazitive Feldverhältnisse vor. Die wesentlichen Berechnungsparameter sind die Permittivität ε und die geometrische Beschaffenheit der Anordnung. Die gegebenen Spannungs- und Feldverhältnisse können mit den Methoden der elektrostatischen Feldberechnung bestimmt werden.
- Zustand II:** Anschließend findet der Übergang vom kapazitiven in das resistive Feld statt, indem sich die inneren Ladungsverhältnisse den äußeren Gegebenheiten anpassen. Hierbei sind die Bildung von Raumladungen und Polarisierungseffekte zu berücksichtigen. Die Ausbildung der Raumladungen und inneren Verhältnisse weisen eine wesentlich längere Zeitkonstante als jene der äußeren Spannungsverhältnisse auf.
- Zustand III:** In diesem Bereich liegt ein rein resistives Feld vor. Die Berechnungen können ebenfalls über die elektrostatische Feldberechnung erfolgen, jedoch ist die spezifische Leitfähigkeit κ von Bedeutung. Darüber hinaus spielen Raumladungen für die Ausprägung der vorherrschenden Feldverhältnisse in diesem Bereich eine wesentliche Rolle.
- Zustand IV:** Auch nach dem Abschalten der speisenden Spannung verbleiben Raumladungen in der Anordnung, welche mit einer gewissen Zeitkonstante abgebaut werden. Die Zeitkonstanten für den Abbau von Raumladungen liegen meist im selben Wertebereich wie jene für den Aufbau oder darüber.
- Zustand V:** In dem Zeitbereich des Polaritätswechsels und in einem gewissen darauffolgenden Zeitbereich herrschen wiederum kapazitive Verhältnisse. Der anliegenden Spannung ist in diesem Bereich die Raumladungen überlagert, was zu einer Felderhöhung führt, welche sich anschließend durch Umformung der Raumladung abbaut.
- Zustand VI:** In diesem Bereich sind die alten Raumladungen abgebaut und die neue Raumladung wird formiert.
- Zustand VII:** In Zustand VII herrschen im Allgemeinen dieselben Gegebenheiten wie in Zustand III nur mit inverser Polarität. Es können jedoch unter Umständen weitere Phänomene wie der Polaritätseffekt auftreten.

2.5.2 Raum- und Oberflächenladungen

In HVDC GIS/GIL spielen Raum- und Oberflächenladungen eine zentrale Rolle für das Durchschlagsverhalten bei Überspannungen. Durch die verschiedenen Belastungszustände (Abschnitt 2.5.1) und das Vorhandensein unterschiedlicher Dielektrika erschwert sich die Bewertung der elektrischen Verhältnisse in einem gasisolierten System [22].

Raumladungen entstehen durch positive oder negative Ladungen in einem Dielektrikum, welche sich durch das anliegende elektrische Feld in dem vorhandenen Dielektrikum bewegen oder ausrichten. Auch bei Dielektrika ohne eine nennenswerte Anzahl an freien Ladungsträgern werden solche nach Erreichen der Teilentladungseinsetzspannung in die Anordnung injiziert. Die Bewegung der Ladungsträger führt zu einer Anlagerung an Elektroden und Grenzschichten verschiedener Dielektrika. Durch die Ausbildung von Raum- und Oberflächenladungen entstehen veränderte Feldverteilungen im Isoliermedium [3, 15, 22, 25, 26, 28].

Bei AC spielt dieser Effekt durch die kontinuierliche Umpolung des elektrischen Feldes nur eine untergeordnete Rolle und kann weitgehend vernachlässigt werden. Da sich bei DC die Feldrichtung – und somit die Richtung der Ladungsbewegung – über die Zeit nicht ändert können sich Raum- und Oberflächenladungen ausbilden und dürfen nicht vernachlässigt werden. Abhängig vom vorhandenen Dielektrikum und der Geometrie dauert die Ausbildung der endgültigen Ladungsverhältnisse sehr lange ($\geq 10^5 s - 10^6 s \approx 1 d - 10 d$) [22].

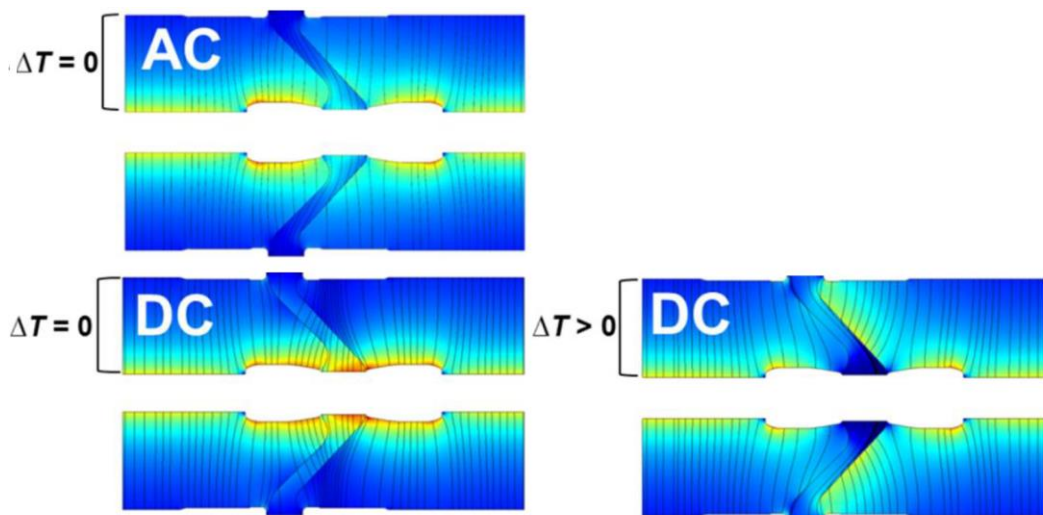


Bild 2-9: Feldverteilung in einem GIS bei AC und DC [3]

Bei einem Übergang (Grenzschicht) zwischen fester und gasförmiger Isolierung bzw. Elektroden und Isolierungen kann es zu Aufladungserscheinungen an den Grenzschichten kommen. Die Leitfähigkeit ist aufgrund ihrer starken Temperaturabhängigkeit in den meisten Fällen nichtlinear – lokale Temperaturerhöhung durch Stromtransportverluste an der Hochspannungselektrode (Bild 2-9).

Es ist erkennbar, dass sich bei Anlegen einer Spannung im Bereich der Grenzschichten bei DC Feldverhältnisse höherer Amplituden ergeben als bei AC. Bei zunehmender Temperatur im Bereich des Leiters gehen diese zurück und im Bereich der Feststoffisolierung ergibt sich eine Aufladung der Grenzschichten [3, 15, 22, 25, 26, 28].

2.5.3 Kapazitiv-Resistive-Felder und deren Übergang

Beim Einschalten einer Gleichspannung herrschen zu Beginn in einem GIS kapazitive Verhältnisse, in denen die Permittivität die vorherrschenden Feldverteilungen bestimmt. Nach einer genügend langen Zeit herrschen resistive Verhältnisse, in denen die elektrische Leitfähigkeit für das vorherrschende (quasi-) stationäre Strömungsfeld verantwortlich ist [22, 25, 29].

Isolierstoffsysteme werden nach konventionellem Ansatz durch ein Netzwerk aus Kondensatoren und Widerständen beschrieben. Die Polarisationsvorgänge werden ebenfalls über eine Ersatzschaltung aus einer Kapazität in Serie mit einem Widerstand nachgebildet. Die Zeitkonstanten der Aufladevorgänge werden nach Formel (6) berechnet.

$$\tau_i = R_i * C_i \quad (6)$$

Die Zeiten für den Kapazitiv-Resistiven-Übergang ergeben sich in [29] nach Formel (7) zu $\tau = 2,2 * 10^4$ bis $2,2 * 10^6$ s.

$$\tau = R * C = \varepsilon * \rho \quad (7)$$

In Bild 2-10 ist das Widerstandsnetzwerk dargestellt und nachfolgend wird auf die einzelnen Bereiche näher eingegangen [22]:

- **Geometrische Kapazität C_0**
Kapazität, welche sich im Vakuum ohne Vorhandensein eines Dielektrikums, abhängig von der vorhandenen Geometrie ergibt.
- **Gleichstromwiderstand R_∞**
Berücksichtigung der Leitfähigkeit des nicht idealen Dielektrikums, abhängig von den verwendeten Materialien.
- **Verschiebungspolarisation C_V und R_V**
Berücksichtigung der Atom- bzw. Deformationspolarisation und Gitterpolarisation mit einer Zeitkonstante unterhalb des ps-Bereichs.
- **Orientierungspolarisation C_O und R_O**
Berücksichtigung der Dipolausrichtung mit einer Zeitkonstanten im ns- bis μ s-Bereich.

- **Grenzflächenpolarisation C_G und R_G**

Aufladung der Ersatzkapazität C_G über R_G mit einer Zeitkonstanten im ms- bis hin zu h/d/m-Bereich (Raumladungen an Grenzflächen), abhängig von den verwendeten Dielektrika und der Geometrie.

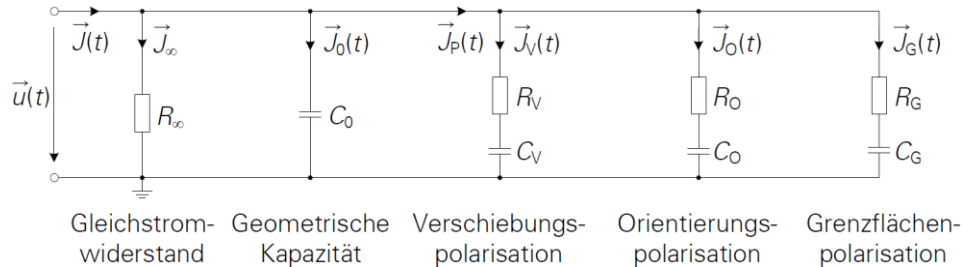


Bild 2-10: Ersatzschaltbild zur Beschreibung der Komponenten des Kapazitiv-Resistiven-Übergangs [22]

Bei AC kann auf die Berücksichtigung der Grenzflächenpolarisation verzichtet werden. Bei DC ist dies jedoch nicht mehr zulässig. In diesem Fall ergibt sich die auftretende Verschiebungsstromdichte $\vec{J}(t)$ im Dielektrikum nach Formel (8), wobei die einzelnen Anteile mit unterschiedlichen Zeitkonstanten abklingen.

$$\vec{J}(t) = \vec{J}_\infty + \vec{J}_0(t) + \vec{J}_V(t) + \vec{J}_O(t) + \vec{J}_G(t) = \kappa(\vartheta) * \vec{E} + \varepsilon * \frac{\partial \vec{E}(t)}{\partial t} \quad (8)$$

Die entsprechenden Parameter der einzelnen Ersatzelemente können durch Anlegen einer Gleichspannung an das Dielektrikum und den daraus resultierenden Kurven ermittelt werden. Nach Abschluss der Polarisationsmechanismen stellt sich das rein resistive Strömungsfeld nach Formel (9) ein. Die Leitfähigkeit weist eine starke Temperaturabhängigkeit und somit gegebenenfalls über die Isolierstrecke eine starke Nichtlinearität auf.

$$\vec{J} = \kappa(\vartheta) * \vec{E} \quad (9)$$

Mit dem bisherig beschriebenen Ansatz können nach [22] jedoch nicht alle auftretenden Phänomene restlos beschrieben werden. Mit dem erweiterten Ansatz von Poisson-Nemest-Planck wird der Verschiebungsstromdichte noch der Ladungsträgerdrift im elektrischen Feld und die Ladungsträgerdiffusion durch lokale Unterschiede der Ladungsträgerkonzentration überlagert. Es ergibt sich somit die globale Stromdichte wie in Formel (10) beschrieben [22].

$$\vec{J}(t) = \sum_i z_i * e * \mu_i * n_i * \vec{E}(t) + \sum_i z_i * e * D_i * \vec{\nabla} n_i(t) + \varepsilon * \frac{\partial \vec{E}(t)}{\partial t} \quad (10)$$

Hierbei werden verschiedene Arten von Ladungsträgern i mit einer bestimmten Wertigkeit z_i unterschieden.

Weiteren Einfluss haben die entsprechenden Raumladungen, welche durch die Ladungshäufung n_i berücksichtigt werden. D_i und μ_i berücksichtigt die durch den Ladungsträgerdrift und die Diffusion verursachte Veränderung der Ladungsträgerkonzentration [22].

2.5.4 Koronastabilisierung

Als Koronastabilisierung wird die raumladungsbedingte Homogenisierung des elektrischen Feldes bei stark gekrümmten Elektroden verstanden. Positive Ionen des Isoliergases wandern durch das Vorhandensein eines elektrischen Feldes zur Kathode und die negativen Ionen zur Anode [18].

Bei der Bildung von Streamer-Entladungen kann die Lawine im Bereich der Spitze zu einer Verringerung und Homogenisierung des elektrischen Feldes führen. Wird die kritische Feldstärke nahe der Spitzenelektrode unterschritten, kommt es zum Erliegen des Lawineneffekts und es treten keine Teilentladungen mehr auf (Bild 2-11). Erst bei einem neuen Überschreiten der kritischen Feldstärke durch Erhöhung der angelegten Spannung treten wieder Teilentladungen auf [18, 30].

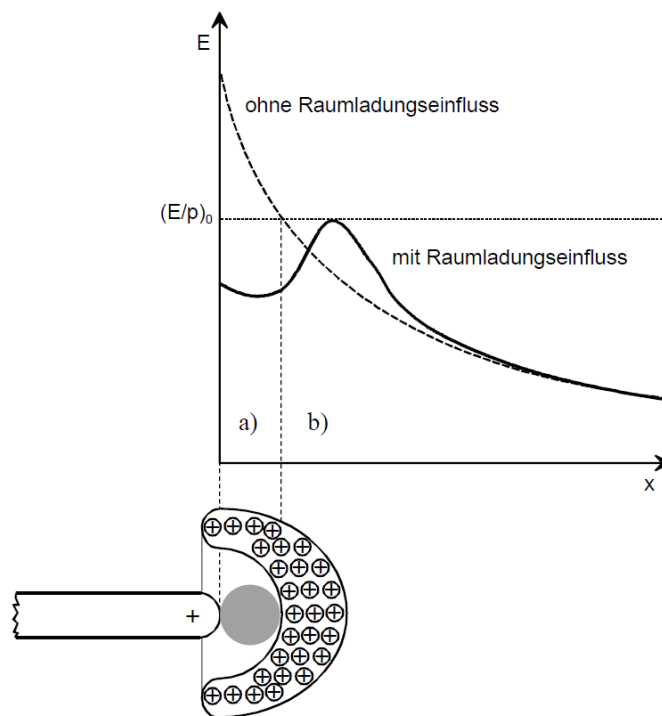


Bild 2-11: Koronastabilisierung einer Spitze bei positiver Polarität der Spannung [31]

2.6 Defekte in gasisolierten Systemen

Die ersten GIS gingen bereits in den 1960er Jahren in Betrieb. Dies führt dazu, dass es in der Zwischenzeit gut fundierte Informationen über das Fehlverhalten und die Fehlerursachen gibt.

Die gravierenden Fehler, welche zu einem Einbüßen primärer Funktionen führen, werden unterteilt in „Dielektrische Durchschläge“ (23 %) und in „Fehler mit Unmöglichkeit der Ausführung essentieller Funktionen“ (63%) [32-34].

Die häufigsten Ursachen für Fehler in GIS sind (Bild 2-12) [32]:

- Abnutzung, Alterung und Zersetzung der unterschiedlichen Komponenten (ca. 40 %);
- Auftreten eines Defekts vor den ersten Instandhaltungs- bzw. Wartungsarbeiten (ca. 25 %), im Besonderen Fertigungs- und Errichtungsfehler (ca. 10 %);
- Fehlerhafte Bedienung und Überbeanspruchung der Anlagen und Anlagenkomponenten (15 %), im Besonderen fehlerhafte Instandhaltungsarbeiten (7 %)

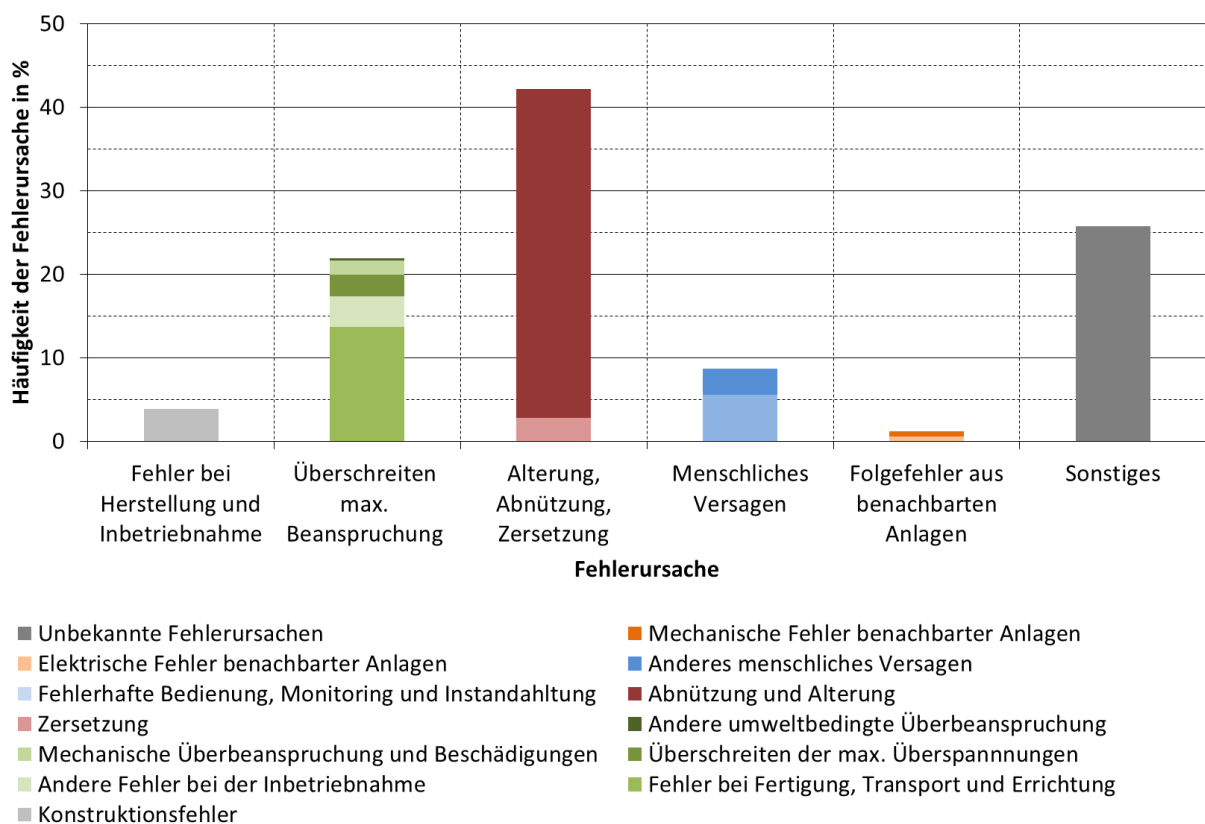


Bild 2-12: Unterscheidung verschiedener Ursachen für Fehler in GIS/GIL, nach [33]

Die auftretenden Fehler können wiederum unterschiedliche Ursachen haben. Die für den elektrischen Durchschlag verantwortlichen Fehler sind in Bild 2-13 gesondert dargestellt. Beispielhaft können bei fehlerhafter Instandhaltung Partikel in den Gasraum eingebracht werden oder scharfkantige Spitzen und Kanten entstehen, welche dann zu einem dielektrischen Durchschlag führen. Daraus resultieren die in GIS/GIL auftretenden typischen Defekte (Bild 2-14) [32-34].

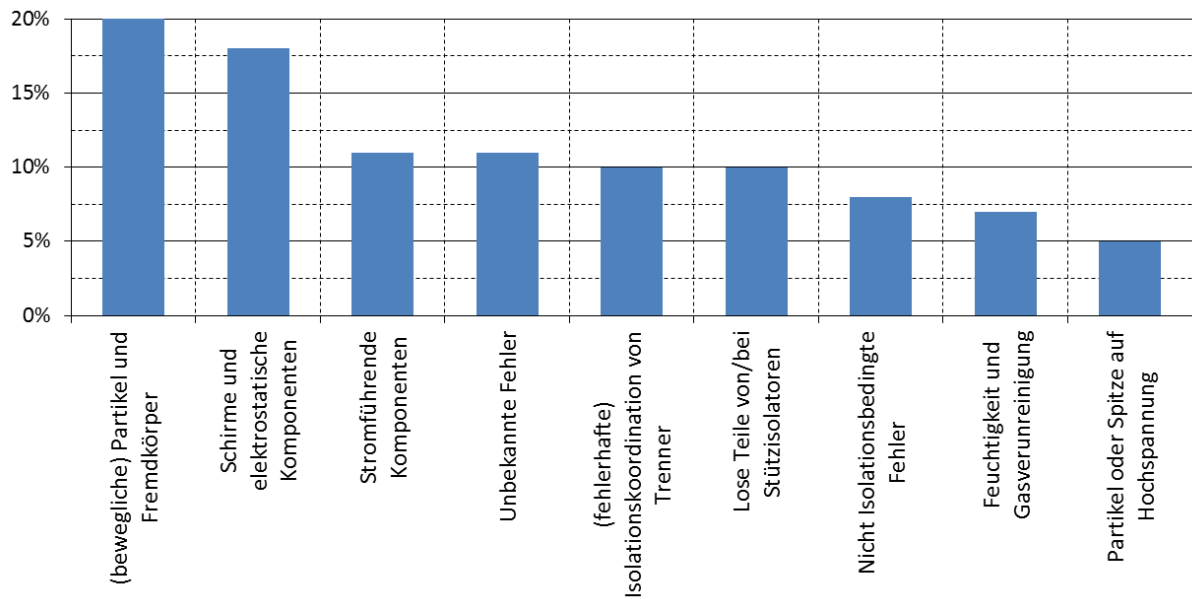


Bild 2-13: Fehler in GIS/GIL, welche zum elektrischen Durchschlag führen, nach [34]

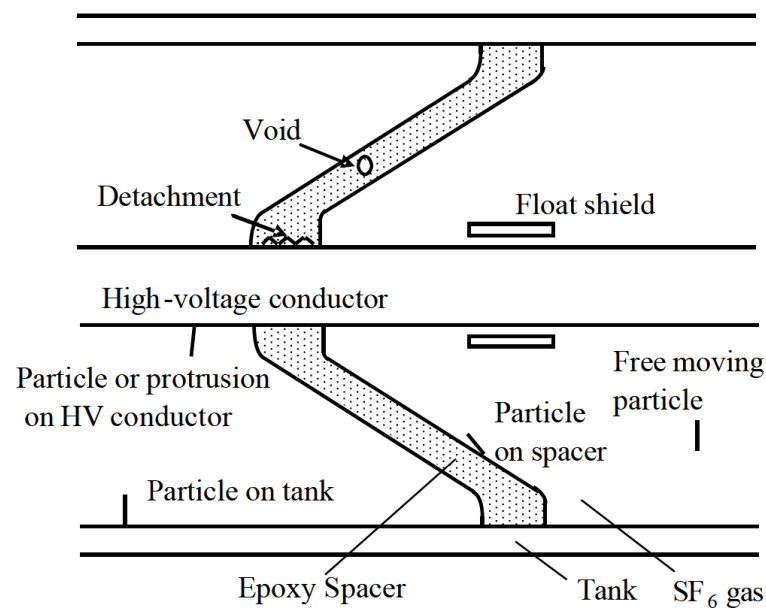


Bild 2-14: Typische Defekte bei gasisolierten Systemen [35]

Eine nähere Beschreibung der Defekte unter Gleichspannung ist dem Abschnitt 3.3 zu entnehmen.

2.7 Definition der Detektierbarkeit

Unter Detektierbarkeit wird in dieser Arbeit das Verhältnis zwischen der Durchschlagsspannung U_{bd} einer Isolierstrecke bei Vorhandensein eines Defektes in einem gasisolierten System und der bei selbigem Defekt auftretenden Teilentladungseinsetzspannung U_i , nach Formel (11) definiert.

$$D = \frac{U_{bd}}{U_i} \text{ in p.u.} \tag{11}$$

In Bild 2-15 ist beispielhaft die Detektierbarkeit für den Defekt „Spitze auf Hochspannung“ in Abhängigkeit des Drucks graphisch dargestellt. Der Tabelle 1 sind die zugehörigen Werte der Detektierbarkeit zu entnehmen.

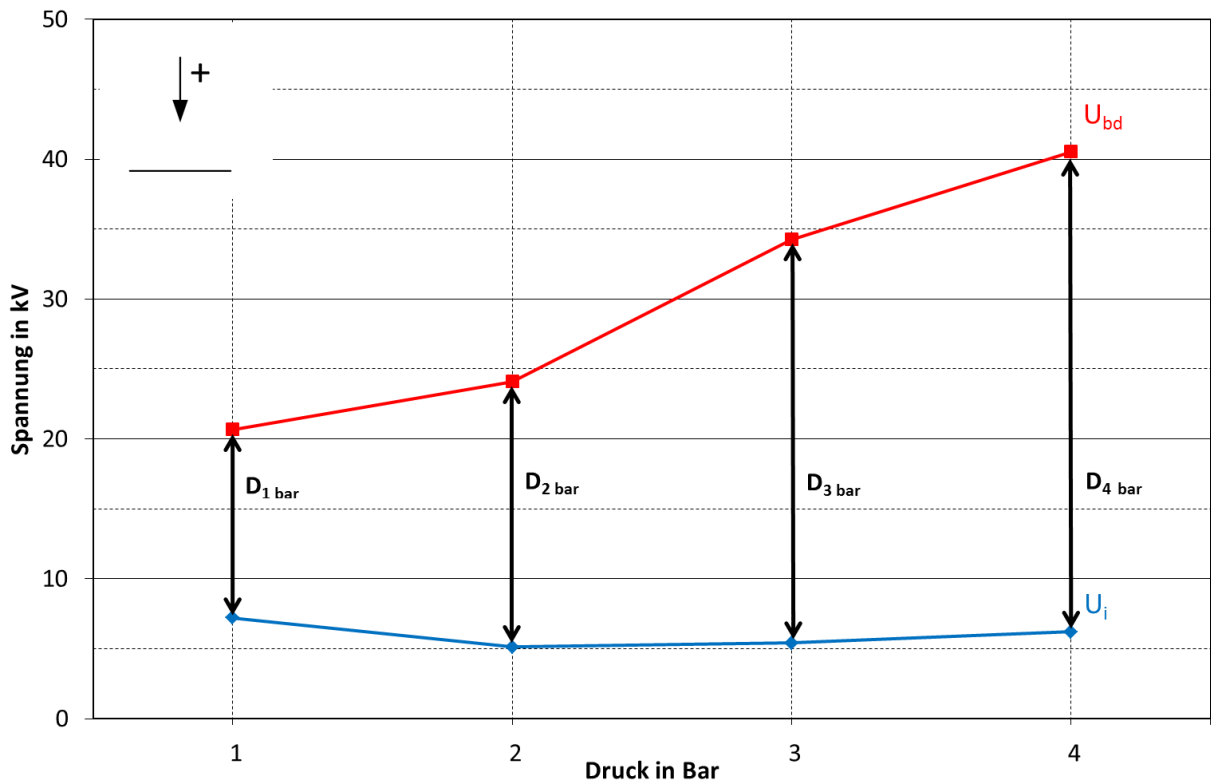


Bild 2-15: Detektierbarkeit am Beispiel eine Spitze-Platte-Anordnung (s = 17 mm, Stickstoff, Gleichspannung positiver Polarität)

Tabelle 1: Detektierbarkeit am Beispiel eine Spitze-Platte-Anordnung

Druck (bar)	1	2	3	4
D	2,9	4,7	6,3	6,5

3 Teilentladungen und Teilentladungsdiagnostik

3.1 Definition von Teilentladungen

“Partial discharge (PD) is localized electrical discharge that only partially bridges the insulation between conductors and which can or cannot occur adjacent to a conductor.” [36]

Die elektrische Isolierung einer Hochspannungskomponente wird nach der Isolationskoordination so gewählt, dass auch bei entsprechenden Überspannungen ein sicherer Betrieb der Anlage möglich ist. Bei Vorhandensein von Defekten im Isoliersystem können die auftretenden Spannungen und Überspannungen jedoch dazu führen, dass an lokal begrenzten Stellen die maximale Feldstärke überschritten wird. Im homogenen Feld führt ein Überschreiten der maximalen Feldstärke zum sofortigen Durchschlag des Isolationsmediums. Beim inhomogenen Feld treten zuerst Teilentladungen (Vorentladungen) auf und erst bei einer weiteren Erhöhung der Spannung kommt es zum elektrischen Durchschlag. Teilentladungen sind demnach örtlich begrenzte, unvollständige elektrische Entladungen, welche die Strecke zwischen den Elektroden teilweise überbrücken. Die Pulsweiten von Teilentladungen liegen in einem Zeitbereich unter $t = 1 \mu\text{s}$. Die Diagnose und Interpretation der Teilentladungen kann Aufschluss über die Art des Defektes und dessen Kritizität liefern. Somit ist die Messung von TE ein wichtiges Mittel zur Zustandsbewertung elektrischer Betriebsmittel [2, 5, 8, 36, 37, 38].

3.2 Teilentladungsmessung

3.2.1 Übersicht über gängige Messverfahren

Bei der Teilentladungsmessung kann zwischen verschiedenen Messmethoden unterschieden werden. Die gängigsten Messmethoden sind die konventionelle Messung nach IEC 60270 und die UHF (Ultra High Frequency) -Methode. Darüber hinaus werden noch die akustische und die optische Methode verwendet. Die nichtkonventionellen TE-Messmethoden beruhen auf physikalischen Effekten, welche durch die TE-Aktivität verursacht werden. Diese sind hauptsächlich die Emittierung von Schallwellen, ultraviolettem (UV) Licht und magnetischen Wellen [5, 39].

3.2.2 Konventionelle Teilentladungsmessung nach IEC 60270

Die konventionelle TE-Messung beruht normativ auf der IEC 60270. In ihr sind die Messvorschriften, Messprozeduren inklusive Kalibrierung und die Auswertung von TE festgelegt. Die Norm befasst sich vorrangig mit der Teilentladungsmessung im Wechselspannungsbereich mit erweiterter Anwendungsmöglichkeit auf den Gleichspannungsbereich [36].

Es wird zwischen drei möglichen Aufbauvarianten unterschieden. Einerseits gibt es die Möglichkeit die Messimpedanz in Serie zum Koppelkondensator oder in Serie zum Prüfobjekt zu schalten, andererseits kann der Prüfaufbau in Form einer ausbalancierten Brückenschaltung realisiert werden. Die Serienschaltung von Messimpedanz und Koppelkondensator ist die in der Praxis gängigste Methode. Diese bietet den Vorteil eines einfachen Aufbaus und schützt gleichzeitig in den meisten Anwendungsfällen die Messeinrichtung vor Überströmen bei Durchschlägen im Prüfobjekt. Der Aufbau dieser Schaltung ist in Bild 3-1 ersichtlich. Der Messkreis sowie die Teilentladungsmessung unterscheiden sich bei Wechsel- und Gleichspannung im Allgemeinen nicht [5, 36, 39].

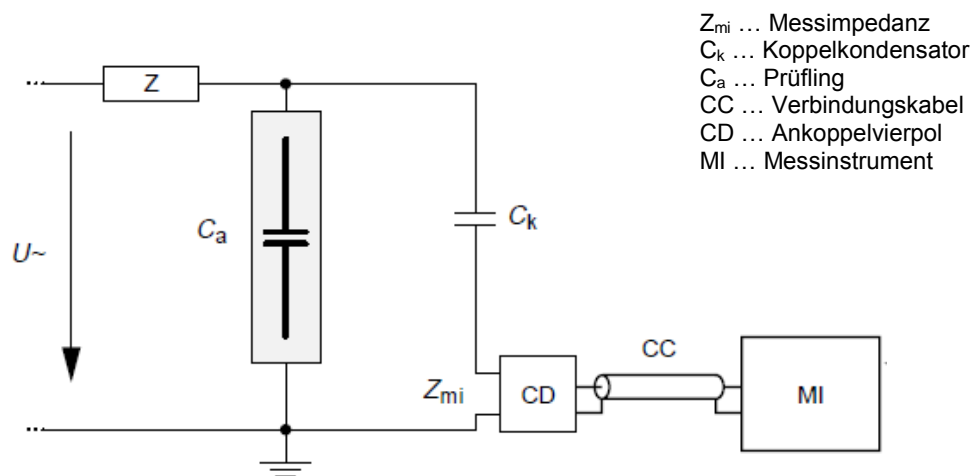


Bild 3-1: Messkreis zur TE-Messung mit Messimpedanz in Serie zu C_k [36]

Die in der Norm festgelegten Messbereiche werden in die schmalbandige und die breitbandige Messung unterteilt. Bei der schmalbandigen Messung wird ein Frequenzband bis zu $\Delta f = 30$ kHz bei einer Mittenfrequenz bis zu $f_c = 1$ MHz und bei der breitbandigen Messung ein Frequenzband bis zu $\Delta f = 900$ kHz bei einer maximalen Frequenz von $f_{max} = 1$ MHz vorgeschrieben [36].

Anforderungen an den Messkreis [36]:

- Der Messaufbau muss im entsprechenden Messbereich teilentladungsfrei sein.
- Kontaminierungen am oder im Testobjekt wie Verschmutzungen sind zu beseitigen.
- Die Kapazität des Koppelkondensators muss wesentlich größer als jene des Prüfobjekts sein. Bei Werten des Koppelkondensators von größer 1 nF ist dies im Allgemeinen erfüllt.
- Vor der Messung ist der Messkreis zu kalibrieren.
- Das Hintergrundrauschen sollte kleiner als 50 % des erwarteten Messpegels betragen.

Kalibrierung

Der Prüfaufbau wird kalibriert, um von der gemessenen Ladung der Teilentladungsimpulse über einen Skalierungsfaktor k auf die Entladungen durch den Prüfling schließen zu können, das heißt den Einfluss des Messaufbaus auf die gemessenen Entladungen zu eliminieren. Die Kalibrierung des Messkreises hat vor jeder Messung zu erfolgen, insofern sich der Kapazitätswert der Prüfobjekte um mehr als $\pm 10\%$ oder der Messaufbau (Vorwiderstände, Koppelkondensatoren, etc.) verändert. Die Kalibrierung hat im relevanten Messbereich (zwischen 50% und 200% der erwarteten Entladungen), örtlich so nahe am Prüfobjekt wie möglich, durchgeführt zu werden [36].

TE-Messung bei DC

Bei der Messung von TE bei Gleichspannung gelten weitere Besonderheiten. Es ist zu beachten, dass sich die TE-Impulsrate sehr gering ausfallen kann und einzelne hohe Impulse auftreten können. Das Teilentladungsverhalten des Testobjektes kann durch die Spannungswelligkeit der Versorgung beeinflusst werden und es treten auch nach Abschaltung der Versorgung Teilentladungsimpulse auf. Es gibt zurzeit noch kein genormtes Verfahren zur Ermittlung der Einsetz- und Aussetzspannung bei Gleichspannung. Darüber hinaus können die gleichen Verfahren und Messschaltungen wie bei AC verwendet werden [16, 36, 40].

Unter Verwendung von Wechselspannung werden die Teilentladungen durch ihren Phasenbezug zugeordnet und die Kritizität des Defekts anhand ihrer Amplitude bestimmt. Bei Gleichspannung fehlt dieser Phasenbezug und es können lediglich die einzelnen Amplituden der Entladungen und deren zeitlicher Verlauf betrachtet werden (Bild 3-2). Zum aktuellen Zeitpunkt gibt es noch kein standardisiertes Verfahren zur Zuordnung der auftretenden Teilentladungen zu einem Defekt [2, 27].

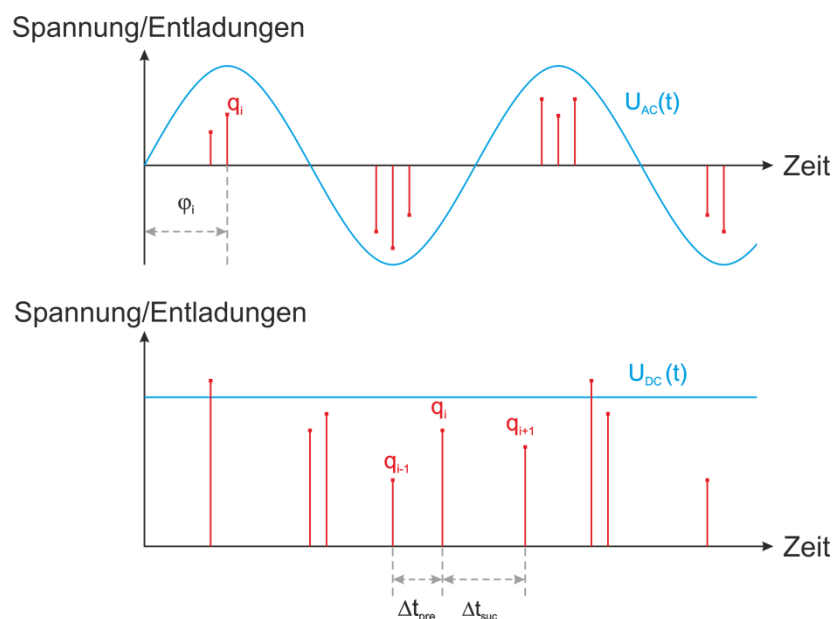


Bild 3-2: Teilentladungen bei AC und DC, nach [2]

Die graphische Analyse von Teilentladungen bei Gleichspannung beruht auf der Auswertung der Amplituden und der Entladungszeitpunkte. Der fehlende Phasenbezug kann durch die Zeitdifferenz zwischen den Entladungen ausgeglichen werden. Fromm definierte die Darstellung der Entladungen einerseits als Dichtefunktion der Entladungen (q) über die Entladungen als auch andererseits die Dichtefunktion der Zeitabstände zur Nachfolgeentladung (Δt_{suc}) über die Zeitabstände. Diese beiden Diagramme wurden zu einem dreidimensionalen $H(q, \Delta t_{\text{suc}})$ -Histogramm verbunden, welches bei unterschiedlichen Defekten unterschiedliche Formen annimmt (Bild 3-3) [27].

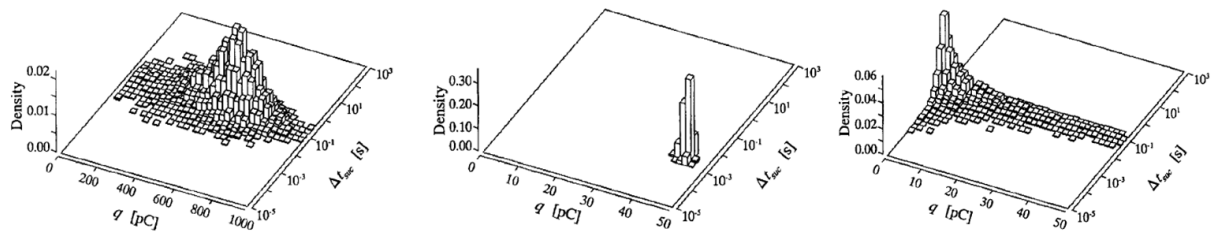


Bild 3-3: $H(q, \Delta t_{\text{suc}})$ -Histogramm (Korona in Öl, Korona in Luft, innere TE bei PE) [27]

Um eine eindeutige Zuordnung der Defekte zu ermöglichen gibt es hierbei unterschiedliche Ansätze. Beispielhaft sind die Ermittlung des virtuellen Schwerpunktes der einzelnen Verteilungen oder Vergleiche mit bekannten Kurvenformen wie der Gaußverteilung genannt. Ein weiterer aktueller Ansatz ist die Verwendung der normierten und differenzierten Werte der Ladungen sowie deren Zeitdifferenzen zu vergleichen [2, 41].

3.3 Teilentladungen in gasisolierten Systemen bei Gleichspannung

3.3.1 Innere Teilentladungen

Ursache für innere Teilentladungen sind gasgefüllte Hohlstellen in festen oder flüssigen Dielektrika. Teilentladungen starten in der Fehlstelle bei Überschreiten einer kritischen Feldstärke [25].

Ersatzschaltung bei AC

Wie in Bild 3-4 ersichtlich, kann die Isolation und die Fehlstelle bei AC durch ein Ersatzschaltbild aus Kondensatoren (ABC-Modell) nachgebildet werden. Zum Zeitpunkt des Durchschlags der Fehlstelle kommt es zu einem Zusammenbrechen der Spannung, was durch eine Funkenstrecke abgebildet werden kann [15, 25].

Die an der Isolieranordnung angelegte Wechselspannung U_0 führt zu einer entsprechend kleineren Wechselspannung U_{void} an der Fehlstelle (Kapazität C_c). Bei Überschreiten der minimalen Spannung U_{min} ist die theoretische Teilentladungseinsetzspannung erreicht.

Es kommt aufgrund der stochastisch verteilten Bereitstellung eines Startelektrons zu einer Verzögerung t_L (time-lag) bis die Entladung stattfindet. Zu diesem Zeitpunkt ist die Spannung bereits um ΔV auf die detektierbare Teilentladungseinsetzspannung U_i gestiegen. Durch die Entladung bricht die anliegende Spannung in der Fehlstelle zusammen. Durch die Sinusform der Wechselspannung kommt es jedoch rasch wieder zu einem Überschreiten der minimalen Spannung und der Vorgang beginnt von Neuem (Bild 3-5) [8, 15, 25].

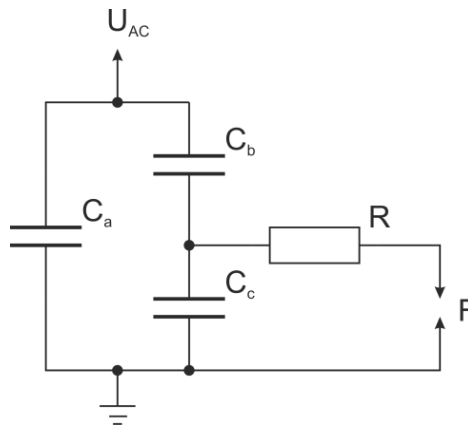


Bild 3-4: ABC-Ersatzschaltung für innere Teilentladung bei AC, nach [25]

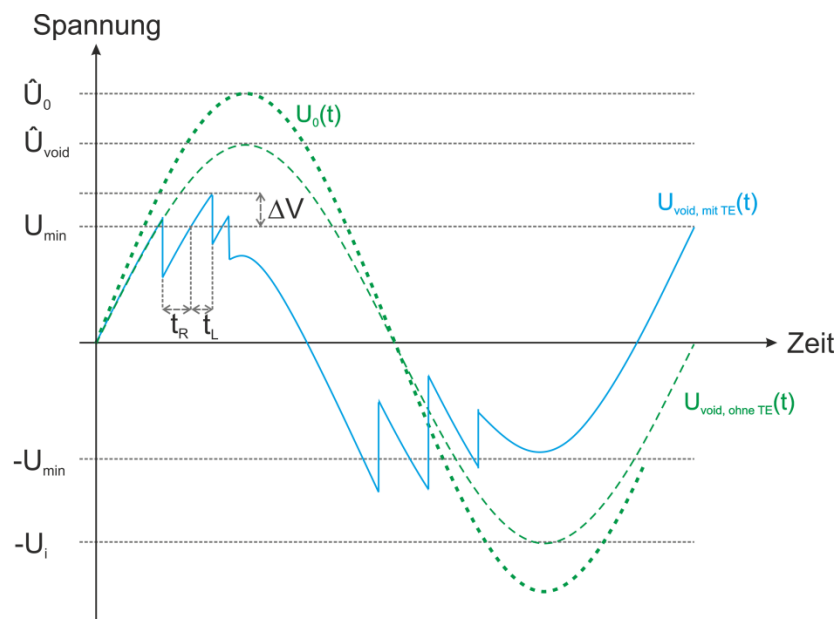


Bild 3-5: Spannungsverläufe innerer Teilentladungen bei AC, nach [25]

Ersatzschaltung bei DC

Nach [25] wurde für die Betrachtungen bei Gleichspannung das ABC-Ersatzschaltbild um Widerstände erweitert (Bild 3-6). Hierbei repräsentieren C_a und R_a die Eigenschaften des Dielektrikums, C_b und R_b jenen Teil des Dielektrikums in Serie mit dem Defekt, C_c die Kapazität der Fehlstelle und R_c den Oberflächenwiderstand.

Der Mechanismus der Teilentladungsbildung ist bei DC sehr ähnlich jenem bei AC und in Bild 3-7 dargestellt. Die Spannung über die Fehlstelle wird solange erhöht, bis es zu einem Überschreiten der Minimalspannung kommt. Nach einer Verzögerungszeit t_L kommt es aufgrund der stochastischen Auftretungswahrscheinlichkeit eines Startelektrons zum Einsatz der Entladungen. Die detektierbare Einsetzspannung liegt auch hier um ΔV über der Minimalspannung, da die Spannung in der Zeit bis zur Bildung eines Startelektrons weiter steigt. Die Minimalspannung für einen gasgefüllten Raum ergibt sich dabei nach dem Gesetz von Paschen.

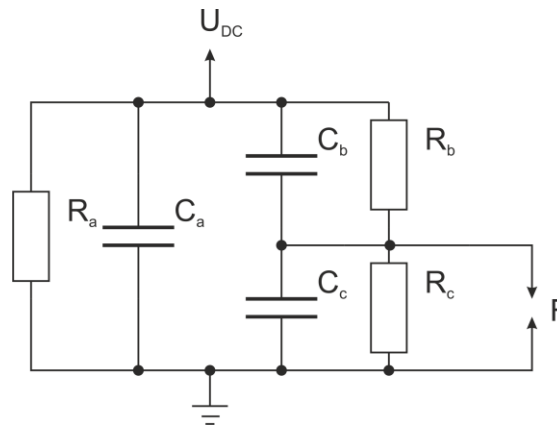


Bild 3-6: Erweiterte ABC-Ersatzschaltung für innere Teilentladung bei DC, nach [25]

Nach dem Zusammenbruch der Gleichspannung aufgrund der Entladungen in der Fehlstelle sinkt diese auf eine Restspannung U_R , die unterhalb der Minimalspannung U_{min} liegt. Anschließend werden die Kapazitäten der Anordnung innerhalb einer gewissen Wiederaufladezeit t_R (recovery-time) neu geladen bis die Minimalspannung wieder erreicht ist und der Vorgang sich wiederholt.

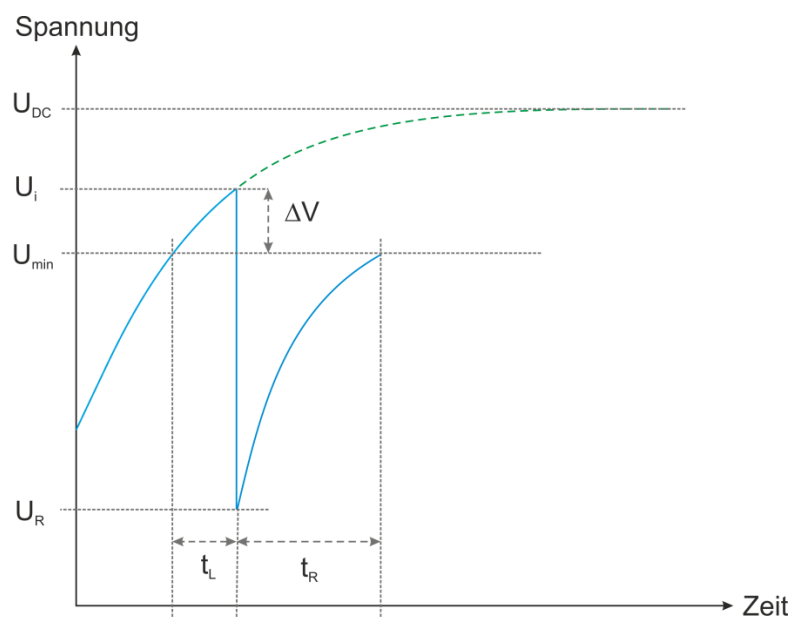


Bild 3-7: Spannungsverläufe innerer Teilentladungen bei DC, nach [15]

Der Entladungsprozess ist stark von t_L , t_R und ΔV abhängig, was zu unregelmäßigen Entladungserscheinungen führen kann. Kleine Überspannungen ΔV werden dem Entladungsmechanismus nach Townsend und große Überspannungen dem Entladungsmechanismus nach Raether zugeschrieben. Dies hat auch einen Einfluss auf die Amplitude der Entladung und die Verzugszeit zwischen den Entladungen. Townsend-Entladungen führen zu geringen Entladungsamplituden mit einem Zusammenbruch der Spannung auf Werte knapp unterhalb von U_{\min} wohingegen Raether-Entladungen hohe Amplituden und einen Spannungszusammenbruch gegen null Volt hervorrufen (Bild 3-8). Es ist anzumerken, dass bei niedrigen Feldstärken vermehrt Townsend-Entladungen und bei hohen Feldstärken vermehrt Raether-Entladungen auftreten. Darüber hinaus besteht ein Gleichfeld nicht wie oft vereinfacht angenommen aus stationären Verhältnissen, sondern setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen. An dieser Stelle wird auf Kapitel 2.5 verwiesen, in welchem die einzelnen Belastungszustände und die Feldzusammensetzung beschrieben werden [15, 25].

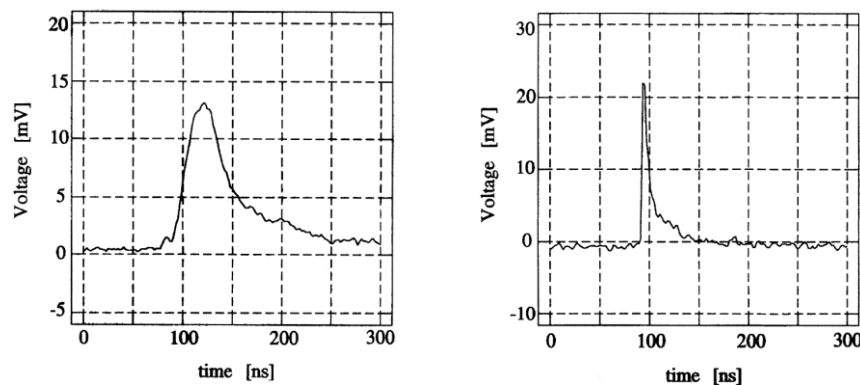


Bild 3-8: Townsend-Entladung (links) und Raether-Entladung (rechts) [42]

Bei Wechselspannung ist die Wiederkehr der Entladungsimpulse über die zeitliche Veränderung der Spannung erklärbar. Bei Gleichspannung findet keine Veränderung der Spannung statt. Die Wiederkehr der Teilentladungsimpulse lässt sich über den endlichen Widerstand der Isolierstrecke erklären, welche zu einer erneuten Aufladung der Fehlstelle führt. Je nach Isoliermedium und dessen Leitfähigkeit sowie den aktuell vorherrschenden Ladungsverhältnissen im Isoliersystem ergibt sich die Wiederaufladezeit t_R . Die zwischen zwei Entladungsimpulsen verstreichende Zeit Δt setzt sich somit aus t_L und t_R zusammen. Die Impulshäufigkeit n als Kehrwert der Zeit Δt ist direkt proportional zur am Isoliersystem angelegten Spannung (Bild 3-9) [8, 15, 25, 43].

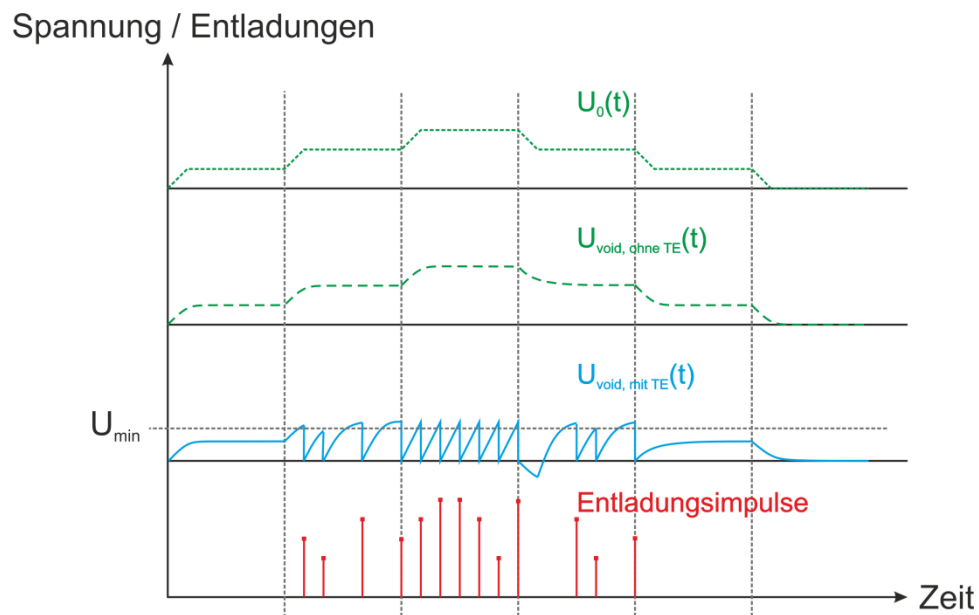


Bild 3-9: Teilentladungen in Abhängigkeit von der Amplitude der Gleichspannung, nach [43]

3.3.2 Bewegliche und haftende Partikel (Oberflächenentladungen)

In GIS spielen Grenzflächen eine wesentliche Rolle für die Spannungsfestigkeit. In üblichen Anwendungen werden Grenzflächen zwischen festen und gasförmigen Isolationsmedien sowie zwischen der gasförmigen Isolierung und den Elektroden unterschieden.

Die an den Grenzflächen auftretenden Oberflächenladungen beeinflussen, im Speziellen bei Polaritätsumkehr, die elektrische Festigkeit wesentlich. Die Einflussgrößen auf die Raumladungsbildung sind die angelegte Spannung, geometrische Verhältnisse im Isoliersystem und die verwendeten Materialien. Bei vorhandenen Störstellen in GIS ist ein besonderer Einfluss auf die Raum- und Oberflächenladung und die entsprechenden Einflüsse gegeben. Störstellen können in frei bewegliche und haftende, leitfähige und nichtleitfähige Partikel sowie Verunreinigungen durch Wasserdampf und Zersetzungsprodukte des Isoliergases unterteilt werden [15, 22, 29, 30, 44, 45].

Frei bewegliche leitfähige Partikel

Zu Beginn befindet sich das Partikel auf der Metallkapselung und weist eine gleichnamige Ladung auf. Das Partikel erfährt einen Abhebevorgang, wenn die, durch das elektrische Feld bedingte Coulomb-Kraft die Gravitationskraft, Reibungskräfte sowie die Adhäsionskraft übersteigt. Nach dem das Partikel sich in Richtung der Gegenelektrode bewegt hat und bei Berührung deren Ladung übernommen hat, erfährt es eine Bewegung in die entgegengesetzte Richtung. Zu den Zeitpunkten in denen sich das Partikel in Schwebelage befindet, kommt es zu einer gewissen Ladungstrennung im Partikel, was zu einem Drall um die eigene Achse führen kann.

Wenn sich das Partikel bei seiner Bewegung einem Festkörperisolator nähert und diesen berührt, bleibt es aufgrund der an der Grenzfläche vorherrschenden Oberflächenladung haften. Erst bei einer Entladung des Partikels über einen leitfähigen Kanal kann es sich wieder frei im Raum bewegen [15, 22, 29, 30].

Einfluss von Wechselspannung, Gleichspannung positiver Polarität und Gleichspannung negativer Polarität auf ein freibewegliches Partikel

Bei der Bewegung eines Partikels in einem GIS werden folgenden zwei Zuständen unterschieden [15, 46]:

- *Firefly-Effekt*
das Partikel bleibt auf der Elektrodenoberfläche oder in dessen Nähe und vollführt verschiedene Bewegungen unter starker Emission von Entladungen, welche als Leuchterscheinungen erkennbar sind. Diese Leuchterscheinungen werden auch als Fireflies bezeichnet. Der Firefly-Effekt tritt vorwiegend bei negativer Polarität der Spannung auf.
- *Bouncing particle*:
das Partikel hebt deutlich von der Elektrodenoberfläche ab und springt unter Umständen bis zur Gegenelektrode unter sehr starker TE-Aktivität. Es kann zu Aussetzern der TE kommen, wenn sich das Partikel für eine gewisse Zeit in einem schwebenden Zustand befindet.

Bei positiver Polarität der Gleichspannung wird das Partikel negativ geladen, hebt ab und schwebt unter Emission von Entladungen in Richtung der positiven Elektrode (Bild 3-10b)). Bei Berührung mit der positiven Hochspannungselektrode kommt es zu einem Ladungsaustausch und das nun positiv geladene Partikel wandert wieder zurück auf die, sich auf Erdpotential befindliche, Elektrode (Bild 3-10 c)). Hierbei kommt es im Nahbereich der Elektrode zum Firefly-Effekt. Es findet wiederum ein Ladungsaustausch statt und der beschriebene Vorgang wiederholt sich (Bild 3-10 d)) [15, 22, 29, 30].

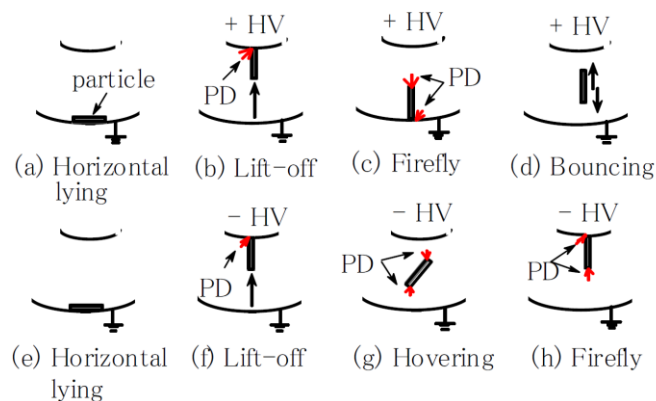


Bild 3-10: Bewegungsablauf eines freien Partikels unter Gleichspannung [29]

Bei frei beweglichen Partikeln spielen die Geometrie und der vorherrschende Gasdruck eine wesentliche Rolle (Bild 3-11). Im Bereich der niederen Drücke ist hier eine eindeutige Detektierbarkeit erkennbar, welche mit steigendem Druck geringer wird, da die Einsetzspannung (PDIV) eine prozentuell höhere Druckabhängigkeit aufweist als die Durchschlagsspannung (BDV). Ab einem Druck von ca. $p = 2$ bar bis $p = 3$ bar ist dieser Defekt bei den entsprechenden Geometrien und positiver Polarität der Gleichspannung nicht mehr detektierbar [29].

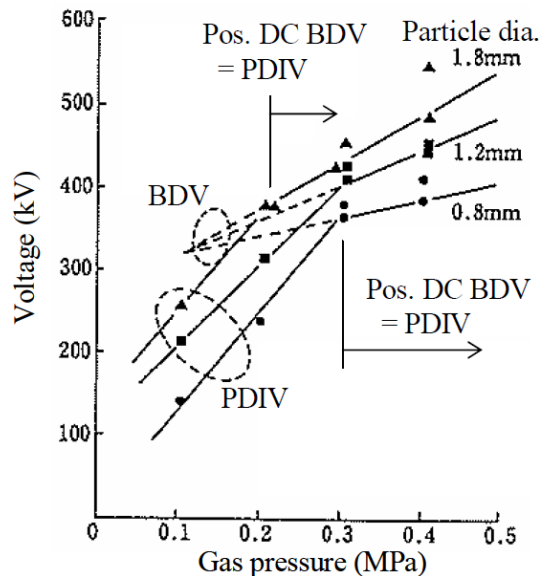


Bild 3-11: Teilentladungseinsetzspannung und Durchschlagsspannung bei einem frei beweglichen Partikel in Abhängigkeit von Gasdruck und Partikelgeometrie ($l = 5$ mm) [29]

Auf Isolatoroberfläche haftende leitfähige Partikel

Ein auf einem Isolator haftendes Partikel kann intensive Teilentladungen hervorrufen und führt zu einer weiteren Ausbildung von Oberflächenladungen. Die letztendliche allgemeine Konsequenz ist eine Herabsetzung der Durchschlagsspannung des Isoliersystems. Es kann jedoch bei reiner Gleichspannung ohne überlagerte impulsförmige Spannung oder einem Polaritätswechsel zu einer ladungsbedingten Erhöhung der Durchschlagsspannung kommen [22, 30, 45].

Bei einer Störstelle an einer Grenzfläche laufen mehrere Vorgänge ab. Einerseits kommt es zu einer Verschiebung und Ausrichtung der Dipole und freien Ladungsträger (Bild 3-12 ①), woraufhin sich Ionen aus dem Gasraum an die Grenzfläche anlagern können (Bild 3-12 ②). Es kommt weiter zur Ausbildung einer Raumladung. Darüber hinaus lagern sich Elektronen an eventuell auftretenden Gitterfehlstellen an (Bild 3-12 ③). Durch die Raumladung kommt es zu einer Verzerrung des elektrischen Feldes, welche im ungünstigen Fall zum Einsetzen von Entladungserscheinungen führen kann.

Bei Auftreten von Entladungen im Isoliersystem können positiv geladene Ionen auf die Störstelle treffen und neue Startelektronen freisetzen (Bild 3-12 ④). Weiter kann es an den Entladungsstellen der Störstelle zur Photoemission kommen, wodurch wiederum neue Startelektronen generiert werden (Bild 3-12 ⑤) [22].

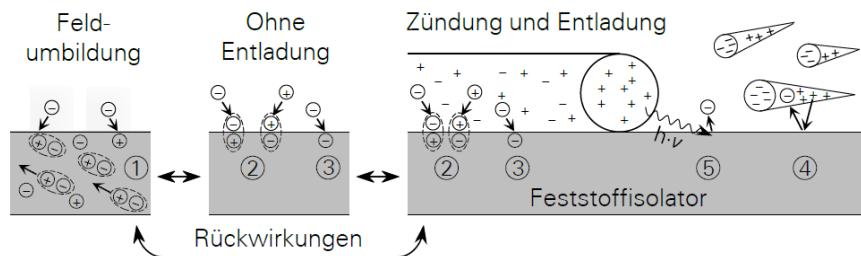


Bild 3-12: Prozesse an einer Grenzschicht [22]

Die Mechanismen und resultierenden Verhältnisse bei einem haftenden Partikel unterscheiden sich geringfügig zwischen positiver und negativer Polarität der angelegten Spannung (Bild 3-13). Auslöser ist jedoch in beiden Fällen eine Erhöhung der Feldstärke im Bereich der Partikelenden. Bei **negativer Polarität** entstehen an dem, dem Erdpotential zugeneigten Ende negative Entladungen, welche teilweise an der Isolatoroberfläche in Richtung Erdpotential wandern und teilweise auf der Isolatoroberfläche verbleiben. Durch diesen Verlust an negativen Ladungsträgern lädt sich das Partikel positiv auf und es entstehen positive Entladungen an der, der Hochspannungselektrode zugeneigten, Seite. Die hierbei entstehenden Entladungen wandern größtenteils durch das Gasvolumen zur Elektrode.

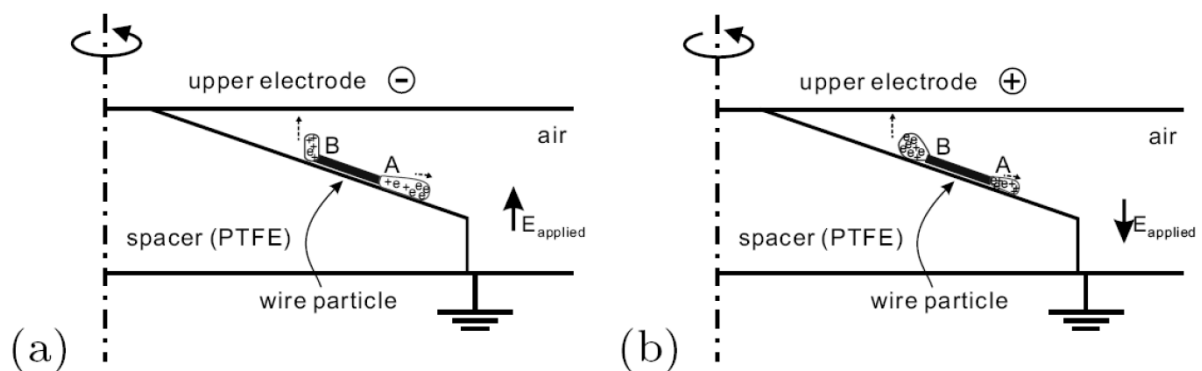


Bild 3-13: Haftendes Partikel auf Isolatoroberfläche [15]

a) negative Polarität und b) positive Polarität der angelegten Spannung

Bei **positiver Polarität** treten zu Beginn negative Entladungen an dem, der Hochspannungselektrode zugewandten, Ende auf und anschließend positive Entladungen an der dem Erdpotential zugewandten Seite. Der Ablauf entspricht jenem bei negativer Polarität. In diesem Fall verbleiben jedoch Ladungsträger beider Polaritäten zu einem gewissen Teil auf der Isolatoroberfläche. Bei der Betrachtung des Partikels in einer Zwischenposition zwischen Hochspannung und Erdpotential treten positive und negative Entladungen auf.

Durch Anlagerung von Oberflächenladungen an die Störstelle kann es zu einer Koronastabilisierung (Abschnitt 2.5.4) im Bereich der Spitzen des Partikels kommen [15, 44, 45].

Den größten Einfluss auf die Oberflächenladung, die Veränderung der Durchschlagsspannung und damit einhergehende Effekte, hat das Längen-Durchmesser-Verhältnis des Partikels. Bei zunehmender Länge und gleichbleibendem Querschnitt nimmt das Verhältnis der Einsetz- und Durchschlagsspannung, bezogen auf die Spannungen im fehlerfreien Fall, deutlich ab, das heißt die Kritizität des Defekts nimmt mit steigender Länge zu (Bild 3-14).

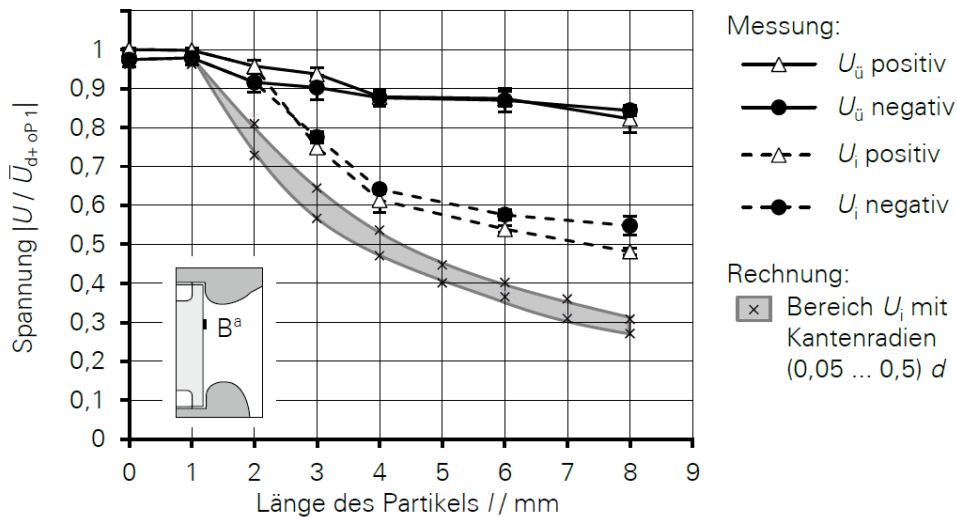


Bild 3-14: Einfluss der Partikellänge auf das Durchschlagverhalten [22]

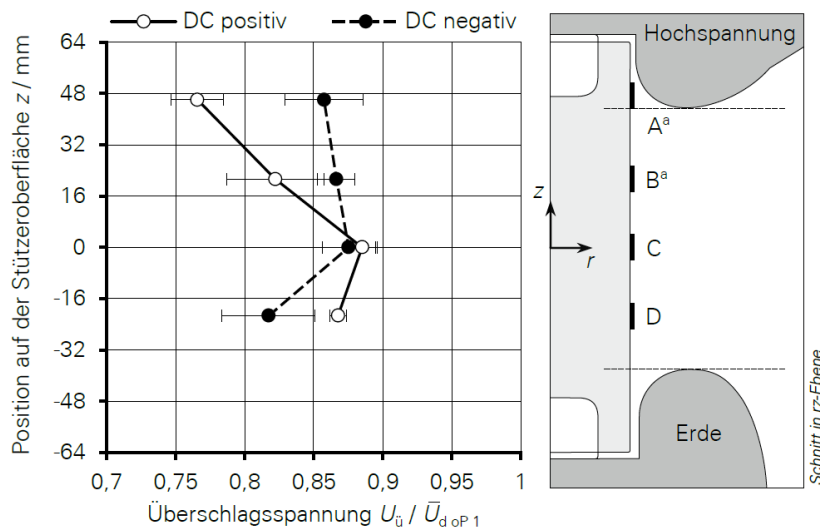


Bild 3-15: Einfluss der Partikelposition auf das Durchschlagverhalten [22]

Darüber hinaus hat auch die Position des Partikels einen Einfluss auf die Durchschlagsspannung (Bild 3-15). Bei der Positionierung in der Mitte des Isolators ist der Einfluss der Störstelle am geringsten und nimmt mit der Annäherung an eine Elektrode zu. Darüber hinaus ist ein ortsabhängiger Polaritätseffekt bemerkbar. Dies begründet sich in der geänderten Feldverteilung. Ein Partikel nahe der Niederspannungselektrode verhält sich wie ein Partikel nahe der

Hochspannungselektrode bei geänderter Polarität. Die an der Fehlstelle entstehenden Raumladungen weisen im unteren Druckbereich einen hohen Einfluss auf. Dieser verliert mit steigendem Druck des Isoliergases an Bedeutung [22].

3.3.3 Korona-Entladungen

Korona-Entladungen entstehen an scharfen Kanten und an Spitzen, da es in diesem Bereich zu Feldüberhöhung kommt. Die maßgeblichen Entladungsmechanismen sind in Abschnitt 2.4 beschrieben. Im Allgemeinen weist negative Korona überwiegend Verhalten nach Townsend und positive Korona überwiegend Verhalten nach Raether auf. Dies ist im Entstehungsort der Lawine und der daraus resultierenden Zahl der Elektronen im Bereich der Spitze begründet. Korona-Entladungen weisen sowohl bei positiver als auch bei negativer Polarität im Bereich der Einsetzspannung hohe Entladungsimpulse, gefolgt von schwächeren Impulsen und Leuchterscheinungen, auf. Darüber hinaus verschieben sich bei stark elektronegativen Gasen die Einsetz- und Durchschlagsspannungen hin zu größeren Werten. Die Amplituden der Entladungsimpulse sowie deren Aufttrittshäufigkeit sind geringer [15, 27].

Koronaentladungen unter Berücksichtigung von Zeitverzug und Wiederkehrzeit

Wird vom gleichen Modell wie bei der inneren Entladung ausgegangen, müssen ebenfalls die Bedingungen des Überschreitens einer gewissen Feldstärke sowie das Vorhandensein eines Startelektrons erfüllt sein. Um eine neue Entladung hervorzurufen muss eine minimale Spannung U_{\min} überschritten werden. Hieraus ergibt sich eine Wiederkehrzeit t_R (recovery-time).

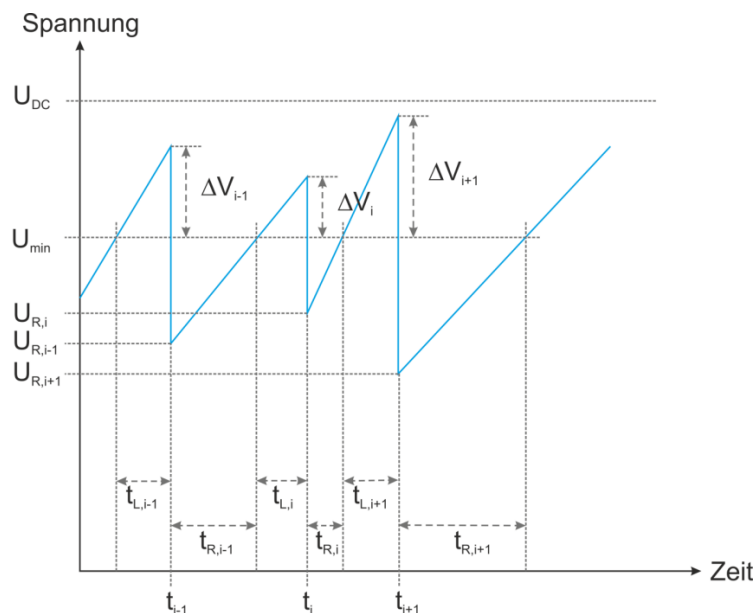


Bild 3-16: (Korona-)Entladung als Funktion der Zeit, nach [25]

In Bild 3-16 ist der Verlauf der Entladungen in Form der (idealisierten) Spannungen an der Defektstelle und den entsprechenden Zeiten angegeben. In der Grafik ist mit dem Index $i-1$ die Vorgänger-, mit dem Index i die aktuelle und $i+1$ die Nachfolgeentladung beschrieben.

Je größer die verbleibende Restspannung U_R ist, desto schneller tritt der nächste Entladungsimpuls auf [15, 27].

Einfluss von Wechselspannung, Gleichspannung positiver Polarität und Gleichspannung negativer Polarität auf eine Spitze auf Hochspannung

Die Einsetzspannung bei Wechselspannung (max. Amplitude) und bei Gleichspannung ist sehr ähnlich. Die geringfügige Erhöhung der Amplitude bei Wechselspannung ist auf den kürzeren Zeitverzug (t_L) nach Erreichen der Minimumspannung bis zur Generierung eines Startelektrons zurückzuführen. Bei negativer Polarität wird das Startelektron aus der Kathode ausgelöst und bei positiver Polarität entsteht es durch äußere Ionisation im Gasraum, was die betragsmäßig höhere Einsetzspannung (Polarisationseffekt) begründet [15, 30].

Bei **negativer Polarität** ist bezüglich der TE-Einsetzspannung kein wesentlicher Unterschied zwischen Wechsel- und Gleichspannung vorhanden, jedoch verringert sich bei Gleichspannung die Amplitude der TE-Impulse mit steigender Spannung. Ursache hierfür ist die Ausbildung von Raumladungen im Bereich der Spitze. Die sich ansammelnden negativen Ladungen fungieren wie ein Schild um die Spitze, welches das Feld schwächt und auch zum Erliegen der Teilentladungsaktivität führen kann (Abschnitt 2.5.4) [15].

Bei stark elektronegativen Gasen spielt die Raumladung eine noch größere Rolle. Es kommt zu repetierenden Entladungskreisläufen. Zu Beginn entstehen einige Entladungen hoher Amplitude gefolgt von Entladungen kleiner werdender Amplituden, bis hin zum Erlöschen der TE-Aktivitäten, bis der Vorgang nach kurzer Zeit von Neuem beginnt (Bild 3-17) [15, 22].

Bei **positiver Polarität** verhält sich die Amplitude der Teilentladungen proportional der angelegten Spannung. Entladungen bei positiver Polarität weisen größere Amplituden als bei negativer Polarität auf. Der Radius der Spitzenelektrode weist einen großen Einfluss auf. Kleinere Spitzenradien führen bei gleicher Spannung zu geringeren Amplituden [15, 27, 47].

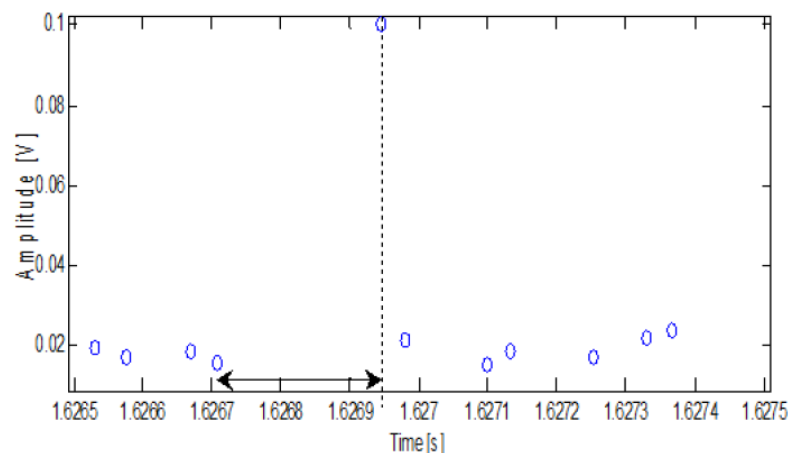


Bild 3-17: Wiederholende Entladungen bei Spitze auf Hochspannung [15]

Einfluss von Wechselspannung, Gleichspannung positiver Polarität und Gleichspannung negativer Polarität auf eine Spitze auf Erdpotential

Darüber hinaus sind die auftretenden Effekte polaritätsvertauscht, das heißt aufgrund der anderen Positionierung der Spitze entstehen bei positiver Polarität der Hochspannung die gleichen Effekte wie bei negativer Polarität und einer Spitze auf Hochspannung [15, 27].

4 Messaufbau und Durchführung

4.1 Messaufbau

4.1.1 Teilentladungsmessung

Die Teilentladungsmessung wurde in Anlehnung an die konventionelle TE-Messung nach IEC 60270 durchgeführt. Es wurde in dieser Arbeit ein Messkreis mit Hilfe des Messvierpols CPL 542A der Firma Omicron in Serie zum Koppelkondensator verwendet. Auftretende Teilentladungen wurden über die MPD 600 und die MCU 502, ebenfalls von Omicron, detektiert. Die Spannung am Prüfling wurde über einen ohmschen Teiler gemessen. Der Prüfaufbau ist in Bild 4-1 ersichtlich und die entsprechenden Spezifikationen sind Tabelle 2 zu entnehmen [16, 36].

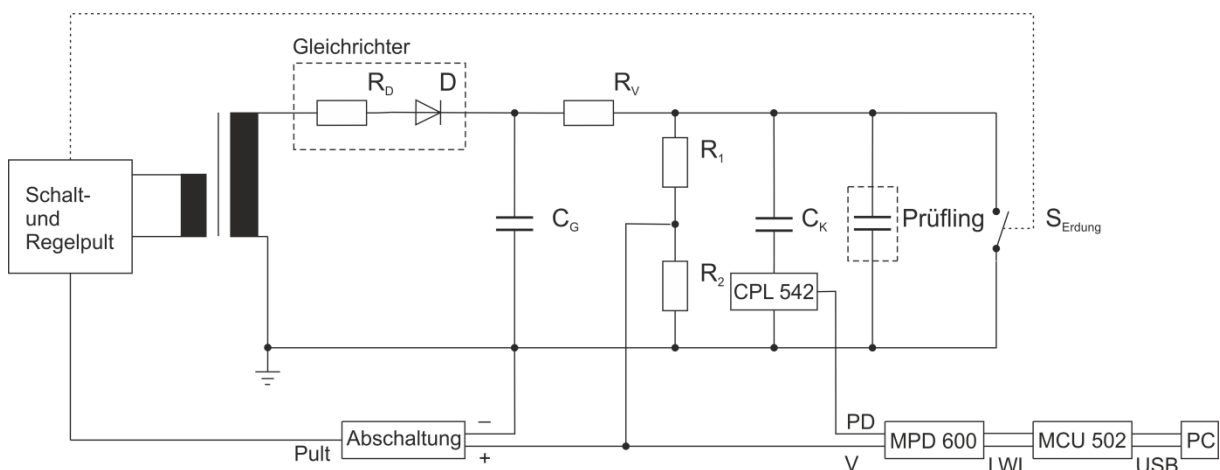


Bild 4-1: Messaufbau, nach [16, 36]

Da aufgrund der hohen gespeicherten Energie in dem Glättungskondensator C_g ein Durchschlag im Prüfling durch das Schalt- und Regelpult der Firma Messwandler-Bau GmbH Bamberg nicht erkannt wurde, musste eine zusätzliche Abschaltung integriert werden. Die Spezifikation und Beschreibung der Abschaltung ist dem Anhang A3 zu entnehmen.

Zur Messung der Teilentladungen wurde eine Bandbreite von $\Delta f = 3$ MHz bei einer Mittenfrequenz von $f_c = 1,6$ MHz verwendet. Der Grundstörpegel lag im relevanten Messbereich in der Regel bei $Q_{\text{stör.}} \leq 1$ pC.

Tabelle 2: Technische Daten des Prüfaufbaus, nach [16, 48] und Typenschilder

Bezeichnung		Hersteller	Spezifikationen	
Schalt und Regelpult		Messwandler-Bau GmbH Bamberg	Anschlussspannung	220 V, 50 Hz
			Durchgangsleistung	5 kVA
Einphasen- Wechselspannungs- Prüftransformator TEO 100/10		Messwandler-Bau GmbH Bamberg	Übersetzung	$\frac{2 \times 220 \text{ V}}{100 \text{ kV}}$
			Leistung	5 kVA
			Kurzschlussspannung	5 %
Gleichrichter Diode		Messwandler-Bau GmbH Bamberg	Widerstand	500 k Ω
			Nennstrom	5 mA
			Sperrspannung	140 kV
Vorwiderstand	R_v	Messwandler-Bau GmbH Bamberg	Widerstand	50 k Ω
Messwiderstand	R_1	Messwandler-Bau GmbH Bamberg	Widerstand	140 M Ω
	R_2	Drahtwiderstand ¹	Widerstand	68 k Ω , 210 k Ω
Glättungskondensator	C_g	Isofarad Ltd.	Kapazität	10 nF
Koppelkondensator	C_k		Kapazität	1,2 nF

4.1.2 Prüfung des Messkreises

Zur Verifizierung des Messkreises wurden folgende Überprüfungen durchgeführt [30, 36]:

- Teilentladungsfreiheit des Messkreises im relevanten Spannungsbereich.
- Ermittlung der Spannung welche zu Außenüberschlägen am Testobjekt führt.
- Spannungswelligkeit der Gleichspannung unter 3 %.
- Kalibrierung der aufgenommenen Spannung und TE-Impulse.

4.2 Messprozeduren

Für die Bestimmung der TE-Einsatzspannung, der TE-Aussetzspannung sowie der Durchschlagsspannung wurden bei verschiedenen Defekten unterschiedliche Spannungsverläufe, wie in Tabelle 3 auf Seite 39 dargestellt, verwendet.

Bei der Spitze auf Hochspannung wurde die Einsatz- und Aussetzspannung mit dem Kriterium von drei Entladungen in 30 Sekunden bei einer Haltezeit von insgesamt 30 Sekunden ermittelt. Zur Ermittlung der Durchschlagsspannung wurde die Spannung linear mit 0,6 kV/s gesteigert. Im Gegensatz hierzu wurde diese bei den anderen Defekten in Stufen zu je 0,5 kV, bei erwarteten Durchschlagsspannungen bis 50 kV bzw. zu je 1 kV ab einer erwarteten Durchschlagsspannung über 50 kV, mit einer Haltezeit von einer Minute ermittelt.

¹ Für den Widerstand wurden standardisierte Drahtwiderstände nach der E-12-Reihe kombiniert.

Dieser Unterschied in der Ermittlung der Durchschlagsspannung ergibt sich aufgrund des hohen Einflusses von Oberflächen und Raumladungen auf Anordnungen mit Grenzflächen auf nicht definierten Potentialen (Freies Potential, Partikel auf Isolatoroberfläche mit freiem Potential).

In der Literatur wird die Einsetzspannung als jene Spannung definiert, bei welcher mehr als eine Entladung innerhalb einer Minute auftreten. In dieser Arbeit wurde die Einsetzspannung schlussendlich auf drei Entladungen in 30 Sekunden festgelegt. Hierbei ist anzumerken, dass bei der Durchführung des Stufenteste jene Impulse, die im Zeitbereich der Spannungserhöhung auftreten nicht gezählt werden dürfen (Bild 4-2) [39, 42, 43].

Spannung/Entladungen

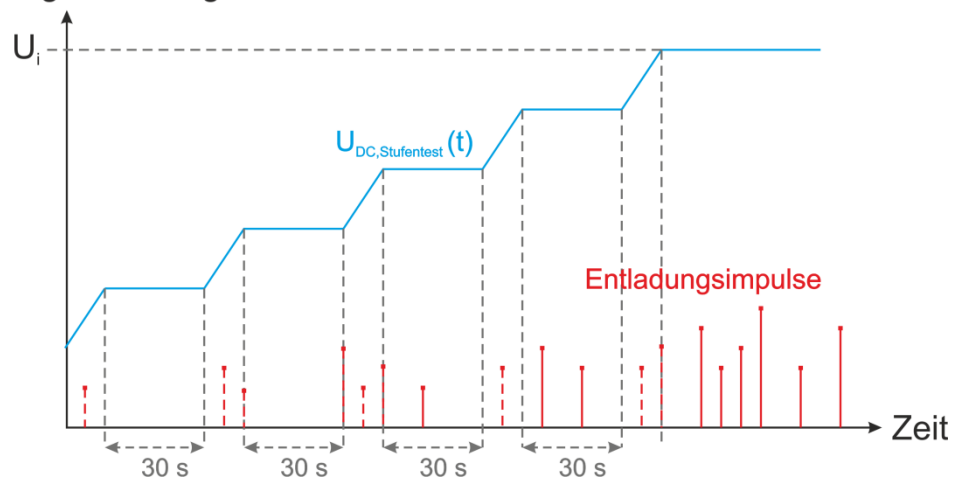


Bild 4-2: Teilentladungen beim Rampentest bis hin zur Einsetzspannung, nach [43]

Die Spannungen der Vorbelastung wurden bei 80 % der Einsetzspannung und bei 80 % der Durchschlagsspannung definiert. Diese Spannung wurde für jeweils eine halbe Stunde konstant gehalten und anschließend mit der oben beschriebenen Messprozedur fortgefahren. In jenen Fällen in denen sich über mehrere Messungen ein Einfluss der Vorbelastung ergab, wurde die Vorbelastungszeit für diese Fälle auf eine Stunde erweitert, um einen entsprechenden Vergleich zu erhalten. Darüber hinaus wurde bei den Messungen mit Vorbelastung auf die Ermittlung der Aussetzspannung verzichtet.

Tabelle 3: Messzyklen der unterschiedlichen Defekttypen

	Ohne Vorbelastung	Vorbelastung bei $0,8 U_i$	Vorbelastung bei $0,8 U_{bd}$
Spitze auf Hochspannung			
	$\Delta t = 360/30 \text{ s}, \Delta U = 0,2 \text{ kV}, \Delta U/\Delta t = 0,6 \text{ kV/s}$		
Freies Potential Partikel auf Isolator			
	$\Delta t = 30 \text{ s}, \Delta U = 0,2 \text{ kV}, \Delta t_{bd} = 60 \text{ s}, \Delta U_{bd} = 0,5/1 \text{ kV}$		

4.3 Prüfbjekte

4.3.1 Testzellen

Zur Simulation der in HVDC GIS/GIL auftretenden Defekte wurden spezielle Testzellen verwendet, welche mit unterschiedlichen Gasen unter variablem Druck (bis zu 5 bar) gefüllt werden können. Die Defekte wurden durch einen variablen internen Aufbau realisiert.

In der „kleinen Testzelle“ wurden die Defekte der „Spitze auf Hochspannung“ (Schlagweite: 17 mm) und des „freien Potentials“ (Schlagweite oben: 1 mm, Schlagweite unten: 7 mm) realisiert (Bild 4-3). Der zylindrische Gasraum von rund 80 cm^3 der kleinen Testzelle weist einen Radius von $r = 2,5 \text{ cm}$ und eine Höhe von $h = 4 \text{ cm}$ auf.

Bei der „großen Testzelle“ wurden die Defekte „Spitze auf Hochspannung“ (Schlagweite: 10 mm, 17 mm und 30 mm) und „metallisches Partikel auf einer Isolatoroberfläche“ realisiert (Bild 4-4). Die große Testzelle weist einen Gasraum von rund 2000 cm^3 bei einem Radius von $r = 7 \text{ cm}$ und einer Höhe von $h = 12,5 \text{ cm}$ auf. Die Auslegung der großen Testzelle ist dem Anhang A2 zu entnehmen.

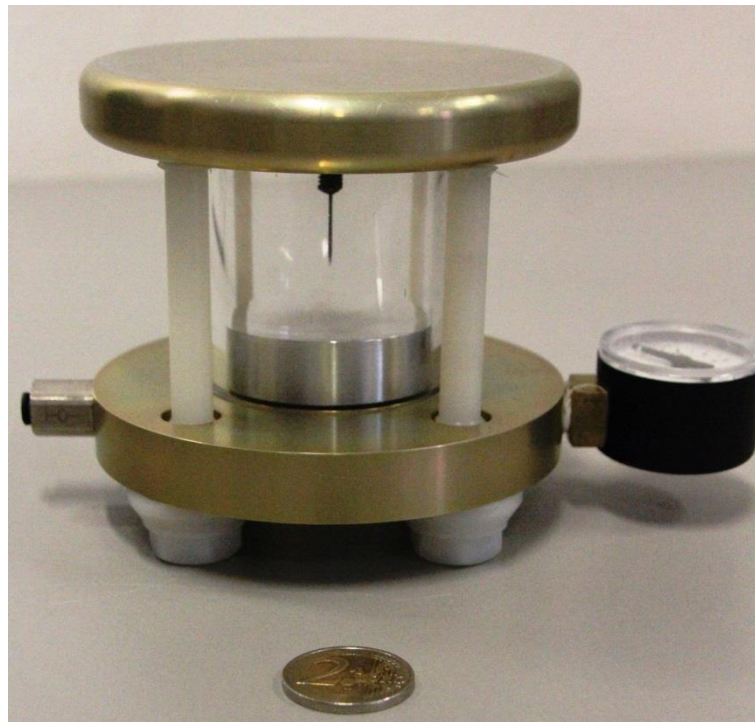


Bild 4-3: Kleine Testzelle mit einer Spitze auf Hochspannung



Bild 4-4: Große Testzelle mit einer Spitze auf Hochspannung

4.3.2 Untersuchte Defekte

Spitze auf Hochspannung

Als Spitzenelektroden wurden Wolfram-Nadeln verwendet, da diese hohen thermischen Belastungen standhalten. Sie weisen einen Schaftdurchmesser von 0,8 mm, einen mittleren Spitzenradius von 24,4 μm (Standardabweichung 4 μm) und einen mittleren Öffnungswinkel von 14,72 $^\circ$ (Standardabweichung 0,5 $^\circ$) auf. Die Mikroskopie einer Spitzenelektrode ist in Bild 4-5 ersichtlich.

Um sicher zu stellen, dass eine mögliche Abnutzung der Wolframnadeln keinen Einfluss auf die Messung hat wurde sowohl die Abnutzung unter dem Mikroskop betrachtet, als auch eine Messreihe mit möglichen Abweichungen der Einsatzspannung nach mehrfachen Durchschlägen erstellt.

Bei der Betrachtung der Aufnahmen mit einem Mikroskop lassen sich Abtragungen der Spitze feststellen. Diese haben jedoch keinen merkbaren Einfluss auf die Einsetz- bzw. Durchschlagsspannung der Anordnung.

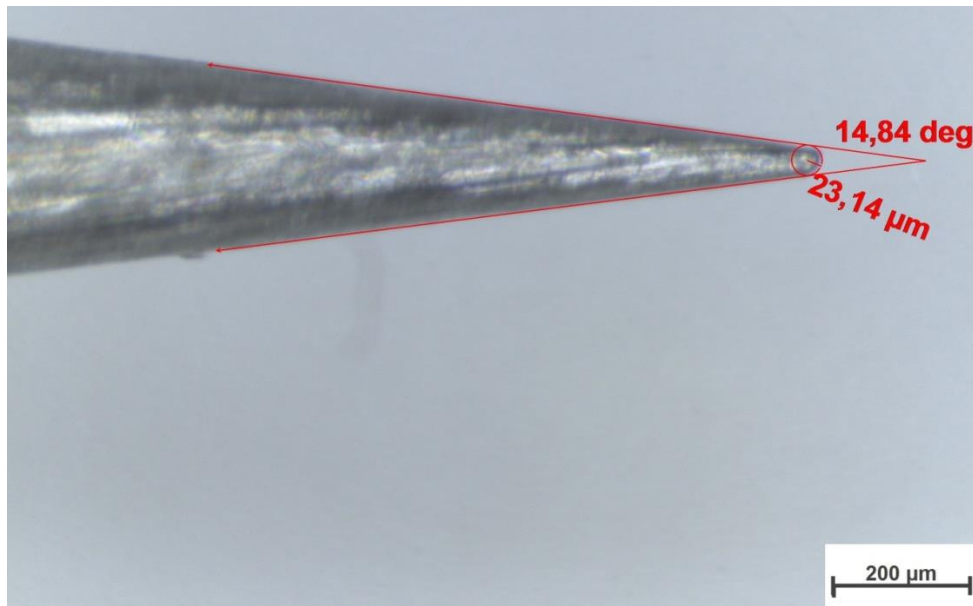


Bild 4-5: Mikroskopie einer Wolframnadel

Um eine Abschätzung der Durchschlagsspannung zu erhalten wird oft auf vereinfachte Modelle, Näherungsformeln oder bekannte und gut fundierte Messergebnisse zurückgegriffen. Eine gängige Methode ist die Abschätzung der maximalen Feldstärke. Dies kann beispielsweise mit Hilfe des Ausnutzungsfaktors nach Schwaiger geschehen [18].

Der Ausnutzungsfaktor nach Schwaiger gibt das Verhältnis der Feldstärke E_0 einer homogenen Anordnung zu der in einer inhomogenen Anordnung maximal auftretenden Feldstärke E_{max} nach der Formel (12) an. Der Ausnutzungsfaktor ist für viele Fälle bereits in Tabellen- oder Diagrammform festgehalten und kann somit einfach abgelesen werden. Alternativ kann dieser auch berechnet werden. Abhängig von der Geometrie der Inhomogenität errechnet sich der Ausnutzungsfaktor η_s sowie der Geometriefaktor p nach unterschiedlichen Formeln [18, 49].

Formel (13) gibt die Berechnung für Spitze-Platten-Anordnungen an, wobei s der Schlagweite und r dem Spitzenradius entspricht [49].

$$E_{max} = \frac{1}{\eta_s} * E_0 \quad (12)$$

$$\eta_s = \frac{\ln(\sqrt{p} + \sqrt{p-1})}{\sqrt{p*(p-1)}} \quad \text{mit} \quad p = \frac{s}{r} + 1 \quad (13)$$

Für die in der Arbeit untersuchten Geometrien ergaben sich die in Tabelle 4 dargestellten Ausnutzungsfaktoren.

Tabelle 4: Ausnutzungsfaktor nach Schwaiger

Geometrie		Ausnutzungsfaktorrechnung		
s	r	ρ	η _s	1/η _s
mm	μm			
10	25	401	0,0092	108,6
17	25	681	0,0058	172,1
30	25	1201	0,0035	283,2

Freies Potential

Die Testzelle in Bild 4-6 diene der Simulation des Defekts des freien Potentials. Hierbei wurden die Abstände so gewählt, dass zwischen der Hochspannungselektrode (Spitze) und der ihr zugewandten Seite des freien Potential (Spitze) die Schlagweite $s_{\text{oben}} = 1 \text{ mm}$ und zwischen der Elektrode auf Erdpotential (Parabelfläche) und der ihr zugewandten Seite des freien Potentials (Kugel) die Schlagweite $s_{\text{unten}} = 7 \text{ mm}$ betrug. Die Kugelelektrode des freien Potentials weist einen Radius von $r_{\text{Kugel}} = 10 \text{ mm}$ auf.

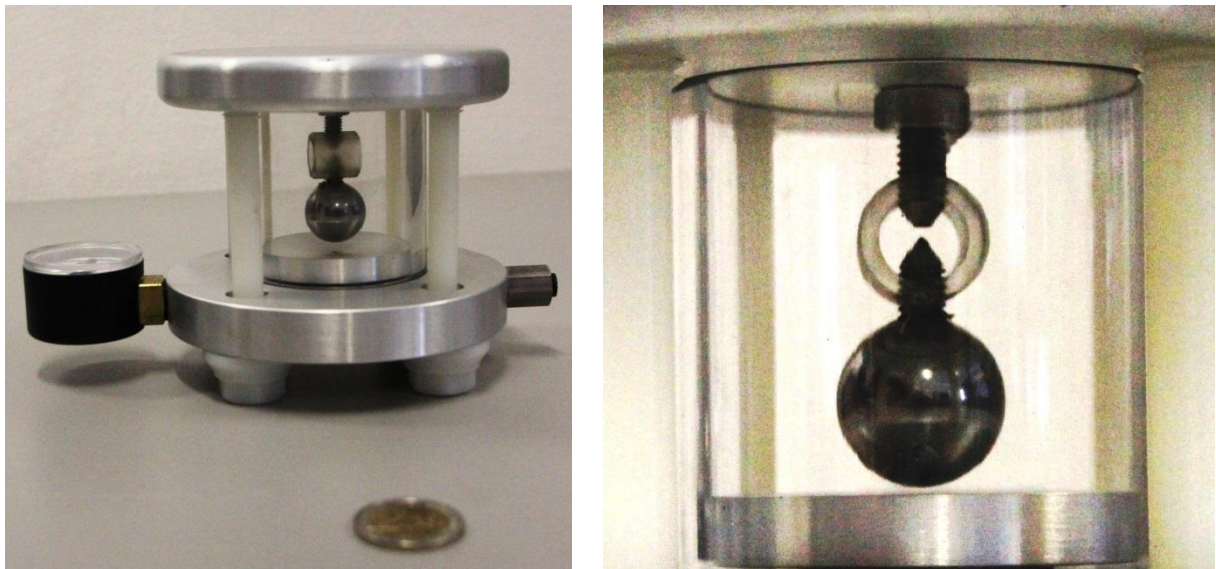


Bild 4-6: Kleine Testzelle mit freiem Potential

Metallischer Partikel auf Isolatoroberfläche

Der Defekt des metallischen Partikels auf Hochspannung ist in Bild 4-7 ersichtlich. Als Isolator wurde ein Gießharzisolator mit einer Höhe von $h = 50 \text{ mm}$ und einem Radius von $r = 30,5 \text{ mm}$ verwendet. Ein Querschnitt durch den verwendeten Isolator ist Bild 4-8 zu entnehmen. Um zu verhindern, dass das Partikel ohne Zutun eines elektrischen Feldes vom Isolator rollt, wurde ein 1 cm breiter Steg in die Oberfläche gefräst. Das Partikel wurde über eine entsprechende Öffnung im Deckel der Testzelle auf die abgeflachte Stelle des Isolators aufgebracht. Die Mitte des Partikels wurde im Abstand von $d = 10 \text{ mm}$, $d = 25 \text{ mm}$ und $d = 40 \text{ mm}$, von der Hochspannungselektrode aus gemessen positioniert. Als Partikel diente ein Wolfram-Drahtstück der Länge $l = 8 \text{ mm}$ und mit dem Radius $r = 0,4 \text{ mm}$.

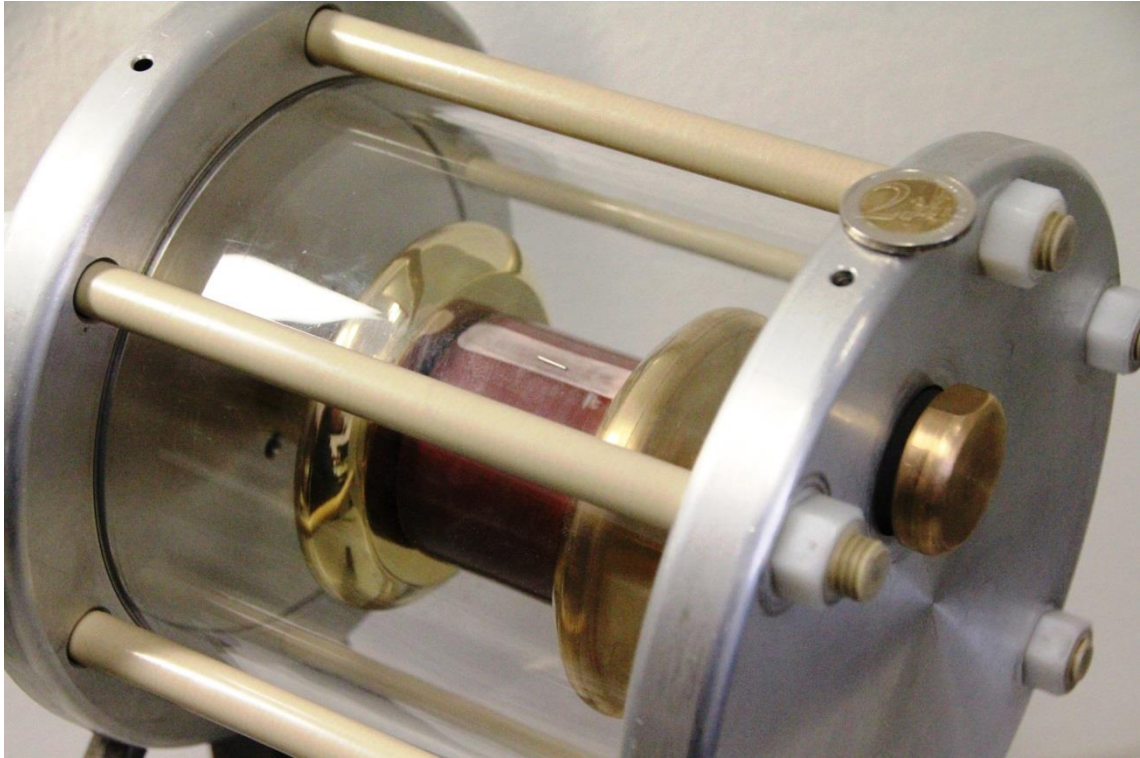


Bild 4-7: Große Testzelle mit metallischem Partikel auf Isolatoroberfläche



Bild 4-8: Querschnitt durch den Giesharzisolator

4.4 Durchgeführte Messungen

In Tabelle 5 sind die im Zuge der Arbeit durchgeführten Messungen schematisch dargestellt. An dieser Stelle sei auf die nachfolgenden Bemerkungen zu den einzelnen Variationen verwiesen.

Tabelle 5: Übersicht über die durchgeführten Messungen

Variation	Hauptuntersuchungen			Orientierende Untersuchungen	
	Spannung	Isoliergas	Gasdruck	Vorbelastung	Schlagweite
Spitze auf Hochspannung	✓	✓	✓	✓	✓
Freies Potential	✓	✓	✓	✓	
Partikel auf Isolator	✓	✓	✓	✓	✓

Spannungsvariation:

Hierbei wurde zwischen hoher Gleichspannung mit positiver und negativer Polarität unterschieden. Zur besseren Beurteilung des Defekts wurden stichprobenartig ausgewählte Messungen bei hoher Wechsellspannung durchgeführt.

Variation des Isoliergases:

Als Isoliermedium wurde Stickstoff und Schwefelhexafluorid verwendet. Zur Orientierung wurden weiter einzelne Messungen bei Umgebungsluft getätigt. Bei dem Defekt des metallischen Partikels auf einem Isolator ist auf die Messung mit Umgebungsluft verzichtet worden.

Variation des Gasdrucks:

Der relative Druck bei Umgebungsluft belief sich auf 0 bar. Bei Stickstoff wurde der relative Druck zwischen 1 und 5 bar und bei Schwefelhexafluorid zwischen 1 und 3 bar variiert. Es wurden nicht bei allen Defektvariationen bei allen Drücken Messungen getätigt, da in gewissen Fällen die Spannungsfestigkeit des Testaufbaus erreicht wurde.

Variation der Vorbelastung:

Bei der Variation der Vorbelastung wird zwischen „ohne Vorbelastung“, Belastung bei 80 % der Einsatzspannung für 0,5 Stunden bzw. für 1 Stunde und Belastung bei 80 % der Durchschlagsspannung für 0,5 Stunden unterschieden. Nicht bei jeder Variation wurden alle Vorbelastungen angewandt.

Variation der Schlagweite:

Bei dem Defekt „Spitze auf Hochspannung“ wurde die Schlagweite zwischen Spitzen- und Platten-Elektrode variiert. Die Schlagweiten lagen bei 10 mm, 17 mm und 30 mm. Bei dem Defekt „Metallisches Partikel auf einer Isolatoroberfläche“ wurde die Partikelposition variiert. Das 1. Drittel beschreibt die Mitte des Partikels bei 10 mm, das 2. Drittel bei 25 mm und das 3. Drittel bei 40 mm, gemessen von der Hochspannungselektrode.

Alle nachfolgenden Druckangaben beziehen sich auf den relativen Umgebungsdruck und werden in bar angegeben.

5 Messergebnisse und Interpretation

5.1 Übersicht

Es wurden die Defekte „Spitze auf Hochspannung (SHV)“, „freies Potential (FP)“ sowie „metallischer Partikel auf einer Isolatoroberfläche (PAI)“ untersucht. Zu den in den Hauptuntersuchungen betrachteten Variationen zählen der Einfluss der Spannungspolarität, der Unterschied zwischen Stickstoff und Schwefelhexafluorid sowie der Einfluss des Gasdrucks. Als orientierende Messungen für weitere Untersuchungen wurden Messungen unter Variation der Vorbelastung und der Schlagweite bzw. Partikelposition durchgeführt.

Die im Zuge dieser Arbeit untersuchten Defekte konnten unter den gegebenen Laborbedingungen alle detektiert werden. Es wurde bei jeder Messvariation ein deutlicher Unterschied zwischen der TE-Einsatzspannung und der Durchschlagsspannung festgestellt. Die Durchschlagsspannungen lagen im Bereich zwischen dem 2- und 16-fachen der Einsatzspannung.

Exemplarisch wird auf Bild 5-1 verwiesen, in welchem die untersuchten Defekte bei Stickstoff und positiver Polarität der Spannung gegenübergestellt sind.

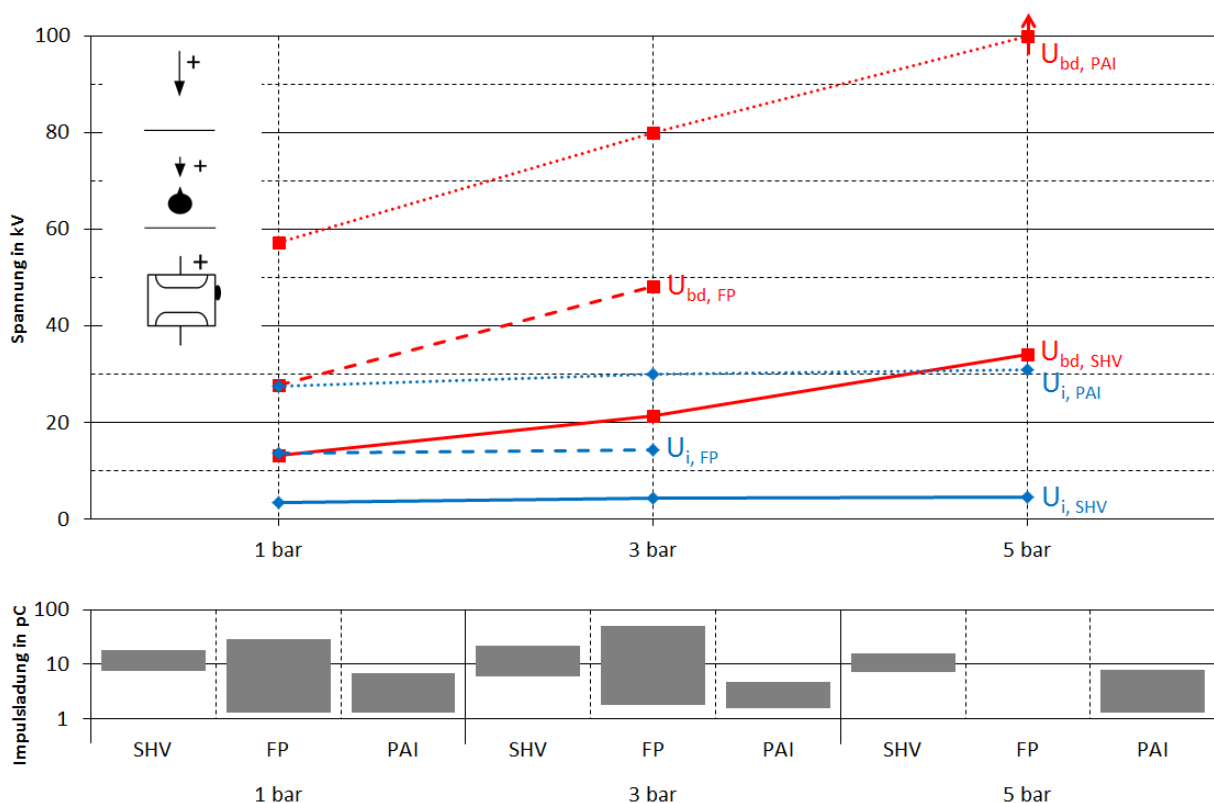


Bild 5-1: TE-Einsatzspannung, Durchschlagsspannung und Impulshöhe der Entladungen bei TE-Einsatzspannung für die unterschiedlichen Defekte bei Stickstoff und Gleichspannung positiver Polarität in Abhängigkeit vom Gasdruck

In Tabelle 6 sind die Messergebnisse der Untersuchungen angeführt. Die grau unterlegten Werte entsprechen den Hauptuntersuchungen dieser Arbeit.

Darüber hinaus wurden stichprobenartig Messungen bei Wechselspannung, welche in der Tabelle nicht enthalten sind, durchgeführt (Abschnitt 5.5.1). Die einzelnen Messergebnisse, deren Mittelwerte und Standardabweichungen sind dem Anhang A1 zu entnehmen.

Beim freien Potential unter Verwendung von SF₆ bei 2 bar sowie beim metallischen Partikel auf der Isolatoroberfläche unter Verwendung von N₂ bei 5 bar und unter Verwendung von SF₆ bei 1 bar kam es zu vereinzelt Außenüberschlägen an den entsprechenden Testzelle. Bei letzterem konnte darüber hinaus, aufgrund der Beschränkung des Stelltransformators bei negativer Polarität der Spannung kein Durchschlag erzielt werden.

Bei den Messungen im Labor ergab sich in der Regel ein Grundrauschpegel welcher 1 pC nicht überschritt. Lediglich kurzzeitig ergaben sich größere Störpegel, welche aber nie über 5 pC lagen. Allgemein und im Besonderen unter Verwendung von SF₆ ist zu bemerken, dass die Amplituden der Entladungen – vor allem im Bereich der Einsatzspannung – sehr geringe Werte annahmen.

5.2 Spitze auf Hochspannung

5.2.1 Vergleich der Teilentladungseinsetzspannung und der Durchschlagsspannung

Einfluss des Isoliergases und des Gasdrucks

Beim Vergleich der beiden Isoliermedien – Stickstoff und Schwefelhexafluorid – ist die deutlich höhere Spannungsfestigkeit von SF₆ bemerkbar. In Bild 5-2 ist ersichtlich, dass die Spannungsfestigkeit von SF₆ bei den getätigten Messungen um den Faktor 2,5 bis 4 höher ist als bei N₂. Grund hierfür ist, dass SF₆ mit 8,84 kV/mm*bar gegenüber N₂ mit 3,3 kV/mm*bar eine wesentlich höhere elektrische Festigkeit aufweist [50]. Ein weiteres zu berücksichtigendes Phänomen ist die starke Elektronegativität von SF₆.

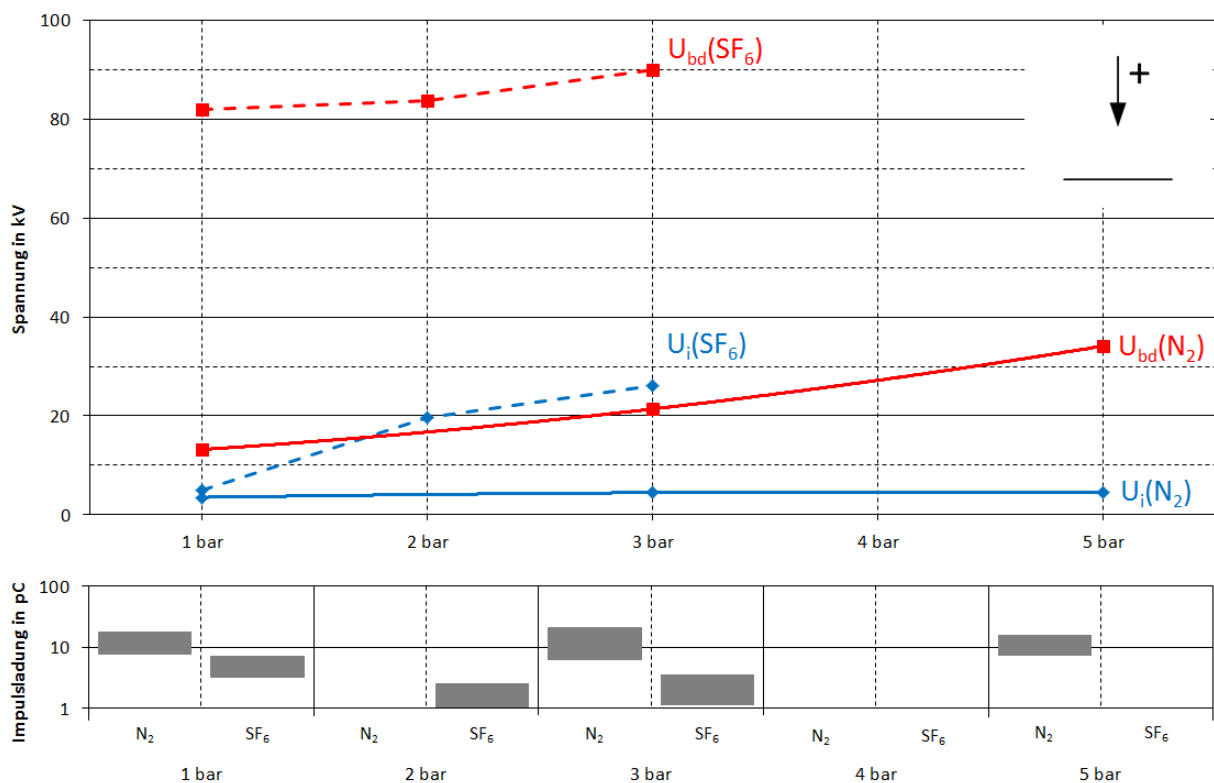


Bild 5-2: TE-Einsetzspannung, Durchschlagsspannung und Impulshöhe der Entladungen bei TE-Einsetzspannung einer Spitze auf Hochspannung für Stickstoff und Schwefelhexafluorid bei Gleichspannung positiver Polarität in Abhängigkeit vom Gasdruck (s = 10 mm)

Die Untersuchungen zeigen, dass der Defekt über den gesamten Messbereich detektierbar ist. Die Detektierbarkeit ist abhängig vom Gasdruck und dem verwendeten Isoliermedium. Bei steigendem Druck nimmt die Detektierbarkeit bei Verwendung von N₂ zu und bei SF₆ ab.

Der Unterschied zwischen der Einsetz- und Durchschlagsspannung ist immer groß genug um einer sichere Detektion zu gewährleisten. Die Werte der Abstände zwischen U_i und U_{bd} sind für Stickstoff in Tabelle 7 und für Schwefelhexafluorid Tabelle 8 angeführt.

Tabelle 7: Unterschiede in der Detektierbarkeit der SHV bei Verwendung von N_2

	HVDC+	HVDC-
Druck	D	D
Bar	p. u.	p. u.
1	3,7	3,9
3	4,8	10,9
5	7,4	11,6

Tabelle 8: Unterschiede in der Detektierbarkeit der SHV bei Verwendung von SF_6

	HVDC+	HVDC-
Druck	D	D
Bar	p. u.	p. u.
1	16,6	16,1
2	4,3	8,9
3	3,5	-

Die Veränderung der Detektierbarkeit resultiert aus dem unterschiedlichen druckabhängigen Verlauf der Spannungen. Bei N_2 weist die Durchschlagsspannung und bei SF_6 die Einsetzspannung eine stärkere Abhängigkeit vom vorherrschenden Gasdruck ab. Gänger beschreibt in [20], dass die Durchschlagsspannung bei Gasen eine größere Druckabhängigkeit aufweist. Dem entgegen steht bei SF_6 dessen Elektronegativität. Diese führt dazu, dass bei steigendem Druck eine größere Menge an Gasmolekülen mit der Fähigkeit Elektronen an sich zu binden im gleichbleibenden Gasvolumen befindlich sind. Somit treten die Bedingungen für das Einsetzen des Generationenmechanismus erst bei höheren Spannungen auf (Abschnitt 2.4.2). Es können im unteren Spannungsbereich mehr freie Elektronen angelagert als durch Ionisation bereitgestellt werden.

Bei N_2 ist eine prozentuell stärkere Druckabhängigkeit der Durchschlagsspannung als bei SF_6 gegeben. Die in [51] experimentell ermittelten Paschen-Kurven für N_2 und SF_6 beschreiben dieses Verhalten. Diese Eigenschaft hat einen Einfluss auf die Detektierbarkeit (Bild 5-2). Bei einer Erhöhung des Drucks von einem auf drei Bar und einer Schlagweite von 10 mm verdoppelt sich die Spannungsfestigkeit von N_2 in der homogenen Anordnung. Bei SF_6 steigt diese um den Faktor 1,75 [51].

Einfluss der Polarität

Bild 5-3 und Bild 5-4 zeigen, dass die Spannungspolarität auf die Einsetzspannung nur einen geringen Einfluss hat.

Aus der Literatur ist bekannt, dass sich die Einsetzspannung negativer Polarität betragsmäßig deutlich unterhalb von jener bei positiver Polarität befinden sollte (Abschnitt 2.4.5). Bei den vorliegenden Messungen konnte dieser Effekt nicht eindeutig nachgewiesen werden.

Bei N_2 gibt es neben den Bereichen, in denen die Einsetzspannung negativer Polarität unterhalb von jener bei positiver Polarität liegt, auch einen Bereich in der sie darüber liegt.

Die Durchschlagsspannung negativer Polarität lag bei Verwendung von N_2 sowie auch bei SF_6 als Isoliermedium deutlich über der Durchschlagsspannung positiver Polarität. Begründet ist dies in der Beeinflussung der elektrischen Feldverteilung durch die Entladungslawinen (Abschnitt 2.4.5). Diese führen bei positiver Polarität zu einer Erhöhung des elektrischen Feldes und bei negativer Polarität zu einer Verringerung im Bereich der Spitze und über den gesamten Bereich zu einer gewissen Homogenisierung (Bild 2-7) [18].

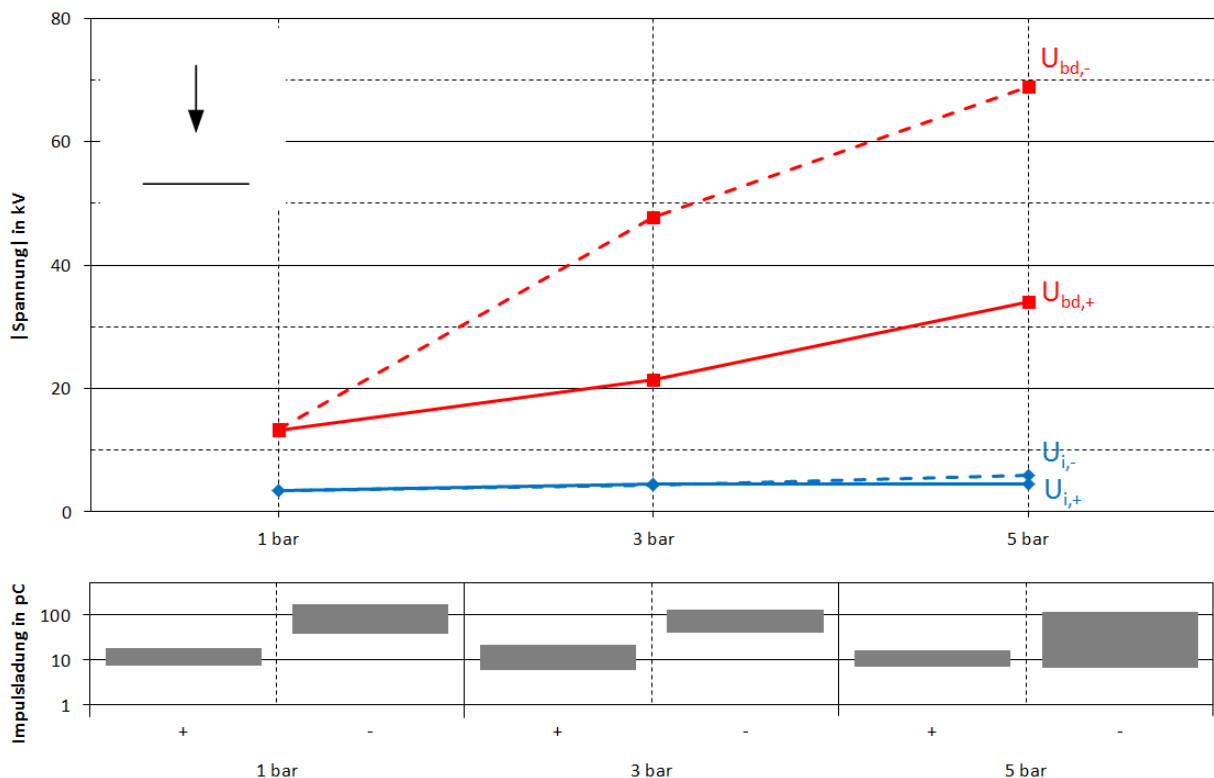


Bild 5-3: TE-Einsetzspannung, Durchschlagsspannung und Impulshöhe der Entladungen bei TE-Einsetzspannung einer Spitze auf Hochspannung für Stickstoff bei Gleichspannung positiver und negativer Polarität in Abhängigkeit vom Gasdruck ($s = 10 \text{ mm}$)

Der ausgewiesene Polaritätseffekt hängt sowohl bei N_2 als auch bei SF_6 stark vom Druck ab. Aufgrund der bereits zuvor beschriebenen starken Druckabhängigkeit der Einsetzspannung bei SF_6 ist sowohl bei positiver als auch bei negativer Polarität ein Rückgang in der Detektierbarkeit feststellbar. Dieser Effekt ist jedoch aufgrund der höheren Werte von U_{bd} bei negativer Polarität nicht so stark ausgeprägt wie bei positiver. Dem gegenüber erhöht sich die Detektierbarkeit bei N_2 bei negativer Polarität.

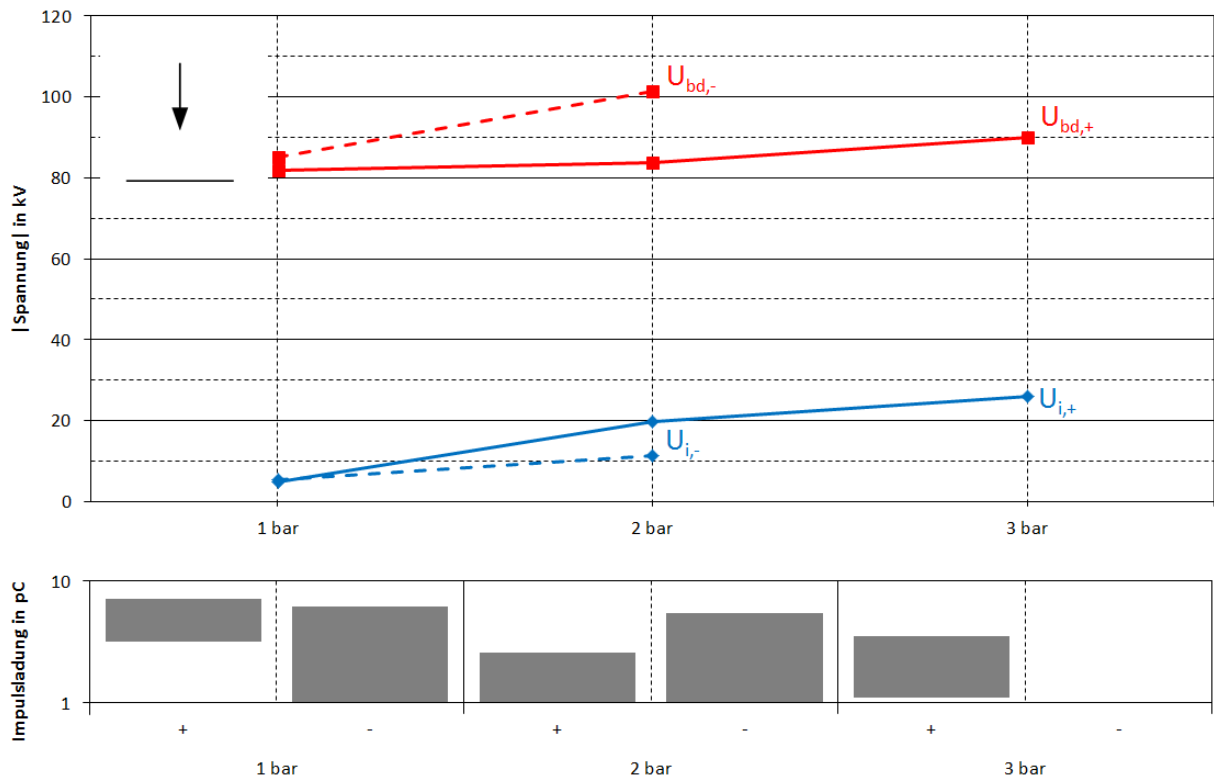


Bild 5-4: TE-Einsatzspannung, Durchschlagsspannung und Impulshöhe der Entladungen bei TE-Einsatzspannung einer Spitze auf Hochspannung für Schwefelhexafluorid bei Gleichspannung positiver und negativer Polarität in Abhängigkeit vom Gasdruck ($s = 10 \text{ mm}$)

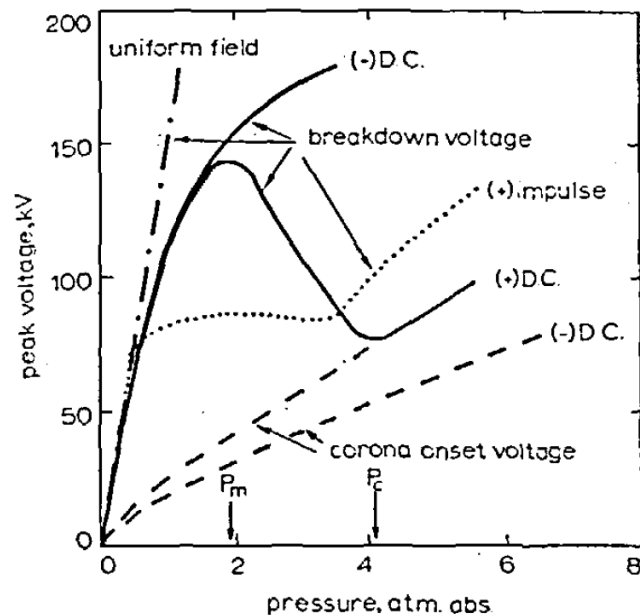


Bild 5-5: TE-Einsatzspannung und Durchschlagsspannung einer Spitze auf Hochspannung für Stickstoff bei Gleichspannung positiver und negativer Polarität sowie Blitzstoßspannung in Abhängigkeit vom Gasdruck ($s = 25 \text{ mm}$, $r = 0,8 \text{ mm}$) [52]

Bei dem Vergleich mit [52] ist bemerkbar, dass sich die Durchbruchspannung bei SF₆ im niederen Druckbereich, wie auch in dieser Arbeit, nicht bzw. nur geringfügig zwischen positiver und negativer Polarität unterscheidet (Bild 5-5). Hierbei ist weiter anzumerken, dass bei positiver Polarität der Spannung ab einem relativen Druck von $p = 3$ bar, im Gegensatz zu den im Zuge dieser Arbeit ermittelten Werte, keine Detektierbarkeit des Defekts auftritt.

5.2.2 Entladungsintensität

Die ermittelten minimalen, mittleren und maximalen Amplituden der Entladungsimpulse bei der Einsetzspannung sind Tabelle 9 zu entnehmen. Vor allem bei Verwendung von SF₆ als Isoliergas wurden sehr niedrige Pegel von unter 4 pC beobachtet.

Der Unterschied in der Amplitude der Teilentladungen im Bereich der Einsetzspannung kann wiederum auf das Isoliermedium SF₆ zurückgeführt werden. Durch seine elektronegativen Eigenschaften wird eine Vielzahl der erzeugten Startelektronen auf dem Weg von der Kathode zur Anode bereits wieder angelagert und es kann keine entsprechend räumlich ausgeprägte bzw. ladungsintensive Lawine entstehen.

Einen weiteren Einfluss auf die Amplitude der TE hat die Beschaffenheit der Elektrodenspitze. Kleinere Spitzenradien weisen geringere TE auf als vergleichsweise größere Spitzenradien. Der Einfluss des Spitzenradius wurde in dieser Arbeit nicht untersucht [15, 47].

Allgemein kann angemerkt werden, dass N₂ aufgrund der größeren Amplituden eine bessere Nachweisbarkeit der aus dem Defekt resultierenden Teilentladungen aufweist.

Tabelle 9: Amplitude der TE bei Spitze auf Hochspannung

Elektrodenabstand	mm	N ₂			SF ₆
		10	17	30	10
Q _{i,min,+}	pC	6,0	5,0	5,1	1,0
Q _{i,mean,+}	pC	9,3	21,6	15,5	2,2
Q _{i,max,+}	pC	15,4	85,7	43,5	4,0
Q _{i,min,-}	pC	6,5	5,4	17,9	1,0
Q _{i,mean,-}	pC	69,2	49,9	33,0	2,9
Q _{i,max,-}	pC	130,6	142,3	47,7	5,2

Bei N₂ und beiden Spannungspolaritäten ergab sich in vielen Fällen eine deutliche Verringerung der Impulshäufigkeit der auftretenden Entladungen. Bei manchen Messungen führte dieser Effekt dazu, dass die Entladungen bis kurz vor dem Durchschlag beinahe gänzlich zum Erliegen kamen. Besonders deutlich ist dieser Effekt bei Stickstoff mit geringen Drücken. Es wird vermutet, dass dies auf den Effekt der Koronastabilisierung zurückzuführen ist (Abschnitt 2.5.4; Bild 5-6).

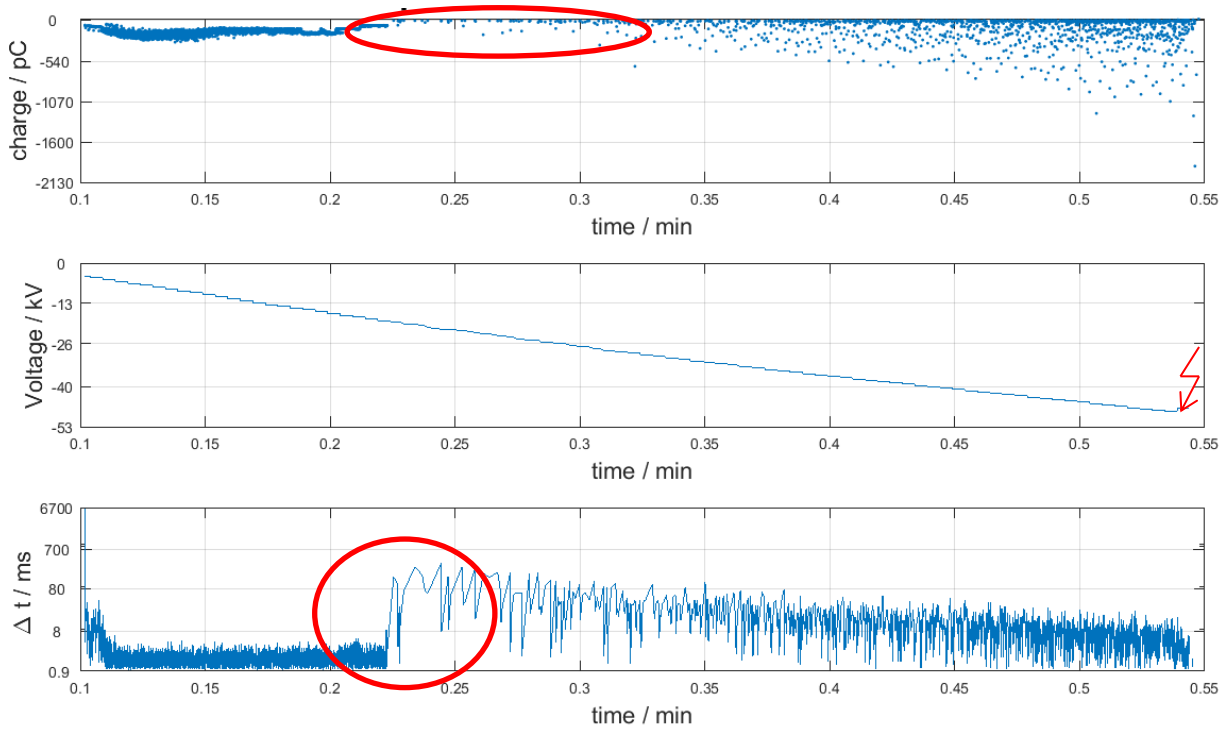


Bild 5-6: Effekt der Koronastabilisierung bei einer Spitze auf Hochspannung anhand der Entladungsamplitude und der Zeitdifferenz zwischen den Entladungen für Stickstoff unter 3 bar bei Gleichspannung negativer Polarität ($s = 10 \text{ mm}$)

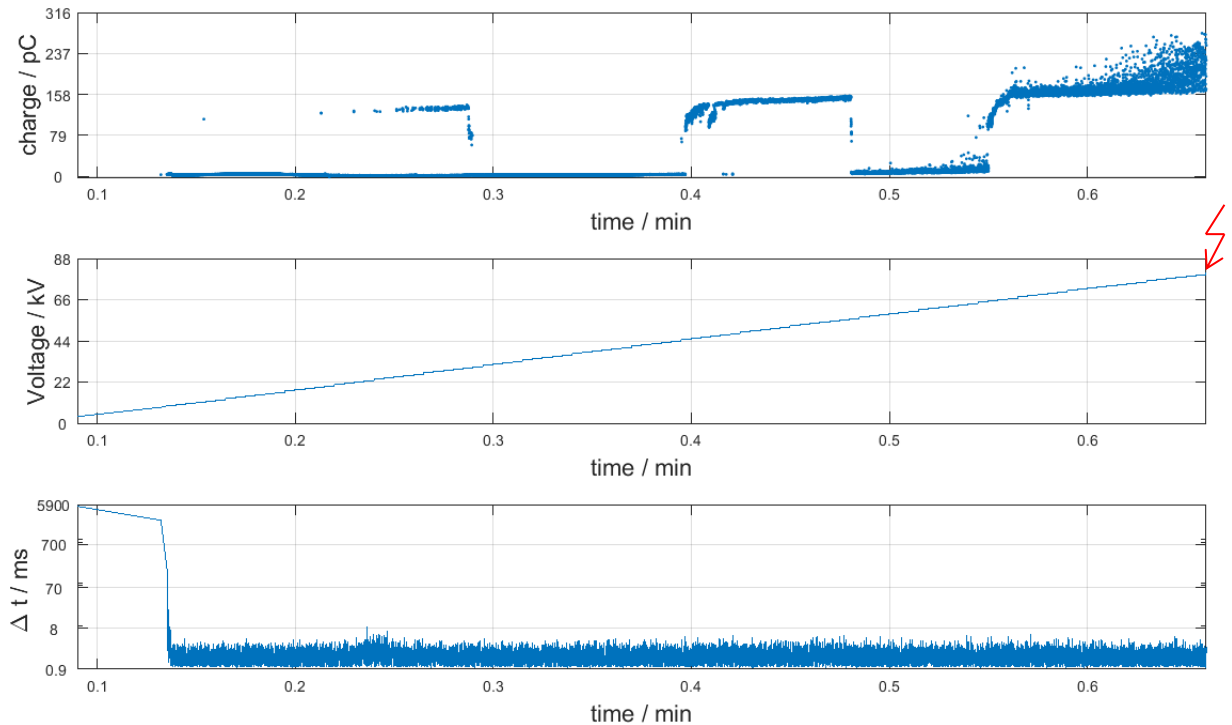


Bild 5-7: Auswirkung der Raumladungen bei einer Spitze auf Hochspannung anhand der Entladungsamplitude und der Zeitdifferenz zwischen den Entladungen für Schwefelhexafluorid unter 1 bar bei Gleichspannung positiver Polarität ($s = 10 \text{ mm}$)

Bei Betrachtung von Bild 5-7 sind Bereiche mit größerer TE-Amplitude ersichtlich. Begründet wird dieses Verhalten im Aufbau und Drift von Raumladungen. In den Bereichen hoher TE-Amplituden kommt es zum Aufbau von Raumladungen im Bereich der Spitze. Diese führen zum Erliegen der hohen Entladungen. Bei Erhöhung der Feldstärke driften diese zur Gegenelektrode und die Schirmwirkung verliert ihre Wirksamkeit. Die Amplitude der Entladungen nimmt wieder zu. Nach einer variablen Zeit hat sich erneut eine abschirmende Raumladung ausgebildet und der Vorgang startet von neuem.

5.2.3 Weitere Auffälligkeiten

Bei Spannungen negativer Polarität sind vor dem Durchschlag blau glimmende Entladungen um die Spitze der Nadelelektrode erkennbar. Bei positiver Polarität konnte dies nicht festgestellt werden. Begründet kann dies darin werden, dass auftretende Leuchterscheinungen von Geometrie, Gasdruck und der Polarität abhängen. Bei positiver Polarität treten Leuchterscheinungen vorwiegend im unteren Druckbereich und bei negativer Polarität vorwiegend im höheren Druckbereich auf [20].

Bei Verwendung von Stickstoff als Isoliermedium wurde eine Verringerung der Einsetzspannung bei Erhöhung des Drucks von $p = 1$ bar auf $p = 2$ bar registriert. Dieses Verhalten wurde bereits in [20] dokumentiert und ist in Bild 5-8 erkennbar.

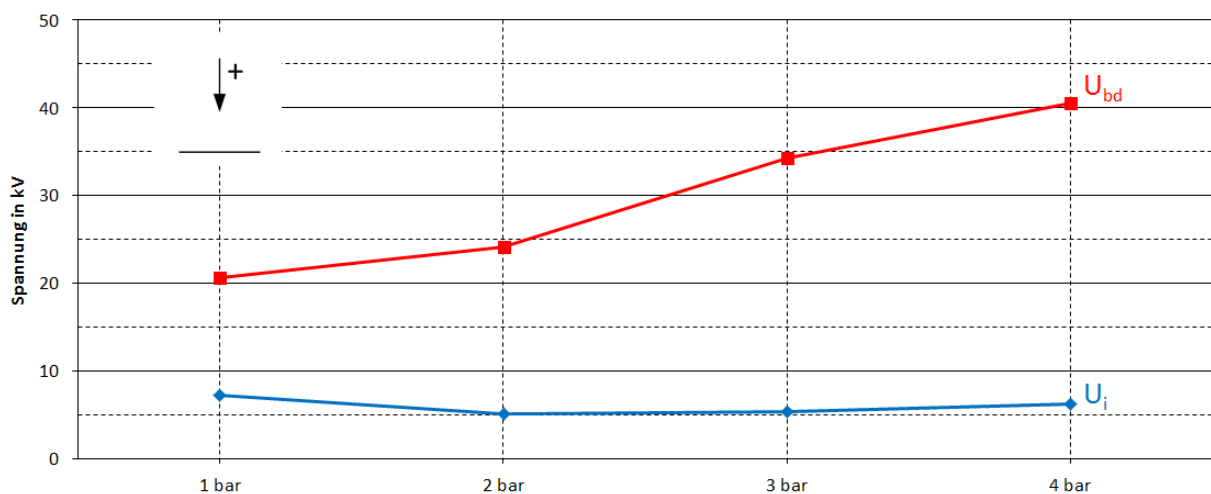


Bild 5-8: TE-Einsetzspannung und Durchschlagsspannung einer Spitze auf Hochspannung für Stickstoff bei Gleichspannung positiver Polarität in Abhängigkeit vom Gasdruck ($s = 10$ mm, KTZ)

Bei Belastung der Anordnung mit rund 80 % der Durchschlagsspannung konnte ein weiteres Phänomen beobachtet werden. Nach kurzer Zeit kommt es zur Verringerung der TE-Aktivität für einige Minuten (Bild 5-9). Ein Wiederholen dieses Phänomens im Betrachtungszeitraum tritt nicht auf. Dieses Verhalten konnte unabhängig von der Polarität der Spannung und des Drucks bei Verwendung von Stickstoff unterschiedlich stark ausgeprägt festgestellt werden.

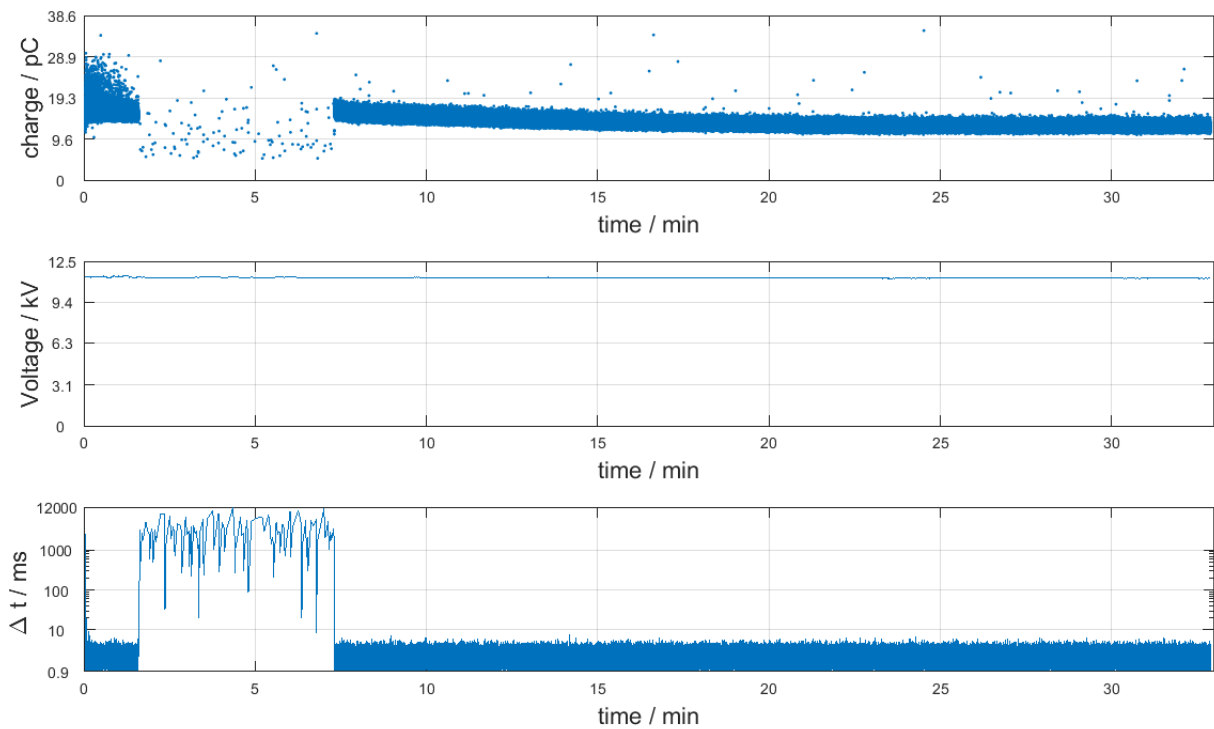


Bild 5-9: Zeitweilige Verringerung der TE-Aktivität bei einer Spitze auf Hochspannung anhand der Entladungsamplitude und der Zeitdifferenz zwischen den Entladungen für Stickstoff unter 3 bar bei Gleichspannung positiver Polarität ($s = 10 \text{ mm}$)

Darüber hinaus ist in den meisten Fällen eine Verringerung in der Amplitude über die Zeit bei konstanter Spannung bemerkbar. Dieser Effekt ist auf die Ausbildung von Raumladungen zurückzuführen (Abschnitt 2.5).

Bei der Steigerung der Spannung hin zum Durchschlag konnte ein sprunghafter Anstieg der Entladungshäufigkeit festgestellt werden (Bild 5-10). Grund hierfür ist der Übergang von dem Entladungsmechanismus nach Townsend auf den Entladungsmechanismus nach Raether (Abschnitt 2.4.4). Es kommt aufgrund der Feldverzerrung zu einer größeren Anzahl an Stößen und folglich zu einer Erhöhung der (Photo-)Ionisation und Folgelawinen. Dies führt zu einer weiteren Verstärkung der Entladungsintensität und zu einer raschen Ausbildung eines leitfähigen Kanals.

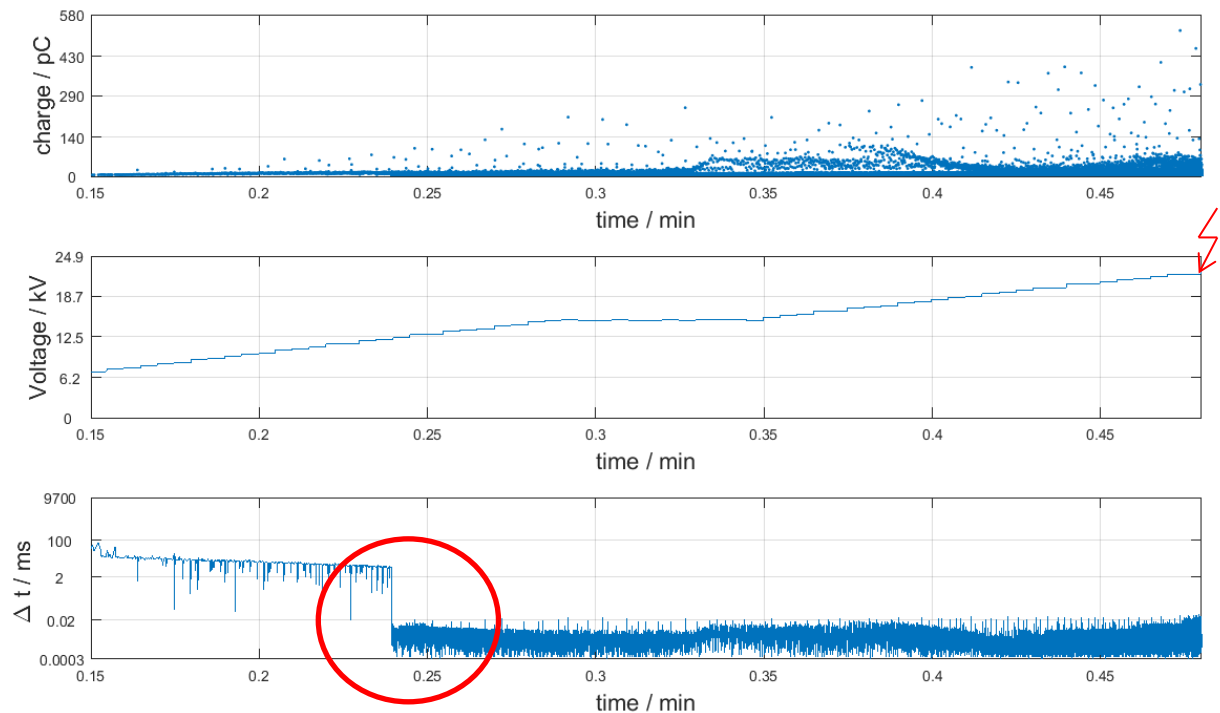


Bild 5-10: Übergang der Entladungsmechanismen bei einer Spitze auf Hochspannung anhand der Entladungsamplitude und der Zeitdifferenz zwischen den Entladungen für Stickstoff unter 2 bar bei Gleichspannung positiver Polarität ($s = 17 \text{ mm}$)

5.3 Freies Potential

5.3.1 Vergleich der Teilentladungseinsetzspannung und der Durchschlagsspannung

Einfluss des Isoliergases und des Gasdrucks

Der Vergleich zwischen N_2 und SF_6 führt bei freiem Potential zu ähnlichen Ergebnissen wie bei der Spitze auf Hochspannung. SF_6 besitzt eine deutlich höhere elektrische Festigkeit als N_2 . Darüber hinaus weisen beide Isoliergase die bereits in Abschnitt 5.2.1 beschriebenen druckabhängigen Eigenschaften auf. In Bild 5-11 sind die Kennlinien von U_i und U_{bd} für die beiden Isoliermedien gegenübergestellt.

Es ist ersichtlich, dass das freie Potential bei den dargestellten Messungen detektierbar ist. Mit steigendem Druck erhöht sich der Abstand zwischen der Einsetzspannung und der Durchschlagsspannung für Stickstoff, wohingegen er sich für Schwefelhexafluorid verringert. Die entsprechenden Werte können Tabelle 10 und Tabelle 11 entnommen werden.

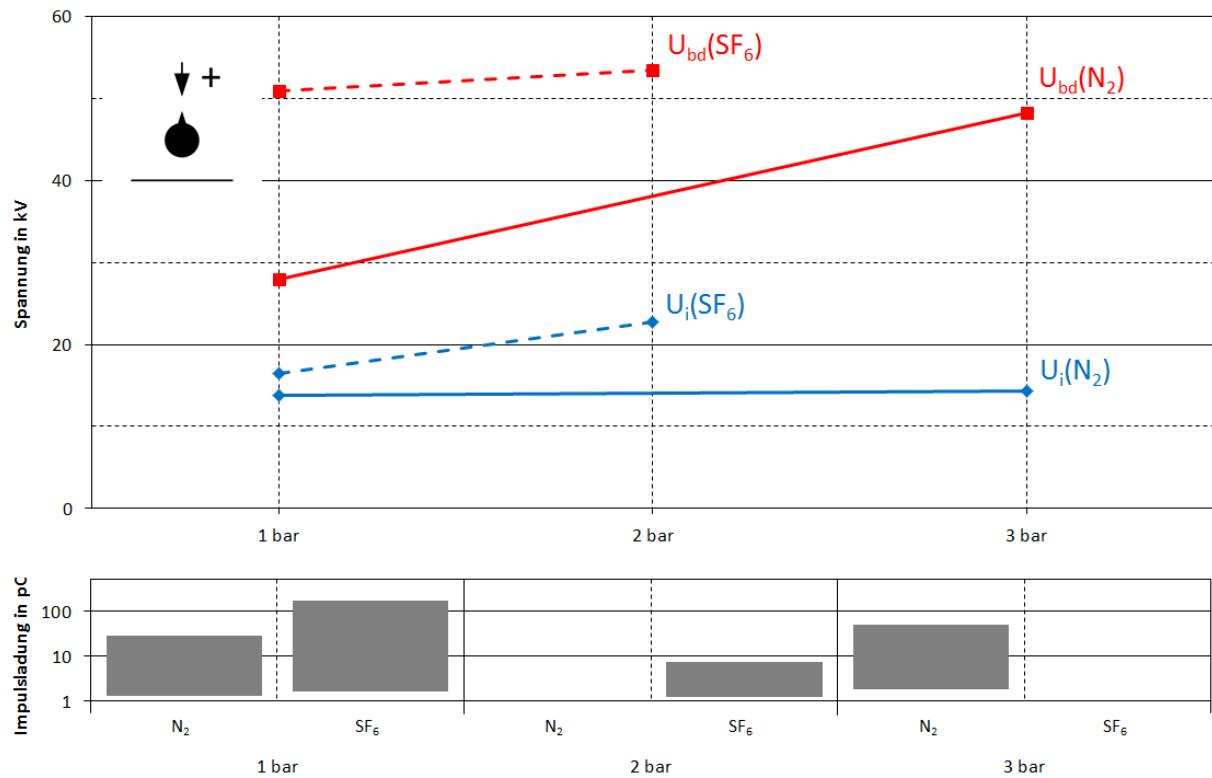


Bild 5-11: TE-Einsetzspannung, Durchschlagsspannung und Impulshöhe der Entladungen bei TE-Einsetzspannung eines freien Potentials für Stickstoff und Schwefelhexafluorid bei Gleichspannung positiver Polarität in Abhängigkeit vom Gasdruck ($r_{Kugel} = 10 \text{ mm}$, $s_{oben} = 1 \text{ mm}$, $s_{unten} = 7 \text{ mm}$)

Tabelle 10: Unterschiede in der Detektierbarkeit des FP bei Verwendung von N_2

	HVDC+	HVDC-
Druck	D	D
bar	p. u.	p. u.
1	2,1	1,9
3	3,4	2,9

Tabelle 11: Unterschiede in der Detektierbarkeit des FP bei Verwendung von SF_6

	HVDC+	HVDC-
Druck	D	D
bar	p. u.	p. u.
1	3,1	2,9
2	>2,4	>3

Einfluss der Polarität

Bei Betrachtung der TE-Einsetzspannung in Bild 5-12 ist ein gewisser Polaritätseffekt bei N_2 erkennbar. Die Spannung negativer Polarität liegt betragsmäßig über jener von positiver Polarität.

Dieser im ersten Augenblick umgekehrt erscheinende Polaritätseffekt kommt durch den geometrischen Aufbau des freien Potentials zu Stande. Hierbei sind die Hochspannungselektrode sowie die ihr zugewandte Seite des freien Potentials eine Spitzenelektrode. Der kleinere Oberflächenradius der beiden Spitzen befindet sich bei dem freien Potential. Aufgrund der negativeren Ladung des freien Potentials gegenüber der Hochspannungselektrode erscheint dies für die Feldverteilung wie eine Spitze auf Erdpotential (Bild 4-6, Abschnitt 3.3.3).

Darüber hinaus ist kein definitiver Unterschied in der Durchschlagsspannung zu erkennen. Auch hier ist die Begründung dem geometrischen Aufbau zu entnehmen. Aufgrund der Anordnung von Kugel-Parabelfläche entstehen quasihomogene Feldverhältnisse. Durch die TE zwischen den beiden Spitzen lädt sich die Kugelelektrode und es kommt beim Erreichen einer gewissen Ladung der Kugel, unabhängig von der Polarität der Spannung zu einem Durchschlag.

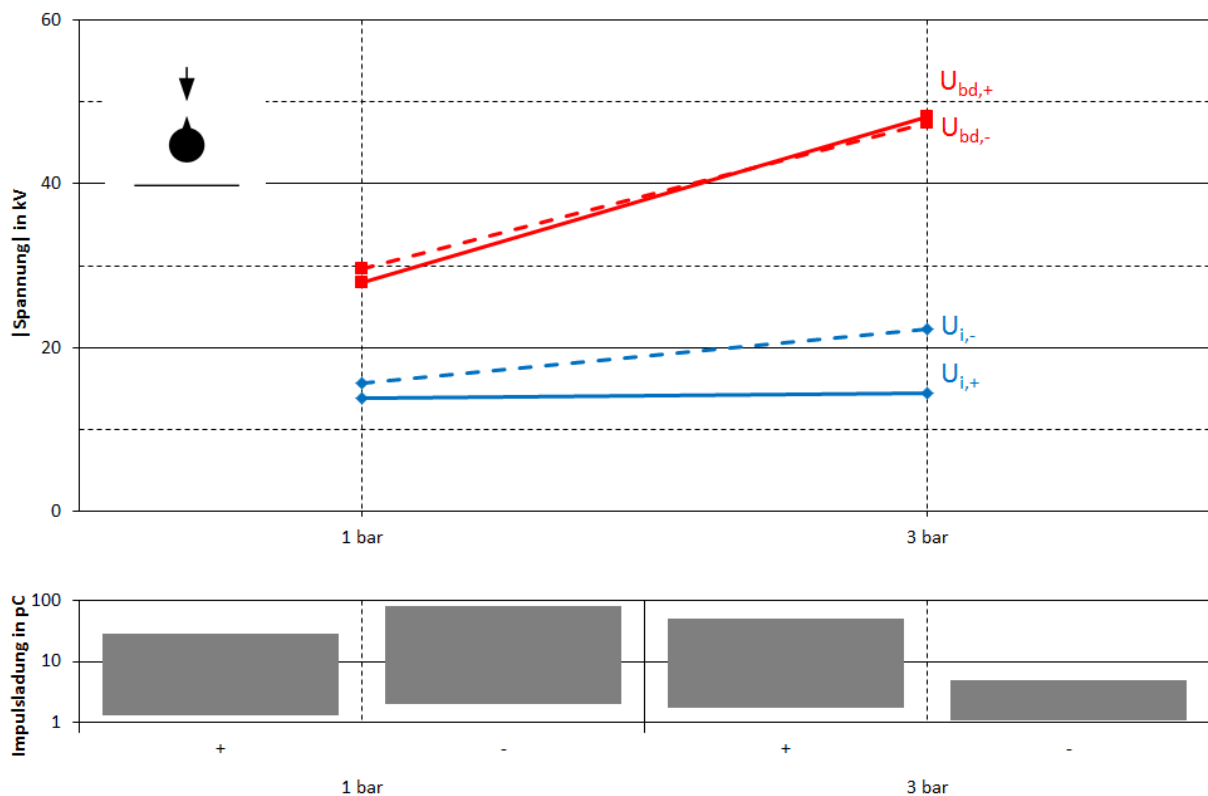


Bild 5-12: TE-Einsatzspannung, Durchschlagsspannung und Impulshöhe der Entladungen bei TE-Einsatzspannung eines freien Potentials für Stickstoff bei Gleichspannung positiver und negativer Polarität in Abhängigkeit vom Gasdruck

$$(r_{\text{Kugel}} = 10 \text{ mm}, s_{\text{oben}} = 1 \text{ mm}, s_{\text{unten}} = 7 \text{ mm})$$

Bei SF_6 konnte kein Polaritätseffekt der Einsatzspannung festgestellt werden. Die geringfügige Verschiebung der Durchschlagsspannung hin zu höheren Werten kann nicht bestätigt werden, da die Spannungsfestigkeit des Testaufbaus bei 2 Bar SF_6 erreicht wurde.

5.3.2 Entladungsintensität

Bei dem Defekt des freien Potentials in der Isolieranordnung wurden, wie auch bei der Spitze auf Hochspannung, teilweise geringe Amplituden der Entladungen beobachtet. Es wird jedoch angemerkt, dass diese zwar niedrigere Minimalwerte aufweisen, aber im Mittel größere Werte annehmen (Tabelle 12).

Tabelle 12: Amplitude der Teilentladungen bei freiem Potential

		N ₂	SF ₆
Q _{i,min,+}	pC	1,3	1,2
Q _{i,mean,+}	pC	31,5	45,4
Q _{i,max,+}	pC	149,1	172,8
Q _{i,min,-}	pC	1,0	1,0
Q _{i,mean,-}	pC	20,7	5,8
Q _{i,max,-}	pC	76,8	26,1

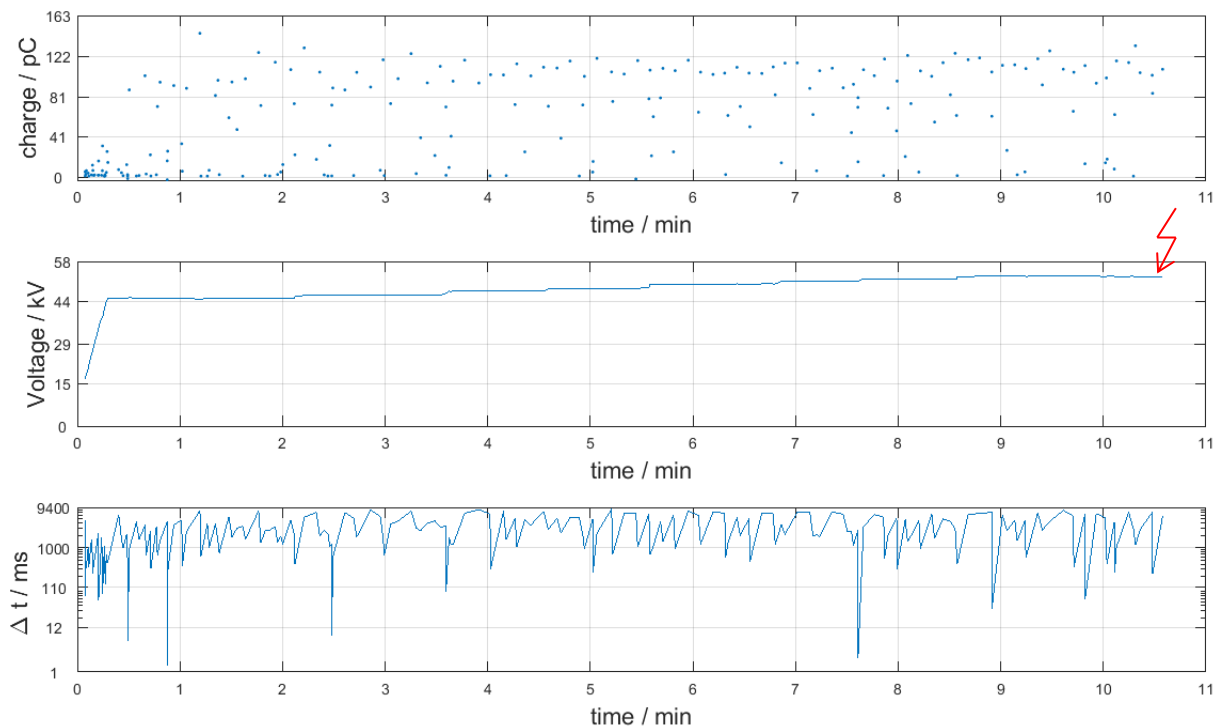


Bild 5-13: Näherungsweise konstante Entladungsverteilung eines freien Potentials anhand der Entladungsamplitude und der Zeitdifferenz zwischen den Entladungen für Schwefelhexafluorid unter 2 bar bei Gleichspannung positiver Polarität
($r_{\text{Kugel}} = 10 \text{ mm}$, $s_{\text{oben}} = 1 \text{ mm}$, $s_{\text{unten}} = 7 \text{ mm}$)

Bezüglich der Nachweisbarkeit des Defektes konnte kein gravierender Unterschied zwischen N₂ und SF₆ festgestellt werden. Es ergab sich bei den Messungen am freien Potential, dass die Amplitude und die Wiederholrate der TE über einen weiten Spannungsbereich, bis hin zum Durchschlag konstant blieben.

Lediglich bei Stickstoff ließ sich im Bereich des Durchschlags und bei höheren Drücken eine Steigerung der Amplitude und der Wiederholrate erkennen (Bild 5-13).

5.4 Metallischer Partikel auf Isolator

5.4.1 Vergleich der Teilentladungseinsetzspannung und der Durchschlagsspannung

Einfluss des Isoliergases und des Gasdrucks

Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben konnte auch bei dem metallischen Partikel auf der Isolatoroberfläche ein deutlicher Unterschied in der Durchschlagsspannung zwischen SF_6 und N_2 ermittelt werden (Bild 5-14). Es ergibt sich kein Unterschied in der Einsetzspannung bei deren Variation.

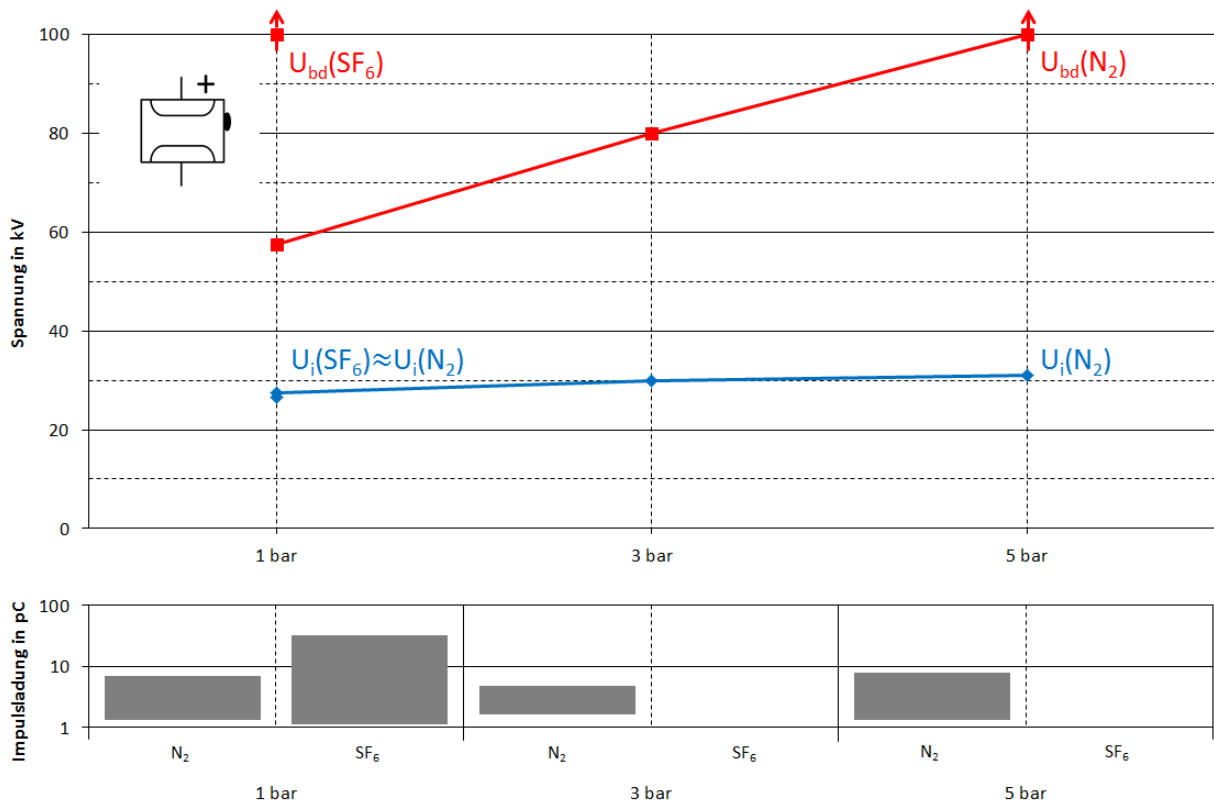


Bild 5-14: TE-Einsetzspannung, Durchschlagsspannung und Impulshöhe der Entladungen bei TE-Einsetzspannung eines Partikels auf einer Isolatoroberfläche für Stickstoff und Schwefelhexafluorid bei Gleichspannung positiver Polarität in Abhängigkeit vom Gasdruck ($d = 10 \text{ mm}$, $l = 8 \text{ mm}$, $r = 0,4 \text{ mm}$)

Beim Vergleich der Abstände zwischen Durchschlagsspannung und TE-Einsetzspannung der verschiedenen Konfigurationen aus. In Tabelle 13 ist ersichtlich, dass die Detektierbarkeit mit steigendem Druck zunimmt. Grund hierfür ist, dass im Vergleich die Durchschlagsspannung mit steigendem Druck prozentuell stärker als die Einsetzspannung steigt (Bild 5-14; Abschnitt 5.2.1). In Tabelle 14 ist weiter die Detektierbarkeit bei SF_6 aufgelistet.

Tabelle 13: Unterschiede in der Detektierbarkeit des PAI bei Verwendung von N₂

	HVDC+	HVDC-
Druck	D	D
bar	p. u.	p. u.
1	2,1	5,2
3	2,7	6,2
5	>3,1	

Tabelle 14: Unterschiede in der Detektierbarkeit des PAI bei Verwendung von SF₆

	HVDC+	HVDC-
Druck	D	D
bar	p. u.	p. u.
1	>3,6	>4,2

Einfluss der Polarität

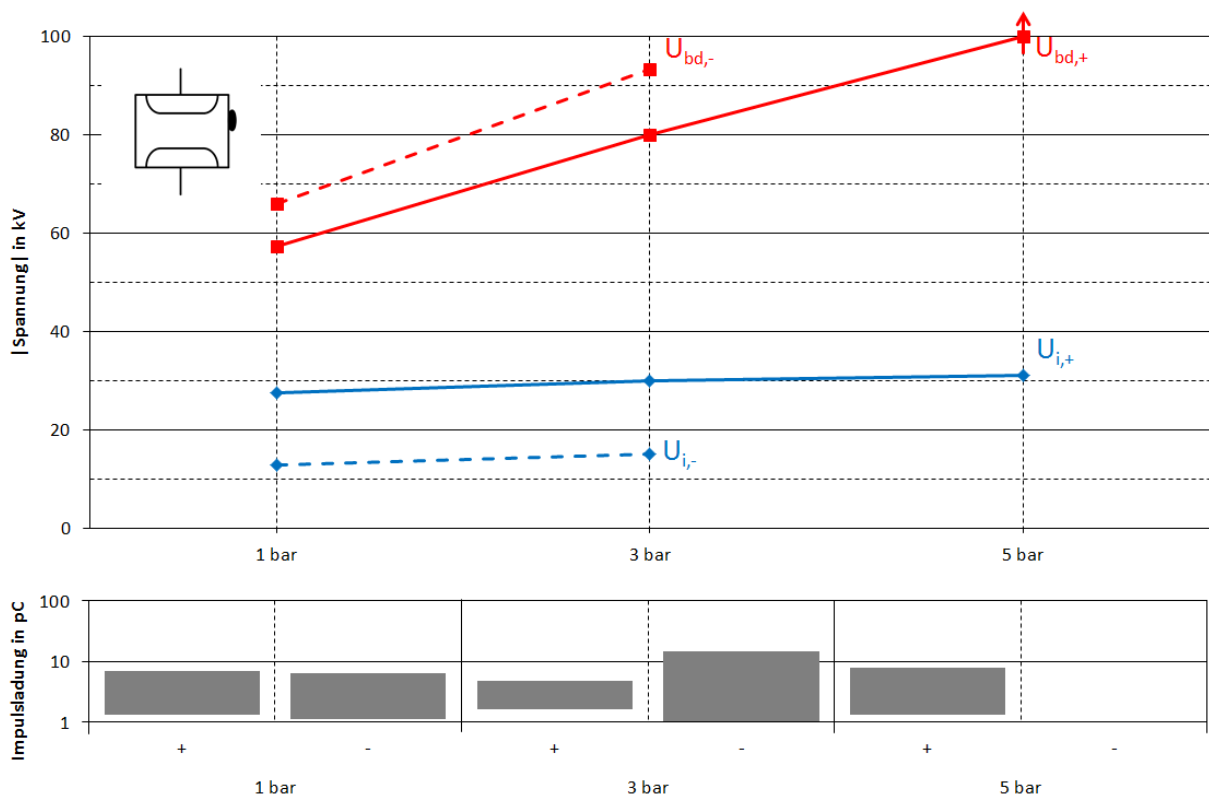


Bild 5-15: TE-Einsetzspannung, Durchschlagsspannung und Impulshöhe der Entladungen bei TE-Einsetzspannung eines Partikels auf einer Isolatoroberfläche für Stickstoff bei Gleichspannung positiver und negativer Polarität in Abhängigkeit vom Gasdruck (d = 10 mm, l = 8 mm, r = 0,4 mm)

Bei Betrachtung von N₂ als Isoliergas geht deutlich der Polaritätseffekt, wie in der Literatur beschrieben, hervor (Abschnitt 2.4.5). Die Einsetzspannung negativer Polarität liegt betragsmäßig deutlich unter, die Durchschlagsspannung betragsmäßig deutlich über jener positiver

Polarität. Dies ist in Bild 5-15 deutlich erkennbar. Der Polaritätseffekt ist auch bei SF₆ erkennbar, jedoch liegt hier die Einsetzspannung im selben Bereich [18].

5.4.2 Entladungsintensität

Das metallische Partikel auf einer Isolatoroberfläche weist, wie in Tabelle 15 dargestellt, von allen Defekten die geringsten Amplituden der TE bei Einsetzspannung auf. Lediglich bei SF₆ und positiver Polarität der Spannung stieg die Amplitude der TE im Mittel über 5 pC.

Tabelle 15: Amplitude der Teilentladungen bei Partikel auf Isolatoroberfläche

Position	Drittel	N2			SF6
		1.	2.	3.	1.
$Q_{i,min,+}$	pC	1,1	1,3	1,4	1,1
$Q_{i,mean,+}$	pC	4,1	2,7	2,7	21,3
$Q_{i,max,+}$	pC	9,7	4,0	4,0	47,4
$Q_{i,min,-}$	pC	1,0			1,0
$Q_{i,mean,-}$	pC	3,5			2,2
$Q_{i,max,-}$	pC	13,7			3,3

Allgemein muss angemerkt werden, dass die Nachweisbarkeit des Defektes aufgrund der geringen Entladungsamplituden erschwert ist.

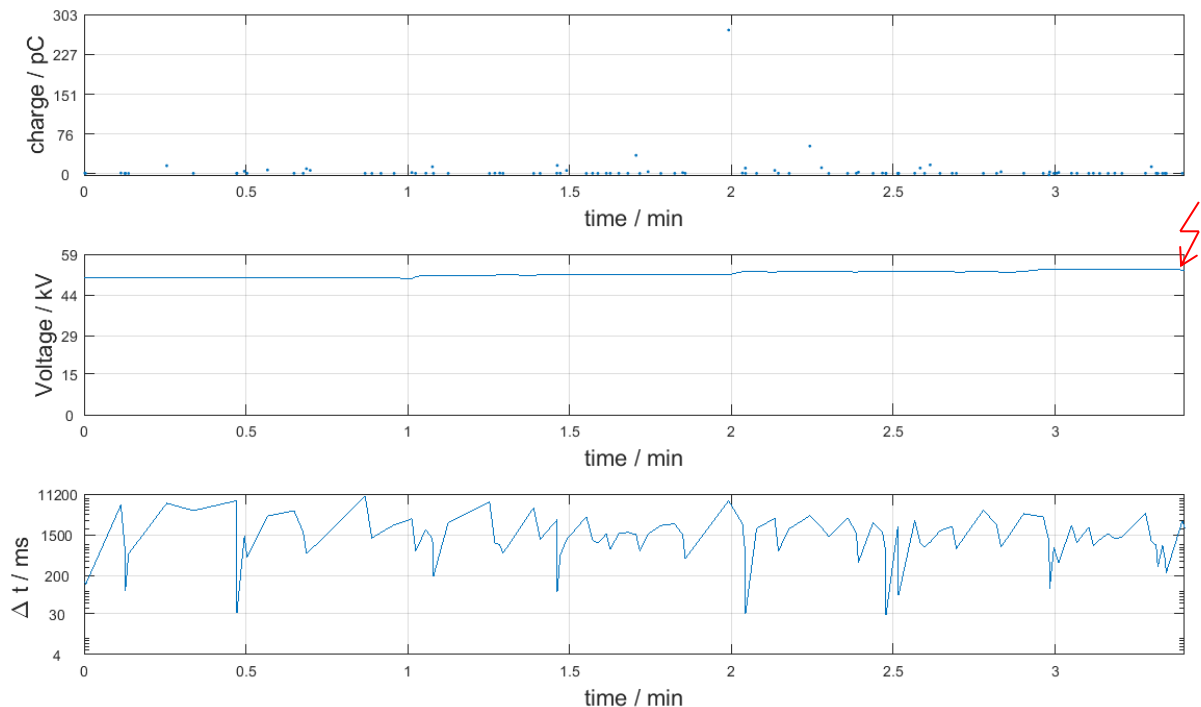


Bild 5-16: Geringe Amplitude und Wiederholrate der Teilentladungen eines Partikels auf einer Isolatoroberfläche anhand der Entladungsamplitude und der Zeitdifferenz zwischen den Entladungen für Stickstoff unter 1 bar bei Gleichspannung positiver Polarität
($d = 10$ mm, $l = 8$ mm, $r = 0,4$ mm)

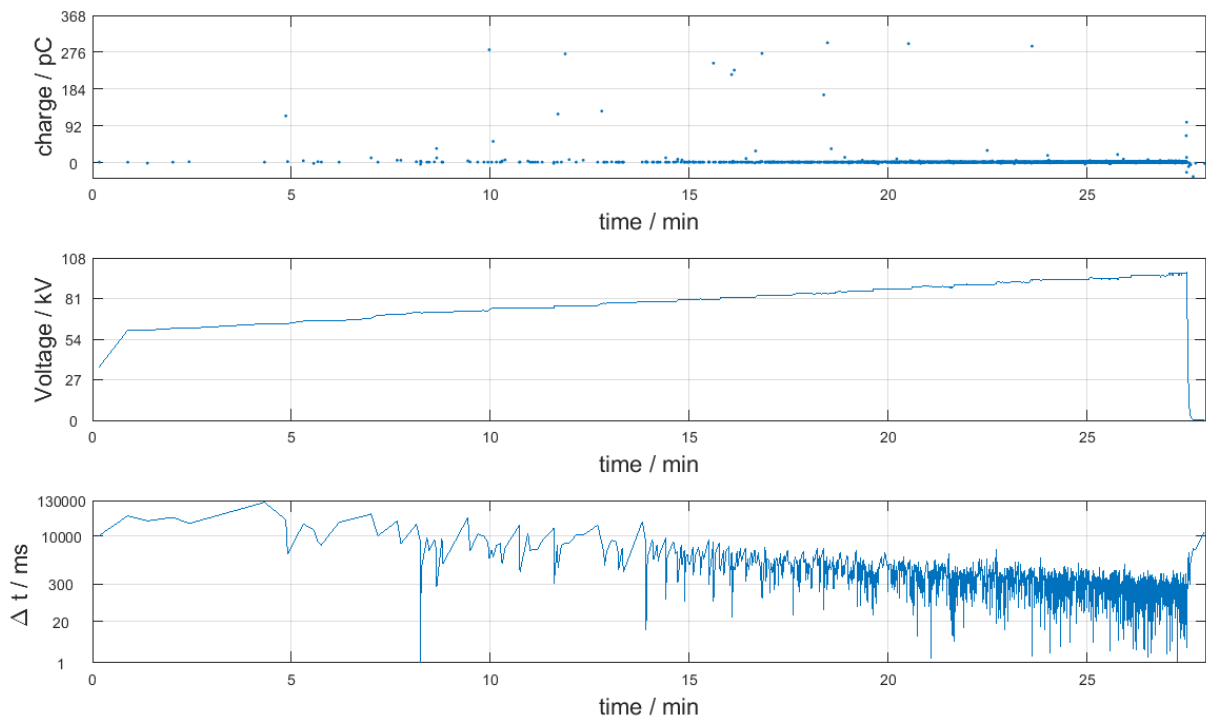


Bild 5-17: Geringe Amplitude und Wiederholrate der Teilentladungen eines Partikels auf einer Isolatoroberfläche anhand der Entladungsamplitude und der Zeitdifferenz zwischen den Entladungen für Schwefelhexafluorid unter 1 bar bei Gleichspannung positiver Polarität ($d = 10 \text{ mm}$, $l = 8 \text{ mm}$, $r = 0,4 \text{ mm}$)

Bei Erhöhung der Spannung zum Durchschlag hin treten bei dem metallischen Partikel auf der Isolatoroberfläche im niedrigen Druckbereich, unabhängig vom Isoliergas, bei positiver Polarität relativ wenige Entladungen geringer Amplitude auf (Bild 5-16, Bild 5-17). Darüber hinaus ist in Bild 5-17 die Zunahme in der Entladungshäufigkeit bei Steigerung der Spannung zum Durchschlag hin ersichtlich. Die geringe Amplitude und Wiederholrate der TE ist auf die Ausbildung von Raum- und Oberflächenladungen zurückzuführen. Es bleiben, wie in Abschnitt 3.3.2 beschrieben, Teile der emittierten Ladungsträger des metallischen Partikels in dessen Nahbereich und auf der Isolatoroberfläche. Die daraus resultierende Raumladung im Bereich der Partikelenden führt zu einer Verringerung und Homogenisierung der elektrischen Feldstärke in diesem Bereich. Lediglich ein gewisser Teil der emittierten Ladungsträger wandern zur entsprechenden Elektrode [15].

5.5 Weitere orientierende Messungen

5.5.1 Wechselspannungsmessungen

Wie bereits eingangs erwähnt wurden für jeden Defekt stichprobenartige Messungen bei Wechselspannung getätigt. Mit Hilfe der aufgenommenen PRPD-Pattern (Phase Resolved Partial Discharge – Pattern) konnten die Defekte verifiziert werden.

Die PRPD-Pattern der analysierten Defekte sind Bild 5-18, Bild 5-19 und Bild 5-20 zu entnehmen. Die dargestellten Pattern weisen in der positiven Spannungshalbwelle die Entladungsimpulse mit negativer Amplitude und in der negativen Spannungshalbwelle mit positiver Amplitude aus. Dies ist im Messaufbau begründet.

Da der Ankoppelvierpol im Zweig des Koppelkondensators integriert wurde, nimmt das Messsystem den Rückfluss der Entladungen auf. In Bezug auf die Spannung weisen diese dadurch eine gegensinnige Polarität auf [36].

Bei der Spitze auf Hochspannung ist der Polaritätseffekt deutlich zu erkennen. Bei diesen Messungen treten Entladungen in der positiven Halbwelle erst bei höheren Spannungen auf. Die Amplitude der Entladungen ist in der positiven Halbwelle größer (Bild 5-18).

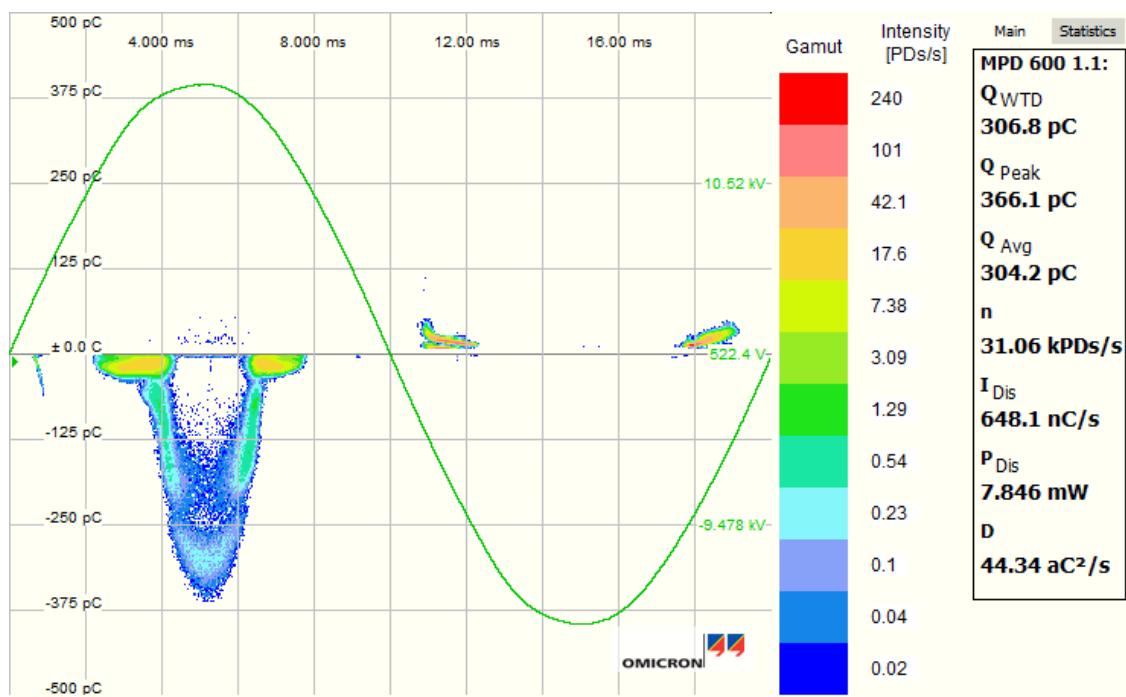


Bild 5-18: AC-PRPD-Pattern einer Spitze auf Hochspannung bei 3,2-facher TE-Einsatzspannung für Stickstoff unter 1 bar (s = 10 mm)

Bei der Wechselspannungsmessung am freien Potential war auffällig, dass von Beginn an sehr hohe Entladungsimpulse im nC-Bereich auftraten (Bild 5-19).

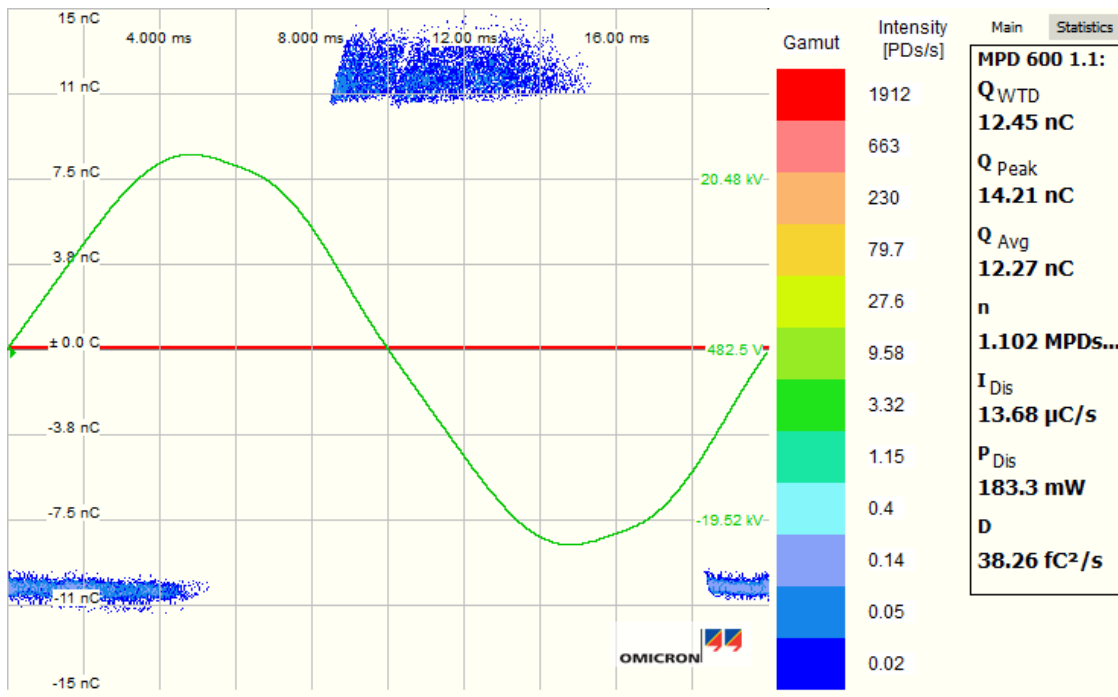


Bild 5-19: AC-PRPD-Pattern eines freien Potentials bei 2,4-facher TE-Einsatzspannung für Stickstoff unter 1 bar ($r_{Kugel} = 10$ mm, $s_{oben} = 1$ mm, $s_{unten} = 7$ mm)

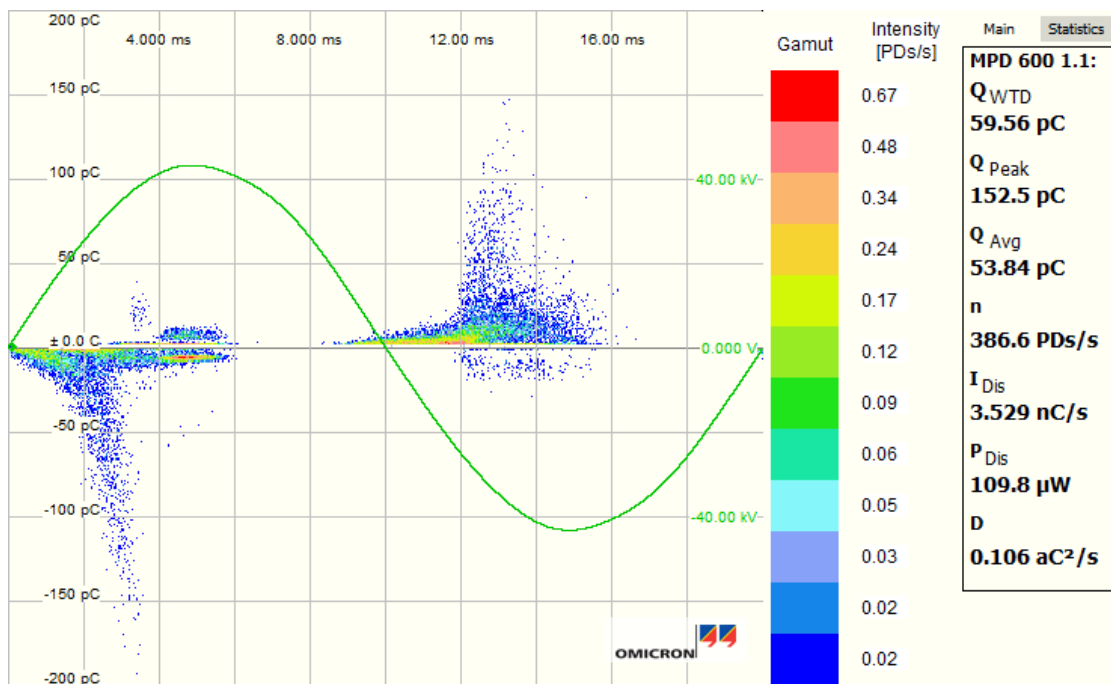


Bild 5-20: AC-PRPD-Pattern eines Partikels auf einer Isolatoroberfläche bei 1,3-facher TE-Einsatzspannung für Stickstoff unter 1 bar ($d = 10$ mm, $l = 8$ mm, $r = 0,4$ mm)

Es ergab sich bei dem Partikel auf der Isolatoroberfläche, dass kein Durchschlag erreicht werden konnte, da sich das auf dem Isolator befindliche Partikel ab einer Spannung von rund 40 kV zu bewegen begann. Es ist feststellbar, dass in beiden Halbwellen positive und negative Entladungen auftreten (Bild 5-20). Dies ist mit großer Wahrscheinlichkeit auf einen Messfehler zurückzuführen.

5.5.2 Einfluss der Vorbelastung

Einfluss einer Vorbelastung mit $U = 0,8 * U_{bd}$

Bei der Vorbelastung mit rund 80 % der Durchschlagsspannung über eine Dauer von einer halben Stunde konnte kein Einfluss auf die Durchschlagsspannung festgestellt werden.

Spitze auf Hochspannung – Einfluss einer Vorbelastung mit $U = 0,8 * U_i$

Die Belastung mit rund 80 % der Einsatzspannung ergab eine betragsmäßige Erhöhung der Einsatzspannung negativer Polarität bei Verwendung von SF₆, wie in Bild 5-21 ersichtlich. Dieser Einfluss nimmt bei steigender Belastungsdauer zu und bedarf weiterer Untersuchungen, bei denen die Dauer der Vorbelastung variiert wird. Die Betrachtung der Veränderung der Durchschlagsspannung ergab keinen eindeutigen Trend. Bei Verwendung von Stickstoff konnte kein Einfluss der Vorbelastung festgestellt werden.

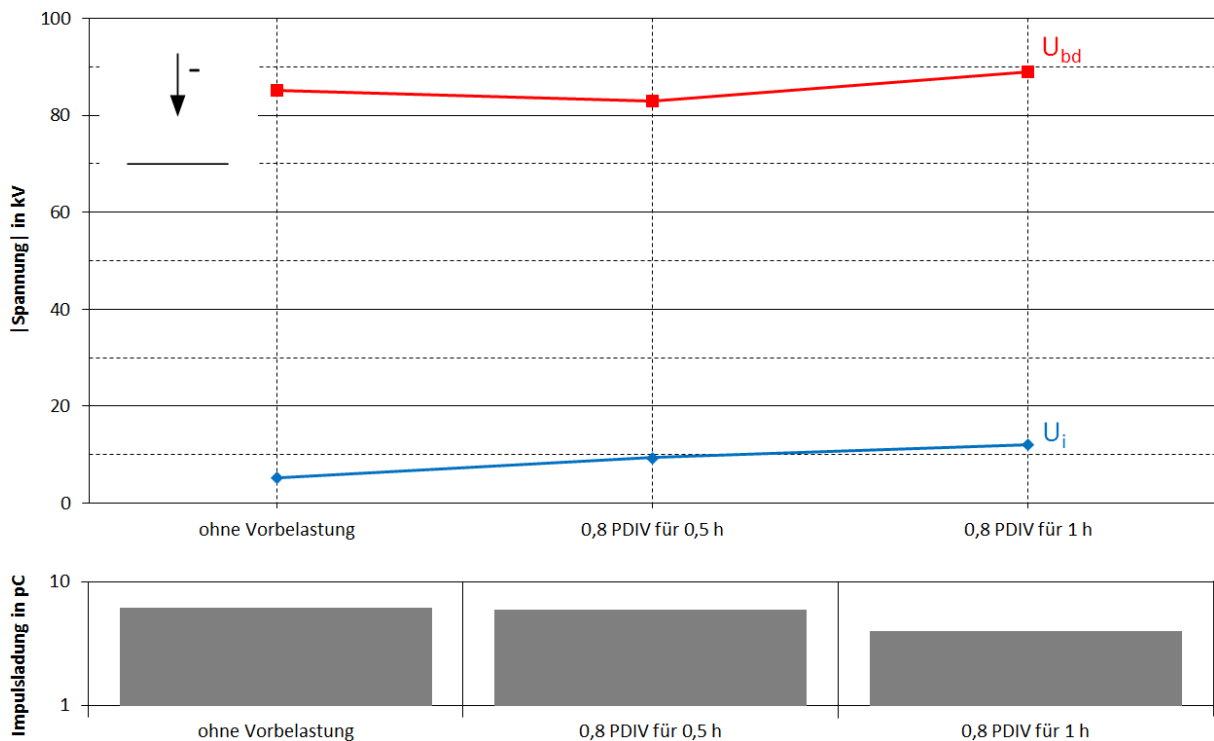


Bild 5-21: TE-Einsatzspannung, Durchschlagsspannung und Impulshöhe der Entladungen bei TE-Einsatzspannung einer Spitze auf Hochspannung für Schwefelhexafluorid unter 1 bar bei Gleichspannung negativer Polarität in Abhängigkeit von der Vorbelastung ($s = 10 \text{ mm}$)

Bei SF₆ driften die positiv geladenen Gasmoleküle bei negativer Polarität zur Spitze hin und sammeln sich in diesem Bereich. Werden nun im feldstarken Bereich der Kathode Startelektronen durch Ionisierung generiert lagern sich diese an die Gasmoleküle an. Es kommt zu einer Verzögerung in der Ausbildung von Elektronenlawinen und die Einsetzspannung verschiebt sich zu betragsmäßig höheren Werten [31].

Durch die Steigerung der Einsetzspannung, bei näherungsweise unveränderter Durchschlagsspannung, sinkt das Verhältnis von U_{bd} zu U_i von rund 16,1 ohne Vorbelastung auf rund 7,4 bei Vorbelastung von einer Stunde.

Die Amplituden der Entladungen bleiben im Bereich der Einsetzspannung über den Variationsbereich näherungsweise konstant.

Freies Potential – Einfluss einer Vorbelastung mit $U = 0,8 * U_i$

Es konnte festgestellt werden, dass bei SF₆ und negativer Polarität der Spannung die Einsetzspannung betragsmäßig abnimmt. Folglich steigert sich die Detektierbarkeit bei diesem Defekt unter den beschriebenen Gegebenheiten von rund 2,9 ohne Vorbelastung auf rund 3,6 bei einer Vorbelastung von einer Stunde (Bild 5-22).

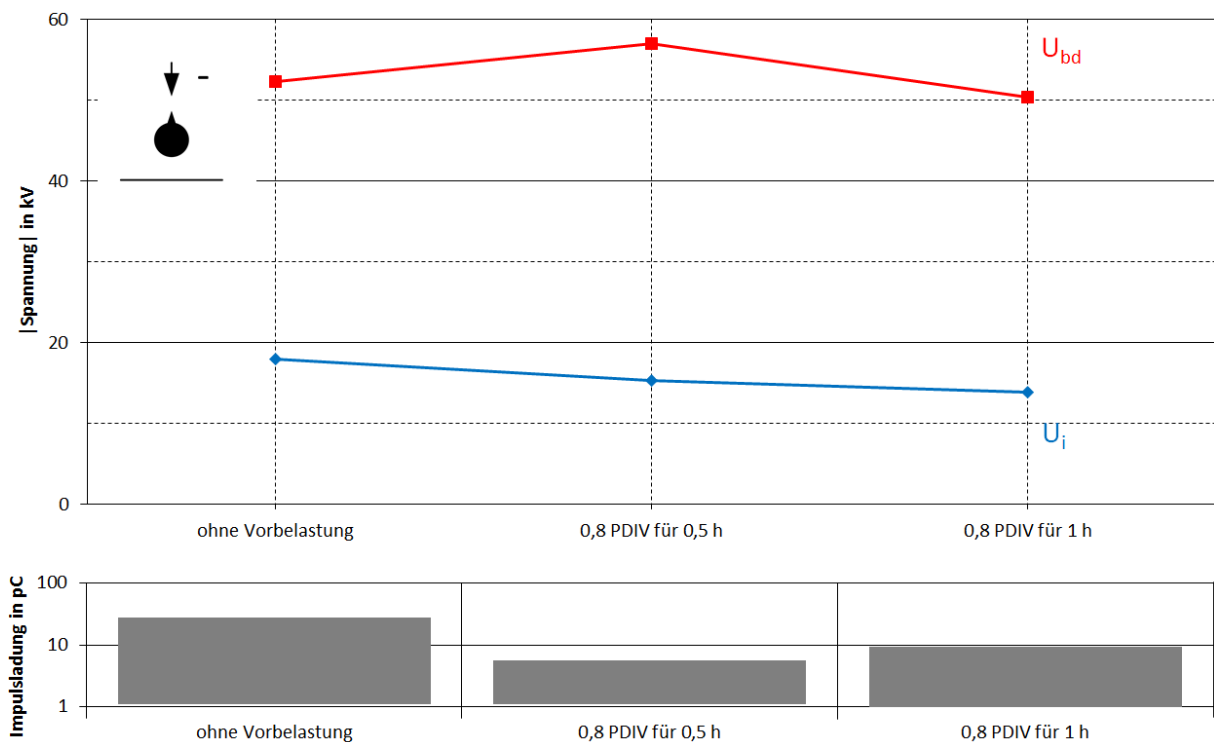


Bild 5-22: TE-Einsetzspannung, Durchschlagsspannung und Impulshöhe der Entladungen bei TE-Einsetzspannung eines freien Potentials für Schwefelhexafluorid unter 1 bar bei Gleichspannung negativer Polarität in Abhängigkeit von der Vorbelastung ($r_{Kugel} = 10 \text{ mm}$, $s_{oben} = 1 \text{ mm}$, $s_{unten} = 7 \text{ mm}$)

Eine mögliche Ursache ist in der Ladung des freien Potentials zu finden. Das freie Potential lädt sich in der Vorbelastungszeit bereits zu einem gewissen Grad auf. Hierdurch kommt es zu einer Felderhöhung im gasgefüllten Zwischenraum und die Einsetzspannung sinkt betragsmäßig.

5.5.3 Einfluss von Elektrodenabständen

Veränderung der Defektpositionierung bei metallischem Partikel auf dem Isolator

Die Partikelposition hat einen eindeutigen Einfluss auf die Einsetz- und Durchschlagsspannung. Bei Überschreiten der halben Entfernung zwischen Hochspannung und Erdpotential ist ein Polaritätseffekt bemerkbar (Bild 5-23).

Grund hierfür ist, dass das Annähern an das Erdpotential für das Partikel dieselben Verhältnisse schafft, als befände es sich nahe der Hochspannungselektrode mit Spannungen negativer Polarität. Zum Vergleich sind in Tabelle 16 die Spannungswerte bei Positionierung im 1. Drittel (positive und negative Polarität) sowie bei Positionierung im 3. Drittel gegenübergestellt. Dieser Effekt wurde bereits in [22] beschrieben (Abschnitt 3.3.2 und Bild 3-15).

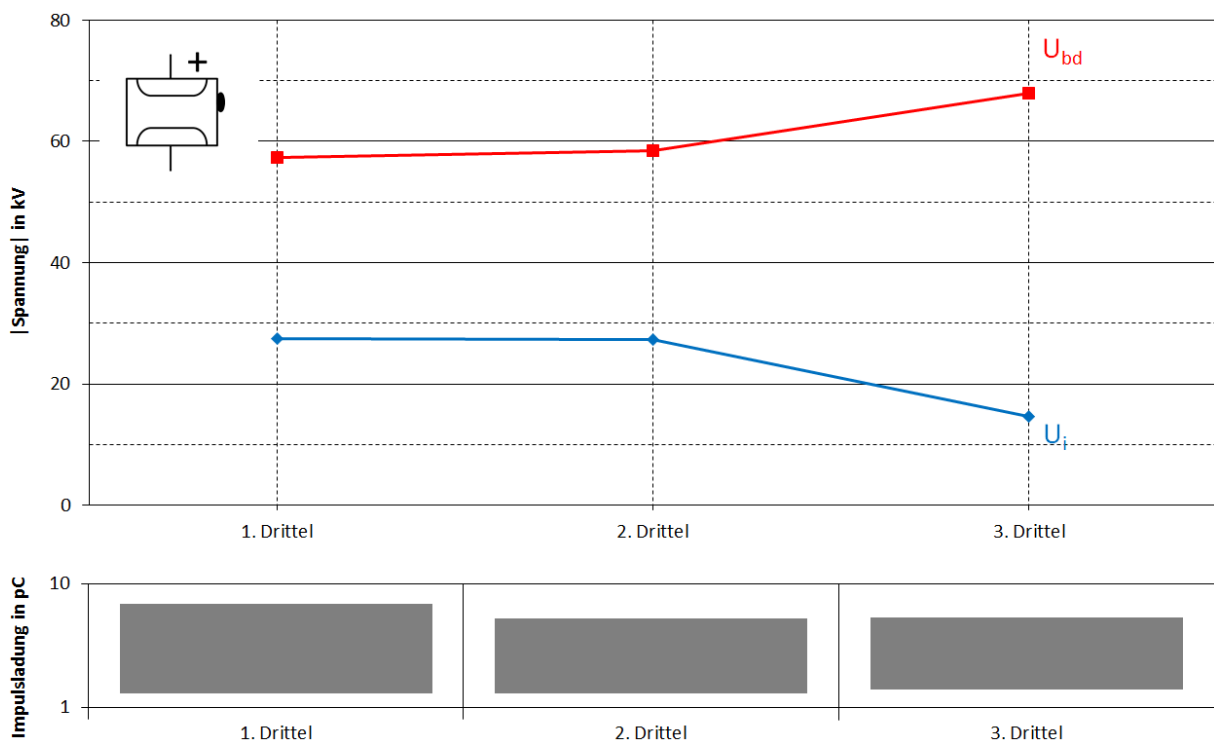


Bild 5-23: TE-Einsetzspannung, Durchschlagsspannung und Impulshöhe der Entladungen bei TE-Einsetzspannung eines Partikels auf einer Isolatoroberfläche für Stickstoff unter 1 bar bei Gleichspannung positiver Polarität in Abhängigkeit von der Partikelposition

($l = 8 \text{ mm}$, $r = 0,4 \text{ mm}$)

Tabelle 16: Gegenüberstellung ausgewählter Partikelpositionen bei N_2 und 1 bar

Spannungen		HVDC+		HVDC-
		1. Drittel	3. Drittel	1. Drittel
U_i	kV	27,5	14,6	-12,7
U_{bd}	kV	57,4	68,0	-66,0
D	p. u.	2,1	4,7	5,2

Darüber hinaus wurde dieser Effekt und dessen Abhängigkeit von Druck, Partikelposition, Isoliergas und geometrischen Form des Isolators in [53] beschrieben. Ein Beispiel für die Detektierbarkeit ist in Bild 5-24 dargestellt, wobei V_{BD} der Durchschlagsspannung und V_{CF} der Teilentladungseinsetzspannung entspricht.

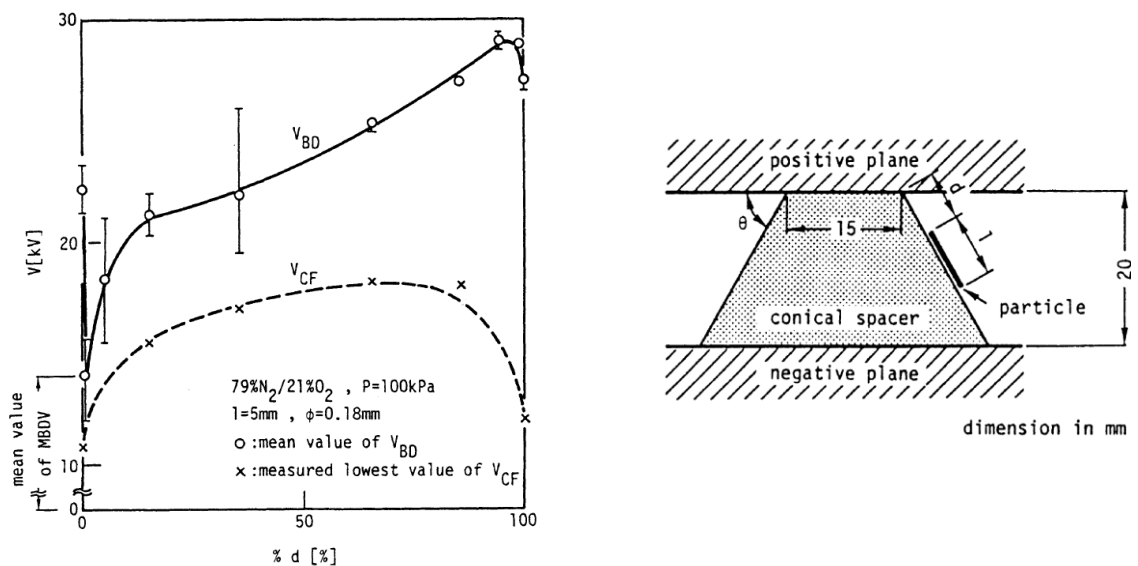


Bild 5-24: TE-Einsetzspannung und Durchschlagsspannung eines Partikels auf einer Isolatoroberfläche bei einem Gemisch aus Stickstoff und Sauerstoff unter 1 bar bei Gleichspannung positiver Polarität in Abhängigkeit von der Partikelposition und der zugehöriger Versuchsaufbau (79 % N_2 , 21 % O_2) [53]

Veränderung der Schlagweite bei Spitze auf Hochspannung

Bei der näherungsweise linearen Erhöhung der Schlagweite zwischen der Spitzen- und Platten-Elektrode erhöht sich die Einsetzspannung sowie die Durchschlagsspannung ebenfalls näherungsweise linear (Bild 5-25). Dieser lineare Zusammenhang kann über das Gesetz von Paschen erklärt werden (Abschnitt 2.4.3). In dem untersuchten Bereich ($pd = 20 \text{ bar}_{\text{abs}} \cdot \text{mm}$ bis $40 \text{ bar}_{\text{abs}} \cdot \text{mm}$) ergeben sich lineare Zusammenhänge (Bild 2-5) [51].

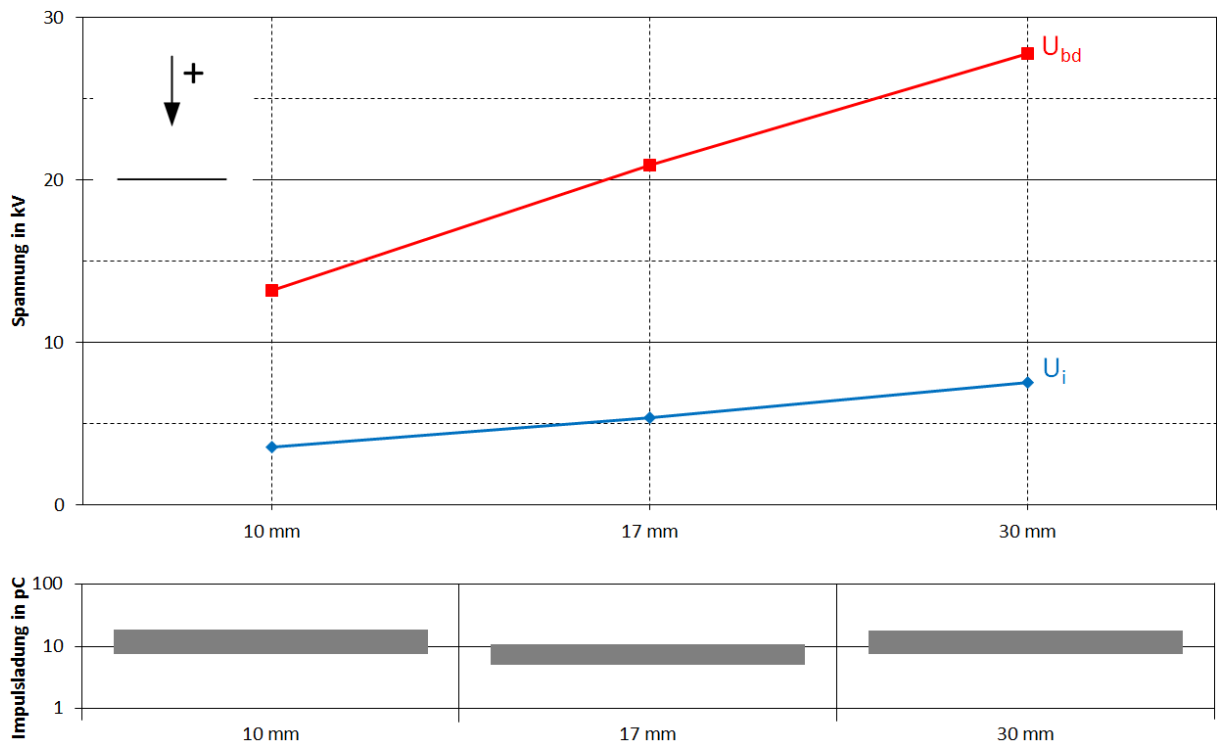


Bild 5-25: TE-Einsatzspannung, Durchschlagsspannung und Impulshöhe der Entladungen bei TE-Einsatzspannung einer Spitze auf Hochspannung für Stickstoff unter 1 bar bei Gleichspannung positiver Polarität in Abhängigkeit von der Schlagweite

In [54] wurde der Einfluss der Schlagweite über einen weiteren Bereich analysiert (Bild 5-26). Es ist ersichtlich, dass sich auch hier die Durchschlagsspannung näherungsweise linear verhält, jedoch die Einsatzspannung nur bis zu einer gewissen Länge hin. Weiter ist erkennbar, dass die Detektierbarkeit mit kleiner werdendem Abstand abnimmt.

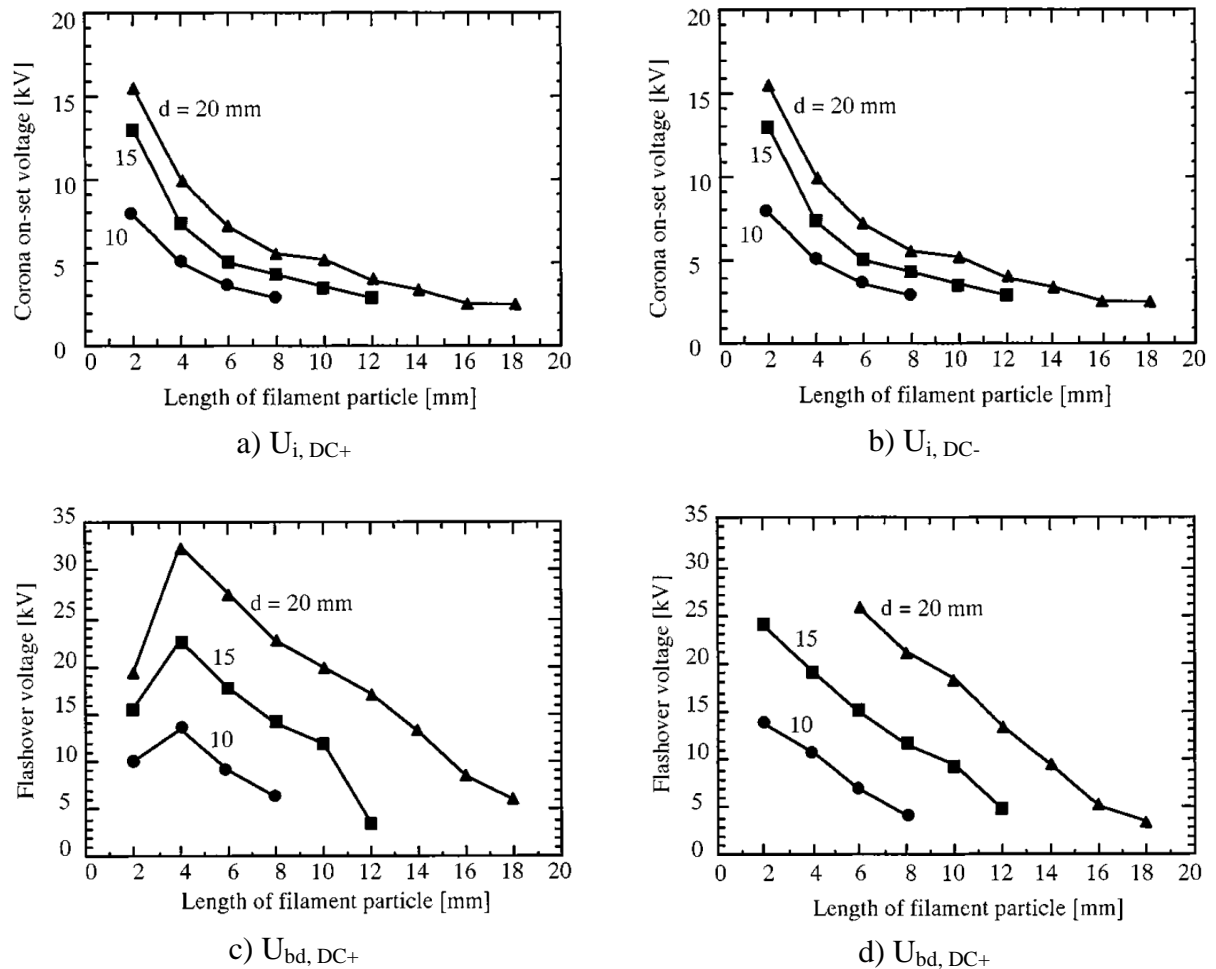


Bild 5-26: TE-Einsatzspannung und Durchschlagsspannung einer Spitze auf Hochspannung für Schwefelhexafluorid bei Gleichspannung positiver und negativer Polarität in Abhängigkeit von der Schlagweite ($r_{\text{wire-tip}} = 0,125$ mm) [54]

In dieser Arbeit wurde auf die Untersuchungen des Einflusses der Spitzengeometrie verzichtet. Allgemein weisen größere Radien der Spitze geringere Durchschlagsspannungen bei höheren Einsatzspannungen auf, was zu einer Verringerung in der Detektierbarkeit bis hin zu Null führen kann (Bild 5-27) [55].

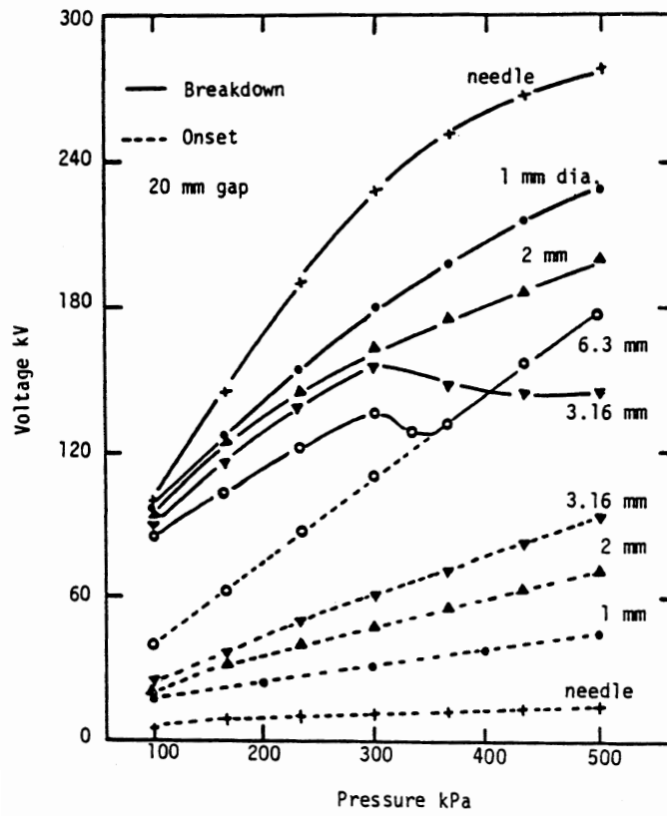


Bild 5-27: TE-Einsetzspannung und Durchschlagsspannung einer Spitze auf Hochspannung für Schwefelhexafluorid bei Gleichspannung positiver Polarität in Abhängigkeit von dem Spitzenradius ($s = 20 \text{ mm}$) [55]

6 Bedeutung für die praktische Anwendung

6.1 Aktuelle Verfahren, Methoden und Kennwerte bei der Prüfung

Bei der Prüfung von Betriebsmitteln auf Basis von Teilentladungen bei Gleichspannung wird zwischen der Stehspannungsprüfung und der Prüfung mit Polaritätsumkehr unterschieden. Basis für diese Verfahren bilden nach [39] einschlägige Normen, welche auf der Grundlage der Erfahrungen mit AC basieren.

Die Stehspannungsprüfung geht über 120 Minuten, wobei in den letzten 30 Minuten eine Teilentladungsmessung durchgeführt wird. Bei der Polaritätsumkehr wird zu Beginn für 90 Minuten eine Spannung negativer Polarität, anschließend für 90 Minuten eine Spannung positiver Polarität und schließlich nochmals eine Spannung negativer Polarität für 45 Minuten angelegt. Die Teilentladungen werden im Allgemeinen jeweils nach Beendigung einer Polaritätsumkehr gemessen. Die TE an Durchführungen und Glättungsdrosseln sind alle 10 bzw. 30 Minuten (mit Ausnahme der Polaritätsumkehr) zu messen. Hierbei darf eine gewisse Anzahl an Impulsen bestimmter Amplitude nicht überschritten werden. Die geltenden Grenzwerte der Entladungen sind Tabelle 17 zu entnehmen [39].

Tabelle 17: Genormte TE-Pegel, nach [39]

Relevante Norm		Umrichter	Glättungsdrosseln	Durchführungen
		61378-2 [56]	60076-6 [57]	65700-19-03 [58]
Stehspannung	Messzeiten	letzten 30 Min.	letzten 30 Min.	letzten 30 Min.
	TE	≤ 30 Entladungen ≥ 2000 pC	≤ 30 Entladungen ≥ 2000 pC	≤ 10 Entladungen ≥ 2000 pC
Polaritätsumkehr	Messzeiten	30 Min. nach Polaritätsumkehr	Alle 10 Min. ohne 5 Min. nach Polaritätsumkehr	Bewegliches 30 Min. Fenster über den Messbereich
	TE	≤ 30 Entladungen ≥ 2000 pC	≤ 10 Entladungen ≥ 2000 pC	≤ 10 Entladungen ≥ 2000 pC

In [3] werden darüber hinaus neue praxisbezogene Testmöglichkeiten erörtert. Die entsprechenden Verfahren und deren Spezifikation sind in Tabelle 18 angeführt.

Tabelle 18: Testverfahren für GIS bei DC (550 kV), nach [3, 59]

Typprüfung (Gasisolierung)	Gleichspannungstest	$1,5 \times U_N$ für ≥ 1 min
	Blitzstoßspannung (LI)	15 Impulse nach IEC 60071
	Schaltstoßspannung (SI)	15 Impulse nach IEC 60071
	Überlagerte Spannungen	$U_N + LI/SI$ (15 Impulse)
	Polaritätsumkehr (optional)	$1,25 \times U_N$
Typprüfung (Grenzschichten)	Gleichspannungstest	U_N (90% der Ausbildungszeit)
	Überlagerte Spannungen	$U_N + LI/SI$ (15 Impulse)
Stückprüfung	Stehspannungsprüfung	$U_{\text{Belastung}} = 1,8 \times U_N$ für 1 min
	TE-Messung	$U_{\text{pd}} = 1,2 U_N$ für ≥ 1 min
Vor-Ort-Prüfung	Stehspannungsprüfung	$0,8 U_{\text{Belastung}}$ für 1 min
	TE-Messung	$0,8 U_{\text{pd}}$ für ≥ 1 min
	Gleichspannungstest (optional)	Noch zu definieren

6.2 Detektierbarkeit der untersuchten Defekte für eine 420-kV-GIL

Um die im Rahmen dieser Masterarbeit ermittelten Werte mit realen Anlagen vergleichen zu können wird zu Beginn die elektrische Feldstärke in der jeweiligen Anordnung bei Teilentladungseinsetzspannung bestimmt. Diese wird anschließend mit der rechnerisch ermittelten vorherrschenden Feldstärke in einer realen 420-kV-GIL verglichen und so daraus geschlossen, ob mit den entsprechenden Prüfspannungen der Defekt nachgewiesen werden kann.

Bei der Spitze auf Hochspannung wurde der Ausnutzungsfaktor für die Testzelle nach [49] und für die 420-kV GIL nach [60] ermittelt. Der Ausnutzungsfaktor des freien Potentials wurde für die obere Elektrodenkonfiguration (Spitze-Spitze) nach [49] und für die untere Elektrodenkonfiguration (Kugel-Platte) nach [49] und [60] bestimmt. An dieser Stelle ist anzumerken, dass bei den Berechnungen davon ausgegangen wurde, dass das freie Potential sowie der Partikel zum Zeitpunkt der Einsetzspannung noch ungeladen sind. Für das metallische Partikel auf der Isolatoroberfläche wurde ein Überhöhungsfaktor nach [22], in Abhängigkeit des Verhältnisses der Länge l zum Durchmesser d , zur Berechnung verwendet (Tabelle 19).

Tabelle 19: Überhöhungsfaktor abhängig von der Partikelgeometrie für ein Partikel auf einer Isolatoroberfläche, nach [22]

Partikelform	Achsenverhältnis	Überhöhungsfaktor
	l/d	E_{max}/E_0
Zylinder	1	4,696
	6	18,6
	10	26,94
Ellipsoid	3	14,7
	5	28,06
	10	57,3

In Tabelle 20 sind die Ergebnisse für die maximale Feldstärke E_{\max} bei Teilentladungseinsetzspannung der Testzellen, die maximale Feldstärke E_{\max} bei Teilentladungseinsetzspannung der Versuche in [45] sowie die maximale Feldstärke E_{\max} bei Leiter-Erde-Spannung einer realen 420-kV-GIL mit entsprechenden Defekten gegenübergestellt. Weiter sind die wesentlichen geometrischen Einflussgrößen angeführt. Die Zwischenergebnisse sind dem Anhang A4 zu entnehmen.

Tabelle 20: Vergleich der maximalen Feldstärke bei Teilentladungseinsetzspannung der untersuchten Defekte in den entsprechenden Testzellen sowie der Ergebnisse nach [45] und der Defekte in einer 420-kV-GIL bei Leiter-Erde-Spannung unter Verwendung von SF₆

		Testzelle		[45]		420-kV-GIL
Spitze auf Hochspannung	Gas und Druck	1 bar SF ₆	3 bar SF ₆	1 bar SF ₆	3 bar SF ₆	5 bar SF ₆
	Spitzenradius r_s (μm)	25,00	25,00	500,00	500,00	25,00
	Schlagweite s_s (mm)	10,00	10,00	140,00	140,00	153,00
	Max. Feldstärke E_{\max} (kV/mm)	53,52	283,21	85,59	125,53	991,77
Freies Potential	Gas und Druck	1 bar SF ₆	2 bar SF ₆			5 bar SF ₆
	Schlagweite oben s_o (mm)	1,00	1,00			1,00
	Schlagweite unten s_u (mm)	7,00	7,00			117,00
	Spitzenradius r_s (mm)	0,40	0,40			0,40
	Kugelradius r_K (mm)	10,00	10,00			10,00
	Max. Feldstärke E_{\max} (kV/mm)	4,92	6,79			25,83
Partikel auf Isolator	Gas und Druck	1 bar SF ₆				5 bar SF ₆
	Partikellänge l_p (mm)	8,00				8,00
	Partikeldurchmesser d (mm)	0,80				0,80
	Isolatorlänge l_i (mm)	50,00				160,00
	Max. Feldstärke E_{\max} (kV/mm)	17,02				42,54

Beim Vergleich der maximalen Feldstärken der Defekte in den Testzellen und der aus [45] ermittelten maximalen Feldstärken mit den Berechnungen für eine reale 420-kV-GIL kann auf eine Detektierbarkeit der untersuchten Defekte in einer realen GIL geschlossen werden. Die maximal auftretenden Feldstärken der Defekte in einer 420-kV-GIL weisen höhere Amplituden als in den Testzellen auf. Dies bedeutet, dass die in einer 420-kV-GIL auftretenden Defekte bereits bei der Leiter-Erde-Spannung Teilentladungen aufweisen. Auch bei entsprechend höherem Druck des Isoliermediums von $p = 5$ bar und somit einer Verschiebung der Einsatzfeldstärke hin zu höheren Amplituden sollten die Einsatzfeldstärken betragsmäßig unter den vorherrschenden maximalen Feldstärken liegen.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass es weitere Untersuchungen bei höherem Druck erfordert, um eine eindeutige Detektierbarkeit in der realen 420-kV-GIL zu bestätigen.

7 Ausblick

In der vorliegenden Masterarbeit im Bereich der Grundlagenforschung wurden drei der fünf typischen Defekte von GIS/GIL hinsichtlich ihrer Detektierbarkeit bei Gleichspannung untersucht. Dies sind die Spitze auf Hochspannung, das freie Potential in einer Isolationsanordnung und ein metallisches Partikel auf einer Isolatoroberfläche. Die Arbeit konzentrierte sich primär auf den Einfluss des Drucks, den Unterschied zwischen Stickstoff und Schwefelhexafluorid sowie den Einfluss der Polarität der Gleichspannung. Mit Hilfe der ermittelten Messdaten konnten erste Interpretationen in Bezug auf die Fehlererkennung in der Praxis geschlossen werden.

Die Thematik der Detektierbarkeit bei Gleichspannung benötigt jedoch intensivere Betrachtung, um Aufschluss über deren Auswirkung für reale Gegebenheiten abschätzen zu können. Als zentrales Element für weiterführende Forschungen steht die Analyse der noch nicht untersuchten Defekte im Vordergrund. Es sollten das frei bewegliche metallische Partikel und die Fehlstelle im Festkörperisolator untersucht werden.

Da heutzutage bei neu errichteten Übertragungsleitungen nur noch in Spezialfällen reines SF₆ zur Anwendung kommt sollten weitere Untersuchungen an Gemischen aus SF₆ und N₂ durchgeführt werden [11].

Darüber hinaus wurden in dieser Arbeit orientierende Messungen in Richtung des Einflusses der Vorbelastung getätigt. Es konnten unter Verwendung von SF₆ bei Gleichspannungsbeanspruchung mit negativer Polarität Einflüsse auf die Teilentladungseinsetzspannung festgestellt werden. Die getätigten Variationen geben jedoch nur einen Einblick in die Thematik. Da die Bildung der Oberflächen- und Raumladung sowie der Kapazitiv-Resistive-Übergang große Zeitkonstanten aufweisen sind weitere Untersuchungen mit längeren Belastungsintervallen (und Variation dieser) durchzuführen [22]. Zu Beginn sollte eine Polarisations-Depolarisations-Strommessung durchgeführt werden, um die benötigte Dauer der Vorbelastung abschätzen zu können. Des Weiteren ist die Spannung, bei welcher die Prüflinge vorbelastet werden von wesentlicher Bedeutung. Auch hier sollten gewisse Variationen in Betracht gezogen werden. An dieser Stelle sei noch angemerkt, dass der Kapazitiv-Resistive-Übergang nicht restlos erforscht ist. Vor allem bei der Variation der verschiedenen Defekte und der Amplitude der angelegten Spannung besteht weiterer Forschungsbedarf.

Ein weiterer in dieser Arbeit nicht untersuchter, aber großer Einflussfaktor auf die entsprechenden Spannungen und Spannungsverläufe, bei Vorhandensein eines Defektes, ist der Einfluss der Temperatur auf das Isoliermedium. Die elektrische Leitfähigkeit der Isoliergase weist eine starke Temperaturabhängigkeit auf [22]. Dies kann zur Herabsetzung der Durchschlagsfestigkeit führen.

Der Spitzenradius hat einen großen Einfluss auf das Verhalten der Spitze bei angelegter Spannung. Allgemein weisen rundere Spitzen mit größerem Radius höhere TE-Aktivitäten bei Verringerung der Durchschlagsspannung auf. Analysen des tatsächlichen Einflusses dieser Spitzenradien müssen in Betracht gezogen werden [15, 47, 55].

Bei den Untersuchungen des Partikels auf der Isolatoroberfläche sei erwähnt, dass in der vorliegenden Arbeit ein Drahtstück verwendet wurde. Dies bietet zwar eine gute Vergleichbarkeit mit anderen Arbeiten, spiegelt aber nicht die Realität wider. Es ist notwendig Untersuchungen mit anderen Partikel-Geometrien (z. B. Bohrspäne), verschiedenen Materialien und Abmessungen durchgeführt werden.

Weitere Untersuchungen sollten auch bei höherem Druck bis zu 10 bar erfolgen. Eine Weiterentwicklung der Testzellen wäre dazu vorteilhaft. Diese sollte für Drücke bis 10 bar ausgelegt werden. Grund hierfür ist, dass reale Anlagen – im Besonderen Anlagen mit alternativen Gasen und Gasgemischen – bei einem höheren Arbeitsdruck operieren. Darüber hinaus wäre es vorteilhaft ein maßstäbliches Modell eines GIS einzubinden, um Aussagen über die Entladungen bei Nennspannung sowie den zeitabhängigen Einfluss der Defekte auf die realen geometrischen Feldverteilungen eines GIS untersuchen zu können [6, 7, 23, 34].

Um die Kritizität der Defekte in der Praxis entsprechend beurteilen zu können ist es unumgänglich weitere Versuche an den Defekten mit überlagerten Spannungen (DC + LI/SI) durchzuführen. Hierbei wird vor allem auf die Einflüsse der Vorbelastung und der Polarität (gleichsinnig oder gegensinnig) hingewiesen. Diese können zu einer starken Verringerung der Durchschlagsspannung führen [45, 61].

8 Zusammenfassung

Die Versorgung mit elektrischer Energie hat in unserer Gesellschaft einen hohen Stellenwert eingenommen und ist aus dem alltäglichen Leben nicht mehr wegzudenken. Folglich ist es von essentieller Bedeutung eine sichere und zuverlässige Versorgung zu gewährleisten. Um die elektrische Energie auch in der Zukunft wirtschaftlich übertragen zu können sind neue Möglichkeiten der Übertragung auszuloten. Als eine geeignete Möglichkeit scheint die Übertragung mit Hilfe von Gleichspannung in gasisolierten Systemen auf.

Um eine gute Ausfallsicherheit der Netze und deren Komponenten zu garantieren, sowie die wirtschaftliche Ausnutzung dieser zu verbessern, ist eine umfangreiche Beurteilung der aktuellen Zustände wichtig. Im Bereich der Wechselspannung wird hier schon seit geraumer Zeit die Teilentladungsmessung zur Diagnose des Ist-Zustandes sowie zur Abschätzung der Restlebensdauer und der Planung von Instandhaltungsmaßnahmen verwendet. Im Bereich der Gleichspannung liegen zum aktuellen Zeitpunkt in diesem Bereich noch Defizite vor. Es müssen weitere Effekte berücksichtigt werden, welche bei Wechselspannung nur eine untergeordnete Rolle spielen. Da sich die reine Gleichspannung über die Zeit betragsmäßig und in ihrer Polarität im Allgemeinen nicht verändert, müssen langsame Polarisierungseffekte und der Kapazitiv-Resistive-Übergang berücksichtigt werden.

In der vorliegenden Masterarbeit wurden ausgewählte Defekte in GIS/GIL mit Hilfe spezieller Testzellen reproduziert und analysiert. Die „Spitze auf Hochspannung“, das „freie Potential“ und das „Metallische Partikel auf einer Isolatoroberfläche“ wurden in Abhängigkeit der Polarität der Spannung, des Drucks und des Isoliergases hinsichtlich ihrer Detektierbarkeit untersucht. Darüber hinaus wurden erste orientierende Messungen in Hinblick auf den Einfluss der Vorbelastung und der Elektrodenabstände getätigt.

Bei der Interpretation der Messergebnisse konnten folgende Erkenntnisse ermittelt werden:

- Im Allgemeinen sind die untersuchten Defekte unter gegebenen Bedingungen in allen Variationen mit Hilfe einer Teilentladungsmessung detektierbar.
- Die Durchschlagsspannung der Isolieranordnungen mit Defekten war bei SF₆ betragsmäßig größer als bei Stickstoff, da die elektrische Festigkeit von SF₆ mit 8,84 kV/mm*bar gegenüber N₂ mit 3,3 kV/mm*bar größer ist.
- Stickstoff weist eine höhere prozentuelle Druckabhängigkeit als Schwefelhexafluorid auf, was sich durch experimentell ermittelte Paschenkurven bestätigt.
- SF₆ weist auf Grund seiner Elektronegativität eine größere Druckabhängigkeit im Bereich der Einsetzspannung auf als N₂. Begründet ist dieses Verhalten in der elektronegativen Eigenschaft von SF₆.
- Bei der Spitze auf Hochspannung ist der Polaritätseffekt nachweisbar.

- Bei N_2 steigt die Detektierbarkeit mit dem Druck, bei SF_6 sinkt die Detektierbarkeit. Grund hierfür sind die jeweiligen druckabhängigen Verläufe der Einsetz- und Durchschlagsspannung.
- Bei der Spitze auf Hochspannung ist der Einfluss der Raumladungsbildung in Form einer Verringerung der TE-Aktivität bei Steigerung der Spannung bemerkbar.
- Bei dem Defekt des freien Potentials ist geometriebedingt ein Polaritätseffekt in der Einsetzspannung mit vertauschter Polarität und in der Durchschlagsspannung kein Polaritätseffekt feststellbar.
- Beim metallischen Partikel auf der Isolatoroberfläche ist der Polaritätseffekt bemerkbar.
- Es konnte kein Einfluss der Vorbelastung mit 80 % der Durchschlagsspannung festgestellt werden.
- Bei der Vorbelastung mit 80 % der Einsetzspannung ergibt sich bei der Spitze auf Hochspannung unter Verwendung von SF_6 eine Ansammlung von positiv geladenen Gasmolekülen im Bereich der Spitze. Dies führt zu einer erhöhten Bindung freier Elektronen und somit zu einer Verschiebung der Einsetzspannung hin zu höheren Werten.
- Beim freien Potential führt die Vorbelastung mit 80 % der Einsetzspannung zu einer Aufladung des freien Potentials und zu einer betragsmäßigen Verringerung der Einsetzspannung.
- Bei der Variation der Partikelposition konnte der bereits in [22] nachgewiesene positionabhängige Polaritätseffekt des Partikels festgestellt werden.
- Beim Vergleich der untersuchten Defekte in den Testzellen mit einer 420-kV-GIL konnte festgestellt werden, dass die Defekte in einer realen 420-kV-GIL mit den derzeitigen Prüfspannungen detektierbar sein sollten, es jedoch weiterer Untersuchungen bei höherem Druck bedarf.

Bei Prüfungen in der Praxis muss zwischen den Untersuchungen im Labor und vor Ort unterschieden werden. Aufgrund der in dieser Arbeit gemessenen geringen Amplituden der TE kann es vor allem bei Verwendung von SF_6 im Allgemeinen und bei dem Partikel auf der Isolatoroberfläche im Speziellen zu Problemen in der Nachweisbarkeit der Defekte kommen.

Literaturverzeichnis

- [1] Huber-Bachmann, Schönauer, Schöberl: „Österreich - Zahlen, Daten, Fakten“. Statistik-Austria, 8. Auflage, 2012
- [2] Pirker, Schichler: „Zustandsbewertung elektrischer Betriebsmittel als Basis für eine sichere Energieübertragung“. 14. Symposium Energieinnovation, Graz, Österreich, 2016
- [3] Koch, Imamovic: „High Power AC and DC Underground Transmission Lines“. Cigré-IEC Colloquium, Report 101, Montreal, Kanada, 2016
- [4] CIGRÉ WG B4.52: „HVDC Grid Feasibility Study“. Technical Brochure 533, 2013
- [5] CIGRÉ WG D1.33: „Guide for Electrical Partial Discharge Measurements in compliance to IEC 60270“. Technical Brochure 366, 2008
- [6] Kröpfel: „Die gasisolierte Übertragungsleitung (GIL)“. Masterarbeit, TU Graz, Österreich, 2012
- [7] CIGRÉ WG 23/21/33.15: „Gas Insulated Transmission Lines (GIL)“. Technical Brochure 218, 2003
- [8] Schwarz: „Optimierung der UHF-Teilentladungsdetektion in GIS/GIL“. Masterarbeit, TU Graz, Österreich, 2014
- [9] CIGRÉ WG B3/B1.27: „Factors for Investment Decision GIL vs. Cables for AC Transmission“. Technical Brochure 639, 2015
- [10] Zamani: „Das Verhalten von Partikeln im quasihomogenen Gleichfeld“. Masterarbeit, TU Graz, Österreich, 2013
- [11] CIGRÉ WG B3.17: „GIS, state of the art 2008“. Technical Brochure 381, 2009
- [12] Tenzer, Behne, Juhre, Imamovic: „Realization and Testing of gas-insulated DC Systems“. Highvolt Kolloquium '15, Radebeul, Deutschland, 2015
- [13] Migliavacca: „Advanced Technologies for Future Transmission Grids“. Springer-Verlag, 1. Auflage, 2013
- [14] Oeding, Oswald: „Elektrische Kraftwerke und Netze“. Springer-Verlag, 7. Auflage, 2011
- [15] Piccin: „Partial Discharge Analysis in HVDC Gas Insulated Substations“. Masterarbeit, TU Delft, Niederlande, 2013
- [16] Rosenzopf: „Teilentladungsmessung bei hoher Gleichspannung“. Bachelorarbeit, TU Graz, Österreich, 2015
- [17] Muhr, Fabian, Jaufer, Exner: „Partial Discharge Behavior of Mineral Oil and oil-board Insulation Systems at HVDC“. IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Bali, Indonesien, 2012

- [18] Küchler: „Hochspannungstechnik - Grundlagen - Technologie - Anwendung“. Springer-Verlag, 3. Auflage, 2009
- [19] CIGRÉ WG D1.28: „Optimized Gas-Insulated Systems by Advanced Insulation Techniques“. Technical Brochure 571, 2014
- [20] Gänger: „Der elektrische Durchschlag in Gasen“. Springer-Verlag, 1953
- [21] International Electrotechnical Commission (IEC): „Bestimmungen für Schwefelhexafluorid von technischem Reinheitsgrad zur Verwendung in elektrischen Betriebsmitteln“. IEC 60376, 2005
- [22] Hering: „Überschlagsverhalten von Gas-Feststoff-Isoliersystemen unter Gleichspannungsbelastung“. Dissertation, TU Dresden, Deutschland, 2016
- [23] CIGRÉ WG D1.03.10: „N₂/SF₆ Mixtures for Gas Insulated Systems“. Technical Brochure 260, 2004
- [24] Kreuger: „Industrial high DC voltage“. Delft University Press, 1995
- [25] Fromm: „Partial Discharge and Breakdown Testing at High DC Voltage“. Dissertation, TU Delft, Niederlande, 1995
- [26] Morshuis, Cavallini, Fabiani, Montanari, Azcarraga: „Stress Conditions in HVDC Equipment and Routes to in Service Failure“. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 22, Nr. 1, Februar 2015
- [27] Fromm: „Interpretation of Partial Discharges at dc Voltages“. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, Nr. 5, Oktober 1995
- [28] Roth, Senarclens, Amsler: „Hochspannungstechnik“. Springer-Verlag, 4. Auflage, 1959
- [29] CIGRÉ WG D1.03: „Gas Insulated Systems for HVDC: DC Stress at DC and AC Systems“. Technical Brochure 506, 2012
- [30] Müller: „Leitfähige Partikel im homogenen elektrischen Gleichspannungsfeld“. Masterarbeit, TU Graz, Österreich, 2012
- [31] Hinterholzer: „Der Durchschlag in SF₆ unter Einfluss der Raumladungsstabilisierung“. Dissertation, TU München, Deutschland, 2002
- [32] CIGRÉ WG A3.06: „Final Report of the 2004 - 2007 International Enquiry on Reliability of High Voltage Equipment - Part1 - Summary and General Matters“. Technical Brochure 509, 2012
- [33] CIGRÉ WG A3.06: „Final Report of the 2004 - 2007 International Enquiry on Reliability of High Voltage Equipment - Part 5 - Gas Insulated Switchgear (GIS)“. Technical Brochure 513, 2012
- [34] CIGRÉ WG 33/23.12: „Insulation Co-ordination of GIS: Return of Experience, On Site Tests and Diagnostic Techniques“. Electra, Nr. 176, Februar 1998

- [35] Endo, Okusu, Nishizawa, Hayakawa, Yoshida, Ogawa, Okubo: „High Speed Measurement and Analysis of Partial Discharge Pulses in SF₆ Gas Insulation System“. 15th International Symposium on High Voltage Engineering, Ljubljana, Slowenien, 2007
- [36] International Electrotechnical Commission (IEC): „High-voltage test techniques - Partial discharge measurements (edition 3.1)“. IEC 60270:2000+AMD1:2015, 2015
- [37] International Electrotechnical Commission (IEC): „Isolationskoordination - Teil 1: Begriffe, Grundsätze und Anforderungen“. IEC 60071-1, 2006
- [38] CIGRÉ WG 15.11/33.03.02: „Knowledge Rules For Partial Discharge Diagnosis In Service“. Technical Brochure 226, 2003
- [39] Stuckenholz, Gamlin, Mraz: „PD Performance of UHV-DC Test Equipment“. 19th International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, Tschechien, 2015
- [40] Schichler, Pirker: „PD Measurement at DC Voltage on Typical Defects of GIS/GIL“. Cigré SC D1 Colloquium - Trends in Technology, Materials, Testing and Diagnostics Applied to Electric Power Systems, Rio de Janeiro, Brasilien, 2015
- [41] Beyer, Morshuis, Smit, Petrarca: „Partial Discharge Diagnostics for DC Equipment“. 10th International Symposium on High Voltage Engineering, Montreal, Kanada, 1997
- [42] Morshuis, Smit: „Partial Discharge at dc Voltage: Their Mechanism, Detection and Analysis“. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12, Nr. 2, April 2005
- [43] Densley: „Partial Discharge Under Direct-Voltage Conditions,“ in *Engineering Dielectrics: Vol. 1: Corona Measurement and Interpretation*, American Society for Testing and Materials, 1979
- [44] Negara, Yaji, Imasaka, Suehiro, Hayashi, Hara: „Corona Discharge Mechanism and Breakdown Voltage Characteristics from Metallic Floating Particle in SF₆ under dc Voltage“. 8th International Conference on Properties and Applications of Dielectrical Materials, Bali, Indonesien, 2006
- [45] Arnold, Tenbohlen, Köhler, Riechert, Straumann: „Fixed Particles in Coaxial SF₆ Arrangements at Various Voltage Stress“. International Conference on High Voltage Engineering and Application, Posen, Polen, 2014
- [46] Diessner, Trump: „Free Conducting Particles in a Coaxial Compressed-Gas-Insulated System“. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-89, Nr. 8, November/Dezember 1970
- [47] Pattanadech: „Partial Discharge Inception Voltage Characteristics of Mineral Oil“. Dissertation, TU Graz, Österreich, 2014
- [48] Messwandler-Bau GmbH Bamberg: „Hochspannungs-Baukasten - Liste HS-B72“. Bamberg, Deutschland

- [49] Hinrichsen: „Hochspannungstechnik“. Skriptum, TU Darmstadt, Deutschland, 2009
- [50] Imamovic: „Umweltfreundliche Isoliergase für gasisolierte Leitungen zur Hochspannung-Gleichstrom-Übertragung“. Dissertation, TU Graz, Österreich, 2011
- [51] CIGRÉ WG 15.03: „Breakdown of Gases in Uniform Field - Paschen Curves for nitrogen, sulfur hexafluorid, hydrogen, carbon dioxide and helium“. Technical Brochure 4, 1977
- [52] Cookson: „Compressed Gas as High Voltage Insulation“. Students' Quarterly Journal, Vol. 39, 1968
- [53] Hara, Adachi, Tobata: „Particle-Initiated Breakdown Characteristics of Conical Insulator in N₂ Gas and N₂/O₂ Mixtures Under DC Voltage“. IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-22, Nr. 1, Februar 1987
- [54] Asano, Yatsuzuka, Yamaki: „DC Corona Discharge of a Metal Filament Particle Within Parallel-Plate Electrodes“. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36, Nr. 1, Januar/Februar 2000
- [55] Malik, Qureshi: „The Influence of Voltage Polarity And Field Non-Uniformity On The Breakdown Behavior Of Rod-Plane Gaps Filled With SF₆“. IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-14, Nr. 6, Dezember 1979
- [56] International Electrotechnical Commission (IEC): „Convertor Transformers - Part 2: Transformers for HVDC Applications“. IEC 61378-2:2001, 2001
- [57] International Electrotechnical Commission (IEC): „Power Transformers - Part 6: Reactors“. IEC 60076-6:2007, 2007
- [58] IEC/IEEE International Standard: „Bushings for DC Application“. IEC/IEEE 65700-19-03:2014, 2014
- [59] Juhre, Lutz, Imamovic: „Testing and Long Term Performance of gas-insulated DC Compact Switchgear“. Cigre Science & Engineering, Nr. 6, Oktober 2016
- [60] Schwaiger: „Elektrische Festigkeitslehre“. Springer, 2. Auflage Auflage, 1925
- [61] Hering, Speck, Großmann, Riechert, Neuhold: „Detection of Particles on the Insulator Surface in gas insulated DC Systems“. Highvolt Kolloquium '15, Radebeul, Deutschland, 2015

Abbildungsverzeichnis

Bild 1-1:	Zielsetzung der vorliegenden Masterarbeit.....	2
Bild 2-1:	A Gerader Leitungsbaustein, B Eckbaustein, C Trennbaustein, D Kompensationseinrichtung, 1 Metallgehäuse, 2 Innenleiter, 3 Gleitkontaktstecker/Gleitkontaktbuchse, 4 gasdurchlässige Isolator, 5 Stützisolator, 6 Längskompensation [9]	4
Bild 2-2:	Normierte elektrische Festigkeit E, benötigter Druck p für konstante dielektrische Festigkeit und damit verbundene Menge q an SF ₆ für N ₂ /SF ₆ Gasgemische [23].....	6
Bild 2-3:	Unselbstständige und selbstständige Entladung in Gasen [18].....	7
Bild 2-4:	Entladungsmechanismus nach Townsend [18].....	8
Bild 2-5:	Paschenkurven unterschiedlicher Isoliergase [18].....	10
Bild 2-6:	Feldverzerrung durch die Elektronenlawine [18]	11
Bild 2-7:	Polaritätseffekt bei einer Spitzen-Platten-Anordnung [18].....	12
Bild 2-8:	Betriebszustände bei Gleichspannung, nach [25]	12
Bild 2-9:	Feldverteilung in einem GIS bei AC und DC [3]	14
Bild 2-10:	Ersatzschaltbild zur Beschreibung der Komponenten des Kapazitiv-Resistiv- Übergangs [22]	16
Bild 2-11:	Koronastabilisierung einer Spitze bei positiver Polarität der Spannung [31]	17
Bild 2-12:	Unterscheidung verschiedener Ursachen für Fehler in GIS/GIL, nach [33].....	18
Bild 2-13:	Fehler in GIS/GIL, welche zum elektrischen Durchschlag führen, nach [34].....	19
Bild 2-14:	Typische Defekte bei gasisolierten Systemen [35].....	19
Bild 2-15:	Detektierbarkeit am Beispiel eine Spitze-Platte-Anordnung (s = 17 mm, Stickstoff, Gleichspannung positiver Polarität).....	20
Bild 3-1:	Messkreis zur TE-Messung mit Messimpedanz in Serie zu C _k [36].....	22
Bild 3-2:	Teilentladungen bei AC und DC, nach [2]	23
Bild 3-3:	H(q, Δt _{suc})-Histogramm (Korona in Öl, Korona in Luft, innere TE bei PE) [27]	24
Bild 3-4:	ABC-Ersatzschaltung für innere Teilentladung bei AC, nach [25]	25
Bild 3-5:	Spannungsverläufe innerer Teilentladungen bei AC, nach [25].....	25
Bild 3-6:	Erweiterte ABC-Ersatzschaltung für innere Teilentladung bei DC, nach [25].....	26
Bild 3-7:	Spannungsverläufe innerer Teilentladungen bei DC, nach [15].....	26
Bild 3-8:	Townsend-Entladung (links) und Raether-Entladung (rechts) [42].....	27

Bild 3-9: Teilentladungen in Abhängigkeit von der Amplitude der Gleichspannung, nach [43]	28
Bild 3-10: Bewegungsablauf eines freien Partikels unter Gleichspannung [29].....	29
Bild 3-11: Teilentladungseinsetzspannung und Durchschlagsspannung bei einem frei beweglichen Partikel in Abhängigkeit von Gasdruck und Partikelgeometrie ($l = 5 \text{ mm}$) [29].....	30
Bild 3-12: Prozesse an einer Grenzschicht [22].....	31
Bild 3-13: Haftendes Partikel auf Isolatoroberfläche [15] a) negative Polarität und b) positive Polarität der angelegten Spannung	31
Bild 3-14: Einfluss der Partikellänge auf das Durchschlagsverhalten [22]	32
Bild 3-15: Einfluss der Partikelposition auf das Durchschlagsverhalten [22]	32
Bild 3-16: (Korona-)Entladung als Funktion der Zeit, nach [25]	33
Bild 3-17: Wiederholende Entladungen bei Spitze auf Hochspannung [15]	34
Bild 4-1: Messaufbau, nach [16, 36].....	36
Bild 4-2: Teilentladungen beim Rampentest bis hin zur Einsetzspannung, nach [43].....	38
Bild 4-3: Kleine Testzelle mit einer Spitze auf Hochspannung	40
Bild 4-4: Große Testzelle mit einer Spitze auf Hochspannung.....	41
Bild 4-5: Mikroskopie einer Wolframnadel	42
Bild 4-6: Kleine Testzelle mit freiem Potential	43
Bild 4-7: Große Testzelle mit metallischem Partikel auf Isolatoroberfläche	44
Bild 4-8: Querschnitt durch den Giesharzisolator.....	44
Bild 5-1: TE-Einsetzspannung, Durchschlagsspannung und Impulshöhe der Entladungen bei TE-Einsetzspannung für die unterschiedlichen Defekte bei Stickstoff und Gleichspannung positiver Polarität in Abhängigkeit vom Gasdruck.....	46
Bild 5-2: TE-Einsetzspannung, Durchschlagsspannung und Impulshöhe der Entladungen bei TE-Einsetzspannung einer Spitze auf Hochspannung für Stickstoff und Schwefelhexafluorid bei Gleichspannung positiver Polarität in Abhängigkeit vom Gasdruck ($s = 10 \text{ mm}$)	49
Bild 5-3: TE-Einsetzspannung, Durchschlagsspannung und Impulshöhe der Entladungen bei TE-Einsetzspannung einer Spitze auf Hochspannung für Stickstoff bei Gleichspannung positiver und negativer Polarität in Abhängigkeit vom Gasdruck ($s = 10 \text{ mm}$).....	51
Bild 5-4: TE-Einsetzspannung, Durchschlagsspannung und Impulshöhe der Entladungen bei TE-Einsetzspannung einer Spitze auf Hochspannung für Schwefelhexafluorid bei Gleichspannung positiver und negativer Polarität in Abhängigkeit vom Gasdruck ($s = 10 \text{ mm}$).....	52

Bild 5-5:	TE-Einsetzspannung und Durchschlagsspannung einer Spitze auf Hochspannung für Stickstoff bei Gleichspannung positiver und negativer Polarität sowie Blitzstoßspannung in Abhängigkeit vom Gasdruck ($s = 25 \text{ mm}$, $r = 0,8 \text{ mm}$) [52]	52
Bild 5-6:	Effekt der Koronastabilisierung bei einer Spitze auf Hochspannung anhand der Entladungsamplitude und der Zeitdifferenz zwischen den Entladungen für Stickstoff unter 3 bar bei Gleichspannung negativer Polarität ($s = 10 \text{ mm}$)	54
Bild 5-7:	Auswirkung der Raumladungen bei einer Spitze auf Hochspannung anhand der Entladungsamplitude und der Zeitdifferenz zwischen den Entladungen für Schwefelhexafluorid unter 1 bar bei Gleichspannung positiver Polarität ($s = 10 \text{ mm}$)	54
Bild 5-8:	TE-Einsetzspannung und Durchschlagsspannung einer Spitze auf Hochspannung für Stickstoff bei Gleichspannung positiver Polarität in Abhängigkeit vom Gasdruck ($s = 10 \text{ mm}$, KTZ)	55
Bild 5-9:	Zeitweilige Verringerung der TE-Aktivität bei einer Spitze auf Hochspannung anhand der Entladungsamplitude und der Zeitdifferenz zwischen den Entladungen für Stickstoff unter 3 bar bei Gleichspannung positiver Polarität ($s = 10 \text{ mm}$)	56
Bild 5-10:	Übergang der Entladungsmechanismen bei einer Spitze auf Hochspannung anhand der Entladungsamplitude und der Zeitdifferenz zwischen den Entladungen für Stickstoff unter 2 bar bei Gleichspannung positiver Polarität ($s = 17 \text{ mm}$)	57
Bild 5-11:	TE-Einsetzspannung, Durchschlagsspannung und Impulshöhe der Entladungen bei TE-Einsetzspannung eines freien Potentials für Stickstoff und Schwefelhexafluorid bei Gleichspannung positiver Polarität in Abhängigkeit vom Gasdruck ($r_{\text{Kugel}} = 10 \text{ mm}$, $s_{\text{oben}} = 1 \text{ mm}$, $s_{\text{unten}} = 7 \text{ mm}$)	58
Bild 5-12:	TE-Einsetzspannung, Durchschlagsspannung und Impulshöhe der Entladungen bei TE-Einsetzspannung eines freien Potentials für Stickstoff bei Gleichspannung positiver und negativer Polarität in Abhängigkeit vom Gasdruck ($r_{\text{Kugel}} = 10 \text{ mm}$, $s_{\text{oben}} = 1 \text{ mm}$, $s_{\text{unten}} = 7 \text{ mm}$)	59
Bild 5-13:	Näherungsweise konstante Entladungsverteilung eines freien Potentials anhand der Entladungsamplitude und der Zeitdifferenz zwischen den Entladungen für Schwefelhexafluorid unter 2 bar bei Gleichspannung positiver Polarität ($r_{\text{Kugel}} = 10 \text{ mm}$, $s_{\text{oben}} = 1 \text{ mm}$, $s_{\text{unten}} = 7 \text{ mm}$)	60
Bild 5-14:	TE-Einsetzspannung, Durchschlagsspannung und Impulshöhe der Entladungen bei TE-Einsetzspannung eines Partikels auf einer Isolatoroberfläche für Stickstoff und Schwefelhexafluorid bei Gleichspannung positiver Polarität in Abhängigkeit vom Gasdruck ($d = 10 \text{ mm}$, $l = 8 \text{ mm}$, $r = 0,4 \text{ mm}$)	61
Bild 5-15:	TE-Einsetzspannung, Durchschlagsspannung und Impulshöhe der Entladungen bei TE-Einsetzspannung eines Partikels auf einer Isolatoroberfläche für Stickstoff bei Gleichspannung positiver und negativer Polarität in Abhängigkeit vom Gasdruck ($d = 10 \text{ mm}$, $l = 8 \text{ mm}$, $r = 0,4 \text{ mm}$)	62
Bild 5-16:	Geringe Amplitude und Wiederholrate der Teilentladungen eines Partikels auf einer Isolatoroberfläche anhand der Entladungsamplitude und der Zeitdifferenz zwischen den Entladungen für Stickstoff unter 1 bar bei Gleichspannung positiver Polarität ($d = 10 \text{ mm}$, $l = 8 \text{ mm}$, $r = 0,4 \text{ mm}$)	63

Bild 5-17: Geringe Amplitude und Wiederholrate der Teilentladungen eines Partikels auf einer Isolatoroberfläche anhand der Entladungsamplitude und der Zeitdifferenz zwischen den Entladungen für Schwefelhexafluorid unter 1 bar bei Gleichspannung positiver Polarität ($d = 10 \text{ mm}$, $l = 8 \text{ mm}$, $r = 0,4 \text{ mm}$)	64
Bild 5-18: AC-PRPD-Pattern einer Spitze auf Hochspannung bei 3,2-facher TE-Einsetzspannung für Stickstoff unter 1 bar ($s = 10 \text{ mm}$)	65
Bild 5-19: AC-PRPD-Pattern eines freien Potentials bei 2,4-facher TE-Einsetzspannung für Stickstoff unter 1 bar ($r_{\text{Kugel}} = 10 \text{ mm}$, $s_{\text{oben}} = 1 \text{ mm}$, $s_{\text{unten}} = 7 \text{ mm}$)	66
Bild 5-20: AC-PRPD-Pattern eines Partikels auf einer Isolatoroberfläche bei 1,3-facher TE-Einsetzspannung für Stickstoff unter 1 bar ($d = 10 \text{ mm}$, $l = 8 \text{ mm}$, $r = 0,4 \text{ mm}$)	66
Bild 5-21: TE-Einsetzspannung, Durchschlagsspannung und Impulshöhe der Entladungen bei TE-Einsetzspannung einer Spitze auf Hochspannung für Schwefelhexafluorid unter 1 bar bei Gleichspannung negativer Polarität in Abhängigkeit von der Vorbelastung ($s = 10 \text{ mm}$).....	67
Bild 5-22: TE-Einsetzspannung, Durchschlagsspannung und Impulshöhe der Entladungen bei TE-Einsetzspannung eines freien Potentials für Schwefelhexafluorid unter 1 bar bei Gleichspannung negativer Polarität in Abhängigkeit von der Vorbelastung ($r_{\text{Kugel}} = 10 \text{ mm}$, $s_{\text{oben}} = 1 \text{ mm}$, $s_{\text{unten}} = 7 \text{ mm}$)	68
Bild 5-23: TE-Einsetzspannung, Durchschlagsspannung und Impulshöhe der Entladungen bei TE-Einsetzspannung eines Partikels auf einer Isolatoroberfläche für Stickstoff unter 1 bar bei Gleichspannung positiver Polarität in Abhängigkeit von der Partikelposition ($l = 8 \text{ mm}$, $r = 0,4 \text{ mm}$)	69
Bild 5-24: TE-Einsetzspannung und Durchschlagsspannung eines Partikels auf einer Isolatoroberfläche bei einem Gemisch aus Stickstoff und Sauerstoff unter 1 bar bei Gleichspannung positiver Polarität in Abhängigkeit von der Partikelposition und der zugehöriger Versuchsaufbau (79 % N_2 , 21 % O_2) [53]	70
Bild 5-25: TE-Einsetzspannung, Durchschlagsspannung und Impulshöhe der Entladungen bei TE-Einsetzspannung einer Spitze auf Hochspannung für Stickstoff unter 1 bar bei Gleichspannung positiver Polarität in Abhängigkeit von der Schlagweite.....	71
Bild 5-26: TE-Einsetzspannung und Durchschlagsspannung einer Spitze auf Hochspannung für Schwefelhexafluorid bei Gleichspannung positiver und negativer Polarität in Abhängigkeit von der Schlagweite ($r_{\text{wire-tip}} = 0,125 \text{ mm}$) [54]	72
Bild 5-27: TE-Einsetzspannung und Durchschlagsspannung einer Spitze auf Hochspannung für Schwefelhexafluorid bei Gleichspannung positiver Polarität in Abhängigkeit von dem Spitzenradius ($s = 20 \text{ mm}$) [55]	73

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Detektierbarkeit am Beispiel eine Spitze-Platte-Anordnung	20
Tabelle 2: Technische Daten des Prüfaufbaus, nach [16, 48] und Typenschilder.....	37
Tabelle 3: Messzyklen der unterschiedlichen Defekttypen.....	39
Tabelle 4: Ausnutzungsfaktor nach Schwaiger	43
Tabelle 5: Übersicht über die durchgeführten Messungen.....	45
Tabelle 6: Übersicht über die Messergebnisse der Hauptuntersuchungen	48
Tabelle 7: Unterschiede in der Detektierbarkeit der SHV bei Verwendung von N ₂	50
Tabelle 8: Unterschiede in der Detektierbarkeit der SHV bei Verwendung von SF ₆	50
Tabelle 9: Amplitude der TE bei Spitze auf Hochspannung.....	53
Tabelle 10: Unterschiede in der Detektierbarkeit des FP bei Verwendung von N ₂	58
Tabelle 11: Unterschiede in der Detektierbarkeit des FP bei Verwendung von SF ₆	58
Tabelle 12: Amplitude der Teilentladungen bei freiem Potential	60
Tabelle 13: Unterschiede in der Detektierbarkeit des PAI bei Verwendung von N ₂	62
Tabelle 14: Unterschiede in der Detektierbarkeit des PAI bei Verwendung von SF ₆	62
Tabelle 15: Amplitude der Teilentladungen bei Partikel auf Isolatoroberfläche	63
Tabelle 16: Gegenüberstellung ausgewählter Partikelpositionen bei N ₂ und 1 bar.....	70
Tabelle 17: Genormte TE-Pegel, nach [39].....	74
Tabelle 18: Testverfahren für GIS bei DC (550 kV), nach [3, 59]	75
Tabelle 19: Überhöhungsfaktor abhängig von der Partikelgeometrie für ein Partikel auf einer Isolatoroberfläche, nach [22]	75
Tabelle 20: Vergleich der maximalen Feldstärke bei Teilentladungseinsetzspannung der untersuchten Defekte in den entsprechenden Testzellen sowie der Ergebnisse nach [45] und der Defekte in einer 420-kV-GIL bei Leiter-Erde-Spannung unter Verwendung von SF ₆	76

Abkürzungsverzeichnis

(HV) AC	(Hohe) Wechselspannung	(High Voltage) Alternating Current
(HV) DC	(Hohe) Gleichspannung	(High Voltage) Direct Current
$\alpha / \alpha_{\text{effektiv}}$	(effektiver) Ionisierungskoeffizient	
A, B, c, $(E/\rho)_0$	experimentell ermittelte Gaskonstanten	
BDV, U_{bd}	Durchschlagsspannung	(Breakdown-Voltage)
CBM	Zustandsabhängige Instandhaltung	(Condition-Based-Maintenance)
d	Elektrodenabstand	
Δt	Verzugszeit als Summe aus $t_R + t_L$	
ΔV	Spannungsdifferenz zwischen U_{min} und U_i	
ε	Permittivität	
FP	Freies Potential	(Floating Potential)
γ	Oberflächenionisierungszahl	
GIL	Gasisolierte Leitung	
GIS	Gasisoliertes Schaltanlagen	
GTZ	Große Testzelle	
η	Anlagerungskoeffizient nach Townsend	
HDÜ	Hochspannungs-Drehstrom-Übertragung	
HFCT	Hochfrequenzstromwandler	(high frequency current transformer)
HGÜ	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung	
η_s	Ausnutzungsfaktor nach Schwaiger	
κ	elektrische Leitfähigkeit	
KTZ	Kleine Testzelle	
LI (Spannung)	Blitzstoß (-spannung)	(Lightning Impulse)
MW	Mittelwert	
N_2	Stickstoff	
N_{krit}	kritische Elektronenzahl nach Raether	
PAI	Partikel auf Isolatoroberfläche	(Particle on Insulation)
PDEV, U_e	Teilentladungsaussetzspannung	(Partial Discharge Extinction Voltage)
PDIV, U_i	Teilentladungseinsetzspannung	(Partial Discharge Inception Voltage)
PRPD-(Pattern)	Phasenbezogener Fingerabdruck der TE	(Phase Resolved Partial Discharge)
RCM	Zuverlässigkeitsabhängige Instandhaltung	(Reliability-Centered-Maintenance)
SA	Standardabweichung	
SF_6	Schwefelhexafluorid	
SHV	Spitze auf Hochspannung	(Protrusion on High Voltage)
SI (Spannung)	Schaltstoß (-spannung)	(Switching Impulse)
TBM	Zeitbasierte Instandhaltung	(Time Based Maintenance)
TE (PD)	Teilentladung	(Partial Discharge)
t_L	Verzögerungszeit einer TE	(lag-time)
t_R	Wiederaufladezeit bis zum Erreichen von U_{min}	(recovery-time)
UHF	Ultra-Hochfrequent	(Ultra High Frequency)
U_{min}	Min. Spannung für das Auftreten von TE	
U_N	Nennspannung	
U_R	Restspannung nach einer Entladung	

Anhang A1 - Messergebnisse

Im Anhang A1 befinden sich die Werte der Einsetzspannung U_i , der Aussetzspannung U_e und der Durchbruchspannung U_{bd} der einzelnen Messungen. Für die Messungen der Einsetzspannung sind weiter die minimale und maximale Amplitude über die Messreihe angegeben. In den Tabellen sind darüber hinaus die entsprechenden Minimal- und Maximalwerte sowie bei Spannungswerten der Mittelwert und die zugehörige Standardabweichung (in %) angegeben.

Tabelle A1- 1: Spitze auf Hochspannung, KTZ, $s = 17$ mm, Luft, HVDC+

	Ohne Vorbelastung				0,8 PDIV für 0,5 h			0,8 BDV für 0,5 h		
	Q_i	U_i	U_e	U_{bd}	Q_i	U_i	U_{bd}	Q_i	U_i	U_{bd}
	pC	kV	kV	kV	pC	kV	kV	pC	kV	kV
MW		4,24	3,80	18,57		3,70	18,56		4,41	23,49
SA (%)		0,09	0,09	0,05		0,12	0,02		0,29	0,06
Min	5,06	3,82	3,40	16,96	5,08	3,23	17,78	8,08	3,51	22,19
Max	34,05	5,20	4,76	19,75	12,63	4,52	19,03	18,10	6,96	26,34
1	5,06	5,20	4,76	19,27	5,08	3,37	17,78	8,08	6,96	23,48
2	34,05	4,39	3,59	19,75	12,63	3,23	18,52	18,10	3,58	22,19
3		3,82	3,82	19,60		4,52	18,78		4,01	22,67
4		4,40	4,30	17,13		3,83	18,71		4,00	26,34
5		4,11	3,92	16,96		3,56	19,03		3,51	22,77
6		4,47	3,80	17,80						
7		4,32	3,89	18,27						
8		3,82	3,50	17,17						
9		4,22	3,78	18,47						
10		3,93	3,60	18,89						
11		3,96	3,50	19,18						
12		3,82	3,40	18,63						
13		3,99	3,60	19,42						
14		4,01	3,70	19,08						
15		4,79		18,80						
16		4,72		19,32						
17		4,04		17,96						

Tabelle A1- 2: Spitze auf Hochspannung, KTZ, s = 17 mm, Luft, HVDC-

	Ohne Vorbelastung				0,8 PDIV für 0,5 h			0,8 BDV für 0,5 h		
	Q _i	U _i	U _e	U _{bd}	Q _i	U _i	U _{bd}	Q _i	U _i	U _{bd}
	pC	kV	kV	kV	pC	kV	kV	pC	kV	kV
MW		-1,96	-1,83	-35,74		-1,45	-35,74		-1,57	-36,41
SA (%)		-0,25	-0,25	-0,01		-0,11	-0,01		-0,10	-0,01
Min	-17,05	-3,50	-3,30	-36,77	-20,80	-1,58	-36,02	-9,61	-1,81	-36,76
Max	-6,44	-1,46	-1,39	-35,33	-5,00	-1,14	-35,49	-5,12	-1,32	-35,97
1	-6,44	-3,50	-3,30	-35,59	-5,00	-1,14	-36,02	-5,12	-1,81	-36,11
2	-17,05	-2,34	-2,10	-35,57	-20,80	-1,58	-35,60	-9,61	-1,62	-35,97
3		-2,38	-2,20	-35,49		-1,48	-35,70		-1,32	-36,76
4		-2,17	-2,00	-35,65		-1,51	-35,49		-1,54	-36,58
5		-2,25	-1,99	-35,57		-1,54	-35,88		-1,56	-36,62
6		-2,16	-2,05	-35,80						
7		-1,83	-1,78	-35,86						
8		-2,13	-1,99	-35,60						
9		-2,04	-1,90	-35,70						
10		-2,10	-2,00	-35,60						
11		-1,47	-1,39	-36,06						
12		-1,68	-1,50	-35,62						
13		-1,47	-1,40	-35,37						
14		-1,88	-1,50	-35,51						
15		-1,46	-1,43	-35,64						
16		-1,46	-1,39	-35,33						
17		-1,52	-1,50	-36,77						
18		-1,51	-1,50	-36,66						

Tabelle A1- 3: Spitze auf Hochspannung, KTZ, s = 17 mm, N₂ 1 bar, HVDC+

	Ohne Vorbelastung				0,8 PDIV für 0,5 h		
	Q _i	U _i	U _e	U _{bd}	Q _i	U _i	U _{bd}
	pC	kV	kV	kV	pC	kV	kV
MW		7,21	6,70	20,67		6,90	21,55
SA (%)		0,07	0,10	0,03		0,09	0,03
Min	5,22	6,20	5,29	19,79	8,06	6,31	20,63
Max	6,12	7,90	7,30	22,04	10,62	8,05	22,03
1	5,22	7,54	6,61	20,33	8,06	8,05	20,63
2	6,12	7,90	7,10	20,41	10,62	6,93	21,21
3		7,14	6,98	20,21		6,68	22,02
4		7,17	7,01	20,59		6,52	22,03
5		7,23	7,10	20,44		6,31	21,88
6		7,77	7,24	20,38			
7		7,53	7,30	19,79			
8		7,28	7,03	20,38			
9		6,89	6,80	21,07			
10		6,20	5,29	22,04			
11		6,61	5,29	21,78			

Tabelle A1- 4: Spitze auf Hochspannung, KTZ, s = 17 mm, N₂ 1,5 bar, HVDC+

	Ohne Vorbelastung		
	U _i	U _e	U _{bd}
	kV	kV	kV
MW	6,38	6,05	21,52
SA (%)	0,05	0,08	0,02
Min	6,13	5,38	20,72
Max	7,00	6,80	21,98
1	7,00	6,80	20,72
2	6,14	6,10	21,57
3	6,13	5,38	21,74
4	6,48	5,86	21,58
5	6,15	6,10	21,98

Tabelle A1- 5: Spitze auf Hochspannung, KTZ, s = 17 mm, N₂ 2 bar, HVDC+

	Ohne Vorbelastung			
	Q _i	U _i	U _e	U _{bd}
	pC	kV	kV	kV
MW		5,13	4,69	24,10
SA (%)		0,05	0,01	0,03
Min	5,16	4,65	4,63	22,64
Max	7,06	5,35	4,80	24,66
1	5,16	5,29	4,63	24,54
2	7,06	5,35	4,80	24,62
3		5,09	4,66	22,64
4		5,27	4,70	24,03
5		4,65	4,64	24,66

Tabelle A1- 6: Spitze auf Hochspannung, KTZ, s = 17 mm, N₂ 3 bar, HVDC+

	Ohne Vorbelastung				0,8 BDV für 0,5 h		
	Q _i	U _i	U _e	U _{bd}	Q _i	U _i	U _{bd}
	pC	kV	kV	kV	pC	kV	kV
MW		5,42	5,20	34,26		5,48	33,60
SA (%)		0,11	0,12	0,02		0,03	0,01
Min	10,47	4,79	4,50	32,06	12,69	5,33	32,96
Max	19,01	6,91	6,70	35,08	16,42	5,71	34,06
1	10,47	4,79	4,60	34,14	12,69	5,71	32,96
2	19,01	4,84	4,82	34,88	16,42	5,34	33,85
3		5,39	5,20	34,77		5,35	33,94
4		5,53	5,30	34,76		5,33	34,06
5		4,79	4,50	35,08		5,68	33,18
6		5,40	5,20	34,32			
7		6,91	6,70	32,06			
8		5,78	5,30	33,91			
9		5,38	5,20	34,44			

Tabelle A1- 7: Spitze auf Hochspannung, KTZ, s = 17 mm, N₂ 4 bar, HVDC+

	Ohne Vorbelastung			
	Q _i	U _i	U _e	U _{bd}
	pC	kV	kV	kV
MW		6,20	6,00	40,52
SA (%)		0,01	0,04	0,01
Min	11,02	6,05	5,60	39,78
Max	23,21	6,28	6,21	41,39
1	11,02	6,05	5,60	41,39
2	23,21	6,26	6,09	40,65
3		6,19	6,00	40,76
4		6,28	6,10	40,00
5		6,24	6,21	39,78

Tabelle A1- 8: Spitze auf Hochspannung, KTZ, s = 17 mm, N₂ 1 bar, HVDC-

	Ohne Vorbelastung				0,8 BDV für 0,5 h		
	Q _i	U _i	U _e	U _{bd}	Q _i	U _i	U _{bd}
	pC	kV	kV	kV	pC	kV	kV
MW		-5,86	-5,57	-40,98		-5,26	-41,98
SA (%)		-0,18	-0,18	-0,03		-0,19	-0,08
Min	-97,01	-7,88	-7,60	-43,30	5,12	-6,73	-44,96
Max	-10,15	-4,32	-4,29	-39,01	55,75	-4,06	-35,95
1	-10,15	-5,33	-5,30	-40,70	5,12	-6,73	-40,72
2	-97,01	-6,58	-5,91	-41,25	55,75	-4,99	-35,95
3		-6,76	-6,59	-40,96		-6,07	-44,90
4		-7,88	-7,60	-40,60		-4,06	-44,96
5		-5,99	-5,80	-43,30		-4,47	-43,35
6		-6,07	-5,60	-39,01			
7		-5,28	-4,74	-42,68			
8		-4,54	-4,29	-40,91			
9		-4,32	-4,30	-39,42			

Tabelle A1- 9: Spitze auf Hochspannung, KTZ, s = 17 mm, N₂ 2 bar, HVDC-

	Ohne Vorbelastung		
	U _i	U _e	U _{bd}
	kV	kV	kV
MW	-7,88	-7,51	-43,79
SA (%)	-0,15	-0,13	-0,02
Min	-9,20	-8,78	-45,17
Max	-6,28	-6,01	-42,58
1	-7,07	-6,88	-43,18
2	-9,15	-8,78	-42,58
3	-9,20	-8,30	-43,39
4	-7,68	-7,60	-44,65
5	-6,28	-6,01	-45,17

Tabelle A1- 10: Spitze auf Hochspannung, KTZ, s = 17 mm, N₂ 3 bar, HVDC-

	Ohne Vorbelastung				0,8 BDV für 0,5 h		
	Q _i	U _i	U _e	U _{bd}	Q _i	U _i	U _{bd}
	pC	kV	kV	kV	pC	kV	kV
MW		-8,58	-7,22	-42,58		-7,74	-41,51
SA (%)		-0,14	-0,15	-0,01		-0,08	-0,02
Min	-142,30	-10,54	-8,80	-43,50	-77,19	#DIV/0!	#DIV/0!
Max	-20,60	-6,68	-5,73	-41,71	-5,51	-6,53	-40,04
1	-20,60	-8,54	-7,49	-42,42	-5,51	-6,53	-41,26
2	-142,30	-9,32	-8,64	-43,00	-77,19	-7,63	-40,04
3		-9,03	-6,77	-42,49		-8,39	-41,22
4		-9,81	-8,27	-42,48		-8,15	-42,72
5		-10,54	-8,80	-42,65		-7,99	-42,33
6		-8,14	-5,78	-41,71			
7		-7,17	-6,90	-42,73			
8		-7,99	-5,73	-42,20			
9		-6,68	-6,60	-43,50			

Tabelle A1- 11: Spitze auf Hochspannung, KTZ, s = 17 mm, N₂ 4 bar, HVDC-

	Ohne Vorbelastung		
	U _i	U _e	U _{bd}
	kV	kV	kV
MW	-9,73	-8,98	-46,06
SA (%)	-0,08	-0,07	-0,02
Min	-10,80	-9,88	-47,35
Max	-8,29	-8,20	-44,65
1	-10,80	-9,88	-45,59
2	-9,63	-9,07	-44,65
3	-8,29	-8,20	-47,35
4	-9,96	-8,33	-47,19
5	-9,95	-9,43	-45,52

Tabelle A1- 12: Spitze auf Hochspannung, KTZ, s = 17 mm, N₂ 5 bar, HVDC-

	Ohne Vorbelastung		
	U _i	U _e	U _{bd}
	kV	kV	kV
MW	-10,21	-9,82	-44,24
SA (%)	-0,12	-0,12	-0,01
Min	-12,37	-12,10	-44,61
Max	-8,91	-8,90	-43,71
1	-9,30	-9,30	-44,47
2	-9,94	-9,11	-44,61
3	-10,55	-9,70	-44,16
4	-12,37	-12,10	-44,24
5	-8,91	-8,90	-43,71

Tabelle A1- 13: Spitze auf Hochspannung, GTZ, s = 17 mm, N₂ 1 bar, HVDC+

	Ohne Vorbelastung				0,8 PDIV für 0,5 h			0,8 BDV für 0,5 h		
	Q _i	U _i	U _e	U _{bd}	Q _i	U _i	U _{bd}	Q _i	U _i	U _{bd}
	pC	kV	kV	kV	pC	kV	kV	pC	kV	kV
MW		5,37	5,20	20,93		4,83	22,49		5,26	20,68
SA (%)		0,07	0,08	0,05		0,04	0,03		0,04	0,02
Min	5,03	4,69	4,39	19,57	12,13	4,49	21,68	5,20	4,93	19,91
Max	5,60	6,02	5,80	22,91	40,90	5,02	23,61	26,28	5,53	21,13
1	5,03	5,51	5,29	20,17	12,13	4,49	22,76	5,20	5,36	19,91
2	5,60	5,47	5,40	19,82	40,90	5,02	21,68	26,28	5,31	21,13
3		5,48	5,47	19,57		4,92	23,61		5,17	20,95
4		5,46	5,40	20,16		4,79	22,05		4,93	21,07
5		5,72	5,70	19,98		4,91	22,36		5,53	20,32
6		5,01	5,00	21,99						
7		4,69	4,58	22,47						
8		4,91	4,39	22,91						
9		4,87	4,67	21,61						
10		5,45	5,15	20,82						
11		5,41	5,31	21,52						
12		6,02	5,39	20,44						
13		5,81	5,80	20,59						

Tabelle A1- 14: Spitze auf Hochspannung, GTZ, s = 17 mm, N₂ 2 bar, HVDC+

	Ohne Vorbelastung			
	Q _i	U _i	U _e	U _{bd}
	pC	kV	kV	kV
MW		6,43	6,23	25,30
SA (%)		0,05	0,01	0,01
Min	5,03	6,24	6,20	24,87
Max	5,31	7,05	6,28	25,61
1	5,03	7,05	6,28	25,02
2	5,31	6,27	6,20	25,45
3		6,24	6,20	24,87
4		6,26	6,20	25,61
5		6,33	6,26	25,54

Tabelle A1- 15: Spitze auf Hochspannung, GTZ, s = 17 mm, N₂ 3 bar, HVDC+

	Ohne Vorbelastung				0,8 PDIV für 0,5 h			0,8 BDV für 0,5 h		
	Q _i	U _i	U _e	U _{bd}	Q _i	U _i	U _{bd}	Q _i	U _i	U _{bd}
	pC	kV	kV	kV	pC	kV	kV	pC	kV	kV
MW		6,37	6,13	31,21		6,81	29,28		6,36	33,40
SA (%)		0,04	0,06	0,06		0,08	0,07		0,01	0,01
Min	18,86	5,93	5,33	27,06	16,93	6,14	27,22	20,74	6,24	32,99
Max	41,98	6,85	6,80	33,57	58,87	7,53	32,56	30,36	6,49	33,62
1	18,86	6,56	5,33	32,16	16,93	7,53	32,56	20,74	6,49	33,33
2	41,98	6,09	6,06	32,15	58,87	7,11	30,03	30,36	6,33	32,99
3		6,03	5,80	32,42		6,26	28,93		6,32	33,52
4		6,36	6,30	29,28		7,02	27,66		6,43	33,62
5		6,85	6,80	29,55		6,14	27,22		6,24	33,54
6		6,46	6,40	31,48						
7		6,43	6,40	30,11						
8		6,83	6,35	28,82						
9		6,42	6,40	27,06						
10		5,93	5,90	33,57						
11		6,44	5,95	33,39						
12		6,47	6,07	32,57						
13		5,99	5,93	33,13						

Tabelle A1- 16: Spitze auf Hochspannung, GTZ, s = 17 mm, N₂ 4 bar, HVDC+

	Ohne Vorbelastung			
	Q _i	U _i	U _e	U _{bd}
	pC	kV	kV	kV
MW		6,68	6,56	40,80
SA (%)		0,10	0,10	0,05
Min	24,35	6,06	6,00	37,00
Max	42,08	7,78	7,74	42,00
1	24,35	7,78	7,74	37,00
2	42,08	6,95	6,88	41,00
3		6,14	6,01	42,00
4		6,45	6,19	42,00
5		6,06	6,00	42,00

Tabelle A1- 17: Spitze auf Hochspannung, GTZ, s = 17 mm, N₂ 5 bar, HVDC+

	Ohne Vorbelastung				0,8 PDIV für 0,5 h			0,8 BDV für 0,5 h		
	Q _i	U _i	U _e	U _{bd}	Q _i	U _i	U _{bd}	Q _i	U _i	U _{bd}
	pC	kV	kV	kV	pC	kV	kV	pC	kV	kV
MW		8,57	8,00	49,38		7,96	49,48		8,27	50,81
SA (%)		0,09	0,13	0,03		0,06	0,03		0,09	0,08
Min	52,12	7,22	5,16	46,19	10,57	7,38	47,01	17,14	7,23	47,42
Max	85,70	10,00	9,35	51,99	28,67	8,78	51,89	33,46	9,49	58,25
1	52,12	8,68	8,30	49,05	10,57	8,78	51,89	17,14	8,01	50,40
2	85,70	9,54	9,35	49,29	28,67	8,09	49,20	33,46	7,85	49,21
3		10,00	8,91	49,48		7,38	48,95		7,23	47,42
4		8,94	8,24	49,71		7,48	47,01		8,78	58,25
5		8,38	8,30	46,92		8,07	50,33		9,49	48,78
6		8,87	8,80	50,19						
7		7,99	7,90	49,07						
8		8,08	7,45	48,48						
9		8,96	5,16	51,60						
10		7,25	7,24	50,78						
11		7,22	6,96	46,19						
12		8,73	8,72	49,20						
13		8,78	8,70	51,99						

Tabelle A1- 18: Spitze auf Hochspannung, GTZ, s = 17 mm, N₂ 1 bar, HVDC-

	Ohne Vorbelastung				0,8 PDIV für 0,5 h			0,8 BDV für 0,5 h		
	Q _i	U _i	U _e	U _{bd}	Q _i	U _i	U _{bd}	Q _i	U _i	U _{bd}
	pC	kV	kV	kV	pC	kV	kV	pC	kV	kV
MW		-4,58	-4,51	-31,06		-4,32	-31,03		-4,48	-31,01
SA (%)		-0,15	-0,15	-0,06		-0,12	-0,04		-0,12	-0,05
Min	-62,29	-5,89	-5,80	-33,63	-50,12	-5,34	-33,28	-55,75	-5,34	-33,50
Max	-5,35	-3,94	-3,87	-29,05	-5,70	-3,79	-29,62	-5,12	-3,79	-29,63
1	-5,35	-4,62	-4,57	-33,63	-5,70	-4,09	-33,28	-5,12	-4,89	-33,50
2	-62,29	-5,89	-5,80	-32,73	-50,12	-5,34	-31,88	-55,75	-5,34	-32,07
3		-4,19	-4,10	-29,05		-4,08	-30,47		-4,08	-29,70
4		-4,25	-4,20	-30,00		-3,79	-29,91		-3,79	-30,13
5		-3,94	-3,87	-29,87		-4,32	-29,62		-4,32	-29,63

Tabelle A1- 19: Spitze auf Hochspannung, GTZ, s = 17 mm, N₂ 3 bar, HVDC-

	Ohne Vorbelastung				0,8 PDIV für 0,5 h			0,8 BDV für 0,5 h		
	Q _i	U _i	U _e	U _{bd}	Q _i	U _i	U _{bd}	Q _i	U _i	U _{bd}
	pC	kV	kV	kV	pC	kV	kV	pC	kV	kV
MW		-4,66	-4,64	-40,75		-5,68	-38,85		-5,44	-38,59
SA (%)		-0,13	-0,13	-0,09		-0,11	-0,06		-0,16	-0,05
Min	-43,67	-5,86	-5,84	-46,82	-94,18	-6,03	-43,61	-72,09	-6,81	-42,17
Max	-5,61	-4,20	-4,20	-37,33	-5,58	-4,48	-36,59	-5,08	-4,45	-36,04
1	-5,61	-4,23	-4,20	-46,82	-5,58	-6,03	-43,61	-5,08	-4,45	-42,17
2	-43,67	-4,48	-4,22	-43,37	-94,18	-4,48	-39,09	-72,09	-4,46	-39,23
3		-4,52	-4,52	-38,20		-5,97	-37,65		-5,86	-38,29
4		-4,20	-4,40	-37,33		-5,88	-37,29		-5,63	-37,20
5		-5,86	-5,84	-38,01		-6,02	-36,59		-6,81	-36,04

Tabelle A1- 20: Spitze auf Hochspannung, GTZ, s = 17 mm, N₂ 5 bar, HVDC-

	Ohne Vorbelastung				0,8 PDIV für 0,5 h			0,8 BDV für 0,5 h		
	Q _i	U _i	U _e	U _{bd}	Q _i	U _i	U _{bd}	Q _i	U _i	U _{bd}
	pC	kV	kV	kV	pC	kV	kV	pC	kV	kV
MW		-6,03	-5,75	-48,18		-5,79	-48,18		-5,61	-50,11
SA (%)		-0,10	-0,12	-0,04		-0,05	-0,02		-0,05	-0,03
Min	-106,30	-6,97	-6,71	-51,92	-96,06	-6,05	-49,87	-86,19	-5,99	-51,41
Max	-5,40	-5,14	-5,10	-45,62	-21,74	-5,21	-46,55	-31,37	-5,23	-48,28
1	-5,40	-5,14	-5,10	-51,92	-21,74	-5,85	-48,68	-31,37	-5,39	-51,41
2	-106,30	-6,97	-6,71	-45,62	-96,06	-5,21	-49,87	-86,19	-5,99	-50,69
3		-5,67	-5,31	-47,22		-6,05	-47,45		-5,23	-48,77
4		-6,44	-6,42	-47,63		-6,04	-48,33		-5,57	-51,41
5		-5,91	-5,22	-48,52		-5,78	-46,55		-5,89	-48,28

Tabelle A1- 21: Spitze auf Hochspannung, GTZ, s = 17 mm, N₂ 1 bar, AC

	Ohne Vorbelastung				
	U _{i+}	U _{i-}	U _{e+}	U _{e-}	U _{bd}
	kV	kV	kV	kV	kV
MW	8,81	4,58	8,04	2,35	14,68
SA (%)	0,08	0,11	0,12	0,08	0,05
Min	7,85	4,06	6,98	2,06	14,07
Max	9,83	5,31	9,60	2,55	15,86
1	9,34	4,06	7,75	2,36	14,18
2	7,85	5,11	7,24	2,53	15,06
3	8,26	4,25	6,98	2,55	14,07
4	9,83	4,17	9,60	2,06	15,86
5	8,79	5,31	8,62	2,25	14,25

Tabelle A1- 22: Spitze auf Hochspannung, GTZ, s = 17 mm, N₂ 3 bar, AC

	Ohne Vorbelastung				
	U _{i+}	U _{i-}	U _{e+}	U _{e-}	U _{bd}
	kV	kV	kV	kV	kV
MW	9,85	4,12	9,27	3,47	23,57
SA (%)	0,10	0,14	0,04	0,18	0,02
Min	8,61	3,35	8,92	2,72	23,09
Max	10,97	4,74	9,85	4,07	24,68
1	10,95	3,51	9,35	2,72	23,09
2	10,97	3,35	9,85	2,73	23,62
3	9,43	4,41	8,98	4,07	23,12
4	9,29	4,74	9,24	4,06	23,33
5	8,61	4,58	8,92	3,76	24,68

Tabelle A1- 23: Spitze auf Hochspannung, GTZ, s = 30 mm, N₂ 1 bar, HVDC+

	Ohne Vorbelastung			
	Q _i	U _i	U _e	U _{bd}
	pC	kV	kV	kV
MW		7,55	7,26	27,75
SA (%)		0,05	0,06	0,01
Min	7,64	7,06	6,70	27,29
Max	10,18	8,04	7,74	28,25
1	7,64	7,77	6,70	27,29
2	10,18	7,06	7,04	27,56
3		7,71	7,70	28,25
4		8,04	7,74	27,80
5		7,15	7,10	27,85

Tabelle A1- 24: Spitze auf Hochspannung, GTZ, s = 30 mm, N₂ 2 bar, HVDC+

	Ohne Vorbelastung			
	Q _i	U _i	U _e	U _{bd}
	pC	kV	kV	kV
MW		7,10	6,89	39,02
SA (%)		0,03	0,02	0,01
Min	5,11	6,84	6,67	38,45
Max	5,62	7,47	7,18	39,28
1	5,11	7,14	6,92	38,45
2	5,62	7,47	7,18	39,25
3		6,99	6,90	39,28
4		6,84	6,80	39,24
5		7,04	6,67	38,89

Tabelle A1- 25: Spitze auf Hochspannung, GTZ, s = 30 mm, N₂ 3 bar, HVDC+

	Ohne Vorbelastung			
	Q _i	U _i	U _e	U _{bd}
	pC	kV	kV	kV
MW		6,25	6,01	48,55
SA (%)		0,02	0,03	0,02
Min	7,57	6,16	5,73	47,06
Max	43,53	6,45	6,24	49,56
1	7,57	6,25	6,24	47,06
2	43,53	6,45	6,14	49,56
3		6,21	5,94	49,18
4		6,16	5,73	49,13
5		6,20	6,02	47,83

Tabelle A1- 26: Spitze auf Hochspannung, GTZ, s = 30 mm, N₂ 4 bar, HVDC+

	Ohne Vorbelastung			
	Q _i	U _i	U _e	U _{bd}
	pC	kV	kV	kV
MW		6,94	6,75	67,00
SA (%)		0,03	0,05	0,04
Min	13,94	6,74	6,34	62,00
Max	30,07	7,34	7,28	69,00
1	13,94	6,76	6,34	69,00
2	30,07	6,91	6,78	62,00
3		7,34	7,28	68,00
4		6,96	6,75	68,00
5		6,74	6,62	68,00

Tabelle A1- 27: Spitze auf Hochspannung, GTZ, s = 30 mm, N₂ 1 bar, HVDC-

	Ohne Vorbelastung			
	Q _i	U _i	U _e	U _{bd}
	pC	kV	kV	kV
MW		-4,51	-4,44	-48,63
SA (%)		-0,12	-0,11	-0,01
Min	-45,38	-5,32	-5,05	-49,16
Max	-21,16	-3,62	-3,60	-47,96
1	-21,16	-3,62	-3,60	-48,73
2	-45,38	-4,41	-4,40	-49,16
3		-5,32	-5,05	-47,96
4		-4,42	-4,34	-48,78
5		-4,80	-4,80	-48,50

Tabelle A1- 28: Spitze auf Hochspannung, GTZ, s = 30 mm, N₂ 2 bar, HVDC-

	Ohne Vorbelastung			
	Q _i	U _i	U _e	U _{bd}
	pC	kV	kV	kV
MW		-5,84	-5,76	-81,56
SA (%)		-0,09	-0,08	-0,05
Min	-47,70	-6,61	-6,32	-88,16
Max	-17,87	-5,09	-5,06	-77,78
1	-17,87	-6,61	-6,32	-88,16
2	-47,70	-5,47	-5,44	-82,04
3		-5,09	-5,06	-81,78
4		-6,03	-6,00	-78,06
5		-6,02	-6,00	-77,78

Tabelle A1- 29: Spitze auf Hochspannung, GTZ, s = 10 mm, N₂ 1 bar, HVDC+

	Ohne Vorbelastung			
	Q _i	U _i	U _e	U _{bd}
	pC	kV	kV	kV
MW		3,53	3,47	13,21
SA (%)		0,09	0,10	0,10
Min	7,43	3,14	3,05	11,35
Max	11,04	3,99	3,89	14,74
1	7,43	3,14	3,05	11,35
2	11,04	3,27	3,20	11,96
3		3,84	3,82	13,88
4		3,99	3,89	14,12
5		3,41	3,40	14,74

Tabelle A1- 30: Spitze auf Hochspannung, GTZ, s = 10 mm, N₂ 3 bar, HVDC+

	Ohne Vorbelastung			
	Q _i	U _i	U _e	U _{bd}
	pC	kV	kV	kV
MW		4,49	4,37	21,40
SA (%)		0,06	0,05	0,02
Min	6,01	4,03	4,03	20,98
Max	15,38	4,73	4,61	22,40
1	6,01	4,73	4,46	22,40
2	15,38	4,67	4,61	21,12
3		4,03	4,03	20,98
4		4,62	4,58	21,51
5		4,42	4,16	21,00

Tabelle A1- 31: Spitze auf Hochspannung, GTZ, s = 10 mm, N₂ 5 bar, HVDC+

	Ohne Vorbelastung			
	Q _i	U _i	U _e	U _{bd}
	pC	kV	kV	kV
MW		4,60	4,26	34,13
SA (%)		0,06	0,04	0,03
Min	7,11	4,04	4,04	32,58
Max	8,88	4,80	4,57	35,02
1	7,11	4,58	4,57	34,29
2	8,88	4,04	4,04	33,87
3		4,80	4,24	32,58
4		4,78	4,29	34,87
5		4,79	4,15	35,02

Tabelle A1- 32: Spitze auf Hochspannung, GTZ, s = 10 mm, N₂ 1 bar, HVDC-

	Ohne Vorbelastung			
	Q _i	U _i	U _e	U _{bd}
	pC	kV	kV	kV
MW		-3,45	-3,43	-13,46
SA (%)		-0,10	-0,10	-0,02
Min	-130,60	-3,85	-3,83	-13,76
Max	-37,60	-2,99	-2,98	-13,18
1	-37,60	-3,85	-3,83	-13,52
2	-130,60	-3,82	-3,82	-13,19
3		-3,46	-3,40	-13,18
4		-3,14	-3,10	-13,76
5		-2,99	-2,98	-13,63

Tabelle A1- 33: Spitze auf Hochspannung, GTZ, s = 10 mm, N₂ 3 bar, HVDC-

	Ohne Vorbelastung			
	Q _i	U _i	U _e	U _{bd}
	pC	kV	kV	kV
MW		-4,38	-4,29	-47,79
SA (%)		-0,07	-0,07	-0,02
Min	-89,65	-4,56	-4,53	-49,05
Max	-39,12	-3,76	-3,75	-46,63
1	-39,12	-4,51	-4,31	-47,11
2	-89,65	-3,76	-3,75	-47,98
3		-4,55	-4,53	-48,17
4		-4,54	-4,51	-49,05
5		-4,56	-4,37	-46,63

Tabelle A1- 34: Spitze auf Hochspannung, GTZ, s = 10 mm, N₂ 5 bar, HVDC-

	Ohne Vorbelastung			
	Q _i	U _i	U _e	U _{bd}
	pC	kV	kV	kV
MW		-5,95	-5,53	-68,98
SA (%)		-0,05	-0,08	-0,04
Min	-111,90	-6,27	-6,19	-72,29
Max	-6,50	-5,38	-4,85	-64,35
1	-6,50	-6,27	-6,19	-64,35
2	-111,90	-6,15	-5,44	-67,69
3		-5,86	-5,70	-68,90
4		-5,38	-4,85	-71,67
5		-6,11	-5,45	-72,29

Tabelle A1- 35: Spitze auf Hochspannung, GTZ, s = 10 mm, SF₆ 1 bar, HVDC+

	Ohne Vorbelastung				0,8 PDIV für 0,5 h			0,8 BDV für 0,5 h		
	Q _i	U _i	U _e	U _{bd}	Q _i	U _i	U _{bd}	Q _i	U _i	U _{bd}
	pC	kV	kV	kV	pC	kV	kV	pC	kV	kV
MW		4,93	4,85	81,85		5,59	82,07		5,19	83,80
SA (%)		0,23	0,23	0,02		0,30	0,02		0,09	0,02
Min	3,21	3,57	3,50	80,33	2,08	3,44	80,53	2,60	4,71	81,97
Max	3,98	6,57	6,50	84,38	3,86	7,46	84,85	3,72	5,79	85,31
1	3,21	4,28	4,20	84,38	2,08	5,87	84,85	2,60	5,08	84,12
2	3,98	3,57	3,50	80,33	3,86	3,44	80,53	3,72	4,71	81,97
3		5,28	5,20	81,39		7,46	80,83		5,79	85,31
4		6,57	6,50	81,29						

Tabelle A1- 36: Spitze auf Hochspannung, GTZ, s = 10 mm, SF₆ 2 bar, HVDC+

	Ohne Vorbelastung				0,8 PDIV für 0,5 h		
	Q _i	U _i	U _e	U _{bd}	Q _i	U _i	U _{bd}
	pC	kV	kV	kV	pC	kV	kV
MW		19,69	18,61	83,74		19,80	82,36
SA (%)		0,09	0,09	0,02		0,08	0,01
Min	1,04	17,44	16,69	80,65	1,00	17,74	81,70
Max	1,62	21,72	20,96	85,43	1,20	21,48	82,71
1	1,04	21,72	20,96	80,65	1,00	20,17	82,71
2	1,62	18,45	16,69	84,48	1,20	21,48	82,66
3		21,14	19,38	84,41		17,74	81,70
4		17,44	17,40	85,43			

Tabelle A1- 37: Spitze auf Hochspannung, GTZ, s = 10 mm, SF₆ 3 bar, HVDC+

	Ohne Vorbelastung			
	Q _i	U _i	U _e	U _{bd}
	pC	kV	kV	kV
MW		26,09	26,00	89,98
SA (%)		0,05	0,05	0,01
Min	1,14	24,89	24,80	88,93
Max	2,35	27,29	27,20	91,02
1	1,14	24,89	24,80	88,93
2	2,35	27,29	27,20	91,02

Tabelle A1- 38: Spitze auf Hochspannung, GTZ, s = 10 mm, SF₆ 1 bar, HVDC-

	Ohne Vorbelastung				0,8 PDIV für 0,5 h			0,8 PDIV für 1 h		
	Q _i	U _i	U _e	U _{bd}	Q _i	U _i	U _{bd}	Q _i	U _i	U _{bd}
	pC	kV	kV	kV	pC	kV	kV	pC	kV	kV
MW		-5,29	-5,26	-85,11		-9,35	-82,99		-12,01	-88,19
SA (%)		-0,20	-0,20	-0,05		-0,28	-0,02		-0,03	-0,04
Min	-5,17	-6,61	-6,60	-92,76	-5,04	-11,46	-85,09	-3,04	-12,39	-92,08
Max	-1,03	-4,12	-4,11	-80,65	-1,00	-5,71	-81,78	-1,00	-11,63	-84,29
1	-1,03	-4,23	-4,20	-81,35	-1,00	-11,46	-81,78	-1,00	-11,63	-84,29
2	-5,17	-5,02	-5,00	-80,65	-5,04	-10,89	-82,11	-3,04	-12,39	-92,08
3		-6,46	-6,40	-83,96		-5,71	-85,09			
4		-4,12	-4,11	-86,81						
5		-6,61	-6,60	-92,76						

	0,8 BDV für 0,5 h		
	Q _i	U _i	U _{bd}
	pC	kV	kV
MW		-4,95	-82,81
SA (%)		-0,18	-0,02
Min	-5,99	-6,03	-84,74
Max	-1,04	-3,82	-81,13
1	-1,04	-5,01	-82,56
2	-5,99	-6,03	-81,13
3		-3,82	-84,74
4			
5			

Tabelle A1- 39: Spitze auf Hochspannung, GTZ, $s = 10 \text{ mm}$, SF_6 2 bar, HVDC-

	Ohne Vorbelastung				0,8 PDIV für 0,5 h		
	Q_i	U_i	U_e	U_{bd}	Q_i	U_i	U_{bd}
	pC	kV	kV	kV	pC	kV	kV
MW		-11,39	-10,07	-101,38		-8,17	-101,79
SA (%)		-0,36	-0,29	0,00		-0,14	0,00
Min	-4,54	-18,53	-15,05	-101,57	-44,62	-9,18	-102,05
Max	-1,02	-8,82	-8,14	-101,06	-1,17	-6,55	-101,52
1	-1,02	-18,53	-15,05	-101,06	-1,17	-6,55	-101,80
2	-4,54	-9,11	-8,14	-101,34	-44,62	-8,77	-102,05
3		-9,08	-8,28	-101,57		-9,18	-101,52
4		-8,82	-8,80	-101,53			

Tabelle A1- 40: Freies Potential, KTZ, $s_o = 1 \text{ mm}$ $s_u = 7 \text{ mm}$, N_2 1 bar, HVDC+

	Ohne Vorbelastung				0,8 PDIV für 0,5 h			0,8 BDV für 0,5 h		
	Q_i	U_i	U_e	U_{bd}	Q_i	U_i	U_{bd}	Q_i	U_i	U_{bd}
	pC	kV	kV	kV	pC	kV	kV	pC	kV	kV
MW		13,80	12,41	28,27		12,94	28,08		13,96	28,36
SA (%)		0,06	0,17	0,02		0,16	0,04		0,11	0,03
Min	1,25	12,52	9,16	27,48	4,30	10,76	26,64	1,31	12,48	27,41
Max	26,96	14,88	14,80	29,41	149,10	15,83	29,17	19,87	15,43	29,31
1	1,25	14,24	10,79	29,41	4,30	10,76	29,17	1,31	12,48	29,31
2	26,96	12,52	9,16	27,75	149,10	12,22	26,64	19,87	15,43	27,41
3		13,25	13,20	28,35		15,83	28,42			
4		14,11	14,10	28,38						
5		14,88	14,80	27,48						

Tabelle A1- 41: Freies Potential, KTZ, $s_o = 1 \text{ mm}$ $s_u = 7 \text{ mm}$, N_2 3 bar, HVDC+

	Ohne Vorbelastung			
	Q_i	U_i	U_e	U_{bd}
	pC	kV	kV	kV
MW		14,37	14,31	48,70
SA (%)		0,07	0,07	0,02
Min	1,75	13,31	13,29	47,12
Max	47,52	15,81	15,75	49,60
1	1,75	13,31	13,29	48,86
2	47,52	15,28	15,20	47,12
3		15,81	15,75	49,60
4		13,39	13,31	49,31

Tabelle A1- 42: Freies Potential, KTZ, $s_o = 1 \text{ mm}$ $s_u = 7 \text{ mm}$, N_2 1 bar, HVDC-

	Ohne Vorbelastung			
	Q_i	U_i	U_e	U_{bd}
	pC	kV	kV	kV
MW		-15,68	-15,45	-29,67
SA (%)		-0,03	-0,03	-0,06
Min	-76,83	-16,30	-15,97	-32,26
Max	-1,01	-14,86	-14,80	-27,39
1	-1,01	-14,86	-14,80	-29,52
2	-76,83	-16,03	-15,97	-32,26
3		-15,55	-15,07	-30,69
4		-15,67	-15,64	-27,39
5		-16,30	-15,77	-28,48

Tabelle A1- 43: Freies Potential, KTZ, $s_o = 1 \text{ mm}$ $s_u = 7 \text{ mm}$, N_2 3 bar, HVDC-

	Ohne Vorbelastung			
	Q_i	U_i	U_e	U_{bd}
	pC	kV	kV	kV
MW		-22,30	-22,15	-47,45
SA (%)		-0,08	-0,08	-0,07
Min	-3,76	-24,24	-24,23	-52,18
Max	-1,05	-19,74	-19,70	-44,63
1	-1,05	-19,74	-19,70	-52,18
2	-3,76	-24,24	-24,23	-44,63
3		-22,92	-22,53	-45,53

Tabelle A1- 44: Freies Potential, KTZ, $s_o = 1 \text{ mm}$ $s_u = 7 \text{ mm}$, N_2 1 bar, HVAC

	Ohne Vorbelastung			
	Q_i	U_i	U_e	U_{bd}
	pC	kV	kV	kV
MW		8,14	7,86	17,74
SA (%)		0,03	0,03	0,01
Min	0,00	7,85	7,48	17,44
Max	0,00	8,51	8,16	18,23
1		8,22	7,99	17,78
2		7,85	7,51	17,78
3		8,51	8,01	17,56
4		7,86	7,48	17,67
5		8,22	8,02	17,44
6		8,20	8,16	18,23

Tabelle A1- 45: Freies Potential, KTZ, $s_o = 1 \text{ mm}$ $s_u = 7 \text{ mm}$, SF₆ 1 bar, HVDC+

	Ohne Vorbelastung				0,8 PDIV für 0,5 h			0,8 BDV für 0,5 h		
	Q _i	U _i	U _e	U _{bd}	Q _i	U _i	U _{bd}	Q _i	U _i	U _{bd}
	pC	kV	kV	kV	pC	kV	kV	pC	kV	kV
MW		16,47	16,33	50,95	1,85	17,07	52,38	6,63	16,59	53,37
SA (%)		0,11	0,12	0,10		0,15	0,09		0,11	0,04
Min	1,60	13,84	13,40	43,75	1,16	13,71	48,37	1,88	14,08	50,82
Max	172,80	18,74	18,70	57,62	2,54	19,92	59,38	11,37	18,29	56,39
1	1,60	18,74	18,70	43,75	1,16	13,71	48,37	1,88	14,08	50,82
2	172,80	13,84	13,40	51,47	2,54	17,58	49,38	11,37	17,40	56,39
3		16,61	16,60	50,95		19,92	59,38		18,29	52,91
4		16,67	16,60	57,62						

Tabelle A1- 46: Freies Potential, KTZ, $s_o = 1 \text{ mm}$ $s_u = 7 \text{ mm}$, SF₆ 2 bar, HVDC+

	Ohne Vorbelastung				0,8 PDIV für 0,5 h			0,8 PDIV für 1 h		
	Q _i	U _i	U _e	U _{bd}	Q _i	U _i	U _{bd}	Q _i	U _i	U _{bd}
	pC	kV	kV	kV	pC	kV	kV	pC	kV	kV
MW		22,74	22,51	53,39	1,25	16,74	54,10	46,48	19,54	54,10
SA (%)		0,04	0,04	0,01		0,06	0,02		0,21	0,05
Min	1,23	21,72	21,70	52,47	1,00	15,78	52,76	1,09	15,35	51,49
Max	6,07	24,05	24,00	54,44	1,50	17,69	55,43	91,87	23,73	56,70
1	1,23	24,05	24,00	53,24	1,00	15,78	52,76	1,09	23,73	56,70
2	6,07	22,65	22,60	53,41	1,50	17,69	55,43	91,87	15,35	51,49
3		22,52	21,73	54,44						
4		21,72	21,70	52,47						

Tabelle A1- 47: Freies Potential, KTZ, $s_o = 1 \text{ mm}$ $s_u = 7 \text{ mm}$, SF_6 1 bar, HVDC-

	Ohne Vorbelastung				0,8 PDIV für 0,5 h			0,8 PDIV für 1 h		
	Q_i	U_i	U_e	U_{bd}	Q_i	U_i	U_{bd}	Q_i	U_i	U_{bd}
	pC	kV	kV	kV	pC	kV	kV	pC	kV	kV
MW		-17,91	-17,58	-52,27		-15,27	-57,02		-13,83	-50,37
SA (%)		-0,09	-0,08	-0,04		-0,02	-0,03		0,00	-0,03
Min	-26,09	-19,48	-18,96	-54,32	-4,64	-15,54	-58,51	-8,37	-13,86	-51,76
Max	-1,11	-15,37	-15,30	-49,55	-1,07	-15,00	-55,52	-1,01	-13,80	-48,97
1	-1,11	-15,37	-15,30	-52,93	-1,07	-15,00	-55,52	-1,01	-13,86	-48,97
2	-26,09	-19,48	-18,96	-49,55	-4,64	-15,54	-58,51	-8,37	-13,80	-51,76
3		-18,93	-18,23	-54,32						
4		-17,85	-17,83							

	0,8 BDV für 0,5 h		
	Q_i	U_i	U_{bd}
	pC	kV	kV
MW		-16,95	-52,51
SA (%)		-0,12	-0,04
Min	-37,05	-18,98	-54,50
Max	-1,01	-14,92	-50,53
1	-1,01	-14,92	-50,53
2	-37,05	-18,98	-54,50
3			
4			

Tabelle A1- 48: Freies Potential, KTZ, $s_o = 1 \text{ mm}$ $s_u = 7 \text{ mm}$, SF_6 2 bar, HVDC-

	Ohne Vorbelastung			
	Q_i	U_i	U_e	U_{bd}
	pC	kV	kV	kV
MW		-20,55	-20,39	-61,69
SA (%)		-0,14	-0,15	-0,08
Min	-3,03	-24,38	-24,33	-67,54
Max	-1,13	-17,27	-16,93	-55,90
1	-1,13	-17,27	-16,93	-55,90
2	-3,03	-19,99	-19,90	-67,54
3		-24,38	-24,33	-61,63

Tabelle A1- 49: Partikel auf Isolatoroberfläche, GTZ, 1. Drittel, N₂ 1 bar, HVDC+

	Ohne Vorbelastung				0,8 PDIV für 0,5 h			0,8 BDV für 0,5 h		
	Q _i	U _i	U _e	U _{bd}	Q _i	U _i	U _{bd}	Q _i	U _i	U _{bd}
	pC	kV	kV	kV	pC	kV	kV	pC	kV	kV
MW		27,46	26,92	57,36		27,05	58,90		28,27	55,86
SA (%)		0,04	0,07	0,06		0,12	0,02		0,05	0,02
Min	1,28	25,68	23,10	53,37	1,44	22,36	57,82	1,11	26,57	55,10
Max	5,63	29,15	29,10	62,30	9,48	29,82	60,51	9,74	29,91	57,13
1	1,28	27,21	27,20	54,75	1,44	28,96	58,38	1,11	26,57	55,35
2	5,63	25,68	23,10	55,76	9,48	22,36	57,82	9,74	28,33	57,13
3		27,50	27,50	60,62		29,82	60,51		29,91	55,10
4		27,74	27,70	53,37						
5		29,15	29,10	62,30						

Tabelle A1- 50: Partikel auf Isolatoroberfläche, GTZ, 1. Drittel, N₂ 3 bar, HVDC+

	Ohne Vorbelastung			
	Q _i	U _i	U _e	U _{bd}
	pC	kV	kV	kV
MW		30,00	29,97	80,00
SA (%)		0,02	0,02	0,03
Min	1,61	29,30	29,29	77,41
Max	3,11	30,65	30,60	84,16
1	1,61	30,45	30,44	84,16
2	3,11	29,59	29,52	77,41
3		30,03	30,00	78,29
4		30,65	30,60	80,15
5		29,30	29,29	

Tabelle A1- 51: Partikel auf Isolatoroberfläche, GTZ, 1. Drittel, N₂ 5 bar, HVDC+

	Ohne Vorbelastung			
	Q _i	U _i	U _e	U _{bd}
	pC	kV	kV	kV
MW		30,93	30,68	95,11
SA (%)		0,03	0,04	0,05
Min	1,28	29,03	28,59	87,43
Max	6,66	31,69	31,61	100,36
1	1,28	31,69	31,61	93,70
2	6,66	30,97	30,95	87,43
3		31,54	30,87	100,36
4		29,03	28,59	98,95
5		31,44	31,40	

Tabelle A1- 52: Partikel auf Isolatoroberfläche, GTZ, 1. Drittel, N₂ 1 bar, HVDC-

	Ohne Vorbelastung				0,8 PDIV für 0,5 h			0,8 BDV für 0,5 h		
	Q _i	U _i	U _e	U _{bd}	Q _i	U _i	U _{bd}	Q _i	U _i	U _{bd}
	pC	kV	kV	kV	pC	kV	kV	pC	kV	kV
MW		-12,70	-12,65	-66,01		-10,24	-74,59		-12,57	-62,96
SA (%)		-0,06	-0,07	-0,06		-0,03	-0,06		-0,01	-0,04
Min	-5,29	-14,15	-14,14	-71,62	-2,20	-10,55	-78,91	-2,57	-12,72	-65,33
Max	-1,08	-11,67	-11,60	-59,99	-1,16	-9,92	-70,26	-1,05	-12,41	-60,59
1	-1,08	-11,67	-11,60	-71,62	-1,16	-10,55	-70,26	-1,05	-12,72	-65,33
2	-5,29	-12,63	-12,60	-69,86	-2,20	-9,92	-78,91	-2,57	-12,41	-60,59
3		-12,57	-12,50	-59,99						
4		-12,48	-12,40	-64,66						
5		-14,15	-14,14	-63,91						

Tabelle A1- 53: Partikel auf Isolatoroberfläche, GTZ, 1. Drittel, N₂ 3 bar, HVDC-

	Ohne Vorbelastung			
	Q _i	U _i	U _e	U _{bd}
	pC	kV	kV	kV
MW		-14,97	-14,80	-93,20
SA (%)		-0,04	-0,03	-0,02
Min	-13,71	-15,71	-15,30	-95,39
Max	-1,00	-14,24	-14,20	-90,51
1	-1,00	-14,24	-14,20	-90,51
2	-13,71	-15,71	-15,30	-93,70
3		-14,96	-14,90	-95,39

Tabelle A1- 54: Partikel auf Isolatoroberfläche, GTZ, 1. Drittel, SF₆ 1 bar, HVDC+

	Ohne Vorbelastung				0,8 PDIV für 0,5 h			0,8 BDV für 0,5 h		
	Q _i	U _i	U _e	U _{bd}	Q _i	U _i	U _{bd}	Q _i	U _i	U _{bd}
	pC	kV	kV	kV	pC	kV	kV	pC	kV	kV
MW		26,54	26,44	97,22		28,86	97,42		28,90	96,77
SA (%)		0,09	0,09	0,04		0,12	0,01		0,12	0,03
Min	1,14	24,26	24,20	91,23	17,19	24,36	95,97	1,34	24,05	92,77
Max	31,32	29,59	29,36	100,75	29,38	32,75	98,96	47,38	33,38	99,82
1	1,14	24,32	24,30	98,44	17,19	24,36	98,96	1,34	33,38	95,49
2	31,32	24,26	24,20	98,45	29,38	26,91	95,97	47,38	28,43	99,01
3		27,99	27,90	100,75		32,75	98,74		24,05	99,82
4		29,59	29,36	91,23		31,41	96,03		29,74	92,77

Tabelle A1- 55: Partikel auf Isolatoroberfläche, GTZ, 1. Drittel, N₂ 1 bar, HVDC-

	Ohne Vorbelastung				0,8 PDIV für 0,5 h			0,8 BDV für 0,5 h		
	Q _i	U _i	U _e	U _{bd}	Q _i	U _i	U _{bd}	Q _i	U _i	U _{bd}
	pC	kV	kV	kV	pC	kV	kV	pC	kV	kV
MW		-26,20	-26,17	-108,96		-25,64	-109,73		-27,40	-108,69
SA (%)		-0,21	-0,21	0,00		-0,23	0,00		-0,25	0,00
Min	-3,00	-33,91	-33,90	-108,98	-3,32	-34,14	-110,22	-2,97	-33,80	-109,21
Max	-1,09	-21,85	-21,80	-108,92	-1,01	-21,10	-109,02	-1,56	-17,98	-108,31
1	-1,09	-22,85	-22,80	-108,97	-1,01	-21,10	-109,02	-1,56	-33,80	-108,54
2	-3,00	-21,85	-21,80	-108,98	-3,32	-34,14	-110,22	-2,97	-17,98	-109,21
3		-33,91	-33,90	-108,92		-21,69	-109,95		-30,42	-108,31

Tabelle A1- 56: Partikel auf Isolatoroberfläche, GTZ, 2. Drittel, N₂ 1 bar, HVDC-

	Ohne Vorbelastung			
	Q _i	U _i	U _e	U _{bd}
	pC	kV	kV	kV
MW		27,27	26,83	58,44
SA (%)		0,03	0,02	0,04
Min	1,34	26,32	26,30	56,63
Max	4,04	28,39	27,40	62,38
1	1,34	26,32	26,30	57,23
2	4,04	26,86	26,85	56,63
3		28,39	26,30	62,38
4		27,44	27,40	58,45
5		27,32	27,30	57,53

Tabelle A1- 57: Partikel auf Isolatoroberfläche, GTZ, 3. Drittel, N₂ 1 bar, HVDC-

	Ohne Vorbelastung			
	Q _i	U _i	U _e	U _{bd}
	pC	kV	kV	kV
MW		14,62	14,56	68,00
SA (%)		0,11	0,11	0,05
Min	1,36	12,28	12,20	64,24
Max	4,02	16,36	16,30	74,51
1	1,36	12,28	12,20	67,04
2	4,02	14,31	14,30	74,51
3		16,36	16,30	67,11
4		13,89	13,80	67,09
5		16,27	16,20	64,24

Anhang A2 - Dimensionierung - Große Testzelle

Die große Testzelle zur Simulation der Defekte der Spitze auf Hochspannung und des metallischen Partikels auf der Isolatoroberfläche wurde am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement im Zuge dieser Arbeit entworfen und gefertigt.

Vorbild für die Ausführung der Testzelle sind die von der Firma Qualitrol entwickelten Testzellen zur Simulation der Defekte Spitze auf Hochspannung, Freies Potential und freibewegliches metallisches Partikel.

Die entwickelte Testzelle ist in Bild A2 - 1 ersichtlich.

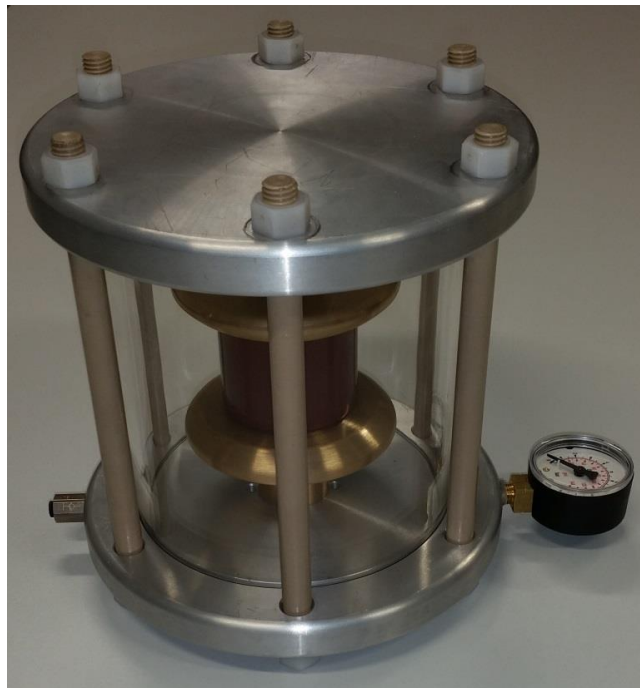


Bild A2 - 1: Große Testzelle

Dimensionierung

Die vorab festgelegten Spezifikationen der neuen Testzelle sind Tabelle A2 - 1 zu entnehmen. Weiter soll die zylindrische Außenhülle aus durchsichtigem Acrylglas bestehen. Aus technischen Gründen bei der Konstruktion wurde von diesen Werten geringfügig abgewichen.

Tabelle A2 - 1: Grundlegende Spezifikationen der neuen Testzelle

Innenradius der Testzelle	7 cm
Höhe der Testzelle	15 cm
Resultierendes Gasvolumen	2650,7 cm ³
Max. relativer Betriebsdruck	5 bar

Die Auslegung von Druckbehältern erfolgt im vereinfachten Fall über die Kesselformel. Sie gibt auf Basis der maximal zulässigen mechanischen Spannung (in Axial, Radial und Tangentialrichtung) bei gegeben. Innendurchmesser und max. Druck die min. Wanddicke an.

$$s_{min} = p * \frac{D}{2} * \frac{1}{\sigma_{zul.}} + s_1 + s_2 \quad \text{mit} \quad D = \frac{D_i + D_a}{2}$$

s_{min}	Min. benötigte Wandstärke in mm
D_a	Äußere Wandstärke in mm
D_i	Innere Wandstärke in mm
p	Druck in N/mm^2 ($1 N/mm^2 = 10 \text{ bar}$)
s_1	Sicherheitsfaktor für Wanddickenunterschreitung (Herstellertoleranz) in mm
s_2	Abnutzungs- und Korrosionszuschlag in mm
$\sigma_{zul.}$	Festigkeitskennwert / Maximal zulässiger Druck in N/mm^2

In Tabelle A2 – 2 sind die vom Hersteller übermittelten Kenndaten des Acrylglases aufgelistet.

Tabelle A2 – 2: Herstellerangaben für Acrylglas

Dielektrizitätszahl	2,8-3,7
Oberflächenwiderstand	$5 \times 10^3 \Omega$
Durchgangswiderstand	$>10^{15} \Omega/cm$
Durchschlagsfestigkeit	30 kV/mm
Sicherheitsfaktor s_1	0,35 mm
Max. zulässiger Druck	5-10 N/mm^2

Es ergibt sich nach der Kesselformel eine minimale Wanddicke zwischen 4 mm und 7,6 mm. Die Testzelle wurde mit einem Acrylglaszylinder der Wandstärke 5 mm gebaut. Um zu gewährleisten, dass die Testzelle dem Druck stand hält wurde dieser mit einem relativen Druck von 9,7 bar für 1 Minute getestet.

Die Gewindestangen wurden aus PEEK gefertigt, welches eine höhere mechanische Belastbarkeit als die Muttern aus Nylon aufweist. Im Fehlerfall fungieren die Muttern als Sollbruchstelle.

Anhang A3 - Abschaltung

Zweck

Die Schalt- und Steuerpulte der Firma Messwandler-Bau GmbH Bamberg besitzen eine interne Überstromerkennung, welche im Falle eines Durch- oder Überschlags im Prüfkreis die Anlage außer Betrieb nehmen soll. Darüber hinaus gibt es die optionale Möglichkeit einen Erdungsschalter in den Messaufbau zu integrieren. Bei der Abschaltung des Prüfaufbaus löst dieser automatisch aus.

In der vorliegenden Arbeit ergab sich die Problematik, dass Durchschläge am Prüfling nicht erkannt wurden. Grund hierfür sind die Kapazitätswerte des Glättungs- und Koppelkondensators und daraus resultierender hoher gespeicherter Energien. Um eine Abschaltung des Prüfaufbaus zu ermöglichen, musste somit eine Erweiterung des Messaufbaus um eine Durchschlagserkennung vorgenommen werden.

Schaltung und Funktion

In Bild A3 - 1 ist der Aufbau der Schaltung zu entnehmen und anschließend wird die Funktion beschrieben.

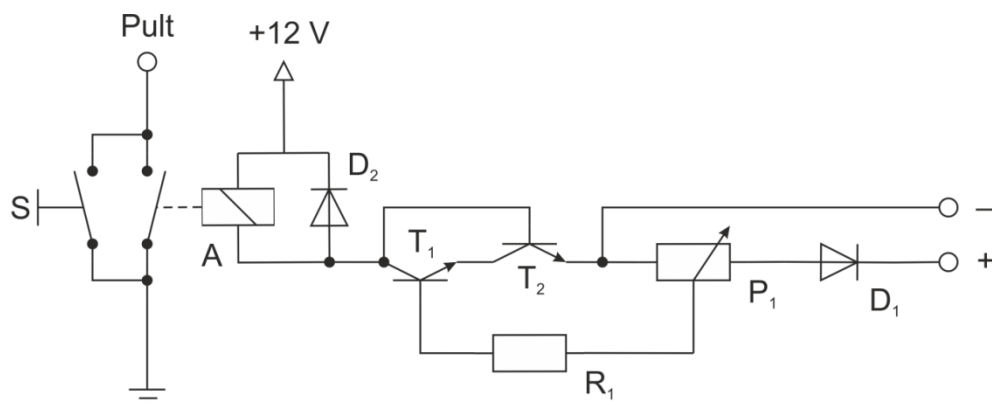


Bild A3 - 1: Schaltbild zur Erkennung des Durchschlags

Die folgenden Betrachtungen sind für Spannungen positiver Polarität angeführt. Die zu überwachende Spannung an wird den positiven Eingang gelegt und der negative Eingang wird mit Masse verbunden. Bei Spannungen negativer Polarität werden die beiden Anschlüsse gegenseitig verbunden.

Bei Überschreiten einer gewissen Spannung beginnt die Diode D_1 zu leiten. Über den regelbaren Spannungsteiler des Potentiometers P_1 und des Widerstandes R_1 liegt eine Spannung an der Basis des Transistors T_1 an und dieser beginnt zu leiten. Daraus resultiert ein Stromfluss und das Relais A zieht an. Bei Unterschreiten einer gewissen Spannung stellt sich der Stromfluss über die Transistoren wieder ein und es kommt zum Lösen des Relais A .

Die anliegende Spannung an der Basis des Transistors kann mit Hilfe des Potentiometers P_1 (über den Spannungsteiler) so eingestellt werden, dass kleine Spannungseinbrüche im Prüfaufbau zur Abschaltung führen.

Zu Beginn der Steigerung der Spannung muss der Relais-Schaltkontakt mit Hilfe des Schalters S überbrückt werden, so lange bis die eingestellte minimale Haltespannung erreicht wird und der Relais-Schaltkontakt schließt. Beim Öffnen des Kontaktes, ausgelöst durch einen Spannungseinbruch, wird die Verbindung zum Pult unterbrochen. Dieses schaltet somit die Spannungsversorgung des Prüfkreises ab und der Erdungsschalter fällt ein. Eine erneute Erhöhung der Spannung am Prüfling führt nicht zu einer automatischen Wiederinbetriebnahme des Pultes.

Die Diode D_2 stellt in der Schaltung eine Freilaufdiode dar.

In Tabelle A3 - 1 sind die entsprechenden Bauteilwerte festgehalten.

Tabelle A3 - 1: Ausgewählte Bauteile zur Schaltungsrealisierung

Zener-Diode D_1	BZX55C (3,3 V)
Freilaufdiode D_2	IN4148
Widerstand R_1	100 k Ω
Potentiometer P_1	100 k Ω
Transistor T_1 / T_2	BC549B

Anhang A4 - Berechnung der maximalen Feldstärken

Tabelle A4 - 1: Berechnung der maximalen Feldstärken der untersuchten Defekte in den entsprechenden Testzellen bei Teilentladungseinsetzspannung, der in [45] ermittelten Teilentladungseinsetzspannungen und der entsprechenden Defekte in einer realen 420-kV-GIL bei Leiter-Erde-Spannung unter Verwendung von SF₆ nach den Berechnungsmethoden in [22, 49, 60]

		Testzelle						[45]						420-kV-GIL		
		1 bar SF ₆			3 bar SF ₆			1 bar SF ₆			3 bar SF ₆			5 bar SF ₆		
Spitze auf Hochspannung	Spitzenradius r _s	25,00	μm	Spitzenradius r _s	25,00	μm	Spitzenradius r _s	0,50	mm	Spitzenradius r _s	0,50	mm	Spitzenradius r _s	25,00	μm	
	Schlagweite s _s	10,00	mm	Schlagweite s _s	10,00	mm	Schlagweite s _s	140,00	mm	Schlagweite s _s	140,00	mm	Radius des Innenleiters r _i	90,00	mm	
	Einsetzspannung U _i	4,93	kV	Einsetzspannung U _i	26,09	kV	Einsetzspannung U _i	150,00	kV	Einsetzspannung U _i	220,00	kV	Radius der Kapselung r _a	250,00	mm	
	Geometriefaktor p	401,00		Geometriefaktor p	401,00		Geometriefaktor p	281,00		Geometriefaktor p	281,00		Leiter-Erde-Spannung U _{LE}	240,00	kV	
	Ausnutzungsfaktor η _s	0,0092		Ausnutzungsfaktor η _s	0,0092		Ausnutzungsfaktor η _s	0,0125		Ausnutzungsfaktor η _s	0,0125		Spitzenlänge l _s	7,00	mm	
	Mittlere Feldstärke E _{0,i}	0,49	kV/mm	Mittlere Feldstärke E _{0,i}	2,61	kV/mm	Mittlere Feldstärke E _{0,i}	1,07	kV/mm	Mittlere Feldstärke E _{0,i}	1,57	kV/mm	Schlagweite s _s	153,00	mm	
	Max. Feldstärke E_{max,i}	53,52	kV/mm	Max. Feldstärke E_{max,i}	283,21	kV/mm	Max. Feldstärke E_{max,i}	85,59	kV/mm	Max. Feldstärke E_{max,i}	125,53	kV/mm	Geometriefaktor p	6121,00		
													Geometriefaktor q	10000,00		
												Ausnutzungsfaktor η _s	0,0016			
												Mittlere Feldstärke E _{0,LE}	1,57	kV/mm		
												Max. Feldstärke E_{max,LE}	991,77	kV/mm		
Freies Potential	1 bar SF ₆		2 bar SF ₆										5 bar SF ₆			
	Schlagweite oben s _o	1,00	mm	Schlagweite oben s _o	1,00	mm							Schlagweite oben s _o	1,00	mm	
	Schlagweite unten s _u	7,00	mm	Schlagweite unten s _u	7,00	mm							Schlagweite unten s _u	117,00	mm	
	Spitzenradius r _s	0,40	mm	Spitzenradius r _s	0,40	mm							Spitzenradius r _s	0,40	mm	
	Kugelradius r _k	10,00	mm	Kugelradius r _k	10,00	mm							Kugelradius r _k	10,00	mm	
	Einsetzspannung U _i	16,47	kV	Einsetzspannung U _i	22,74	kV							Leiter-Erde-Spannung U _{LE}	240,00	kV	
	Geometriefaktor p _o	3,50		Geometriefaktor p _o	3,50								Geometriefaktor p _o	3,50		
	Geometriefaktor p _u	1,70		Geometriefaktor p _u	1,70								Geometriefaktor p _u	12,70		
Ausnutzungsfaktor η _o	0,4188		Ausnutzungsfaktor η _o	0,4188								Ausnutzungsfaktor η _o	0,4188			
Ausnutzungsfaktor η _u	0,66		Ausnutzungsfaktor η _u	0,66								Ausnutzungsfaktor η _u	0,0787			
Mittlere Feldstärke E _{0,i}	2,06	kV/mm	Mittlere Feldstärke E _{0,i}	2,84	kV/mm							Mittlere Feldstärke E _{0,LE}	2,03	kV/mm		
Max. Feldstärke E_{max,i}	4,92	kV/mm	Max. Feldstärke E_{max,i}	6,79	kV/mm							Max. Feldstärke E_{max,LE}	25,83	kV/mm		
Partikel auf Isolator	1 bar SF ₆												5 bar SF ₆			
	Partikellänge l _p	8,00	mm										Partikellänge l _p	8,00	mm	
	Partikeldurchmesser d	0,80	mm										Partikeldurchmesser d	0,80	mm	
	Isolatorlänge l _i	50,00	mm										Isolatorlänge l _i	160,00	mm	
	Einsetzspannung U _i	26,54	kV										Leiter-Erde-Spannung U _{LE}	240,00	kV	
	l/d	10,00											l/d	10,00		
Überhöhungsfaktor	26,94											Überhöhungsfaktor	26,94			
Mittlere Feldstärke E _{0,i}	0,63	kV/mm										Mittlere Feldstärke E _{0,LE}	1,58	kV/mm		
Max. Feldstärke E_{max,i}	17,02	kV/mm										Max. Feldstärke E_{max,LE}	42,54	kV/mm		