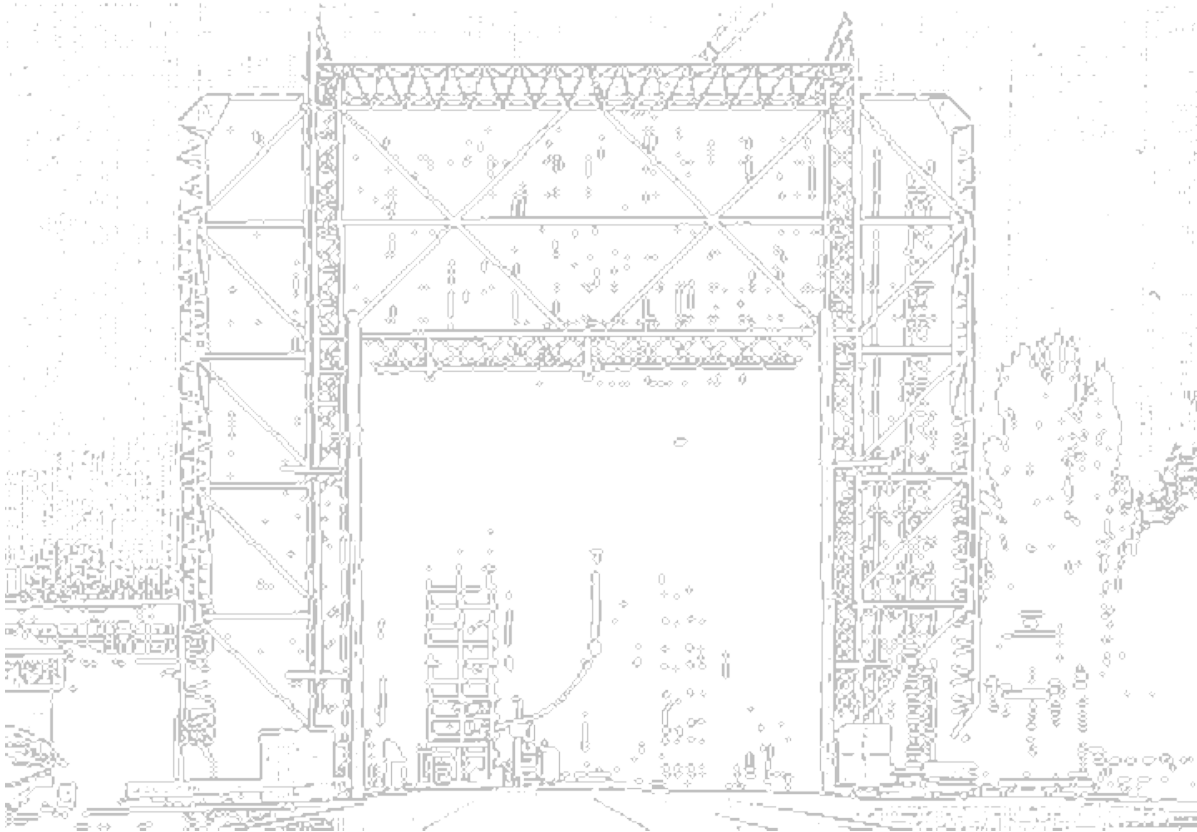




Technische Universität Graz

Dissertation



**Institut für Hochspannungstechnik und
Systemmanagement**

Leitfähige Partikel im koaxialen Rohrleiter unter hoher Gleichspannungsbeanspruchung

Thomas Berg

November 2014, Graz

Institut für Hochspannungstechnik
und Systemmanagement
Technische Universität Graz



1. Begutachter: Em.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Michael Muhr
2. Begutachter: Prof. Dr.-Ing. Claus Neumann

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Assistententätigkeit am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement. In Zeiten des Energiewandels aufgrund begrenzter Ressourcen und nachhaltiger Energieerzeugung steht es außer Zweifel, dass sich der Energiemarkt großen Herausforderungen stellen muss. Es stellt sich also nicht die Frage, ob es zu Veränderungen kommt, sondern wie man diesen begegnet. Der Energieübertragung wird dabei eine große Bedeutung zugemessen, da Energieerzeugung, -verbrauch und -speicherung einen erhöhten Einsatz von Übertragungskapazitäten fordern. Allerdings ist die Akzeptanz von großen Übertragungsleitungen aus Gründen der Ästhetik, Lärmemission und elektromagnetischer Verträglichkeit nicht besonders hoch. Eine Antwort auf diese Problematik ist nicht einfach zu finden, jedoch gibt es Möglichkeiten einer effizienteren Energieübertragung, wie z. B. der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ). Des Weiteren bietet sich die gasisolierte Leitung (GIL) als Alternative zu Kabel und Freileitung an.

Im Zuge meiner Forschungstätigkeit hatte ich die einmalige Gelegenheit, an diesem zukunftssträchtigen Thema mitzuwirken und einen Beitrag zur Lösung der Problematik einer gasisolierten Leitung unter hoher Gleichspannung zu leisten. In Kooperation mit Siemens AG/Erlangen wurde im Jahr 2010 ein Forschungsvorhaben über leitfähige freibewegliche Partikel im gasisolierten Rohrleiter begonnen. Dies bedeutete nicht nur eine spannende und herausfordernde Aufgabe, sondern war auch absolutes Neuland für mich. Ich möchte daher allen voran meinem Doktorvater Prof. Michael Muhr danken. Er hat mich weit über das Selbstverständliche unterstützt und gefördert. Ich konnte mich auch bei meiner Forschungstätigkeit frei entfalten und meine Ideen verwirklichen, auch hatte er trotz seines vollen Terminkalenders immer eine offene Tür für so manche Gespräche. Dass er mir die Möglichkeit gegeben hat, an diesem zukunftssträchtigen Leuchtturmprojekt mitzugestalten, dafür gebührt ihm mein aufrichtiger Dank.

Prof. Claus Neumann möchte ich danken für seine rasche und unkomplizierte Bereitschaft, die zweite Begutachtung zu übernehmen. Als kompetenten Fachmann auf diesem Gebiet habe ich ihn schon des Öfteren bei manchen Besprechungen erfahren, und ich bin ihm auch für seine Empfehlungen und Vorschläge dankbar.

Den Mitarbeitern des Instituts möchte ich auch danken. Was es bedeutet, einen Versuchsaufbau in einem Hochspannungsprüffeld zu betreuen, ist den wenigsten bewusst. Eine besondere Hilfe dabei war mir Mohammad Zamani, der immer zur Stelle war und seinen Einsatz bewiesen hat. Aber auch der Leiter des Hochspannungslabors Dr. Werner Lick hat immer wieder versucht, trotz einer vollen Laborauslastung, mir und dem Projekt die maximal mögliche Prüfzeit zur Verfügung zu stellen. Für die Durchführung der Aufgaben in einem Hochspannungsprüflabor ist eine kompetente Werkstatt unabdingbar. Auch sie war mir bei den Versuchen eine große Hilfe, die ihre Aufgaben immer rasch und genau durchführte.

Danken möchte ich auch noch Mag. Jutta Ritsch. Sie als „Nichttechnikerin“ gilt als unbefangene, welches sie dazu befähigt, die Arbeit objektiv zu korrigieren.

Der Familie gilt auch mein aufrichtigster Dank. Sie hat mich über all die Jahre immer begleitet und unterstützt, moralisch als auch mit dem einen oder anderen original Kärntner Reindling.

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 entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Ort

Datum

Unterschrift

Statutory Declaration

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

Place

Date

Signature

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	iii
Eidesstattliche Erklärung	iv
1 Einleitung	1
2 Aufgabenstellung	3
3 Grundsätzliches über frei bewegliche Partikel	6
3.1 Einführung	6
3.1.1 Partikelverhalten	7
3.1.2 Einflussfaktoren auf das Partikelverhalten	11
3.2 Partikelverhalten bei unterschiedlichen Spannungsarten	12
3.2.1 Partikelverhalten bei Gleichspannung	12
3.2.2 Partikelverhalten bei Wechselspannung	13
4 Physikalische Effekte und elektrische Feldverteilung im Rohrleiter	15
4.1 Elektrische Feldverteilung im Rohrleiter	15
4.1.1 Wirkung elektrischer Felder	17
4.2 Gleichspannungsbelastung des Rohrleiters	22
4.2.1 Physikalische Vorgänge im Gas	24
4.2.2 Anforderungen an gasisolierte Systeme unter Gleichspannung	26
5 Partikel im gasisolierten Rohrleiter für Anwendung mit Gleichspannung	29
5.1 Partikelverhalten in einer coaxialen Elektrodenanordnung	29
5.1.1 Klassifizierung der Bewegungsmuster	30
5.2 Einfluss der Partikel auf die Isolationsfestigkeit	33
5.2.1 Partikeleinfluss auf das Isoliergas	33
5.2.2 Partikeleinfluss auf den Isolator	35
6 Versuchsaufbau	36
6.1 Geometrie und Komponenten einer GIL-Anordnung	36
6.2 Kamerasystem	38
6.3 Berechnungsablauf der Partikelposition	39
6.4 Teilentladung	41
6.4.1 Allgemeines	41
6.4.2 Teilentladungsmessung	43
6.4.3 Besonderheiten der Gleichspannung	44
6.5 Synchronisierung der Messungen	45
6.6 Messkreis	46
7 Versuchsplanung und Durchführung	49
7.1 Versuchsplanung	49
7.1.1 Partikelarten	51

7.2	Versuchsablauf	52
8	Ergebnisse	54
8.1	Allgemeines	54
8.2	Partikelverhalten	55
8.2.1	Abhebefeldstärken der Partikel	55
8.2.2	Partikelbewegung bei positiver Polarität	60
8.2.3	Partikelbewegung bei negativer Polarität	61
8.3	Vergleich von unterschiedlichen Spannungsarten	62
8.3.1	Wechselspannung	62
8.3.2	Positive Gleichspannung	63
8.3.3	Negative Gleichspannung	64
8.3.4	Polaritätswechsel	65
8.4	Partikel auf Isolatoroberfläche	66
8.5	Partikelverursachte Teilentladungserscheinungen	67
9	Resümee	72
10	Ausblick	75
10.1	Allgemeines	75
10.2	Partikelfalle	75
10.3	Weitere Untersuchungen	77
11	Zusammenfassung	79
	Literatur	82

1 Einleitung

Klassische Übertragungs- und Verteilnetze werden üblicherweise mit Wechselspannung betrieben, die eine einfache Umwandlung der Spannung in die entsprechende Spannungsebene ermöglicht. Für größere Leistungen über weite Strecken eignen sich jedoch Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungen (HGÜ) besser, da sie eine optimale Trassenausnutzung aufweisen, bei der auch kein Blindleistungstransport stattfindet. Außerdem treten dabei auch keine Stromverdrängungseffekte auf, wie dies bei Wechselstromnetzen der Fall ist, und es kann der Leiterquerschnitt dadurch vollständig ausgenutzt werden. Die dabei zunehmende Distanz zwischen Energieerzeugung und -verbrauch erfordert daher einen vermehrten Bedarf an flexiblen Energieübertragungskapazitäten. Eine „Overlay-Netzstützung“ eines künftigen Übertragungsnetzes bildet neben Offshore-Anlagen und Netzkopplungen einen möglichen Anwendungsbereich der HGÜ-Technologie [1]. Als Übertragungsnetzsysteme neben Kabel und Freileitung gibt es weitere Alternativen der Energieübertragung großer Leistungen. Die gasisolierte Leitung (GIL) zeichnet sich durch ihre hohe Zuverlässigkeit, ihre große Übertragungskapazität sowie ihren geringen Platzbedarf aus. Allerdings ist eine GIL mit dem Gas Schwefelhexafluorid (SF_6) befüllt, welches ein großes Treibhauspotential aufweist und somit als nicht-umweltfreundliches Gas gilt. Da SF_6 ein stark klimawirksamer Stoff ist, der eine hohe Lebensdauer in der Atmosphäre aufweist und ein hohes Treibhauspotential von zirka dem 23.900-fachen CO_2 -Äquivalent besitzt, ist es im Kyoto-Protokoll als Treibhausgas deklariert [2]. Zwar wird neben reinem SF_6 auch ein Gemisch aus Stickstoff N_2 und SF_6 verwendet, doch für lange Leitungen ist der Anteil von SF_6 noch immer sehr hoch. Es gibt daher Bestrebungen, nach umweltfreundlichen alternativen Isoliergasen zu suchen. Deren Anforderungen lassen sich kurz zusammenfassen in: dielektrische Eigenschaften, chemische und physikalische Eigenschaften, gute Umweltverträglichkeit, Verfügbarkeit und vertretbare Kosten. Da eine Akzeptanz in stark urbanisierten Räumen von breiten Übertragungstrassen nicht mehr gegeben ist, wird daher eine Flexibilisierung der Übertragungstechnologien gefordert. Dabei liegt es nahe, die HGÜ-Technik an gasisolierten Systemen anzuwenden, um so den gestiegenen Leistungsanforderungen gerecht zu werden.

Für einen Betrieb der GIL mit hoher Gleichspannung muss aber eine genaue Kenntnis über die Auswirkungen von Gleichfeldern auf gasförmige und feste Isolierstoffe vorausgesetzt werden, da das Verhalten von Isolierstoffen bei hoher Gleichspannung sich von dem bei hoher Wechselspannungsbeanspruchung grundsätzlich unterscheidet. Zum einen existieren polaritätsabhängige Effekte und zum anderen muss neben dem Fall einer reinen Gleichspannungsbeanspruchung auch der Fall einer transienten Beanspruchung Berücksichtigung finden. Transiente Beanspruchungen treten in erster Linie durch Schalthandlungen, Polaritätswechsel und Überspannungen auf. Da jedoch in einem stationären elektrischen Feld sich eine resistive Feldverteilung einstellt, hingegen in einem Wechselfeld eine kapazitive Feldverteilung, müssen dafür geeignete Materialien und ein optimiertes Design in Betracht gezogen werden. Die für eine resistive Feldverteilung bestimmende Größe ist die Leitfähigkeit der daran beteiligten Isolierstoffe, welche auch einer Temperaturabhängigkeit sowie weiteren Parametern unterliegt.

Darüber hinaus treten noch weitere Fragestellungen auf, wie beispielsweise die Auswahl von geeigneten Materialien für die Komponenten einer GIL, die Berücksichtigung von Korrosionseffekten sowie eventuelle Beschichtungen von Oberflächen und deren Auswir-

kungen auf das System. Große Bedeutung wird auch den Isolatoren beigemessen, deren Aufladungsverhalten und damit der Bildung von Raumladungen im Isoliermaterial. Des Weiteren sind noch Systemaufbau und Design zu nennen, die Abmessungen und Toleranzen sowie die Geometrie des Systems.

Ein Hauptaugenmerk dabei gilt den frei beweglichen Partikel, da diese den kritischsten Defekt darstellen. Diese mindern die Isolationsfestigkeit der Gasstrecke dahingehend, dass durch partikelverursachte Feldüberhöhungen Teilentladungen entstehen [3]. Befinden sich frei bewegliche Partikel in der Nähe von Isolatoren, können die dabei erzeugten Entladungen die Grenzfläche zwischen Gas und Isolator beeinträchtigen.

Es besteht außerdem noch die Möglichkeit, dass sich frei bewegliche Partikeln zu anderen Arten von Defektes wandeln. Beispielsweise können diese auf die Isolatoroberfläche gelangen und dort verbleiben. Dabei werden sie nur schwer detektiert und sind daher oft unerkannt. Unter Betriebsspannung verursachen die Partikeln auf den Isolatorenoberflächen Entladungen, die den Isolierstoff dabei schädigen.

Ein weiterer möglicher Defekt sind Partikel, welche sich am Innenleiter oder aber auch an der Außenhülle festsetzen und sogenannte Spitzen bilden. Diese verursachen eine Feldüberhöhung in diesem Bereich und mindern zusätzlich die Isolationsfestigkeit des Gases. Durch Spitzen an Innenleiter oder Außenhülle und durch Partikeln an Isolatorenoberflächen besteht vor allem ein wesentlich höheres Risiko eines Durchschlages im Falle transientser Überspannungsbeanspruchung. Die soeben genannten Argumente setzen umso mehr voraus, dass Maßnahmen gegen frei bewegliche Partikel gesetzt werden müssen. Grundlage dabei ist die genaue Studie des Bewegungsverhaltens der frei beweglichen Partikel unter hoher Gleichspannung. Aus den theoretischen Überlegungen lassen sich daher die grundlegenden Kräfte, die auf ein Partikel wirken, bestimmen. Da aber bei frei beweglichen Partikeln sehr komplexe physikalische Prozesse stattfinden, sind die theoretischen Überlegungen nur eine stark vereinfachte allgemeine Betrachtung. Um die Partikeldynamik intensiver zu studieren, sind praxisnahe Untersuchungen daher unabdingbar. Vorzugsweise werden daher Partikel aus Materialien untersucht, welche am häufigsten bei gasisolierten Systemen vorkommen. Da Innenleiter und Außenhülle aus Aluminium bestehen, ist daher Aluminium das bei weitem häufigste Material.

Partikelgröße und vor allem Form können hingegen sehr stark variieren. Aus der großen Anzahl an unterschiedlichen Partikeln, wie beispielsweise kugel-, zylinder-, span- und spiralförmige, ist es sinnvoll, nur eine Auswahl mit den am häufigsten auftretenden Partikeln zu treffen. Daher wurden die Hauptuntersuchungen mit spanförmigen Aluminiumpartikeln von 2, 4, und 6 mm Länge durchgeführt. Neben den Untersuchungen des Bewegungsverhaltens von einzelnen Partikeln wurden auch Ereignisse wahrgenommen, welche im Vorhinein nicht zu erwarten waren. Beispielsweise konnten auch Beobachtungen von Durchschlägen mit Partikelbeteiligung gemacht werden. Außerdem wurde mehrfach festgestellt, wie Partikel auf die Oberfläche eines Isolators gelangten, ohne dabei detektiert zu werden. Dies sind kritische Ereignisse, welche daher einer besonderen Aufmerksamkeit bedürfen. Aus dem Partikelverhalten können in weiterer Folge Schlüsse auf die Aufenthaltswahrscheinlichkeit gezogen werden. Maßnahmen gegen frei bewegliche Partikel sollten daher dort angesetzt werden. Partikelfallen, welche das Prinzip von feldfreien Bereichen anwenden, sollten daher dort eingesetzt werden, wo die Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Partikel am höchsten ist. Diese Arbeit umfasst daher alle diese dargelegten Erscheinungen, um aus den gewonnenen Ergebnissen entsprechende Maßnahmen treffen zu können.

2 Aufgabenstellung

Die vorher in Kapitel 1 beschriebenen Problemstellungen einer gasisolierten Leitung unter hoher Gleichspannung sind mannigfaltig und komplex. Außerdem bestehen Zusammenhänge zwischen diesen Problematiken, bei denen oft eine Differenzierung nur schwer möglich ist. Es ist daher notwendig, die Aufgabenstellung dabei abzugrenzen und auf einige Schwerpunkte einzuschränken. Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung des Bewegungsverhaltens von frei beweglichen leitenden Partikeln unter hoher Gleichspannung. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf einem möglichst praxisgerechten Ansatz mit einer Versuchsanordnung aus realen GIL/GIS-Komponenten und einer dafür entsprechenden Probenaufbereitung. Aufgrund einer Vielzahl möglicher Partikelformen wurden für die Hauptuntersuchungen dabei Einschränkungen auf spanförmige Aluminiumpartikel von 2, 4 und 6 mm Länge gemacht. Es sind ausschließlich elektrisch leitfähige Partikel zu untersuchen, da nichtleitende Stoffe nur unwesentlichen Einfluss auf die Isolationseigenschaften eines gasisolierten Rohrleiters ausüben. Partikel in Form von Metallspänen kommen als Defekt recht häufig vor, da diese ursprungsbedingt von Fertigung, Montage oder durch Vibrationen bzw. Abrieb herrühren. Für Voruntersuchungen wurden aus Gründen der Probenvorbereitung zylinderförmige Kupferpartikel verwendet. Diese sind leichter reproduzierbar und haben auch idealere Eigenschaften als die unregelmäßige Form von Aluminiumspänen. Aus Gründen eines möglichen Einsatzes von Stahlwerkstoffen bei gasisolierten Rohrleitern wurden auch Metallspäne aus Eisen untersucht. Die Besonderheit an Eisen liegt darin, dass es als ferromagnetischer Stoff gilt und dessen Partikeln mittels Magneten wesentlich leichter kontrolliert und daher auch eliminiert werden können. In erster Linie gilt es zu untersuchen, welche Kräfte und Einflüsse auf Partikel im Gleichspannungsfeld wirken. Dabei ist die Form der Partikel entscheidend, da mit zunehmendem Längen-Durchmesser Verhältnis sich auch die Inhomogenitäten vergrößern, die das Verhalten der Partikel stark beeinflussen. Das Bewegungsverhalten der Partikel hängt hauptsächlich von folgenden Größen ab:

- a) Elektrostatische Kraft
- b) Erdanziehungskraft
- c) Strömungswiderstand des Gases
- d) Stoßzahl beim Aufprall des Partikels auf der Oberfläche

Die Kraft, die das Partikel am stärksten beeinflusst, ist die elektrostatische Kraft, welche von der Ladung des Partikels und der Stärke des elektrischen Feldes abhängt. Des Weiteren wirkt auch die Erdanziehungskraft als eine nach unten gerichtete Größe auf das Partikel, welche proportional zur Partikelmasse ist. Der Strömungswiderstand wird in der Bewegungsgleichung aufgrund der Geschwindigkeit und der Gasdichte berücksichtigt. Dieser hat vor allem bei sehr schnellen Partikeln Auswirkungen, da die Geschwindigkeit als quadratische Größe in die Gleichung eingeht. Des Weiteren erfährt das Partikel auch einen elastischen Stoß, wenn es dabei an der Elektrodenoberfläche aufschlägt. Die soeben beschriebenen Größen sind die Hauptfaktoren der Partikeldynamik, welche in einer Bewegungsgleichung dargestellt werden. Da aber diese Gleichung aufgrund der komplexen physikalischen Prozesse aus Variablen besteht, welche keine mathematische Beschreibung zulassen, ist daher ein empirischer Ansatz gewählt worden. Im Besonderen entsteht durch Ladungsaufnahme, Umladevorgänge und Teilentladungen ein sehr zufäl-

liges Bewegungsmuster der Partikel. Trotzdem können folgende Bewegungsmuster frei beweglicher Partikel unter Gleichspannung zugeordnet werden:

- a) Abheben vom Boden der Außenhülle
- b) Auf- und Abbewegung zwischen Außenhülle und Innenleiter
- c) Stehende Bewegung am Innenleiter
- d) Stehende Bewegung an der Außenhülle

Die unterschiedlichen Bewegungsarten der Partikel haben zu Folge, dass es auch diverse Formen der Entladungen gibt, welche unterschiedliche Auswirkungen auf das Isolationsvermögen des Rohrleiters haben. Diese stellen sich wie folgt dar:

- a) Ständige Teilentladungen
- b) Temporär auftretende Teilentladungen
- c) Durchschlag

Um das Bewegungsverhalten und auch das Teilentladungsverhalten der Partikel eingehendst zu untersuchen, wurden daher folgende Aufgabenstellungen definiert:

Theoretische Überlegungen: In einem ersten Schritt wurde der Stand der Technik recherchiert, die dabei vorhandenen Ergebnisse überprüft und gegebenenfalls ergänzt. Da Untersuchungen an gasisolierten Systemen unter hoher Gleichspannung eine relativ neue Thematik darstellten, konnten Versuche nicht im selben Ausmaß durchgeführt werden, wie dies bei Wechselspannung der Fall ist. Daher wurden Versuchsparameter von praxisbezogenen Werten bei Wechselspannung herangezogen. Diese Versuchsparameter sind beispielsweise Höhe der Prüfspannung und Isoliergasdruck.

Versuchsaufbau: Der Versuchsaufbau besteht im Wesentlichen aus einem Durchführungsteil und aus einem koaxialen Rohrleiter-Element mit anschließendem Winkelbaustein (GIS). Im koaxialen Rohrleiterteil wurden die Partikelproben eingebracht und dort ihr Bewegungsverhalten untersucht. Besonders wegen der Untersuchung der Partikeldynamik wurden Teile des Aufbaues verändert, wie beispielsweise zusätzliche Beobachtungsfenster, Vorrichtung zum Einschleusen von Partikeln, LED-Innenraumbeleuchtung und aus Gründen der Beobachtbarkeit der Partikel eine Verkleinerung des Kugelabschlusses am Innenleiter.

Feldberechnung: Die elektrischen Felder in einem gasisolierten Rohrleiter wurden mittels Finite-Elemente-Methode (FEM) bestimmt. Dazu müssen die exakten Dimensionen wie auch die Permittivitätszahlen und Leitwerte der daran beteiligten Isolierstoffe bekannt sein. Jede Veränderung des Versuchsaufbaus wurde vorher mittels FEM-Programmen überprüft und gegebenenfalls abgeändert, damit unzulässige Feldüberhöhungen nicht auftreten können, beispielsweise bei Verkleinerung des Kugelabschlusses des Leiters oder bei der Einbringung der Innenraumbeleuchtung.

Teilentladungsmessung: Da Partikelbewegungen immer mit Teilentladungserscheinungen einhergehen, wurde es daher als notwendig erachtet, auch Teilentladungen zu erfassen. Die dabei angewandten Methoden waren die konventionelle Messmethode gemäß IEC 60270 sowie die UHF-Messmethode mittels kapazitiver Feldsonden.

Kamerasystem: Zentrales Element dieser Untersuchungen ist ein System aus zwei baugleichen Kameras, welches nicht nur die Partikelbewegung, aufzeichnet sondern dabei auch das Partikel detektiert und die dreidimensionalen Koordinaten daraus berechnet. Wegen der hohen Geschwindigkeit der Partikel und des relativ großen Versuchsraums im Verhältnis zur Partikelgröße sind nicht nur eine große Anzahl an Bildern pro Sekunde, sondern auch eine gute Bildauflösung gefordert. Die Technologie des Kamerasystems kommt im eigentlichen Sinn aus der Robotik und wurde erstmalig an Hochspannungsversuchsaufbauten eingesetzt.

Schutzkonzept: Die Untersuchungen finden mit Spannungspegel statt, bei denen kein Durchschlag beabsichtigt ist. Trotzdem kann sich, beispielsweise unter Partikelbeteiligung, ein Versagen der Isolation ereignen. Daher ist es notwendig, ein Schutzkonzept gegen unkontrollierte Entladungen zu entwerfen. Allen voran muss dabei das Kamerasystem geschützt werden, da das Teilentladungsmesssystem aufgrund seines Einsatzgebietes von vornherein mit einem Schutz gegen Überspannungen ausgelegt ist. Die Maßnahmen lassen sich kurz Zusammenfassen in:

- a) Niederinduktive Erdung des Prüflings
- b) Vermeidung von Erdschleifen
- c) Schirmung der Leitungen und Geräte

Synchronisierung der Messungen: Damit eine Zuordnung der Partikelbewegung durchgeführt werden kann, müssen die Messsysteme zeitlich aufeinander abgestimmt werden. Das bedeutet, dass vor allem Kameraaufzeichnungen mit den Teilentladungsimpulsen übereinstimmen müssen. Dabei wurde nach dem Empfindlichkeitsnachweis (UHF) und der Kalibrierung (60270, Kamerasystem) ein Impuls des Kamerasystems an das Teilentladungssystem ausgegeben. Da dieser Impuls von der Teilentladungsmessung und dem Kamerasystem zugeordnet werden konnte, wurden die Geräte damit synchronisiert.

Visualisierung: Mittels eigenem Visualisierungsprogramm konnten die Trajektorien eines Partikels rekonstruiert werden. Da jedes Bildpaar des Kamerasystems einen dreidimensionalen Punkt liefert und bei bis zu 200 Bildern/Sekunde sehr viele Punkte entstehen, kann damit die Trajektorie eines Partikels beschrieben werden.

Methodik: Um bestimmte Abhängigkeiten von Einflussfaktoren bestimmen zu können, wurden bestimmte Versuchsparameter variiert. Diese sind im Wesentlichen:

- a) Unterschiedliche Größe der Partikel (2, 4, 6 mm)
- b) Unterschiedliche Materialien der Partikel (Cu, Al, Fe)
- c) Positive/negative Polarität der Prüfspannung
- d) Verschiedene Drücke mit SF_6 -Gas (0, 4 MPa, 0, 2 MPa, 0, 1 MPa)

Ziel dabei ist die Bestimmung der Abhebefeldstärke, ab welcher sich die Partikel aufrichten, die Bestimmung der Typen von Bewegungsmustern, eine eventuelle Änderung derer und die Ermittlung von Schwellwerten dabei. Aufgrund dieser Erkenntnisse sollten Überlegungen zu Maßnahmen gegen frei bewegliche Partikel gemacht werden.

3 Grundsätzliches über frei bewegliche Partikel

3.1 Einführung

Vom Standpunkt der Isolationskoordination aus sind all jene Defekte kritisch, welche den erforderlichen Pegel der Stehspannung mindern könnten [4]. Diese sollten dann auch entsprechend erkannt und entfernt werden. Hauptsächlich entstehen diese Defekte bei Fertigung oder Montage, sie können aber auch während des Betriebes auftreten. Typische Defekte sind leitfähige Partikel, nicht gut kontaktierte Elemente auf schwebendem Potential, Hohlräume im Isolator und Spitzen am Innenleiter oder an der Außenhülle. Leitfähige Partikel unterteilen sich wiederum in frei bewegliche Partikel, Partikel an der Isolatoroberfläche oder aber auch in den Feldraum hinein stehende örtlich verfestigte Partikel, sogenannte Spitzen, an den metallischen Oberflächen. Wie kritisch ein Defekt ist, hängt sowohl von Typ und Größe des Defektes als auch von Ort und Art sowie der Höhe der Spannungsform ab. Frei bewegliche Partikel sind bei Wechselfeldbeanspruchung kritischer, wohingegen sich Spitzen und Partikel an der Isolatoroberfläche problematischer bei transienter Beanspruchung auswirken [4]. In dieser Arbeit wurden ausschließlich leitfähige frei bewegliche Partikel untersucht. Dies ist der am häufigsten vorkommende und auch kritischste Defekt bei gasisolierten Systemen. Frei bewegliche Partikel können auch auf die Oberfläche eines Isolators gelangen oder sich beispielsweise am Innenleiter festsetzen und sich so zu einer örtlichen Störstelle wandeln. Nicht leitfähige Partikel haben wenig bis keine Auswirkung auf die Durchschlagsfestigkeit des Isoliergases [5]. Da sie keine Entladungen verursachen, können diese auch nicht mittels einer Teilentladungsmessung detektiert werden. Sie werden daher als nicht bedenklich betrachtet. Eine auf ein sich bewegendes Partikel wirkende magnetische Kraft ist um Größenordnungen schwächer und kann somit ebenso vernachlässigt werden [6].

Für die Empfindlichkeit der Diagnosemessung wurde eine scheinbare Ladung von 5 pC für frei bewegliche Partikel nach IEC 60270 festgesetzt. Dieser Wert sollte eine bei Vor-Ort-Bedingungen noch akzeptierbare maximale Empfindlichkeit gewährleisten [4]. Im Allgemeinen wird die Meinung vertreten, dass schwer zu erfassende Partikel von wenigen Millimetern Länge keine Überschläge verursachen. Allerdings muss beachtet werden, dass ein auf die Isolatoroberfläche gelangendes Partikel bei einer folgenden Überspannung eine Gleitentladung an der Isolatoroberfläche provozieren kann. Daher wird für Wechselfeldbeanspruchung auch die Entfernung von Partikeln über einige Millimeter Länge empfohlen [7].

Arten von Partikeln: Zur Untersuchung des Verhaltens von Partikeln in gasisolierten Systemen werden meist leicht reproduzierbare und möglichst einfache Partikel verwendet. Die einfachste geometrische Partikelform stellt die Kugel da. Da kugelförmige Partikel allerdings kaum in gasisolierten Anlagen vorkommen, werden hauptsächlich zylinderförmige Partikel untersucht, welche aus einem Litzendraht leicht hergestellt werden können. In der Realität kommen diese Geometrien allerdings kaum vor. Da Partikelverunreinigungen bei Montage oder aber durch Vibrationen und Abrieb von beweglichen Kontakten entstehen, sind die dabei entstehenden Partikel meist spanförmig und unregelmäßig und als kritischer Defekt zu bewerten [8]. In gasisolierten Systemen vorkommende Par-

tikel bestehen meist aus den gleichen Materialien, aus welchen auch die Anlage gefertigt ist. Diese sind in der Regel spiral- oder blättchenförmig mit großen Durchmesser-Längenverhältnissen und bestehen hauptsächlich aus Aluminium [6]. Weiters kommen Elemente aus Kupfer und Eisen in GIS/GIL-Anlagen vor und sollen somit auch in Betracht gezogen werden.

Da aber für gasisolierte Systeme bei Gleichspannungsanwendungen Wirbelströme und Hysteresisverluste vernachlässigt werden können, liegt es nahe, anstatt Aluminium Eisen für die Außenhülle zu verwenden [9]. Eisen nimmt als ferromagnetischer Stoff eine Sonderstellung ein und ermöglicht ein einfaches Entfernen der Eisenpartikel mit Magneten.

3.1.1 Partikelverhalten

Aufgenommene Ladung und Abhebevorgang: Vor dem Anlegen einer Spannung befindet sich das Partikel ruhend am Boden der Außenhülle. Von dort kann es im elektrischen Grundfeld \vec{E}_0 über die metallische Oberfläche eine unipolare Ladung q aufnehmen. Die Größe der aufgenommenen Ladung hängt hauptsächlich vom elektrischen Grundfeld, aber auch von der Form, Größe und Orientierung des Partikels ab. Die aufgenommene Ladung ergibt sich nach Gleichung 1 zu:

$$q = \oint_A \vec{D} \cdot d\vec{A} = \epsilon_0 \oint_A \vec{E} \cdot d\vec{A} \quad (1)$$

A entspricht der Oberfläche des Partikels, \vec{D} der lokalen elektrischen Flussdichte, \vec{E} der lokalen elektrischen Feldstärke an der Oberfläche des Partikels und ϵ_0 der absoluten Permittivität. Das Partikel erfährt aufgrund der aufgenommenen Ladung im elektrischen Feld eine elektrostatische Kraft \vec{F}_e :

$$\vec{F}_e = \int_q \vec{E} \, dq \quad (2)$$

Übersteigt die elektrostatische Kraft die Gewichtskraft \vec{F}_G und weitere Kräfte wie Adhäsions- und Reibungskräfte, wird sich das Partikel von der Oberfläche abheben. Nach dem Abhebevorgang kommt zu der unipolaren Ladung noch eine ortsabhängige bipolare Influenzladung hinzu, und die Lage des Partikels bestimmt nun die Ladungsverteilung [10].

Allgemeine Partikeldynamik: Nach dem Abheben von der Oberfläche der erdseitigen Elektrode richtet sich das langgestreckte Partikel entlang der Feldlinien in Richtung Gegenelektrode (Hochspannungspotential) aus. Dabei hat es von der erdseitigen Elektrode gleiche Ladung aufgenommen und wird infolgedessen von dieser abgestoßen und von der Gegenelektrode angezogen. Aufgrund der zusätzlichen Influenzwirkung ist die elektrostatische Kraft bei gleichem elektrischen Grundfeld auf das Partikel größer als in seiner horizontal liegenden Position. Der Unterschied ist umso größer, je größer das Längen-Radius-Verhältnis des Partikels ist [11].

Vorausgesetzt, es treten nur mäßige Koronaentladungen auf, beziehungsweise das Partikel kann dabei eine ausreichend große Ladung erhalten, wird sich das Partikel demzufolge sofort nach dem Abheben von der erdseitigen Elektrode in Richtung Gegenelektrode bewegen. Nach Durchlaufen der Gasstrecke schlägt es dann auf der Oberfläche der Hochspannungselektrode auf, wo es dann umgeladen wird. Infolgedessen nimmt das Partikel

wiederum gleiche Ladung von dieser auf und wird wiederum abgestoßen, respektive von der gegenüberliegenden Elektrode angezogen. Dabei ist die Beschleunigung nach unten hin größer, da der Vektor der Gewichtskraft \vec{F}_G in Bewegungsrichtung wirkt.

Aufgrund des Unterschiedes zwischen der Kraft, welche ein Abheben des Partikels in liegender Position bewirkt, und jener Kraft, welche ein Abheben des Partikels in stehender Position zur Folge hat, tritt ein gewisser Hysterese-Effekt ein. Umgekehrt betrachtet gibt es bei gleicher Kraft, je nach Partikelzustand (horizontal/vertikal), unterschiedliche Feldstärken, um ein Partikel zum Abheben zu bringen. Wird daher nach dem Abheben des Partikels die Prüfspannung verringert, kommt das Partikel bei einer Feldstärke weit unterhalb der ursprünglichen Abhebefeldstärke am Boden der erdseitigen Elektrode zu liegen. Jene Feldstärke, welche das Partikel in eine Ruhelage versetzt, kann um einige Größenordnungen geringer sein als die ursprüngliche Abhebefeldstärke [11]. Mit zunehmender Partikellänge wird jene Schwelle der Feldstärke geringer, welche das Partikel in Ruhelage versetzt. Die Abhebefeldstärke ist dagegen dazu unabhängig von der Partikellänge [12].

Physikalische Kräfte: Außer der elektrostatischen Kraft, der vorherrschenden Kraft der Partikelbewegung, wirken weitere physikalische Kräfte auf das Partikel. Dabei wird jene Kraft, die das Isoliergas als Medium der Partikelbewegung entgegengesetzt, als Strömungswiderstand bezeichnet [13]. Für einen eindimensionalen Bewegungsvorgang unter Berücksichtigung des Strömungswiderstandes \vec{F}_W und der Gewichtskraft \vec{F}_G ergibt sich daher folgende Differenzialgleichung [14]:

$$m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = \vec{F}_e - \vec{F}_W \pm \vec{F}_G \quad (3)$$

Dabei ist \vec{r} die Partikelposition. Mit \vec{g} für die Erdbeschleunigung und der Masse m ergibt sich die Gewichtskraft \vec{F}_G . Der Strömungswiderstand \vec{F}_W ist wiederum eine Funktion des Widerstandsbeiwertes c_w , der Querschnittsfläche des Partikels \bar{A} und der Gasdichte ρ_G . Mit dem Einheitsvektor \vec{e} ergibt sich der Strömungswiderstand zu:

$$\vec{F}_W = c_w \bar{A} \frac{1}{2} \rho_G \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 \vec{e} \quad (4)$$

Als stets der Bewegungsrichtung entgegengesetzte Kraft dämpft der Strömungswiderstand \vec{F}_W die Partikeldynamik. Im Gegensatz dazu wirkt die Gewichtskraft \vec{F}_G bei der Aufwärtsbewegung entgegen und bei der Abwärtsbewegung in Bewegungsrichtung des Partikels.

Bei der Auf- und Abbewegung trifft das Partikel naturgemäß an den Elektrodenoberflächen auf. Dabei müssen auch noch Stoßprozesse beachtet werden. Abgesehen von den, aufgrund von Unebenheiten der beteiligten Oberflächen schiefen exzentrischen Stößen bei der Reflexion, erfolgt die Partikelbewegung stets in Feldrichtung [6]. Bewegt sich ein Partikel durch den Gasraum, kommt es beim Auftreffen an der Elektrode zu plastischen und elastischen Verformungen der daran beteiligten Materialien. Durch das Zusammenwirken von äußerst komplexen Einflussfaktoren wird bei diesem teilelastischen Stoß ein Teil der Bewegungsenergie in Wärme und Verformungsenergie umgewandelt. Für die Partikelgeschwindigkeit v vor und v' nach einem teilelastischen Stoß gilt folgender Zu-

sammenhang:

$$v' = -kv \quad \text{bei} \quad 0 < k < 1 \quad (5)$$

Faktor k ist dabei die Stoßzahl bzw. der Restitutionskoeffizient. Unter realen Bedingungen ist anzunehmen, dass nicht nur gerade zentrische Stöße auftreten, sondern auch schiefe exzentrische. Die Bedingungen ändern sich also von Stoß zu Stoß. Die Stoßzahl ist dabei immer wieder von neuem zu berechnen [6].

Partikelformen: Aufgrund der großen Anzahl an unterschiedlichsten Partikelformen, -größen und -arten kann nur eine beschränkte Auswahl beschrieben werden. Die verschiedenen Einflussparameter bewirken jedoch ein unterschiedliches Bewegungsverhalten der einzelnen Partikelformen.

Ideale Partikel, wie kugelförmige Partikel, können sich nicht entlang der Feldlinien ausrichten. Nach dem Abheben beginnen diese sofort mit einer Aufwärtsbewegung in Richtung Gegenelektrode. So kommt es zu einer ständigen Auf- und Abbewegung und besonders ausgeprägtem Hysterese-Effekt. Das bedeutet, dass die Prüfspannung sehr stark reduziert werden kann, bis das Partikel zur Ruhe kommt. Dies kann damit begründet werden, dass aufgrund der Stoßparameter der elastische Anteil daran bei weitem überwiegt und somit der Impuls lange erhalten bleibt [15].

Im Gegensatz dazu können sich zylinderförmige Partikel entlang der Feldlinien ausrichten. Dabei können sich bei dieser Partikelform zwei Bewegungszustände ergeben. Zum einen kann sich eine stehende Bewegung an der Elektrodenoberfläche einstellen und zum anderen eine Auf- und Abbewegung zwischen den Elektroden. Welche Bewegungsform dann die vorherrschende ist, hängt von Faktoren wie Partikellänge, spezifisches Gewicht und Teilentladungsprozesse ab.

Im Gegensatz zu den vorher genannten Partikelformen sind blättchenförmige Partikel durchaus in Anlagen zu finden. Diese Partikelform rührt von Spänen oder Abrieb her. Sie besitzen ein relative großes Dicke-Breite-Verhältnis, können aber auch quadratische Formen annehmen. Das Bewegungsverhalten dieser Partikel ist ähnlich wie jenes der zylinderförmigen Partikel.

Die meisten Partikel weisen allerdings eine sehr unregelmäßige Form auf. Vertreter von sehr unregelmäßigen Partikelformen stellen spiralförmige Partikel dar, wie sie typischerweise von der Metallverarbeitung herrühren. Spiralförmige Partikel können vielfältige Formen annehmen, jedoch hat die Ganghöhe, also der Abstand, bei dem sich die Spirale bei einem Umlauf nach oben windet, einen wesentlichen Einfluss auf ihr Bewegungsverhalten [5].

Aufgenommene Ladung/elektrostatische Kraft: Die Ladung q und die elektrostatische Kraft F_e hängen grundsätzlich von der Form, dem Material und dem Durchmesser des Partikels ab. Die elektrostatische Kraft ist aus der Ladungsverteilung auf der Partikeloberfläche zu bestimmen. Die Flächenladung kann zu Punktladungen zerlegt und auf diese das Coulombsche Gesetz zur Ermittlung der zum Abheben notwendigen Kraft F_e angewandt werden [10]. Die für die Berechnung der Kraft F_e zu bestimmende Ladung des Partikels lässt sich nur dann errechnen, wenn der Feldstärkeverlauf an der Oberfläche beschrieben werden kann. Eine analytische Berechnung der aufgenommenen Ladung

führt selbst bei einer einfachen Geometrie wie der Kugelform zu einer komplizierten Reihenentwicklung. Es können aber für langgestreckte Partikelformen von der Orientierung abhängige Näherungslösungen gefunden werden [6]. In Tabelle 1 finden sich die notwendigen Formeln zur Berechnung der aufgenommenen Ladung und der elektrostatischen Kraft für kugelförmige, zylinderförmige, und spiralförmige Partikel. Dabei ist r der Radius, l die Länge des Partikels und ϵ_0 die absolute Permittivität. Für das spiralförmige Partikel ist D der Durchmesser der Spirale.

Tabelle 1: Elektrische Ladung und elektrostatische Kraft unterschiedlicher Partikelformen [12]

Partikelform	elektrische Ladung	elektrostatische Kraft
Kugel	$q = \frac{2}{3}\pi^3\epsilon_0 r^2 E$ (6)	$F_e = kqE$ $k = 0,832(\text{auf Elektrode})$ (7)
Zylinderförmig horizontal liegend	$q = 2\pi\epsilon_0 r l E$ (8)	$F_e = \frac{1}{\sqrt{2}}qE$ (9)
Zylinderförmig vertikal stehend	$q = \frac{\pi\epsilon_0 l^2 E}{\ln(2l/r) - 1}$ (10)	$F_e = \frac{\ln(l/r) - 0,5}{\ln(2l/r) - 1}qE$ (11)
Spiralförmig horizontal liegend	$q = \pi\epsilon_0 l D E$ (12)	$F_e = 0,715qE$ (13)

Abhebefeldstärken: Übersteigt die elektrostatische Kraft die Gewichtskraft des Partikels, kommt es zum Abhebevorgang. Bei Vernachlässigung von Adhäsions- und Reibungskräften folgt aus $F_e = mg$. Dadurch kann die zum Abheben erforderliche Feldstärke E_{Ab} bestimmt werden. Die in Tabelle 2 angeführten Formeln der Abhebefeldstärke können gemäß Tabelle 1 aus der Ladung q und der elektrostatischen Kraft F_e ermittelt werden. Dabei ist ρ die allgemeine Dichte und h die Ganghöhe des spiralförmigen Partikels.

Tabelle 2: Abhebefeldstärke für unterschiedliche Partikelformen [12]

Partikelform	Abhebefeldstärke
Kugel	$E_{Ab} = 0.49 \sqrt{\frac{\rho g r}{\epsilon_0}} \quad (14)$
Zylinderförmig horizontal liegend	$E_{Ab} = \sqrt{\frac{\rho g r}{1,43\epsilon_0}} \quad (15)$
Zylinderförmig vertikal stehend	$E_{Ab} = [\ln(2l/r) - 1] \sqrt{\frac{2\rho r^2 g}{3\epsilon_0 l [\ln(l/r) - 0,5]}} \quad (16)$
Spiralförmig horizontal liegend	$E_{Ab} = d \sqrt{\frac{\rho g}{2,86\epsilon_0}} \sqrt{\left(\frac{\pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{1}{D}\right)^2} \quad (17)$

Wie die in Tabelle 2 dargestellte Formel 15 für das zylinderförmige Partikel in liegender Position zeigt, ist die Abhebefeldstärke unabhängig von der Partikellänge. Das bedeutet, dass die Abhebefeldstärke nur vom Partikelradius bestimmt wird. Für einen merklichen Abhebevorgang muss nicht nur eine minimal erforderliche Kraft, sondern auch eine bestimmte Dauer der Spannung proportionale Energie geleistet werden [10].

3.1.2 Einflussfaktoren auf das Partikelverhalten

Abhebefeldstärken können sich deutlich verringern, wenn es beispielsweise aufgrund von Schalthandlungen zu Erschütterungen kommt. Solche Vibrationen geben den Partikeln eine beschleunigte Anfangsbewegung, bei der die für den Abhebevorgang erforderliche Abhebefeldstärke unterschritten werden kann. Diese Abhebefeldstärke verringert sich umso mehr, je stärker das Partikel beschleunigt wird [16].

Die Abhebefeldstärke kann deutlich erhöht werden, wenn die Oberfläche der Elektrode mit einer dielektrischen Beschichtung versehen wird. Vor allem bei Komponenten von Schaltanlagen ist eine Lackierung der Oberfläche der Innenseite der Kapselung üblich. Wenn eine Elektrode mit einem dielektrischen Material beschichtet ist, kann das Partikel keine direkte Ladung von der Elektrode aufnehmen. Zwei Mechanismen dominieren den Aufladeprozess des Partikels. Zum einen kann das Partikel Ladung über die elektrische Leitfähigkeit der Beschichtung aufnehmen und zum anderen wird es über Mikroentladungen geladen [17]. Die aufgenommene Ladung ist daher zusätzlich eine Funktion der Leit-

fähigkeit der Beschichtung und des Gasdruckes [6]. Wird jedoch der Gasdruck variiert, so kann keine merkbare Veränderung der Abhebefeldstärke erkannt werden. Allerdings ist bei einem geringeren Gasdruck die Teilentladungsaktivität höher, und es kommt vermehrt zu einer stehenden Bewegung an der Elektrodenoberfläche. Im Gegensatz dazu wird es bei einem höheren Gasdruck eher zu einer Auf- und Abbewegung zwischen den Elektroden kommen [15].

3.2 Partikelverhalten bei unterschiedlichen Spannungsarten

Das dynamische Verhalten der Partikel hängt hauptsächlich von der an der Oberfläche verteilten Ladung q ab, die wiederum von der Spannungshöhe im Augenblick des Abhebens und von der Partikelform bestimmt wird. Es wird daher angenommen, dass die Partikeltrajektorie bei Wechselladungsbeanspruchung der Phasenlage folgt, wohingegen bei Gleichspannungsbeanspruchung eine konstante Beschleunigung eintritt [18]. Wie bereits in Abschnitt 3.1.1 erwähnt, muss auch noch eine ausreichende Dauer der Spannung bzw. der dazu proportionalen Energie bestehen, um einen Abhebevorgang des Partikels einzuleiten [10]. Eine entsprechende Dauer ist aber bei Standardimpulsspannungen nicht immer gegeben.

Impulsspannung: Entsprechend der Norm IEC 60060 finden hauptsächlich die genormte Blitzstoßspannung ($1, 2/50 \mu s$) und die genormte Schaltstoßspannung ($250/2500 \mu s$) als Prüfspannungen Verwendung. Bei reiner Beanspruchung mit einer Blitzstoßspannung ist jedoch die dabei auftretende elektrostatische Kraft von zu kurzer Dauer, um überhaupt einen Abhebevorgang des Partikels auslösen zu können. Während eine Blitzstoßspannung nicht ausreicht, kann eine Schaltstoßspannung mit entsprechend längerer Beanspruchungsdauer ein Abheben von leichten Partikeln bis zur Gegenelektrode bewirken [10]. Somit haben frei bewegliche Partikel kaum einen Einfluss auf die Isolationsfestigkeit bei Beanspruchung mit Standardimpulsformen [6].

3.2.1 Partikelverhalten bei Gleichspannung

Die Polarität, als charakteristisches Merkmal der Gleichspannung, bewirkt bei den Abhebefeldstärken keine merklichen Unterschiede, da der Betrag der aufgenommenen Ladung bei positiver wie auch bei negativer Gleichspannung der gleiche ist [19]. Nach dem Abhebevorgang zeigen sich allerdings markante Unterschiede im Bewegungsverhalten der Partikel.

Die vorhergehenden Betrachtungen im Abschnitt 3.1.1 bezogen sich auf das Partikelverhalten unter der Annahme, dass das Partikel seine aufgenommene Ladung behält. Die tatsächlichen Bewegungsprozesse laufen aber nie ohne Teilentladungsaktivität ab. Das bedeutet, dass die Ladung q des Partikels sich, bei Überschreiten einer kritischen Feldstärke, ändert. Da aber die elektrostatische Kraft F_e das Produkt aus der Ladung q und der elektrischen Feldstärke E ist, wird jede Änderung der Ladung auch eine Änderung der Bewegung bewirken. Die Partikelgeometrie bestimmt auch das Verhältnis von elektrostatischer Kraft und Masse sowie die am Partikel auftretenden Feldstärken. Dadurch werden einerseits der Bewegungsvorgang, andererseits die Ausbildung stabiler Teilentladungen beeinflusst [10]. Bei verhältnismäßiger starker Teilentladungsaktivität nimmt

das Partikel ständig Ladungen von der Elektrode auf und gibt diese wieder in Richtung Gegenelektrode ab. Dadurch verbleiben im Partikel nicht genug Ladungen, um dieses von der Elektrode abzustößen und von der Gegenelektrode angezogen zu werden.

Es konnte auch festgestellt werden, dass der negative Teilentladungsstrom wesentlich größer ist als der positive Teilentladungsstrom [20]. Es wurde auch beobachtet, dass die Ladungsaufnahme des Partikels schon knapp vor dem Kontakt mit der Elektrode beginnt. Dies zeigt sich in deutlich sichtbaren Leuchterscheinungen an beiden Enden des Partikels [20]. Da durch Elektronenemission der negative Teilentladungsstrom größer ist, verbleibt im Partikel eine positive Nettoladung. Das Partikel wird dadurch stets zur negativeren Elektrode angezogen [21]. Das bedeutet, dass bei einer auf Erdpotential befindlichen unteren Elektrode und einer oberen positiven Hochspannungselektrode das Partikel eine stehende Bewegung an der erdseitigen unteren Elektrode ausführen wird. Umgekehrt wird bei negativem Hochspannungspotential an der oberen Elektrode das Partikel eine stehende Bewegung an der Unterseite der oberen Elektrode ausführen [21]. Das heißt, die elektrostatische Kraft F_e , welche auf die verbleibende Ladung des Partikels wirkt, übersteigt dessen Gewichtskraft F_G . Eine dauerhaft stehende Bewegung an der Unterseite der oberen Elektrode ist daher möglich.

Ein weiterer Effekt der Gleichspannung ist, dass Partikel zu höheren Feldstärken hingezogen werden, wenn sie eine stehende Bewegung an der Elektrodenoberfläche ausführen [22].

Hebt sich aber das Partikel von der Elektrode ab, kann es möglich sein, dass es sich verlangsamt und wieder in Richtung Elektrode zurückfällt, um dann wiederum abzuheben. Dieser Vorgang ist bei beiden Polaritäten möglich. Ein Extremfall solcher Ladungsänderungen ist der sogenannte „Firefly“-Effekt, bei dem das Partikel zu oszillieren beginnt. Diese Oszillation des Partikels nahe der Elektrodenoberfläche kann damit erklärt werden, dass sich das Partikel in einer Raumladungswolke bewegt, welche es selbst durch Entladungen verursacht hat. Dabei wird es ständig umgeladen und beginnt zu oszillieren. Begleitet wird dieses Verhalten von Koronaentladungen und deren Leuchterscheinungen, daher der Name „Firefly“-Effekt [11].

3.2.2 Partikelverhalten bei Wechselspannung

Da die elektrische Feldstärke E bei Wechselspannung eine Funktion der Zeit ist, stellt sich die Dynamik der Partikel noch komplexer dar als bei Gleichspannung, bei der $E = konst.$ ist. Mit \hat{E} als Höchstwert der Feldstärke gilt bei Netzfrequenz $E(t) = \hat{E} \sin(\omega t)$. Entsprechend Gleichung 2 wirkt sich diese zeitliche Änderung der Feldstärke auch zeitlich auf die elektrostatische Kraft und somit auch auf Bewegungsgleichung 3 aus. Wenn die Änderung der angelegten Wechselspannung größer ist als die Durchlaufzeit des Partikels zwischen den Elektroden bei Gleichspannung, dann ist die elektrostatische Kraft nicht mehr in eine Richtung wirksam, und der Bewegungsprozess stellt sich noch komplexer dar [11]. Es zeigt sich, dass das Partikel nur wenig oberhalb der Abhebespannung anfangs in seiner Bewegung der Netzfrequenz folgt. Es wird dann, nach seiner Rückkehr zur Elektrode, mechanisch reflektiert und setzt dann seine Geschwindigkeit nicht mehr mit $v_1 = 0$, sondern mit $v_2 > 0$ fort. Zwar oszilliert das Partikel im Raum mit der Netzfrequenz, allerdings wird der Bewegungsablauf im stationären Zustand hauptsächlich durch mechanische Einflüsse, wie Reflexion, bestimmt [10].

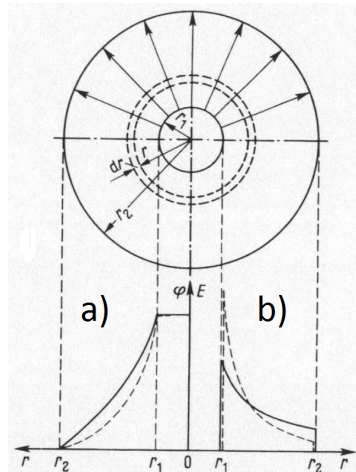
Je höher die Spannung, desto größere Sprunghöhen kann das Partikel erreichen. Bei

ausreichend hoher Spannung und Spannungsfestigkeit kann dadurch auch die Gegenelektrode erreicht werden [5].

4 Physikalische Effekte und elektrische Feldverteilung im Rohrleiter

4.1 Elektrische Feldverteilung im Rohrleiter

Dimensionierung von Rohrleitern: Die Kriterien zur Berechnung von Rohrleitern sind zum einen die minimale Höchstfeldstärke und zum anderen die Dimensionierung des Durchmessers der konzentrischen Außenelektrode. In Abbildung 4-1 ist ein Schnittbild zweier konzentrischer Zylinder dargestellt, bei dem der Außenradius r_2 als konstant angenommen wird. Der Radius r_1 des Innenleiters hingegen ist variabel. Bei dieser Elektrodenanordnung stellt sich ein radialsymmetrisches Feld ein, welches in diesem Fall von innen nach außen gerichtet ist. Der Innenleiter befindet sich daher auf positivem Potential. Die Abbildung 4-1a stellt den Verlauf der Potentialverteilung φ dar. Der Feldstärkeverlauf E ist hingegen in Abbildung 4-1b abgebildet. Es existiert ein optimales Verhältnis von r_2 zu r_1 , bei dem die Höchstfeldstärke, welche an der Oberfläche des Innenleiters auftritt, ein Minimum besitzt.



(a) Potentialverteilung (b) Feldstärkeverteilung

Abbildung 4-1: Schnittbild koaxiale Zylinder [23]

Um das optimale Verhältnis von Innenleiter zu Außenleiter bestimmen zu können, wird zuerst die elektrische Feldstärke entlang der Länge l betrachtet. Diese ergibt sich umgekehrt proportional zum Radius r :

$$E_r = \frac{Q}{2\pi\epsilon r l} \quad (18)$$

Da die größte Feldstärke an der Oberfläche des Innenleiters auftritt, ergibt sich diese bei $r = r_1$ mit E_1 :

$$E_1 = \frac{Q}{2\pi\epsilon r_1 l} \quad (19)$$

Da sich die Außenhülle auf Erdpotential befindet, kann dessen Potential φ_2 mit 0 angenommen werden. Es folgt daher das Potential des Innenleiters mit φ_1 :

$$\varphi_1 = \int_{r_1}^{r_2} \vec{E} \cdot d\vec{s} = \int_{r_1}^{r_2} E \, ds \quad (20)$$

Nach Integration des Innenradius r_1 zum Außenradius r_2 erhält man die Potentialdifferenz bzw. die Spannung U mit:

$$\varphi_1 = U_{12} = U = \frac{Q}{2\pi\epsilon l} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (21)$$

Der Feldstärkeverlauf zwischen innerem und äußerem Zylinder ergibt sich dann mit:

$$E(r) = \frac{U}{r \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (22)$$

Ist der Außenradius gegeben, soll ein optimaler Radius für den Innenleiter gewählt werden, sodass die Randfeldstärke E_1 minimal wird. Es gibt mit $r_1 \rightarrow 0$ und $r_1 \rightarrow r_2$ zwei Grenzfälle, welche jeweils unendlich große Feldstärken ergeben. Der optimale Radius für das Minimum der Randfeldstärke kann ermittelt werden, indem die Ableitung von E_1 zu r_1 Null gesetzt wird.

$$\frac{\partial E_1}{\partial r_1} = 0 \quad (23)$$

Daraus folgt für E_{1min} und r_1 :

$$E_{1min} = e \frac{U}{r_2} \quad r_1 = \frac{r_2}{e} \quad (24)$$

Somit ist das optimale Verhältnis zwischen r_1 und r_2 die Zahl e [23].

Ausnutzungsfaktor: Elektrische Felder lassen sich in homogene, quasihomogene und inhomogene Felder einteilen. Für das homogene Feld gilt, dass im gesamten Feldraum die maximale Feldstärke E_{max} konstant auftritt. Um Durchschlagsspannungen unterschiedlicher Elektrodenanordnungen besser mit einem homogenen Feld vergleichen zu können, wurde von A. Schwaiger der Ausnutzungsfaktor bzw. der Homogenitätsgrad η definiert [24]. Dieser besagt, wie gut ein Isoliersystem gleichmäßig vom elektrischen Feld ausgenutzt wird. Der Ausnutzungsfaktor kann für all jene Elektrodenanordnungen errechnet werden, bei denen sich auch die Durchschlagsspannung errechnen lässt. Dieser ist im Allgemeinen definiert durch $\eta = E_0/E_{max}$. Für eine koaxiale Elektrodenanordnung wie dem Rohrleiter ergibt sich η in % [25]:

$$\eta = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{\frac{r_2}{r_1} - 1} * 100 \quad (25)$$

Wird der Ausnutzungsfaktor für ein optimales Verhältnis von Innenradius zu Außenradius wie nach Gleichung 24 berechnet, ergibt sich dabei ein Homogenitätsgrad von etwa 57 %.

4.1.1 Wirkung elektrischer Felder

Neben der Homogenität lassen sich elektrische Felder auch in stationäre, quasistationäre und nichtstationäre Felder einteilen. Während nichtstationäre Felder elektromagnetische Wellen beschreiben, sind nur stationäre und quasistationäre elektrische Felder für die folgende Betrachtung von Interesse. Unter einem stationären Feld versteht man ein zeitlich konstantes Feld, bei dem die elektrischen Feldgrößen E , D und J keine Funktionen der Zeit sind; es gilt daher $\frac{\partial}{\partial t} = 0$. Hingegen ist bei quasistationären Feldern die Feldstärke E eine Funktion der Zeit.

Resistive/Kapazitive Feldstärkeverteilung: Eine Größe, die im direkten Zusammenhang mit der Ursache des elektrischen Feldes steht, ist die elektrische Flussdichte bzw. die elektrische Verschiebung D . Der Faktor, der die Beziehung zwischen der Flussdichte D und der Feldstärke E beschreibt, ist die absolute Permittivität ϵ_0 . Die absolute Permittivität ist eine Naturkonstante, welche das Verhältnis von D und E im Vakuum beschreibt. Befindet sich aber Materie im elektrischen Feld, wird diese mittels der Materialkonstanten ϵ_r , der relativen Permittivität, berücksichtigt. Es gilt daher:

$$D = \epsilon E \quad \text{mit} \quad \epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (26)$$

Bei Anlegen einer Spannung bildet sich in leitfähiger Materie zusätzlich zum elektrischen Fluss auch ein elektrischer Strom aus. Diesen Stromfluss beschreibt eine weitere wichtige Feldgröße, die elektrische Stromdichte bzw. das elektrische Strömungsfeld J . Auch hier gibt es einen Zusammenhang mit der elektrischen Feldstärke E , welche folgende Gleichung beschreibt:

$$J = \kappa E \quad (27)$$

Der Proportionalitätsfaktor κ ist daher das Verhältnis zwischen der Stromdichte J und der Feldstärke E und wird elektrische Leitfähigkeit genannt. Man unterscheidet zwei verschiedene Arten von Strömungen. Zum einen gibt es den Leitungsstrom J_L , welcher auf der Strömung von Ladungsträgern beruht, und zum anderen gibt es den Verschiebungsstrom J_V , der auf der zeitlichen Änderung elektrischer Felder \dot{E} bzw. \dot{D} basiert [26]. In Leitern ist der Leitungsstrom wesentlich größer als der Verschiebungsstrom. Umgekehrt ist der Verschiebungsstrom in Nichtleitern viel größer. In der folgenden Abbildung 4-2 ist ein Teil eines Stromkreises, welcher durch einen Luftspalt unterbrochen ist, dargestellt.

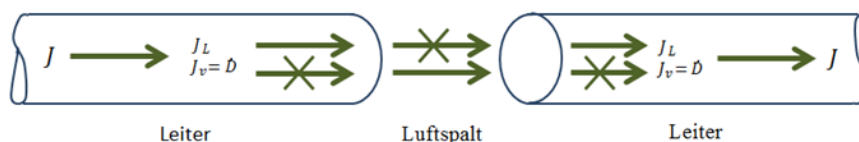


Abbildung 4-2: Darstellung des wahren elektrischen Stromes aus den jeweiligen Elementen von Verschiebungs- und Leitungsstrom

An der Grenzfläche Leiter - Luftspalt geht der Leitungs- in den Verschiebungsstrom über, um sich dann wieder an der zweiten Grenzfläche Luftspalt - Leiter vom Leitungs- zum Verschiebungsstrom zu wandeln. Die Summe aus beiden Strömungen ergibt daher die wahre elektrische Strömung J .

$$J = J_L + J_V = \kappa E + \epsilon \dot{E} = \kappa E + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (28)$$

Um den Vorgang besser beschreiben zu können, kann man sich eine Hüllfläche an der Schnittstelle Leiter zu Luft denken. Die eintretende wahre Strömung in diese Hüllfläche muss dann folglich gleich der austretenden wahren Strömung sein. Mathematisch lässt sich dies durch das Kontinuitätsgesetz ausdrücken, welches aus der Gleichung 28 abgeleitet werden kann:

$$\oint_A J dA = \oint_A J_L + J_V dA = 0 \quad (29)$$

Aus Gleichung 28 ist auch ersichtlich, dass der Term $\epsilon \dot{E}$ bzw. $\frac{\partial D}{\partial t}$ im stationären Strömungsfeld 0 werden muss. Als komplex dargestellte Form kann man Gleichung 28 besser die Abhängigkeit der Frequenz entnehmen [26].

$$\underline{J} = \kappa \underline{E} + j\omega\epsilon \underline{E} = (\kappa + j\omega\epsilon) \underline{E} \quad (30)$$

Es gilt daher unabhängig von der Feldstärke:

$\kappa \gg \omega\epsilon$	Leitungsstrom dominant
$\kappa \ll \omega\epsilon$	Verschiebungsstrom dominant

Das bedeutet, dass bei zeitlich veränderlichen Vorgängen das elektrische Verschiebungsfeld D vorherrschend ist, respektive bei zeitlich konstanten Vorgängen das elektrische Strömungsfeld J . Bei quergeschichteten Zweischicht-Dielektrika mit unterschiedlichen Dielektrizitätszahlen und unterschiedlichen Leitwerten ergibt sich nach Gleichung 26 folgende Beziehung bei zeitlich veränderlichen Feldern:

$$\text{Bei } D_1 = D_2 \quad \Rightarrow \quad \frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \quad (31)$$

Bei zeitlich konstanten Feldern ergibt sich analog dazu nach Gleichung 27:

$$\text{Bei } J_1 = J_2 \quad \Rightarrow \quad \frac{E_1}{E_2} = \frac{\kappa_2}{\kappa_1} \quad (32)$$

Das bedeutet, dass bei einem elektrischen Wechselfeld sich eine kapazitive Feldstärkeverteilung einstellt, hingegen bei einem Gleichfeld eine resistive Feldverteilung. Wenn das Verhältnis ϵ/κ an verschiedenen Punkten des Isolierstoffes unterschiedliche Werte besitzt, stimmt die Potentialverteilung im stationären Zustand nicht überein mit der Potentialverteilung während des Lade- oder Entladevorganges [27]. Daher stellt sich beim Laden und Entladen eine Potentialverteilung ein, wie sie der eines Verschiebungsfeldes entspricht, für welches dann die Permittivitätszahl maßgebend ist. Um dies besser zu

veranschaulichen, ist ein Zweischichtkondensator mit unterschiedlichen Permittivitätszahlen und Leitwerten gegeben, wie er in Abbildung 4-3 dargestellt ist.

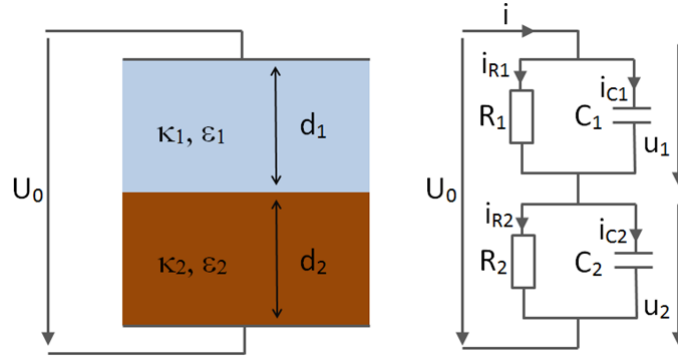


Abbildung 4-3: Kondensator mit zwei unterschiedlichen Dielektrika und die dazugehörige Ersatzschaltung

Der Strom i teilt sich in die beiden Teilströme i_{R1} und i_{C1} auf. Dabei wird der Strom i_{R1} als Leitungsstrom mit $\frac{u_1}{R_1}$ und i_{C1} als Verschiebungsstrom mit $C_1 \frac{du_1}{dt}$ aufgefasst. Nach dem Kirchhoffschen Gesetz ist $i = i_{C1} + i_{R1}$ und analog dazu $i = i_{C2} + i_{R2}$. Da der durch die Parallelschaltung von R_1 und C_1 fließende Strom i der gleiche Strom sein muss, welcher auch durch die Schaltung von R_2 und C_2 fließt, ergibt sich:

$$C_1 \frac{du_1(t)}{dt} + \frac{u_1(t)}{R_1} = C_2 \frac{du_2(t)}{dt} + \frac{u_2(t)}{R_2} \quad (33)$$

Die Quellenspannung muss außerdem zu jedem Zeitpunkt den gesamten Spannungsbedarf decken und entspricht daher $U_0 = u_1 + u_2$. Drückt man u_2 aus und setzt es in die Gleichung 33 ein, erhält man folgende Differentialgleichung erster Ordnung:

$$\frac{du_1(t)}{dt} + u_1(t) \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 (C_1 + C_2)} = \frac{U_0}{R_2 (C_1 + C_2)} \quad (34)$$

Deren allgemeine Lösung ist:

$$u_1(t) = K e^{-\frac{t}{\tau}} + U_0 \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad \text{mit} \quad \tau = \frac{R_1 R_2 (C_1 + C_2)}{R_1 + R_2} \quad (35)$$

Um den Faktor K bestimmen zu können, wird als Anfangsbedingung $u_1(0) = \frac{C_2}{C_1 + C_2} U_0$ bestimmt, welche einem kapazitiven Spannungsteiler entspricht. Dadurch ergibt sich die Lösung für die Teilspannung u_1 .

$$u_1(t) = U_0 \frac{R_1}{R_1 + R_2} \left(1 + \left(\frac{C_2 R_2}{\tau} - 1 \right) e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (36)$$

Analog dazu erhält man dann für u_2 :

$$u_2(t) = U_0 \frac{R_2}{R_1 + R_2} \left(1 + \left(\frac{C_1 R_1}{\tau} - 1 \right) e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (37)$$

Wird der Einschaltfall betrachtet, dann wird deutlich, dass sich bei $t = 0$ eine kapazitive und bei $t \rightarrow \infty$ eine resistive Potentialverteilung einstellt.

$$\frac{u_1(0)}{u_2(0)} = \frac{C_2}{C_1} \quad \text{und} \quad \frac{u_1(\infty)}{u_2(\infty)} = \frac{R_1}{R_2} \quad (38)$$

Die folgende Abbildung 4-4 stellt einen Spannungssprung für ein Zweischichtdielektrikum mit unterschiedlichen Leitwerten und Permittivitätszahlen dar. Zum Zeitpunkt $t = 0$ ist die Spannungsaufteilung im umgekehrten Verhältnis ihrer dazugehörigen Permittivitätszahlen. Die Dauer der Aufladung hängt von der Zeitkonstante τ ab. Da die verwendeten Isolierstoffe in einem coaxialen Rohrleiter sehr geringe Leitwerte haben, ergeben sich sehr große, den Auf- bzw. Entladevorgang bestimmende Zeitkonstanten. Bei erreichtem Endzustand kehrt sich das Verhältnis der Teilspannungen entsprechend ihrer Widerstandswerte um.

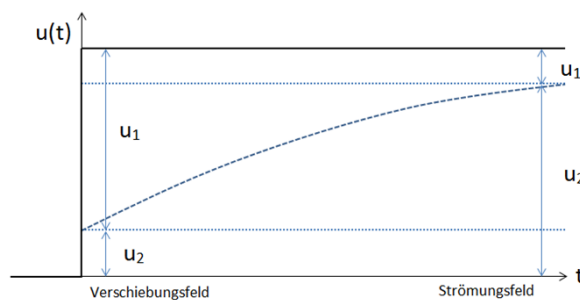


Abbildung 4-4: Transienter Vorgang beim Zuschalten einer Gleichspannung für zwei geschichtete Dielektrika

In Abbildung 4-5 ist ein Ausschnitt der Feldstärkeverteilung des coaxialen Rohrleiters der Versuchsanordnung dargestellt. Diese Abbildung ist ein Beispiel für die früher angeführte Feldberechnung. Darin befindet sich ein konischer Isolator, welcher von einem Isoliergas umgeben ist. Die Abbildung 4-5a zeigt eine resistive Feldstärkeverteilung. Die Feldlinien werden dabei vorzugsweise in jenes Medium hineingedrängt, welches den geringeren Leitwert aufweist. Im Gegensatz dazu zeigt Abbildung 4-5b eine kapazitive Feldstärkeverteilung eines Wechselfeldes. Hier findet eine gleichmäßigere Verteilung des elektrischen Feldes statt.

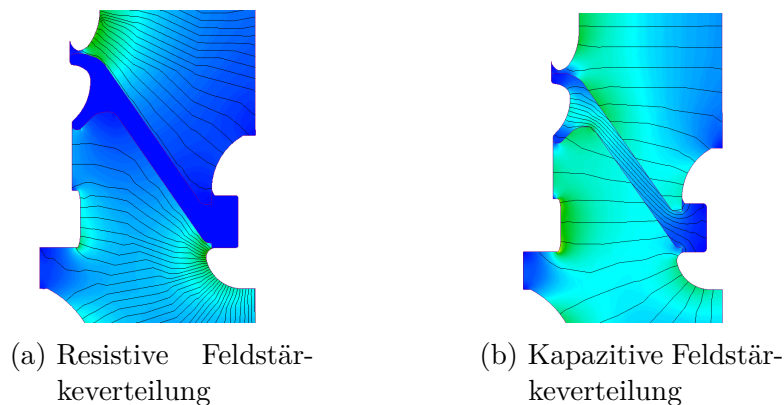


Abbildung 4-5: Feldstärkeverteilung

Grenzflächeneffekte im elektrischen Verschiebungsfeld: Grenzflächen befinden sich dort, wo zwei Isolierstoffe mit unterschiedlichen Dielektrizitätszahlen und Leitwerten eine Isolieranordnung bilden. Im coaxialen Rohrleiter wäre dies der Übergang vom festen zum gasförmigen Isolierstoff bzw. die Anordnung Isolator - Gas. Je nachdem, wie die Feldlinien auf die Grenzfläche einer Zweischichtisolierung auftreffen, wird zwischen quer, längs und schräg-geschichtetem Dielektrikum unterschieden.

Wenn Feldlinien normal auf eine Grenzfläche auftreffen, sind die Beträge von E und D gleich ihren Normalkomponenten. Die elektrischen Flussdichten D_1 und D_2 sind ident, und es gilt entsprechend Gleichung 26:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \quad (39)$$

Die Beträge der Feldstärken stehen daher im umgekehrten Verhältnis zu den Permittivitätszahlen. Das Dielektrikum mit der niedrigeren Permittivitätszahl wird daher mit einer höheren Feldstärke belastet als das Dielektrikum mit der höheren Permittivitätszahl. Es kommt daher zum Feldverdrängungseffekt in jene Materie mit der niedrigeren Permittivitätszahl.

Befindet sich jedoch eine Grenzfläche parallel zu den Feldlinien, so müssen die Beträge beider Feldstärken gleich groß sein. Es gilt daher:

$$E_1 = E_2 \quad (40)$$

Das bedeutet, dass beide Dielektrika im gleichen Maße vom elektrischen Feld beansprucht werden. Bei schräg geschichteten Dielektrika hingegen kommt es jedoch zu einer Brechung der Feldlinien an der Grenzfläche. An dieser gehen die Normalkomponenten der elektrischen Flussdichte stetig über, und es gilt daher:

$$D_{n1} = D_{n2} \quad \rightarrow \quad \epsilon_{r1} E_{n1} = \epsilon_{r2} E_{n2} \quad \text{bzw.} \quad \frac{E_{n1}}{E_{n2}} = \frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}} \quad (41)$$

Des Weiteren gilt auch die Stetigkeit der Tangentialkomponenten:

$$E_{t1} = E_{t2} \quad (42)$$

Dividiert man die Stetigkeitsbedingung von Gleichung 41 durch die Stetigkeitsbedingung von Gleichung 42, erhält man den Tangens jenes Winkels α , welcher von dem Feldvektor E und dessen Normalkomponente E_n eingeschlossen wird. Sofern keine freien Ladungsträger an der Grenzfläche vorhanden sind und nur reine Polarisierung stattfindet, können der Einfallswinkel α_1 und der Brechungswinkel α_2 wie folgt in Relation gesetzt werden:

$$\frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} = \frac{E_{t1}/E_{n1}}{E_{t2}/E_{n2}} = \frac{E_{n2}}{E_{n1}} = \frac{D_{n2}/\epsilon_2}{D_{n1}/\epsilon_1} = \frac{D_{1t}}{D_{2t}} = \frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}} \quad (43)$$

Wie in Abbildung 4-6 dargestellt, wird der Feldvektor E_1 , welcher unter dem Einfallswinkel α_1 an der Grenzfläche auftrifft, dort auch gebrochen. Im Dielektrikum 2 verläuft dieser dann unter dem Brechungswinkel α_2 als Feldvektor E_2 weiter. Der Brechungswinkel α_2 ist daher abhängig von der relativen Permittivitätszahl des Dielektrikum 2. Die Brechung der Feldlinien erfolgt analog zu den Phänomenen der Optik [28].

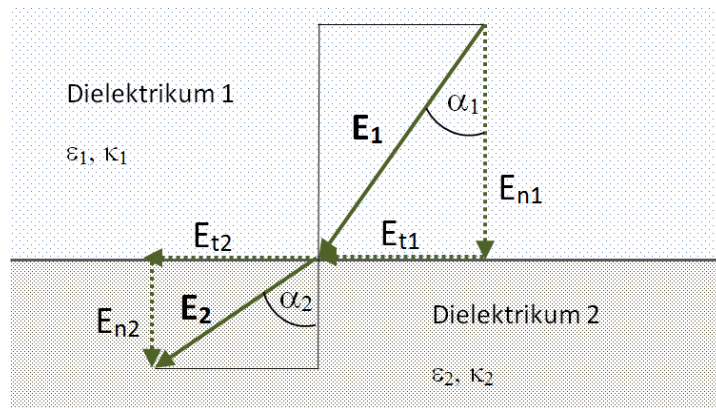


Abbildung 4-6: Feldkomponenten eines schräg geschichteten Dielektrikums

Grenzflächeneffekte im elektrischen Strömungsfeld: Aufgrund der Materialgleichungen 26 und 27 ergeben sich Analogien zwischen dem elektrischen Verschiebungsfeld und dem elektrischen Strömungsfeld.

Für quer geschichtete Dielektrika gilt $J_1 = J_2 = J$. Dabei steht das Verhältnis der Feldstärken im umgekehrten Verhältnis zu den dazugehörigen Leitwerten mit:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\kappa_2}{\kappa_1} \quad (44)$$

Bei längs geschichteten Dielektrika unterscheiden sich hingegen die Stromdichten der beiden Dielektrika hinsichtlich ihrer Leitwerte. Bei $J_1 = \kappa_1 E$ und $J_2 = \kappa_2 E$ gilt aufgrund der Geometrie der Isolieranordnung:

$$E_1 = E_2 = E \quad (45)$$

Betrachtet man dagegen den Fall eines schräg geschichteten Dielektrikums, ergeben sich analog zum elektrischen Verschiebungsfeldes die Brechung der Feldlinien entsprechend dem Leitwert. Die Verhältnisse der beiden $\tan \alpha$ können daher gleichgesetzt werden mit den Verhältnisse ihrer dazugehörigen Leitwerte:

$$\frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} = \frac{\kappa_1}{\kappa_2} \quad (46)$$

4.2 Gleichspannungsbelastung des Rohrleiters

Die Isolieranordnung eines Rohrleiters besteht zum einen aus dem gasförmige Isolierstoff Schwefelhexafluorid SF_6 bzw. aus einem Gemisch mit Stickstoff N_2 und zum anderen aus einem festen Isolierstoff, typischerweise Epoxyd-Harz. Isolieranordnungen aus zumindest zwei unterschiedlichen Isoliermedien besitzen immer Grenzflächen. Da bei Grenzflächen die elektrische Festigkeit geringer ist als jene des Mediums mit der geringeren Isolationsfestigkeit, bedarf es hier generell einer hohen Aufmerksamkeit. Als Ursache für die unterschiedliche elektrische Festigkeit des SF_6 bzw. SF_6/N_2 -Gemisches in reinen Gasstrecken und der Grenzfläche sind Feldstärkeänderungen im mikroskopischen Bereich verantwortlich [10]. Eine weitere Problematik besteht in überhöhten tangentialen Feld-

beanspruchungen an den Grenzflächen, welche unter Umständen auch Gleitentladungen an der Isolatoroberfläche hervorrufen können [28]. Wie bereits im vorhergehenden Abschnitt 4.1.1 dargestellt, hängt eine tangentielle Feldstärke auch vom Winkel der Grenzfläche zu den Feldlinien ab. Die Geometrie des Isolators hat deshalb einen wesentlichen Einfluss auf die Feldstärkeverteilung im Rohrleiter. Als weitere Stelle ist der Tripelpunkt zu nennen. Da hier zwei unterschiedliche Isolierstoffe auf eine Elektrode treffen, kommt es dort meist zu Feldverdrängungseffekten in jenes Medium mit der geringeren Dielektrizitätszahl. Unter Umständen können aufgrund von mangelnder Kontaktierung kritische Feldstärken auftreten, welche dann zu Teilentladungen und in weiterer Folge zu Gleitentladungen führen können [29]. Als Besonderheit für Anwendungen bei hoher Gleichspannung gilt in erster Linie die resistive Feldstärkeverteilung sowie die Oberflächenaufladung an den Isolatoren.

Leitfähigkeit: Anders als bei der Wechselspannungsbeanspruchung wird die Feldverteilung bei Gleichspannungsbeanspruchung durch die Leitwerte der daran beteiligten Isolierstoffe dominiert. Dies gilt allerdings nur für den Endzustand, welcher nach dem Einschalten mit entsprechender Zeitkonstanten τ erreicht wird. Bei Epoxydharz-Isolierstoffen, welche eine sehr niedrige Leitfähigkeit aufweisen, kann die Zeitkonstante für einen Übergang von kapazitiven in resistiven Zustand in der Größenordnung einiger Wochen liegen [30]. Bei transienter Beanspruchung dominiert hingegen das kapazitive Verhalten, wie z. B. bei Polaritätswechsel, Überspannungen und Schaltvorgängen. Das kapazitive Verhalten muss daher bei Gleichspannungssystemen Berücksichtigung finden. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen Volumsleitfähigkeit und Oberflächenleitfähigkeit. Der Leitwert wird unter anderem auch durch die Temperatur entscheidend beeinflusst. Typische Grenztemperaturen für Isolatoren sind $105 - 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ bei einer maximal erlaubten Temperatur der Außenhülle von $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ oder $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ bei erdverlegten und $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ oder $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ bei tunnelverlegten Rohrleitern [31]. Es existiert daher ein Temperaturgradient, welcher sich auf die Leitfähigkeit des Isolators stark auswirkt [32]. Bei Beeinflussung der Volumsleitfähigkeit durch eine niedrigere Temperatur ergeben sich dort auch höhere Feldstärken, die zu einer Feldinversion führen können [33]. Das bedeutet, dass es unter Umständen eine höhere Feldstärkebelastung im Bereich der Außenhülle gibt als im Bereich des Innenleiters. Außerdem besteht eine weitere Abhängigkeit des Leitwertes von der elektrischen Feldstärke. Hohe Feldstärken begünstigen die Ionisations- und Dissoziationsprozesse in festen polymeren Werkstoffen und erhöhen somit die Leitfähigkeit [34].

Oberflächenaufladung: Eine Ladungsträgeranhäufung auf der Isolatoroberflächen findet dann statt, wenn die Ansammlung der Ladungsträger größer ist als die Ableitung dieser [35]. Die Potentialverteilung am Isolator wird dadurch erheblich beeinträchtigt, die eine starke Minderung der Isolationsfestigkeit, besonders bei Polarisationswechsel, zur Folge hat [36]. Diese Oberflächenaufladungen können sowohl durch die Oberflächen- oder Volumsleitfähigkeit des Isolators stattfinden als auch über die Isoliergasstrecke. [29]. Des Weiteren verändert sich der Feldverlauf bei jeder Änderung des Betriebszustandes. Abbildung 4-7 zeigt den Spannungsverlauf (schwarze durchgezogene Linie) bei Betriebszustandsänderungen sowie den qualitativen Verlauf von Oberflächenladungen (rote gestrichelte Linie) einer beliebigen Anordnung durch analytische Berechnung [37]. Der in Abbildung 4-7a gezeigte Zuschaltvorgang zeigt das kapazitive, durch die Permitti-

vität bestimmte Verhalten des Isolators (Bereich *I*). Da aber der Schaltvorgang sehr viel kürzer ist als die Zeit bis zum Erreichen des Endzustandes, entspricht der Feldübergang vom kapazitiven in den resistiven Zustand der Zeitkonstanten τ . Daher muss für diese Zeitspanne sowohl das kapazitive als auch das resistive Verhalten in Betracht gezogen werden (Bereich *II*). Stellt sich der Endzustand ein, dominiert das resistive Verhalten (Bereich *III*). Beim Abschaltvorgang sind immer noch Restladungen vorhanden, welche das elektrische Feld beeinflussen (Bereich *IV*). Wird ein Polaritätswechsel durchgeführt, kommen auch hier die Effekte von Oberflächenladungen zu tragen. Zum Zeitpunkt des Polaritätswechsels und dem Moment danach kommt es zu einer kapazitiven Potenzialverteilung, welche dem Hauptfeld entgegenwirkt (Bereich *V*). Die restlichen Oberflächenladungen beeinflussen weiterhin das elektrische Feld, solange die Entladezeitkonstante vergleichsweise groß ist im Vergleich zur Dauer des Polaritätswechsels. In dieser Übergangsphase werden die Oberflächenladungen der einen Polarität abgebaut und andere entsprechend der entgegengesetzten Polarität aufgebaut (Bereich *VI*). Letztlich stellt sich wiederum ein stationärer Endzustand ein, bei welchem wieder das resistive Verhalten dominierend ist (Bereich *VII*) [37].

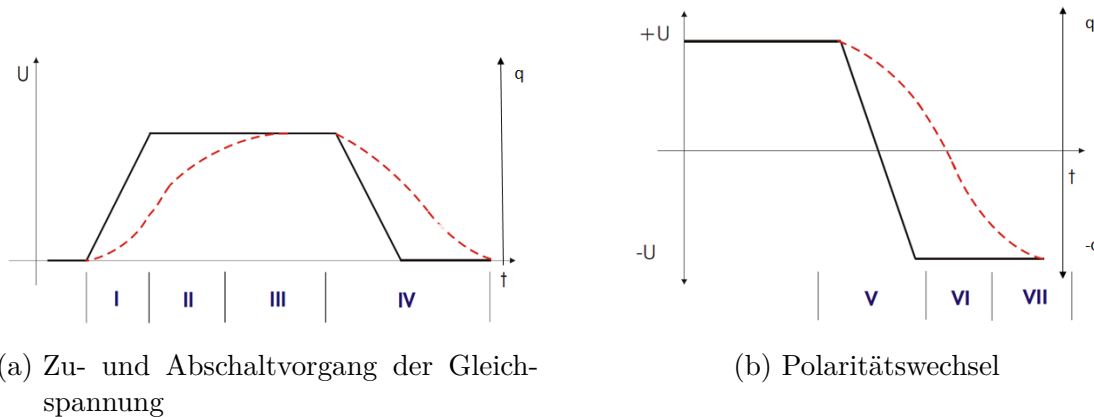


Abbildung 4-7: Spannungsverlauf mit schwarzer durchgezogener Linie und Verlauf der Oberflächenladungen bei Isolatoren mit roter gestrichelter Linie [37]

4.2.1 Physikalische Vorgänge im Gas

Anfangselektron: Die Elementarprozesse in Gasen unter Einfluss elektrischer Felder sind äußerst komplex und vielfältig. Für Entladungsprozesse in Gasen bedarf es jedoch immer beschleunigter Ladungsträger, bevorzugt Elektronen, die ihre kinetische Energie auf neutrale Moleküle übertragen und diese ionisieren [10]. Für die Bereitstellung eines Anfangs- bzw. Startelektrons sind in erster Linie äußere Ionisation, insbesondere die natürliche radioaktive Strahlung sowie die Höhenstrahlung, verantwortlich. Die Freisetzung eines Anfangselektrons kann aber auch mittels Thermoemission oder Feldemission aus der Kathode oder mittels Fotoelektronenemission durch Licht geschehen.

Stoßprozesse: Wird im elektrischen Feld ein Anfangselektron beschleunigt, so trifft es nach Durchlaufen der freien mittleren Weglänge auf ein Teilchen, in der Regel auf

ein neutrales Molekül. Welcher Prozess dabei eintritt, hängt hauptsächlich von der kinetischen Energie des Elektrons und dem davon beim Stoß auf das neutrale Molekül übertragenen Energieanteil ab [10]. Wird das Elektron beim Zusammenstoß nur abgelenkt, spricht man von einem elastischen Stoß. Hingegen wird bei einem unelastischen Stoß dem Elektron seine gesamte Energie entzogen, welche dann in anderer Form dem gestoßenen Teilchen zugeführt wird.

Anlagerung und Dissoziation: Kommt es dabei zum Elektroneneinfang bzw. zur Bildung eines negativen Ions, wird dieser Mechanismus als Anlagerung oder Elektronenaffinität bezeichnet. Außerdem kann bei Anlagerungsprozessen durch eine genügend große Energie des Elektrons eine Teilung des Moleküls in ein neutrales Teilchen und in ein negatives Ion erwirkt werden. Diesen Prozess nennt man dissoziative Anlagerung und er ist bei molekularen Gasen vorherrschend. Es gibt jedoch noch weitere Prozesse der negativen Ionenbildung, wie z. B. Teilung des Moleküls in ein negatives und positives Ion durch Elektronenstoß ohne Elektronenanlagerung [28].

Rekombination: Die vorher beschriebenen Prozesse der Elektronenanlagerung sind reversibel. Die Rekombination ist also der inverse Prozess der Ionisierung. Kommt es dabei zu einem Gleichgewicht von Generation und Rekombination, welches die Anzahl der freien Ladungsträger bestimmt, entstehen dabei keine zusätzlichen Ladungsträger durch den Strom. Diese haben daher keinen Beitrag zum Stromtransport.

Diffusion: Die Diffusion ist ein gerichteter Teilchentransport von unterschiedlicher Geschwindigkeit der einzelnen Ladungsträger. Dadurch entstehen Raumladungen, die den weiteren Diffusionsvorgang beeinflussen und die unterschiedlichen Geschwindigkeiten gleichmäßig [10].

Polaritätseffekt: Bei inhomogenen Elektrodenanordnungen treten ab einem bestimmten Spannungswert Vorentladungen auf. Dabei entstehen große Mengen an Ladungsträgern von positiven Ionen und Elektronen, die durch unterschiedliche Beweglichkeit Raumladungen bilden, welche dann die elektrische Feldverteilung stören [38]. In SF_6 setzen Teilentladungen an einer Störstelle mit negativer Polarität bei niedrigerer Spannung ein als an einer mit positiver. Allerdings kehrt sich der Polaritätseffekt bei der Durchschlagsspannung, um wenn stabile Teilentladungen auftreten. Dieser ist dann umso ausgeprägter, je inhomogener das elektrische Feld und je größer die Schlagweite ist [10].

Physikalische Effekte im Rohrleiter: Die bereits in Abschnitten 4.1.1, 4.2.1 und 4.2.1 beschriebenen physikalischen Phänomene sind in Abbildung 4-8 zusammenfassend dargestellt. Die Isolieranordnung besteht im Wesentlichen aus Isolator und Isoliergas, welche im Prinzip als zwei in Serie geschaltete Parallelschaltungen von R und C dargestellt werden können. Wie bereits in Abschnitt 4.1.1 beschrieben, sind dabei einige Faktoren zu berücksichtigen. Während des Feldüberganges, also vom Zeitpunkt des Einschaltens bis zum Erreichen des Endzustandes, wirken sich dabei die Leitwerte und Permittivitäten der daran beteiligten Isolierstoffe unterschiedlich auf die Feldverteilung aus. Die Dauer bis zum Erreichen des Endzustandes hängt von der Zeitkonstanten τ ab, welche durch

R und C bestimmt wird.

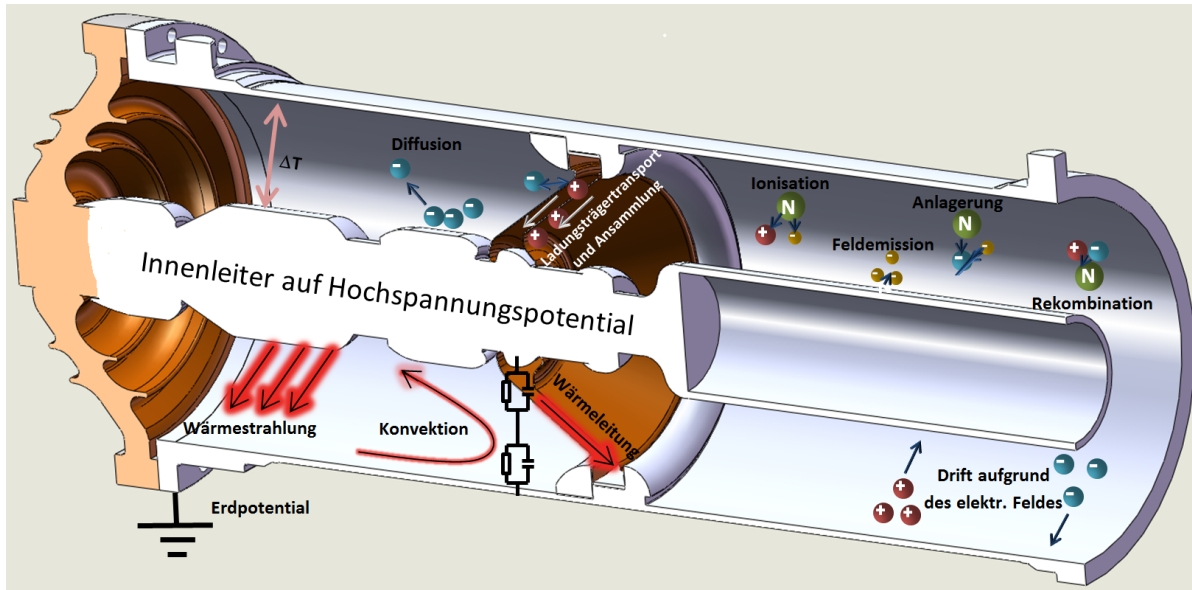


Abbildung 4-8: Physikalische Effekte im koaxialen Rohrleiter

Verursacht durch Stromwärmeverluste ergibt sich ein Temperaturgradient ausgehend vom Innenleiters zur Außenhülle, welcher die Temperaturabhängigkeiten der Permittivität und des Leitwertes des Isolators beeinflusst. Dies ist die Ursache für unterschiedliche Leitwerte, welche den Feldverlauf noch zusätzlich beeinflussen. Ein weiterer Faktor sind die durch Aufladungserscheinungen verursachten Ladungsträgeransammlungen an der Isolatoroberfläche. Darüber hinaus stören diese den Feldverlauf und tragen auch zu Feldverzerrungen bei. Der Wärmetransport findet hauptsächlich über Konvektion des Isoliergases statt, aber auch Wärmeleitung über den Isolator und Strahlungswärme sind beteiligt. Die physikalischen Prozesse im Gas sind im Wesentlichen die bereits vorhin beschriebenen Effekte: allen voran Feldemission, Ionisation, Anlagerung und Rekombination von Ladungsträgern.

4.2.2 Anforderungen an gasisolierte Systeme unter Gleichspannung

Die in diesem Kapitel beschriebenen Phänomene und Effekte bei hoher Gleichspannung verdeutlichen die Komplexität der Vorgänge im gasisolierten Rohrleiter. Es gibt daher besondere Anforderungen an gasisolierte Systeme für den Betrieb mit hoher Gleichspannung. Die Isolation muss nicht nur dem stationären Fall standhalten, sondern auch transiente Vorgänge, wie Zu- und Abschaltungen, Polartitätswechsel und Überspannungen, abdecken. Das Isolationssystem des Rohrleiters, bestehend aus Isoliergas und Isolator, bedarf daher besonderer Aufmerksamkeit und wird im Folgenden getrennt betrachtet.

Isolator und Grenzfläche: Im Falle einer reinen Gleichspannungsbeanspruchung sollte sich die Leitfähigkeit bei Temperaturänderungen nur wenig ändern, um eine eventuelle Feldinversion zu vermeiden. Unter anderem muss auch der kapazitive Charakter im Falle

einer transienten Beanspruchung Berücksichtigung finden [39]. Dabei sollte ein geeignetes Design der Kontur des Isolators gefunden werden, um die tangentielle Feldstärke so gering wie möglich zu halten.

Isoliergas: Das Isoliergas, welches in den meisten Fällen SF_6 bzw. ein Gemisch aus SF_6/N_2 ist, besitzt eine sehr geringe Leitfähigkeit, welche in den meisten Fällen vernachlässigt werden kann [32].

Allerdings wirken sich Temperatur, Feuchtigkeit und Verschmutzung des Gasraumes stark auf die Isolationsfestigkeit des Gases aus [37]. Im Allgemeinen gibt es Anforderungen an die dielektrischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften sowie an Umweltrahmenbedingungen und Langzeitbeständigkeit. In der folgenden Tabelle 3 sind diese Anforderungen detaillierter dargestellt.

Tabelle 3: Anforderungen an Isoliertgase [37]

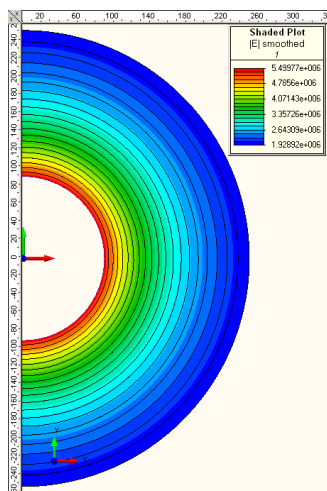
Dielektrische Eigenschaften	Physikalische und chemische Eigenschaften
Hohe elektrische Festigkeit (geringe Leitfähigkeit)	Elektronegativität, Bildung von negativen, stabilen Ionen
Gute Rekombinationseigenschaften (Selbstregeneration)	Chemische Beständigkeit
Geringe Neigung zur Bildung von Zersetzungsprodukten	Hoher Dampfdruck
Geringe Empfindlichkeit gegenüber Partikeln	Hohe thermische Stabilität
Keine Empfindlichkeit gegenüber der Oberflächenrauigkeit von Elektroden	Nicht brennbar
	Hohe Wärmeleitfähigkeit
	Gute Lichtbogenlöschfähigkeit
Langzeitanforderungen	Umweltrahmenbedingungen
Keine Gasspaltung Gas-Zersetzung	Geringe Toxizität (Gesamtwirkung auf die Umwelt)
Unempfindlichkeit gegen Verschmutzung (Feuchte)	Gesetzgebung bezüglich der geringen Treibhausgasemissionen
Keine Verflüssigung bei niedrigen Umgebungstemperaturen	Niedriger ODP (Ozonschichtabbaupotential)
Stabile dielektrische Eigenschaften	Einfaches Recycling

5 Partikel im gasisolierten Rohrleiter für Anwendung mit Gleichspannung

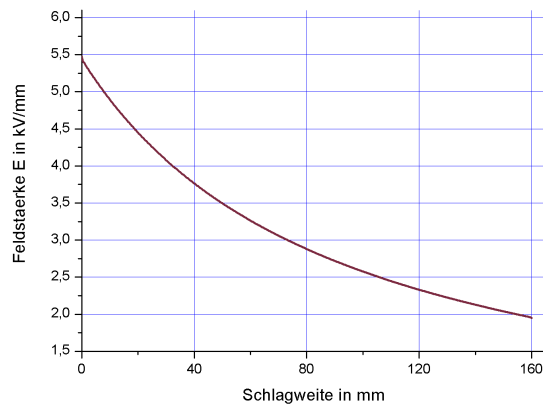
5.1 Partikelverhalten in einer koaxialen Elektrodenanordnung

Bereits im vorhergehenden Kapitel 3 wurde die allgemeine Partikeldynamik im homogenen elektrischen Feld beschrieben. Da aber der koaxiale Rohrleiter im Wesentlichen aus einer konzentrischen Anordnung aus Innenleiter und Außenhülle besteht, ergibt sich dadurch ein radial symmetrisches Feld. Bei einem ideal gewählten Verhältnis zwischen dem Innenradius und dem Außenradius wird sich dabei ein quasihomogenes Feld mit einem Ausnutzungsgrad von annähernd 57 % ergeben. Dieses wurde bereits im Kapitel 4 ausführlich beschrieben.

Abbildung 5-1 zeigt ein Beispiel eines Rohrleiters, bei dem der Innenleiter mit 500 kV und die Außenhülle mit 0 kV angenommen worden sind. Eine qualitative Darstellung der Feldstärkeverteilung zeigt Abbildung 5-1a. In Abbildung 5-1b ist der Verlauf der Feldstärke vom Innenleiter bis zur Außenhülle dargestellt. Die Höchstfeldstärke ist mit etwa 5,5 kV an der Oberfläche des Innenleiters zu finden.



(a) Feldbild Rohrleiter



(b) Feldstärkeverlauf vom Innenleiter zur Außenhülle

Abbildung 5-1: Feldstärkeverteilung im koaxialen Rohrleiter

Eine radiale Feldverteilung bedeutet aber auch, dass die elektrische Feldstärke ortsabhängig ist, wie es in Gleichung 22 beschrieben ist. Daher ist die Feldstärke E eine Funktion vom Radius r der koaxialen Anordnung. Wenn das Partikel seine Ladung behält, dann wird es von der Außenhülle abgestoßen und bewegt sich in Richtung Innenleiter. Wegen der immer höher werdenden Feldstärke zum Innenleiter wird auch die elektrostatische Kraft proportional zur Feldstärke größer [19]. Daher ist die Beschleunigung $\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = a = a(t) \neq \textit{konstant}$, und das Partikel erfährt eine ungleichmäßig beschleunigte Bewegung hin zum Innenleiter. Die Beschleunigung nimmt daher zum Innenleiter immer mehr zu, allerdings steigt auch der Strömungswiderstand mit dem Quadrat der Geschwindigkeit und wirkt dabei der Beschleunigung entgegen.

Im koaxialen Rohrleitersystem gibt es außerdem Abschnitte, bei denen eine Querschnittsänderung bzw. eine Verjüngung des Innenleiters stattfindet, wie z. B. bei Isolatoren. In

diesen verjüngten Bereichen besteht eine erhöhte Feldstärke, von der Partikel angezogen werden. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Partikeln in diesem Bereichen ist daher verhältnismäßig hoch.

5.1.1 Klassifizierung der Bewegungsmuster

Partikelverhalten bei positiver Polarität: Wenn sich ein längliches Partikel bei positiver Polarität im Rohrleiter befindet, so wird sich dieses nach Erreichen einer bestimmten Spannung an der Oberfläche der Außenhülle aufrichten. Dabei setzen sofort Teilentladungen ein. Die Teilentladungseinsetzspannung und die Spannung, bei der sich das Partikel aufrichtet, sind daher ident. Wenn das Partikel dabei ausreichend Ladung bewahren kann, wird es nach dem Abheben eine Auf- und Abbewegung ausführen. Wenn jedoch der Entladungsprozess des Partikels verstärkt wird, z. B. durch Erhöhen der Prüfspannung, wird aufgrund von vermehrten Teilentladungen die Ladung q des Partikels markant verringert, sodass es nicht mehr von den Elektroden abgestoßen bzw. angezogen werden kann. Es kommt dabei zu einer stehenden Bewegung an der Außenhülle.

Dies erscheint zunächst als Widerspruch, da eine höhere Spannung vermuten lässt, dass es eher zu einem Abhebeprozess kommt als bei geringerer Spannung. Das heißt, bei höherer Spannung verbleibt weniger Ladung im Partikel, welche dann nicht mehr zum Abheben ausreicht. Abbildung 5-2 zeigt bei positiver Polarität unterschiedliche Bewegungszustände eines Partikels, welche sich im koaxialen Rohrleiter ausbilden können:

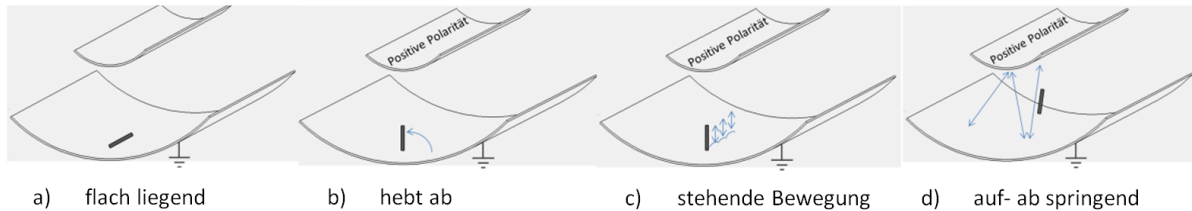


Abbildung 5-2: Bewegungsmuster von Partikeln bei positiver Polarität

- a) Partikel flach am Boden liegend
- b) Partikel hebt nach Erreichen der dafür notwendigen Feldstärke ab
- c) Partikel bewegt sich in aufrechter Position am Boden hin und her
- d) Partikel springt zwischen den Elektroden auf und ab

Der Bewegungszustand zu a) tritt ein, wenn sich ein Partikel im Rohrleiter befindet und die Spannung von 0 kV bis zum Erreichen der Abhebespannung gesteigert wird. Wird eine Abhebespannung erreicht so kommt es zu einem Aufrichten des Partikels, wie es in b) dargestellt wird. Danach können sich zwei Bewegungszustände zeigen. Entweder es kommt zu einer stehenden Bewegung am Boden der Außenhülle, wie es in c) darstellt wird, oder es wird eine Auf- und Abbewegung zwischen Innenleiter und Außenhülle stattfinden, wie es in d) gezeigt wird.

Bei relativ langen, unregelmäßig geformten Partikeln und bei nicht ausreichendem Isoliervermögen des Gases sowie höheren Feldstärken werden Entladungsprozesse begünstigt,

und es kommt daher zu einer stehenden Bewegung nach *c*). Im Gegensatz dazu kommt es bei geringerer Größe, regelmäßiger Form des Partikels sowie geringerer Feldstärke und ausreichendem Isoliervermögen des Gases zu einer eingeschränkten Teilentladungsemision. Dann wird sich eher eine Partikelbewegung nach *d*) einstellen.

Partikelverhalten bei negativer Polarität: Die physikalischen Phänomene bei negativer Polarität zeigen Analogien zu jenen bei positiver Polarität. Die Prozesse dabei sind ähnlicher Natur. Es ergeben sich vergleichbare Schwellwerten der Spannungen, wie sie sich bei positiver Polarität ergeben. Allerdings gibt es wiederum markante, polaritätsabhängige Effekte, bei denen sich eine charakteristische Partikeldynamik zeigt. Wird eine Hochspannung mit negativer Polarität an den Innenleiter angelegt und befindet sich ein längliches Partikel am Boden der Außenhülle, dann wird dieses sich bei einer bestimmten Abhebespannung aufrichten. Diese Abhebespannung ist bei gleichen Partikeln für positive und negative Spannung gleich. Auch hier beginnt der Teilentladungseinsatz sofort nach dem Abheben, wobei die Teilentladungseinsatzspannung und die Abhebespannung ident sind. Wie auch bei positiver Polarität, bestimmt die erhaltene Ladung des Partikels den weiteren Bewegungsverlauf. Bei Partikeln mit ausreichender Ladung wird sich wieder eine Auf- und Abbewegung einstellen. Hingegen kommt es bei stärkeren Entladungen des Partikels zu einer stehenden Bewegung am Innenleiter. Wenn das Partikel eine stehende Bewegung am Innenleiter ausgeführt, befindet es sich damit im ungünstigsten Feldbereich des Rohrleiters, da dort bekanntermaßen die maximale Feldstärke an der Oberfläche des Innenleiters auftritt [40]. Eine Partikelbewegung verursacht daher bei negativer Polarität wesentlich höhere Koronaentladungen als bei positiver Polarität [41]. Ein weiteres Charakteristikum der negativen Polarität ist, dass Partikel bei einer stehenden Bewegung an der Oberfläche stärker oszillieren als bei positiver Polarität. Dies begründet sich darin, dass der Vektor der Gewichtskraft \vec{F}_G immer nach unten und somit entgegen der elektrostatischen Kraft \vec{F}_E gerichtet ist. Hingegen wirkt bei positiver Polarität der Vektor \vec{F}_G in Richtung \vec{F}_E und wirkt sich dabei unterstützend auf eine stehende Bewegung aus. In Abbildung 5-3 sind die unterschiedlichen Bewegungszustände eines Partikels bei negativer Polarität dargestellt:

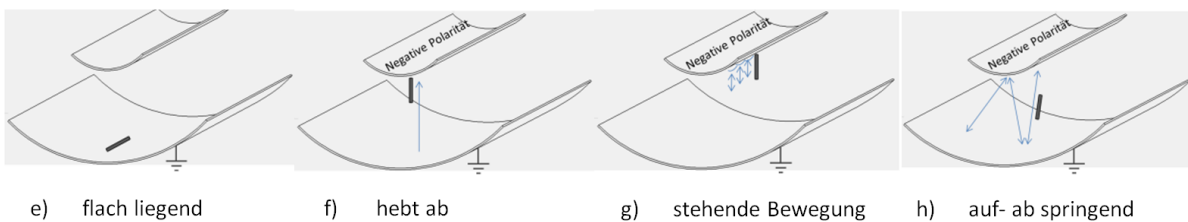


Abbildung 5-3: Bewegungsmuster von Partikeln bei negativer Polarität

- e) Partikel flach am Boden liegend
- f) Partikel hebt nach Erreichen der dafür notwendigen Feldstärke ab und geht zum Innenleiter
- g) Partikel bewegt sich in aufrechter Position am Innenleiter hin und her
- h) Partikel springt zwischen den Elektroden auf und ab

Analog zur positiven Polarität befindet sich das Partikel allerdings bei negativer Polarität bis zum Abheben am Boden der Außenhülle wie in *e*) gezeigt wird. Beim Abhebevorgang in *f*) durchläuft das Partikel die Gasstrecke und schlägt auf der Oberfläche des Innenleiters auf. Abhängig von der Ladungsdichte des Partikels wird sich auch hier einer von zwei Bewegungszuständen einstellen. Entweder kommt es zu einer stehenden Bewegung an der Oberfläche des Innenleiters, wie in *g*) dargestellt, oder es findet eine Auf- und Abbewegung statt, wie in *h*) gezeigt wird.

Partikelverhalten bei Spannungsverlauf: Es soll hier anhand eines Beispiels gezeigt werden, dass sich die Partikeldynamik infolge unterschiedlicher Spannungspegel grundlegend ändert.

In Abbildung 5-4 ist ein Spannungsverlauf dargestellt, bei dem mit einer bestimmten Geschwindigkeit der Spannungssteigerung ein Sollwert erreicht wird. Dabei wird die Stehspannung über eine vorher bestimmte Dauer konstant gehalten. Nach Ablauf dieser Zeitdauer wird die Spannung langsam auf Null reduziert. Die bei positiver Polarität beim Spannungsverlauf auftretenden charakteristischen Bewegungsmuster der Partikel, laut Abbildung 5-2, sind in Abbildung 5-4 mit den Bezeichnungen *a* bis *d* eingezeichnet. Des Weiteren sind in der selben Abbildung Schwellwerte von Spannungsänderungen bzw. Änderungen der Partikeldynamik durch Nummerierungen von 1 – 5 gekennzeichnet.

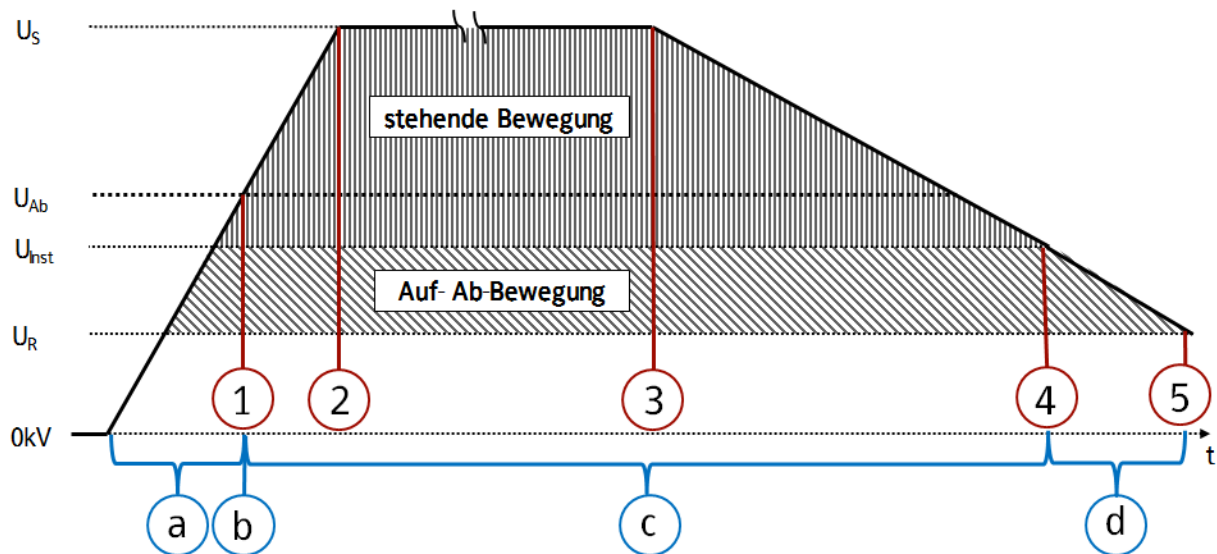


Abbildung 5-4: Spannungsverlauf mit typischen Bewegungsarten von Partikeln

Am Beginn, zwischen 0 kV und der Abhebespannung U_{Ab} im Punkt 1, befindet sich das Partikel im Anfangszustand *a*, wie es in Abbildung 5-2 dargestellt ist. Beim Erreichen der erforderlichen Abhebefeldstärke (Abbildung 5-4 Punkt 1) beginnt sich das Partikel aufzurichten (*b*). Sofort nach dem Aufrichten ab Punkt 1 kommt es zu einer stehenden Bewegung an der Oberfläche der Außenhülle (5-2 *c*). Die Spannung wird dabei weiter bis zur Stehspannung U_S in Punkt 2 gesteigert. Beim Erreichen des Sollwertes wird dieser Wert für eine festgelegte Dauer konstant bis zu Punkt 3 gehalten. Das Partikel führt weiterhin eine stehende Bewegung aus. Nach Ablauf der Prüfzeit wird die Spannung kontinuierlich bis 0 kV reduziert. Ohne Anzeichen einer Bewegungsänderung unterschreitet das Partikel den Schwellwert der Abhebespannung in Punkt 1 und führt nach wie vor

bis weit unter diesen Wert eine stehende Bewegung aus. Bei Erreichen einer weiteren Spannungsschwelle U_{Inst} bei Punkt 4 beginnt das Partikel dann mit einer instabileren Bewegung, indem es zu oszillieren beginnt und schließlich dann in eine Auf- und Abbewegung übergeht (5-2 d). Nach dem Durchlaufen des Spannungsbereiches von Punkt 4 bis zu Punkt 5 wird sich die Geschwindigkeit der Oszillation verlangsamen, bis diese schließlich nach Unterschreiten eines weiteren Schwellwertes U_R im Punkt 5 zu Null wird. Das Partikel hat dann wieder den Ausgangszustand erreicht. Es wird dabei deutlich erkannt, dass es beim Durchlaufen des Spannungsverlaufes zu einem Hysterese-Effekt kommt, da die Abhebespannung deutlich höher liegt als die Schwellwerte der Spannung U_{Inst} und der Spannung U_R . Wird der gleiche Spannungsverlauf mit negativer Polarität durchgeführt, so ergeben sich dabei ähnliche oder sogar gleiche Schwellwerte wie bei positiver Polarität, und man kann dabei die Bewegungsmuster nach Abbildung 5-2 durch jene in Abbildung 5-3 ersetzen.

5.2 Einfluss der Partikel auf die Isolationsfestigkeit

Abhängig von der Art des Defektes wirken sich leitfähige Partikel unterschiedlich auf das Isolationssystem aus. Sie können entweder als frei bewegliche Partikel auftreten, ebenso auch als ortsfeste Spitzen am Innenleiter bzw. der Außenhülle oder auch als ortsfeste Partikel auf einer Isolatoroberfläche. Eine Minderung der Isolationsfestigkeit hängt auch noch von weiteren Faktoren ab, wie der Art der Partikelbewegung, dem Gasdruck, den dielektrischen Eigenschaften der Grenzflächen und der Art der Spannungsbeanspruchung [11]. Die auftretenden elektrischen Entladungsprozesse sind mit komplizierten Bewegungsvorgängen verknüpft, der dabei wirkende Mechanismus ist daher außerordentlich komplex. Die von frei beweglichen Partikeln verursachten Durchschlagsspannungen liegen wesentlich unter jenen Durchschlagswerten des ungestörten elektrischen Feldes. Ortsfeste Partikel als Spitzen am Innenleiter bzw. der Außenhülle vermögen die Durchschlagsspannung nicht in jenem Ausmaß zu senken, wie frei bewegliche Partikel [10]. Es zeigte sich auch, dass ein Partikeleinfluss auf die Isolationsfestigkeit von Mischungen aus SF_6 mit anderen Gasen wie N_2 , Luft und Helium weniger besteht als auf jene des reinen SF_6 -Isoliergases [42].

5.2.1 Partikeleinfluss auf das Isoliergas

Die im Gasraum befindlichen frei beweglichen Partikel, allen voran längliche Formen, können das Isolationsvermögen aufgrund einer Ionisierung des Gases stark beeinflussen [11]. Mit längerer Verweildauer eines Partikels im Gasraum sinkt auch die Durchschlagsspannung bis zu einem gewissen Minimalwert ab. [8]. Bei Auftreten von frei beweglichen Partikeln in einer Anlage kann daher die Bestimmung der Spannungsfestigkeit nicht mit einer kontinuierlichen Spannungssteigerung erfolgen, sondern muss mit einer stufenweisen ansteigenden Spannung durchgeführt werden, bei der der Spannungswert über einen gewissen Zeitraum konstant gehalten wird [6]. Eine signifikante Reduktion des Isoliervermögens wird vor allem auch durch Partikel verursacht, welche die Gasstrecke durchlaufen und sich dann im höheren Feldbereich des Innenleiters aufhalten [11]. Dies kann unter Umständen auch bei Wechselspannung geschehen, da aufgrund der oszillierenden Bewegung des Partikels es sich bis zum Innenleiter aufschwingen kann. Es zeigte sich dabei,

dass die geringste Durchschlagsspannung dann erreicht wird, wenn sich das Partikel zum Zeitpunkt des Scheitelwertes der Spannung in der Nähe des Innenleiters aufhält [8]. Bei den verschiedenen Bewegungsmustern der Partikel bei Gleichspannungsbeanspruchung ergeben sich auch Unterschiede in der Beeinflussung der Isolationsfestigkeit. Wie bei der Wechselspannungsbeanspruchung gilt auch bei der Gleichspannungsbeanspruchung, dass die Durchschlagswahrscheinlichkeit höher ist, wenn sich das Partikel beim oder zumindest in der Nähe des Innenleiters aufhält [11]. Da aber die Oberfläche des Innenleiters jener Bereich ist, an dem die Höchstfeldstärke auftritt, verursacht hier eine stehende Bewegung eines Partikels auch die höchsten Teilentladungsamplituden. Ein Versagen der Isolationsfestigkeit ist daher wahrscheinlicher.

In Abbildung 5-5 dargestellt sind partikelverursachte Durchschlagswerte U_{dp} , bezogen auf reine Gasdurchschläge U_d als Funktion des Gasdruckes. Die unterschiedlichen Kurvenverläufe stellen die Art der Spannungsbeanspruchung von Blitz-, Schaltstoß sowie Wechsel- und Gleichspannung dar. Dabei wurde ein kugelförmiges Partikel in einer koaxialen Anordnung untersucht [28]. Es zeigt sich, dass eine reine Blitzstoßbeanspruchung keine Auswirkungen auf das Isolationsvermögen hat. Es ist auch erkennbar, dass je höher der Druck desto stärker sinkt die Durchschlagsspannung mit Partikeleinfluss bezogen auf jene ohne Partikeleinfluss [28].

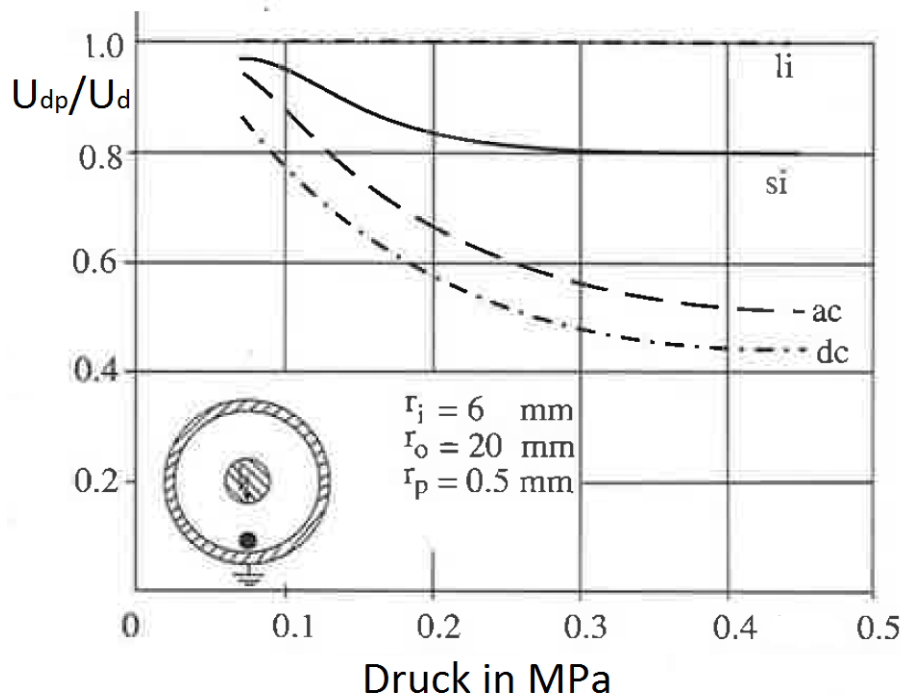


Abbildung 5-5: Durchschlagsspannungen bei unterschiedlichen Spannungsarten und verschiedenen Gasdrücken [28]

Ortsfeste Partikel als Spitzen gefährden das Isoliervermögen vor allem bei Überspannungsbeanspruchung und besonders bei Blitzstoßspannung. Die kritische Partikellänge für scharfe Spitzen am Innenleiter liegt im Millimeterbereich, respektive um einige Größenordnungen darüber für Spitzen an der Außenhülle [19].

5.2.2 Partikeleinfluss auf den Isolator

Ein frei bewegliches Partikel kann unter Umständen auf die Oberfläche eines Isolators gelangen und dort dauerhaft verbleiben. Dabei hängt es von der Position, der Größe, dem Isoliergasdruck und der Orientierung zur tangentialen Feldstärke E_t ab, wie stark sich dieser Defekt auf das Isolationsvermögen auswirkt [4]. Eine Störung des elektrischen Feldes durch ein Partikel verursacht eine Erhöhung der Feldstärke an den Partikelspitzen. Elektronen, die infolge dieser Feldstärkeerhöhung aus dem Partikel herausgelöst werden, verursachen eine Ionisierung des Gases in ihrer Umgebung. Diese Ladungen bewegen sich durch den Gasraum und können sich dann am Ende der Spannungsbeanspruchung an der Oberfläche des Isolators in Form von Oberflächenladungen ansammeln. Da diese Oberflächenladungen die Feldverteilung stören, verursachen diese grundsätzlich eine Verminderung des Isoliervermögens [43].

Bei einer Gleichspannungsbeanspruchung entsteht meist eine unipolare Ladungsverteilung. Dabei wird insbesondere die Isolationsfestigkeit im Falle einer positiven Blitzstoßbeanspruchung bei negativen Oberflächenladungen vermindert [44].

Außerdem können Partikel durch diese dauerhafte, niederenergetische Streamer-Entladung eine Langzeitschädigung der Isolatorenoberfläche verursachen [19].

Partikel auf einer Isolatorenoberfläche mindern aber im Besonderen die Isolationsfestigkeit bei transienter Spannungsbeanspruchung. Als Beispiel kann ein 2 mm Partikel auf einer Isolatorenoberfläche angeführt werden, welches das Isoliervermögen im Vergleich zum nicht verunreinigten Fall um den Faktor 2 vermindert [4].

Partikel können aber auch einen kritischen Defekt bei einem Polaritätswechsel darstellen. Aufgrund einer Überlagerung von Oberflächenladungen und einem geänderten elektrischen Feld wird das Isolationsvermögen dadurch stark herabgesetzt [12].

6 Versuchsaufbau

6.1 Geometrie und Komponenten einer GIL-Anordnung

Der Versuchsaufbau besteht im Wesentlichen aus zwei Abschnitten: zum einen aus einem Durchführungsteil (linke Seite der Abbildung 6-1) und zum anderen aus einem Abschnitt, in dem die Untersuchungen durchgeführt werden (rechte Seite der Abbildung 6-1). Gemeinsam mit einem Winkelement bildet eine Durchführung mit 550 kV Nennspannung den ersten Abschnitt, welcher durch einen Schottisolator vom zweiten getrennt ist.

Zentraler Teil des Versuchsaufbaus ist jener Abschnitt, in dem das Bewegungsverhalten der Partikel untersucht wurde. Er besteht aus einem Rohrleiterstück und einem Winkelement. Die Außenhülle des Rohrleiters ist ein spiralgeschweißtes Aluminiumrohr. Dagegen ist das Winkelement ein Aluminiumguss, welches innen wie auch außen beschichtet ist. Aufgrund dieser Bauelemente ergibt sich ein maximaler Isoliergasdruck des Versuchsaufbaus von 0,73 MPa.

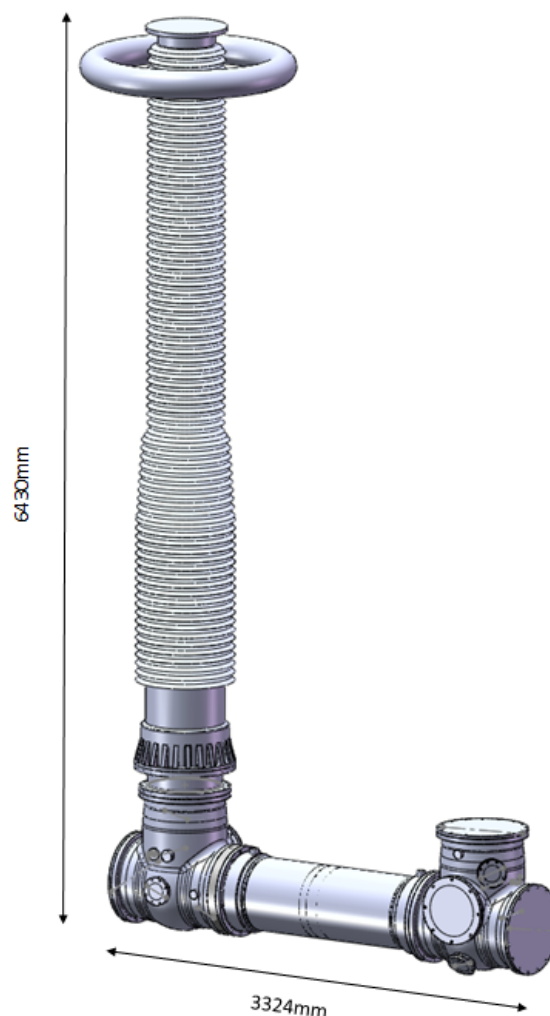


Abbildung 6-1: Dreidimensionales Modell des Versuchsaufbaus

Die Höhe des Versuchsaufbaus beträgt $6,43\text{ m}$, wobei das Untergestell nicht berücksichtigt wurde. Die Länge ergibt mit zwei Winkelementen und einem Rohrelement ungefähr $3,3\text{ m}$, bei einer Breite von rund $0,8\text{ m}$. Ein Untergestell wurde entworfen, damit der Aufbau eine stabile Auflage aufgrund seiner Höhe erhält und um auch eine gewisse Mobilität zu erlangen.

Da die Untersuchungen allen voran den coaxialen Rohrleiter betreffen, sind dessen Nennwerte in folgender Tabelle 4 dargestellt:

Tabelle 4: Technische Daten des verwendeten GIL-Elementes

Nennleistung	bis 4300 MVA
Nennspannung	bis 500 kV
Nennstehblitzspannung	bis 1575 kV
Nennstrom	bis 5000 A
Nennkurzschlussstrom	$63\text{ kA}/3\text{ s}$
Überlastfähigkeit	100%

Diese Anordnung konnte bei entsprechendem Druck des verwendeten SF_6 -Gases den Stehwert einer Prüfgleichspannung von $\pm 800\text{ kV}$ ohne nennenswerte Teilentladungen halten. Bei höheren Spannungen konnten jedoch äußere Teilentladungen akustisch und messtechnisch erfasst werden.

Die für die Versuchsdurchführung relevanten geometrischen Abmessungen sind in der darauffolgenden Abbildung 6-2 dargestellt. Diese betreffen den gekapselten Gasinnenraum mit der coaxialen Leiteranordnung.

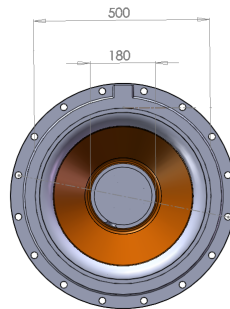


Abbildung 6-2: Coaxiale Leiteranordnung mit Durchmesserbemaßungen

Der dafür verwendete coaxiale Rohrleiter hat einen Leiterdurchmesser von 180 mm und einen Außendurchmesser von 500 mm . Dies ist das optimale Verhältnis Innendurchmesser zu Außendurchmesser, bei dem sich eine Schlagweite von 160 mm ergibt.

Weitere wichtige Abmessungen zeigt das Schnittbild der Abbildung 6-3. Da der Innenleiter durch einen Isolator in der Mitte des Rohrs gestützt werden muss, ist für den Versuchsablauf nicht die gesamte Rohrlänge von 1610 *mm* wirksam.

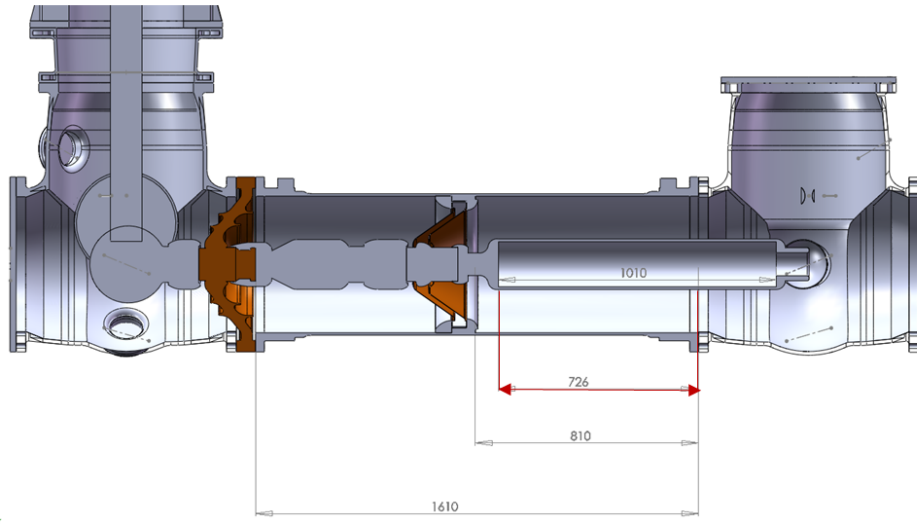


Abbildung 6-3: Seitenansicht des Versuchsabschnittes mit relevanten Bemaßungen

Für die Versuchsdurchführung wird daher nur jener Gasraum (Abbildung 6-3 rechter Bereich) verwendet, welcher von der Stirnseite auch eingesehen werden kann. In diesem Abschnitt ragt der Innenleiter bis ungefähr in die Mitte des Winklelementes hinein. Die Leiterlänge von 1010 *mm* und die Länge der Außenhülle des Rohrleiters von 810 *mm* können nicht zur Gänze ausgenutzt werden da, sich der Innenleiter wegen der Kontaktierung am Isolator verjüngt. Die Länge eines translatorisch radialsymmetrischen Feldes bei Vernachlässigung von Randeffekten beschränkt sich daher auf eine Länge von 726 *mm*, wie dies in der Abbildung 6-3 durch die rote Bemaßung dargestellt wird.

Des Weiteren wurde der am Ende des Innenleiters befindliche Kugelabschluss auf den Leiterdurchmesser von 180 *mm* reduziert. Durch diese Maßnahme konnte vor allem eine bessere Sicht auf die Oberfläche des Innenleiters bewirkt werden, an dem eine hohe Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Partikel vorliegt.

6.2 Kamerasystem

Ein Kamerasystem wurde verwendet, um die Bewegung eines einzelnen Partikels räumlich aufzuzeichnen. Dabei wird das Partikel von der Software detektiert, und mittels eines sogenannten Triangulationsverfahrens wurden die X-, Y- und Z-Koordinaten bestimmt. Das Kamerasystem besteht im Wesentlichen aus den folgenden Komponenten:

- a) Zwei baugleiche Kameras
- b) Zwei baugleiche Objektive
- c) Frame-Grabber-Karteneinschübe (Schnittstelle zwischen Kamera und Computer)
- d) Messrechner
- e) Software

Anforderungen an die Komponenten: Die Bildwiederholfrequenz, also die Geschwindigkeit in Bildern pro Sekunde, ist eine wichtige Kenngröße des Kamerasystems. Von zwei Bildern (pro Kamera ein Bild) kann die Position des Partikels berechnet werden. Dabei steht die Bildwiederholfrequenz der Kamera in Zusammenhang mit der gemessenen Anzahl der Positionen des Partikels. Das heißt, je größer die Geschwindigkeit des Partikels ist, desto größer sollte die Anzahl der Bilder pro Sekunde sein, um eine genauere Auflösung zu erzielen. Wird die Position des Partikels nicht oft genug gemessen, so nimmt die Genauigkeit ab, und es kommt im schlimmsten Fall zum Aliasing-Effekt.

Eine weitere Anforderung an die Kameras ist ihre Synchronisation zueinander, damit beide Kameras dieselbe Position des Partikels aufnehmen. Auch die Bildauflösung ist eine weitere wichtige Kenngröße, da der Versuchsraum eine relativ große Ausdehnung im Größenverhältnis zum Partikel ($\leq 6 \text{ mm}$) hat. Des Weiteren wurden wegen der besseren optischen Erfassung Weitwinkelobjektive verwendet.

Abbildung 6-4 zeigt die verwendeten Hochgeschwindigkeitskameras, montiert an der Stirnseite des Versuchsaufbaus. Wesentlich dabei ist, dass der Achsabstand der Kameras nicht veränderbar ist. Das Gestell wurde daher massiv ausgeführt und zum Schutz vor Überspannungen auch mit einer Schirmung versehen. Damit Überspannungen auch nicht in die Versorgungs- und Datenleitungen einkoppeln können, wurden auch diese mittels eines Aluminiumrohrs geschützt.

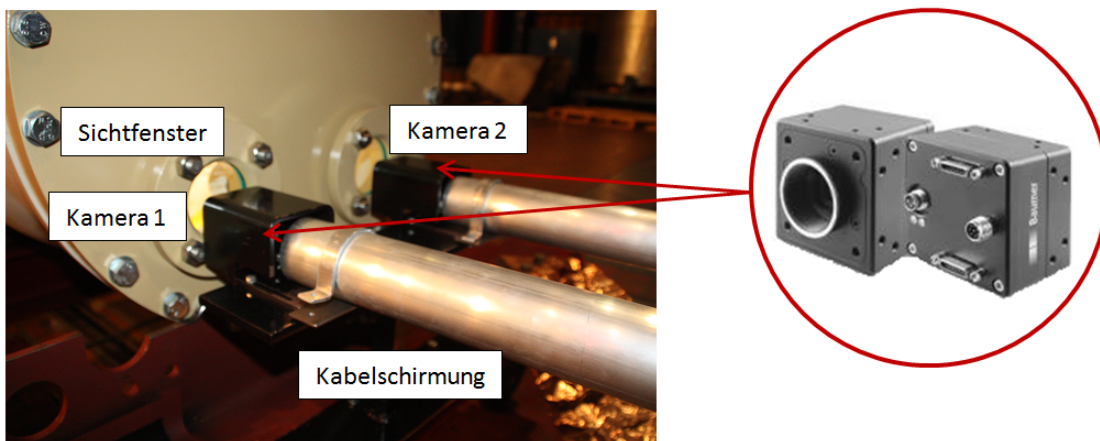


Abbildung 6-4: Montage der Kameras am Prüfaufbau

Weil die Blendenöffnungszeit (ca. $1,2 \text{ ms}$) relativ kurz sein muss (bessere Tiefenschärfe), sollte auch ausreichend Licht auf die Kamerablende treffen. Es ergibt sich dadurch auch eine hohe Anforderung an die Beleuchtung. Diese sollte nicht nur eine ausreichende Lichtdurchflutung, sondern auch eine gleichmäßige Ausleuchtung über den gesamten Versuchsraum sicherstellen (kleiner Abstrahlwinkel).

6.3 Berechnungsablauf der Partikelposition

Detektion: In einem ersten Schritt muss das Partikel zunächst im Bild gefunden werden. Durch die Anwendung von speziellen Filtern und Schwellwerten können ein oder mehrere (wegen Reflexionen) potentielle Objekte Partikel darstellen. Um das Partikel herauszufinden, können das Wissen über die Form und den Aufenthaltsort des Partikels

sowie die Zusatzinformation, wo das Partikel im Bild davor detektiert wurde, herangezogen werden. Ist erstmals das Partikel in einem Bild erkannt worden, so muss derselbe Punkt noch im anderen Bild erkannt werden. Dabei ist die Geometrie der Kameras hilfreich. Der entsprechende gesuchte Punkt befindet sich nämlich exakt auf derselben horizontalen Linie wie im ersten Bild. Es muss daher nur entlang dieser Linie der richtige Punkt gefunden werden.

Triangulation: Der zweite Schritt ist die Berechnung der Position des Partikels. Als Eingabe dafür liegen bereits die zwei berechneten Punkte (je Kamera) aus der vorhergehenden Detektion vor. Für die Berechnung der Tiefe (Z-Koordinaten) geschieht dies mittels Triangulationsverfahren. Dabei wird wieder die Geometrie der Kameras zu Nutze gemacht. In Abbildung 6-5 ist ein idealer Stereo-Aufbau von oben dargestellt.

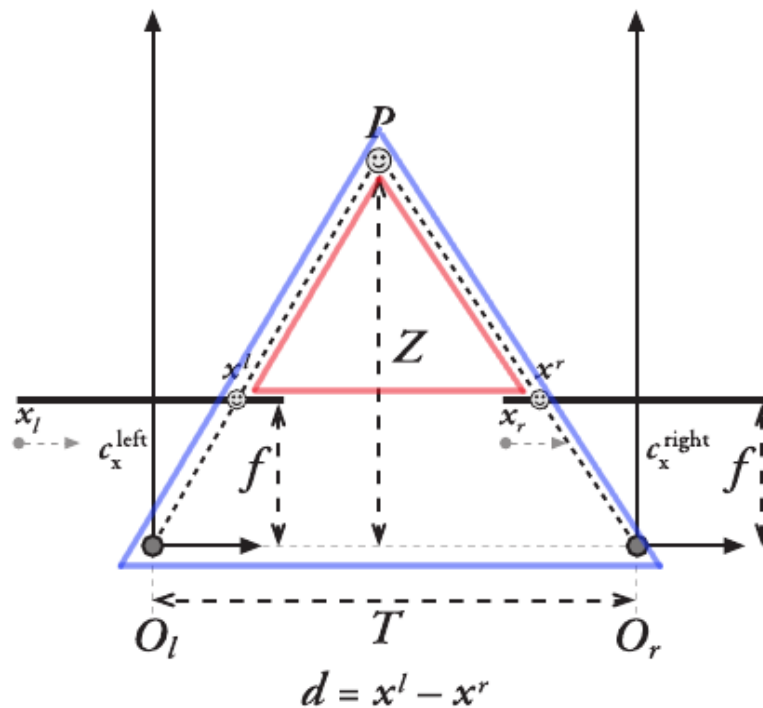


Abbildung 6-5: Schematische Darstellung des Triangulationsverfahrens

Die Brennpunkte der beiden Kameras sind O_r und O_l , welche exakt nach vorne gerichtet sind. Das bedeutet, sie befinden sich dabei exakt auf einer gleichen horizontalen Linie im Abstand T zueinander. Die Bildebenen (schwarze dicke Linie) befinden sich vor den Brennpunkten der Kameras im Abstand der Brennweite f . T und f sind bereits bekannte Punkte durch die Kalibrierung des Kamerasystems. Die Punkte x_l und x_r sind dabei die entsprechenden X-Koordinaten der beiden Kamerabilder (links/rechts), welche bereits bei der Detektion ermittelt wurden. Mit diesen bekannten Punkten lassen sich nun zwei ähnliche Dreiecke (rot/blau) bilden. Diese beiden ähnlichen Dreiecke stehen in einem Verhältnis zueinander, welches durch unten stehende Gleichung 47 beschrieben wird:

$$\frac{T - (x^l - x^r)}{Z - f} = \frac{T}{Z} \quad \Rightarrow \quad Z = \frac{fT}{x^l - x^r} \quad (47)$$

Durch Bewertung von Z kann die Tiefe bestimmt werden. Zusammen mit den $X - Y$ -Koordinaten, welche sich einfach aus der Position des Partikels pro Bildpaar bestimmen lassen, können dann daraus die dreidimensionalen-Koordinaten des Partikels ermittelt werden.

3D-Trajektorien: Bei einer sehr großen Anzahl von Bildern über einen Beobachtungszeitraum, wird auch eine große Anzahl an 3D-Positionen über eine Zeitspanne erfasst. Es kann daher der Weg (Trajektorie) des Partikels über den Messzeitraum nachvollzogen werden. Wurden bereits Weg und Zeit ermittelt, können dadurch die Geschwindigkeit und Beschleunigung bestimmt werden. Um aber auch die Trajektorien in einer richtigen Weise interpretieren zu können, muss der Ort des Partikels im Versuchsaufbau bekannt sein. Die Koordinaten müssen daher vom Kamerasystem auf den Versuchsaufbau übertragen werden, damit die korrekte Position des Partikels angegeben werden kann. Die Abbildung 6-6 zeigt ein Querschnittsmodell des Beobachtungsraumes mit den Positionen von Kamerasystem und eines Partikels.

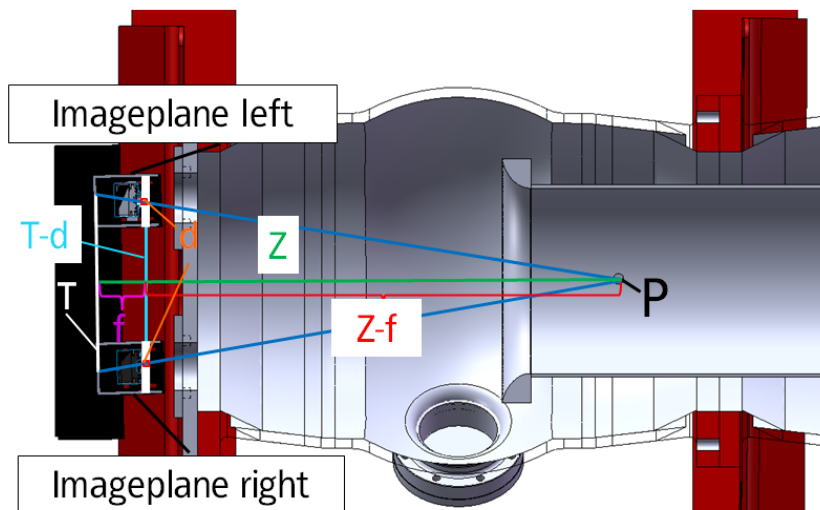


Abbildung 6-6: Querschnitt durch den Versuchsbereich mit Position des Kamerasystems und des Partikels

Visualisierung: Ist bereits ein 3D-Datensatz vorhanden, könnte dieser auch für eine Visualisierung genutzt werden. Zunächst wird ein graphisches Computermodell vom Versuchsaufbau erstellt. Der vorhandene Datensatz und das graphische Computermodell können dann mit einem Visualisierungsprogramm verknüpft werden. Ergebnis ist dann die räumliche Darstellung einer Partikel-Trajektorie im Computermodell.

6.4 Teilentladung

6.4.1 Allgemeines

Grundlegendes: Nach IEC 60270 sind Teilentladungen örtlich beschränkte elektrische Entladungen, welche die Isolierung zwischen Leitern nur teilweise überbrücken und welche angrenzend an einen Leiter auftreten können, aber nicht müssen [45]. Die Ur-

sachen für Teilentladungen sind lokale Feldstärkeüberhöhungen, beispielsweise durch leitfähige Spitzen oder Feldverdrängung oder durch lokale Minderung der elektrischen Festigkeit, wie etwa Hohlräume [46]. Entsprechend ihrem örtlichen Auftreten wird zwischen Koronaentladungen, inneren Teilentladungen und Gleitentladungen unterschieden. Koronaentladungen finden in gasisolierten Elektrodenanordnungen statt, im Gegensatz dazu treten innere Teilentladungen innerhalb eines Isolationssystems auf. Hingegen entstehen Gleitentladungen aufgrund überbeanspruchter Grenzflächen durch überhöhte tangentielle Feldstärken. Obwohl alle drei Erscheinungsformen auch in gasisolierten Systemen auftreten können, liegt der Fokus auf Koronaentladungen, verursacht durch frei bewegliche Partikel.

Damit Teilentladungen in mit SF_6 -Gas gefüllten Systemen überhaupt möglich sind, müssen folgende zwei Bedingungen gleichzeitig erfüllt werden. Erstens muss eine druckbezogene Feldstärke den kritischen Wert von $E/p = 89 \frac{kV}{mm MPa}$ überschreiten, welche an den Spitzen des Partikels auftritt. Zweitens gilt die Bedingung, dass zumindest ein Anfangselektron zur Verfügung stehen muss, damit überhaupt eine Streamer-Entladung einsetzen kann [47].

Die Teilentladungen setzen an einer Störstelle bei negativer Polarität bei niedrigeren Spannungen ein als bei einer positiven Polarität. Allerdings sind die Polaritätseffekte im stark elektronegativen Isoliergas SF_6 weniger stark ausgeprägt als beispielsweise in Luft [10].

Die Entladungsmechanismen treten dabei in Form von elektrischen, physikalischen, optischen sowie chemischen Effekten auf, welche sich in einem sehr breiten Spektrum äußern, wie dies Abbildung 6-7 zeigt.

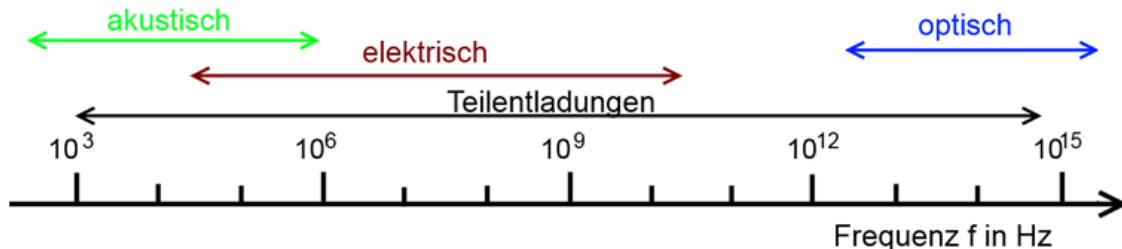


Abbildung 6-7: Spektralbereich von unterschiedlichen Teilentladungserscheinungen [48]

Verursacht wird dieses breite Spektrum im Wesentlichen durch Licht- und Schallemission sowie durch die Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen. Des Weiteren werden Entladungsenergien freigesetzt, welche an den Zuleitungsklemmen durch den anschließenden Energieausgleich als Impulse wahrgenommen werden. Aufgrund des breiten Spektrums können daher die unterschiedlichsten Messverfahren angewendet werden. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen konventionellen und unkonventionellen Messverfahren, wobei die unkonventionellen wiederum eine Unterteilung in elektrische, akustische, optische und chemische Messmethoden erfahren. Tabelle 5 zeigt eine allgemeine Übersicht der unterschiedlichen Messmethoden in ihren eingesetzten Frequenzbereichen.

Tabelle 5: Mögliche Messmethoden zum Erfassen von Teilentladungen [49]

Teilentladungsmessmethoden		
Konventionelle Messung (IEC 60270)	Integration Frequenzbereich	schmalbandig - 10 kHz begrenzt breitbandig - 50-500 kHz
	Integration Zeitbereich	breitbandig - > 1 MHz
Elektrische Messung bei hohen Frequenzen	HF/VHF-Methode 10-400 MHz	schmalbandig - < 2 MHz breitbandig - > 50 MHz
	UHF-Methode 0,2-3 GHz	schmalbandig - < 2 MHz breitbandig - 50 MHz
		10 Hz - 300 kHz
		UV - VIS - IR
Akustische Messung		z. B. Gasanalysen

Da aber nicht alle Methoden bei jedem Betriebsmittel als geeignet erscheinen, muss für die jeweilige Anwendung die dafür passende Methode eingesetzt werden. Für gasolierte Systeme hat sich neben der konventionellen Methode mittlerweile auch die UHF-Methode etabliert. Daher wird sich diese Arbeit nur auf die beiden Messmethoden beschränken.

6.4.2 Teilentladungsmessung

Teilentladungsmessung IEC 60270: Da Partikel Teilentladungen verursachen, sind Teilentladungsmessungen unabdingbar. Die für die Versuche angewandten Messmethoden haben spezielle Anforderungen, welche im Allgemeinen gute Synchronisierbarkeit mit anderen Systemen, Stabilität und hohe Messgenauigkeit sind. Um eine möglichst zeitgleiche Messung durchführen zu können, wurde ein modulares Teilentladungssystem verwendet, bestehend aus einem Controller und einer Messeinheit (60270). Der Controller ist dabei über eine Datenleitung mit dem Messrechner verbunden. Im Gegensatz dazu wurde die Messeinheit mittels Lichtwellenleiter entweder seriell oder parallel an den Controller angebunden. In Abbildung 6-8 dargestellt ist der verwendete Messaufbau der konventionellen Teilentladungsmessung.

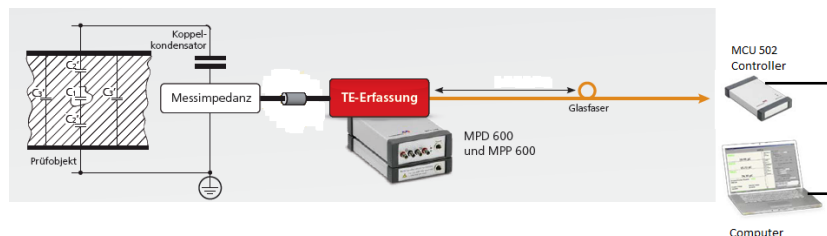


Abbildung 6-8: Übersichtsschaltbild des TE-Messkreises entsprechend IEC 60270

UHF-Teilentladungsmessung: Die UHF-Teilentladungsmessung besteht annähernd aus dem gleichen Aufbau, wie die schon vorher beschriebene konventionelle Messung (60270). Das Messsystem wird lediglich durch einen UHF-Bandbreitenkonverter erweitert, welcher direkt mit der Messeinheit verbunden wird. Das von der kapazitiven Feldsonde empfangene Teilentladungssignal wird vom UHF-Konverter vorverstärkt und eine Hüllkurve über das Messsignal gebildet, welches die Messeinheit zur weiteren Signalverarbeitung empfängt. Die folgende Abbildung 6-9 zeigt eine Feldsonde, welche sich am Versuchsaufbau befindet, den UHF-Bandbreitenkonverter direkt an der Messeinheit und die Datenübertragung mittels Lichtwellenleiter zum Controller und Messrechner.

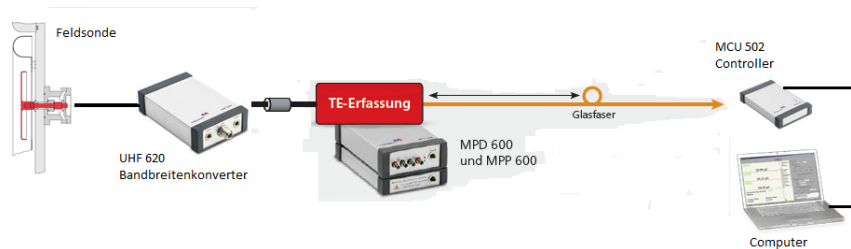


Abbildung 6-9: Übersichtsschaltbild des UHF-TE-Messkreises

6.4.3 Besonderheiten der Gleichspannung

Grundsätzlich können die unterschiedlichen Teilentladungsmessmethoden sowohl für Wechselgrößen als auch für Gleichgrößen verwendet werden. Mangels Phasenkorrelation bei Gleichspannung können aber dabei wenig aussagekräftige Ergebnisse erlangt werden. Der fehlende Phasenbezug stellt daher eine besondere Herausforderung in der Interpretation der Messdaten dar, und es müssen daher geeignetere Auswerteverfahren angewendet werden als das klassische phasenaufgelöste Teilentladungsdiagramm [50]. Vor allem die Unterscheidung zwischen Nutzsignal und Störern stellt sich als besonders schwierig heraus, wie auch die Unterscheidung mehrerer Teilentladungsquellen. Unterschiedliche Ansätze der Interpretation von Teilentladungen sind bei Gleichspannung deshalb nur anwendbar, sofern nicht mehrere Teilentladungsquellen gleichzeitig aktiv sind oder diese getrennt werden können [51].

Auswertemethoden für Gleichspannung: Die Auswertemethoden sind durch den fehlenden Phasenbezug stark eingeschränkt. Daher eignen sich nur die Methoden zur Auswertung, welche keine phasenbezogene Analyse durchführen, wie die *3PARD*-, *3PTRD*- und *3CFRD*-Methoden.

Eine mögliche Bewertung der Teilentladungssignale wäre die Erfassung von Impulsgrößen über ein festgelegtes Zeitfenster (Pulszählerdiagramme). Wichtigste Messgröße dabei ist die scheinbare Ladung q , welche über die Zeit aufgetragen wird.

Eine weitere Bewertungsform ist die Darstellung der Ladungsdichten. In Ladungsklassen eingeteilte Impulse werden der Anzahl nach in einem Diagramm dargestellt, bei dem auf der Ordinate die Anzahl der Impulse und auf der Abszisse die Ladungsklasse aufgetragen wird [52].

Im Zeitbereich lässt sich auch noch der zeitliche Abstand Δt zwischen den Impulsen ermitteln und diese Information gemeinsam mit der scheinbaren Ladung q in einem

Diagramm darstellen [53]. Die folgende Abbildung 6-10 zeigt den Vergleich zwischen Wechselspannung mit scheinbarer Ladung q und phasenbezogenem Winkel ϕ und einer Gleichspannung mit dem zeitlichen Impulsabstand Δt_i .

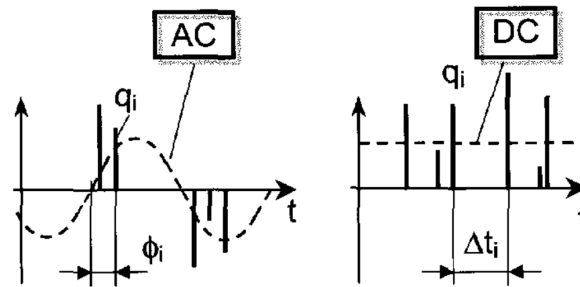


Abbildung 6-10: Teilentladungsimpulse bei Wechselspannung und Gleichspannung [53]

Eine Signalbetrachtung im Frequenzbereich wäre eine weitere Möglichkeit der Interpretation von Teilentladungen unter Gleichspannung. Das Impulsspektrum kann dabei analysiert und mit unterschiedlichen Spektren anderer Impulse verglichen und ausgewertet werden. Dabei könnten statistische Verfahren angewendet werden [52].

6.5 Synchronisierung der Messungen

Um die Messdaten auf sinnvolle Weise zu verknüpfen, müssen diese synchron erfasst werden. Die Teilentladungsmessung ist das zentrale System dabei, an dem sich die jeweiligen Messungen orientieren. Die zu synchronisierenden Systeme sind:

- Spannungsmessung
- Kamerasystem
- Konventionelle TE-Messung
- UHF-Messung

Spannungsmessung: Eine korrekte Messung der Spannungsgröße ist für die Untersuchung des Partikelverhaltens notwendig, da Informationen über Abhebefeldstärken und bestimmte Schwellwerte nur mittels genauer Spannungsmessung ermittelt werden können. Da die Spannungsmessung als Gleichgröße nicht kapazitiv mittels Ankoppelvierpol, welcher gewöhnlich noch eine Unterteilung aufweist, erfolgen kann, muss diese direkt dem Hochspannungsgenerator entnommen werden. Das davon bezogene Messsignal wurde dann vom Teilentladungsmesssystem erfasst.

Kamerasystem: Ein weiteres wesentliches Element der Untersuchungen ist die Synchronisierung des Kamerasystems mit der Teilentladungsmessung. Dabei wird vor jeder Messung Kamera- und TE-Messsystem abgeglichen, indem ein Spannungsimpuls vom Kamerasystem über die Frame-Grabber-Einschubkarten an den Signaleingang der Messeinheit ausgegeben wird. Die Abbildung 6-11 zeigt ein Übersichtsschaltbild von Teilentladungsmesskreis und Kamerasystem. Der Ausgang der Frame-Grabber-Karte wird mit dem Messeingang einer Messeinheit verbunden. Wird ein Spannungsimpuls über das Kamerasystem ausgegeben, detektiert das Teilentladungsmesssystem einen deutlichen Impuls.

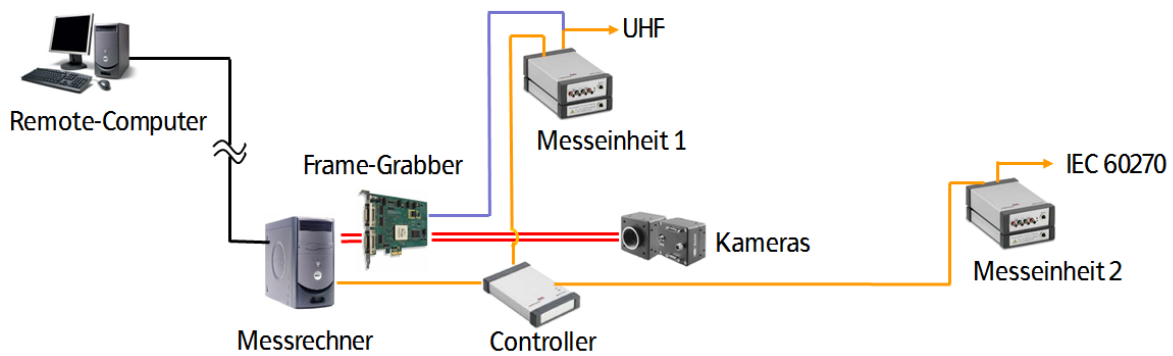


Abbildung 6-11: Übersichtsschaltbild von TE-Messkreis und Kamerasystem bei Kalibrierung

Da die Zeiten bei Kamera- und Messsystem bekannt sind und am Beginn der Messung noch keine Spannung anliegt, ist dieser erste Teilentladungsimpuls der zeitliche Abgleich zwischen den beiden Systemen. Voraussetzung dafür ist, dass der Controller des Teilentladungsmesssystems mit demselben Messrechner verbunden ist wie das Kamerasystem. Mit dieser Methode kann die Teilentladungsmessung mit der Partikelbewegung in Zusammenhang gebracht werden.

Teilentladungsmessung: Beide Teilentladungsmessmethoden sind bereits in einem System implementiert und sind daher synchron. Des Weiteren wird auch die Spannungsmessung von einer der beiden Messeinheiten (UHF, 60270) erfasst, auf welcher die Triggerung der gesamten Teilentladungsmessung erfolgte.

6.6 Messkreis

Teilentladungsmesssystem, Kamerasystem und Spannungsmessung ergeben zusammen mit dem Versuchsaufbau den Messkreis. In Abbildung 6-12 ist das Übersichtsschaltbild des Messkreises dargestellt, welcher in zwei Bereiche aufgeteilt ist. Die linke Seite ist der Bereich des Kontrollraumes und die rechte Seite der Bereich des Prüffeldes. In der Mitte des Prüffeldes dargestellt ist der Prüfaufbau, welcher mit dem Gleichspannungsgenerator verbunden ist. An der Stirnfront des Versuchsaufbaus befindet sich das Kamerasystem. Kamerasystem und Controller des Teilentladungsmesssystems sind am selben Messrechner angeschlossen, welcher sich ebenfalls im Prüffeld befindet. Des Weiteren ist der Controller mit den jeweiligen Messeinheiten von UHF- und konventioneller Teilentladungsmessung mittels Lichtwellenleiter verbunden.

Die Spannungsinformation wird direkt dem Gleichspannungsgenerator entnommen und an die Messeinheit des Teilentladungsmesssystems zugeführt.

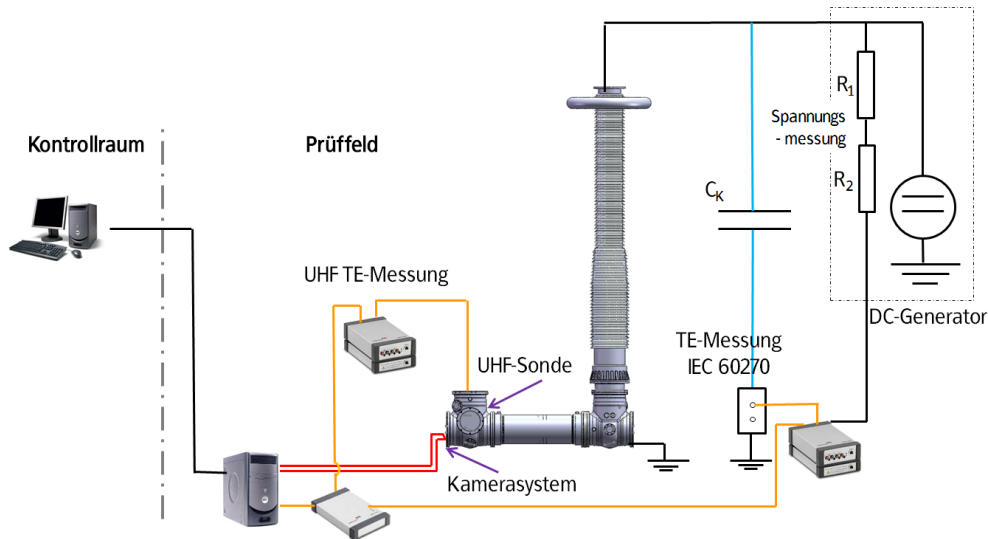


Abbildung 6-12: Messaufbau Gesamtübersicht

Die Abbildung 6-13 zeigt den Messaufbau im Hochspannungslabor. Der Prüfling ist mittels Zentralelektrode und Widerstand mit dem Gleichspannungsgenerator verbunden. Der Koppelkondensator (links im Bild) befindet sich neben dem Prüfling und wird mit diesem über ein Rohr kontaktiert. Das Kamerasystem, welches stirnseitig an den Versuchsaufbau anschließt, wird über zwei Rohrverbindungen mit einer Schirmzelle verbunden. Messrechner und Controller befinden sich in dieser Schirmzelle (rechts im Bild).

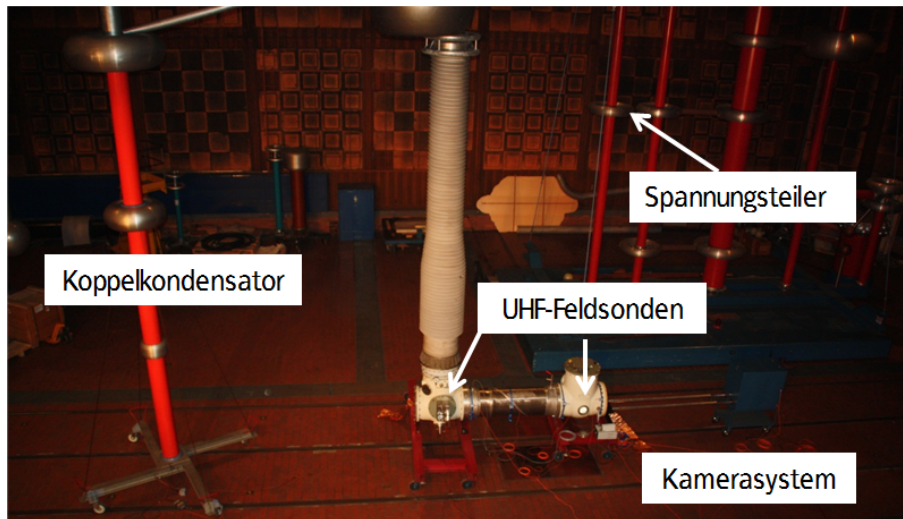


Abbildung 6-13: Messaufbau im Nikola Tesla-Labor

Schutzkonzept: Partikelverursachte Durchschläge sind ein bekanntes Problem, welches einer gesonderten Aufmerksamkeit bedarf. Um unkontrollierte Entladungen zu vermeiden und Messgeräte und Kamerasystem zu schützen, müssen daher Schutzmaßnahmen getroffen werden. Der Versuchsaufbau ist daher mit einer niederinduktiven Erdverbindung zu versehen, welche idealerweise an mehreren Punkten geerdet wird. Eine weitere Maßnahme betrifft die Schirmung von Daten-, Mess- und auch Versorgungsleitungen sowie eine geschirmte Messkabine für den Messrechner.

Um elektromagnetische Einkopplungen zu verhindern, sollten Erdschleifen aufgetrennt bzw. vermieden werden (USV, Trenntransformator).

7 Versuchsplanung und Durchführung

7.1 Versuchsplanung

Zweck der Untersuchungen ist es, mittels eines Versuchsaufbaus möglichst reale Verhältnisse einer gasisolierten Leitung unter hoher Gleichspannung nachzubilden. Bei vorangegangenen Grundsatzuntersuchungen wurden bereits Versuchsreihen durchgeführt, welche eine statistische Evaluierung der Messwerte erlaubten, wie z. B. die der Abhebespannung. Da aber Ergebnisse eines Kleinversuchs nur bedingt übertragbar auf reale Verhältnisse sind, ist eine Untersuchung mit realen GIS/GIL-Komponenten unabdingbar. Beispielsweise ergibt sich durch die koaxiale Leiterstruktur ein Homogenitätsgrad von etwa 57 %. Das bedeutet, dass am Innenleiter höhere Feldstärken vorliegen als auf der Oberfläche des Außenmantels. Es ergeben sich daher Unterschiede im Teilentladungsverhalten und in der von den Teilentladungen induzierten Bewegungen eines Partikels.

Für die Hauptuntersuchungen des Bewegungsverhaltens von Partikeln im realen Versuchsaufbau wurden daher folgende Annahmen getroffen:

- Verwendetes Isoliergas: SF_6
- Prüfspannung: $\pm 500 \text{ kV}$
- Prüfdruck: $0,4 \text{ MPa}$

Übergeordnetes Ziel ist es, aus den Erkenntnissen der Untersuchungen Maßnahmen gegen frei bewegliche Partikel zu finden. Damit verbunden ist eine sorgfältige Untersuchung des Bewegungsverhaltens von frei beweglich leitenden Partikeln. Um dabei bewegungsabhängige Faktoren zu ermitteln, wurden bestimmte Parameter geändert, wie:

- Form des Partikels (zylinder- und spanförmige Partikeln)
- Partikellänge
- Verschiedene Materialien
- Druck des Isoliergases (SF_6)
- Polarität der Prüfspannung

In einem ersten Schritt wurden möglichst ideale Formen von Partikeln verwendet, um gute Vergleichswerte mit den Grundsatzuntersuchungen zu erhalten. Es wurden Partikel aus Kupfer verwendet, welche den Vorteil haben, relativ leicht hergestellt werden zu können. Damit konnte eine große Anzahl an Partikeln mit geringen Abweichungen in Größe, Gewicht und Form hergestellt werden. Als Vorversuche, welche den Zweck hatten, die Messsysteme aufeinander abzustimmen und vor allem für die Kalibration des Kamerasystems notwendig waren, wurden Untersuchungen mit Kupferpartikeln durchgeführt. Um praxisnahe Ergebnisse zu erhalten, wurden im nächsten Schritt Untersuchungen mit spanförmigen Aluminiumpartikeln durchgeführt.

Wegen der möglichen Verwendung von Eisen in zukünftigen gasisolierten Systemen wurden auch Untersuchungen mit Eisenspänen betrachtet. Diese hatten eine ähnliche Form wie die Aluminiumpartikel, haben aber eine wesentlich höhere spezifische Dichte als diese.

Die unten stehende Tabelle 6 stellt die Gesamtübersicht der Untersuchungen mit freibeweglichen Partikeln dar. Es wurden dabei unterschiedliche Formen (zylinderförmig, spanförmig), Größen ($2 - 6 \text{ mm}$) und Materialien (Cu, Al, Fe) bei beiden Polaritäten untersucht. Das Hauptaugenmerk wurde auf Partikel aus Aluminium gelegt.

Tabelle 6: Übersicht der Versuchsdurchführung

Druck	Material	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Polarität
0,4 MPa	Cu	6	rund	0,25	+
	Cu	6	rund	0,25	-
	Al	6	1,5	0,15	+
	Al	6	1,5	0,15	-
	Al	4	1,5	0,15	+
	Al	4	1,5	0,15	-
	Al	2	1,5	0,15	+
	Al	2	1,5	0,15	-
	Fe	6	1,2	0,1	+
	Fe	6	1,2	0,1	-
	Fe	4	1,2	0,1	+
	Fe	4	1,2	0,1	-
	Fe	2	1,2	0,1	+
	Fe	2	1,2	0,1	-
0,2 MPa	Al	6	1,5	0,15	+
	Al	6	1,5	0,15	-
	Al	2	1,5	0,15	+
	Al	2	1,5	0,15	-
0,1 MPa	Al	6	1,5	0,15	+
	Al	6	1,5	0,15	-
	Al	2	1,5	0,15	+
	Al	2	1,5	0,15	-

7.1.1 Partikelarten

Kupferpartikel: Da eine einfache Reproduzierbarkeit der Partikel gefordert ist, wurde zu diesem Zweck ein Kupferlitzendraht zu Partikeln zusammengekürzt. Es konnten daher bei einer ausreichend hohen Genauigkeit beliebig viele Partikel einfach hergestellt werden. In Abbildung 7-1 ist ein 6 mm Kupferpartikel dargestellt, welches in den anfänglichen Versuchsreihen verwendet wurde.



Abbildung 7-1: 6 mm Kupferpartikel

Partikeleigenschaften:

Länge: 6 mm

Durchmesser: 0,26 mm

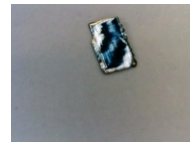
Spezifische Dichte: 8,92 g/cm³

Schmelzpunkt: 1357,77 K (1084,62 °C)

Aluminiumpartikel: Für praxisnähere Untersuchungen wurden Aluminiumspäne verwendet. Diese wurden gerade gebogen und auf ihre entsprechenden Längen von 2, 4 und 6 mm zugeschnitten. Da sämtliche Späne aus einem Arbeitsgang herrührten, sind Dicke und Breite der Partikel gleich. Ihre Kanten und die Form der einzelnen Partikel hingegen weisen Unregelmäßigkeiten auf und sind daher nicht ideal. Abbildung 7-2a und 7-2b zeigen ein 6 mm und ein 2 mm Aluminiumpartikel, welche aus Spänen der Metallverarbeitung entstammen.



(a) Aluminiumpartikel 6 mm



(b) Aluminiumpartikel 2 mm

Abbildung 7-2: Spanförmige Partikel

Partikeleigenschaften:

Längen: 6, 4, 2 mm

Breite: 1,5 mm

Dicke: 0,15 mm

Spezifische Dichte: 2,7 g/cm³

Schmelzpunkt: 933,47 K (660,32 °C)

Eisenpartikel: Da eine gasisolierte Leitung bei HGÜ-Anwendung nicht notwendigerweise aus Aluminium sein muss, könnte die Außenhülle beispielsweise aus Eisen bestehen. Aus diesem Grund wurden auch einige Versuchsreihen mit Eisenpartikeln durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden ebenfalls Metallspäne verwendet, welche für die jeweiligen Längen von 2, 4, 6 mm zugeschnitten wurden.

Partikeleigenschaften:

Längen: 6, 4, 2 mm

Breite: 1, 2 mm

Dicke: 0, 1 mm

Spezifische Dichte: 7,874 g/cm³

Schmelzpunkt: 1811 K (1538 °C)

7.2 Versuchsablauf

Die Hauptuntersuchungen betreffen das Bewegungsverhalten von leitfähigen Partikeln unter hoher Gleichspannung. Dies sind die Voraussetzungen für weitere Untersuchungen für Maßnahmen gegen Partikelverunreinigungen in gasisolierten Systemen. Des Weiteren wurden auch Referenzmessungen mit Aluminiumpartikeln unter hoher Wechselspannung durchgeführt.

Die Versuchsdurchführung wird anhand eines Beispiels kurz erläutert. Voraussetzung für eine erfolgreiche Messung sind absolute Sauberkeit des Prüflings und ordnungsgemäße Kalibration der Messgeräte. Nach gründlicher Reinigung des Prüflings wurde zunächst die konventionelle Teilentladungsmessung kalibriert sowie ein Empfindlichkeitsnachweis mittels zwei Feldsonden bei der UHF-Messung durchgeführt. Im nächsten Schritt wurde das Kamerasystem mit dem Teilentladungsmesssystem zeitlich abgeglichen, indem ein Impuls am Signalausgang des Kamerasystems an die Messeinheit des Teilentladungsmesssystems ausgegeben wurde. Als nächstes musste noch ein Korrekturfaktor der Spannungsmessung ermittelt werden, da diese über das Teilentladungsmesssystem erfolgte. Dies ist notwendig, weil unterschiedliche Spannungsteiler mit verschiedenen Übersetzungsverhältnissen verwendet werden können. Der Korrekturfaktor wurde dabei bei einem bekanntem Spannungswert bei Vorversuchen ermittelt.

Als nächster Schritt wurde eine Stehspannung von 600 kV an den Prüfling angelegt, um sowohl die Spannungsfestigkeit als auch Teilentladungsfreiheit zu gewährleisten. Im Hochspannungsprüffeld wurde bei den Leerlaufmessungen meist ein Grundstörpegel von ≤ 1 pC festgestellt. Bei eventuell auftretenden Teilentladungen konnten äußere und innere Teilentladungen aufgrund der beiden Teilentladungsmessmethoden gut unterschieden werden. Erst bei völliger Abwesenheit von Teilentladungen konnte mit der Versuchsreihe begonnen werden. Dabei wurde ein einzelnes Partikel mittels einer Vorrichtung in den unter Druck stehenden Versuchsaufbau eingeschleust.

Mit dem am Boden der Außenhülle liegenden Partikel wurde die Spannung bis zum Erreichen eines Sollwertes (meist ± 500 kV) gesteigert. Die Prüfspannung wurde für eine bestimmte Dauer gehalten, während in dieser Zeit das Partikelverhalten mit Hilfe des Kamerasystems aufgezeichnet werden konnte. Entweder wurde die Spannung nach Ablauf der Prüfdauer wieder auf den Wert Null reduziert oder das Partikel verließ den

Bereich der koaxialen Leiteranordnung und kam daher im Winkelement zu liegen. Im Winkelement wird die Abhebespannungen der Partikel in der Regel nicht mehr erreicht, sodass die Partikel sich dort in einer Ruheposition befinden. Ein weiteres Partikel wurde wieder in den Versuchsaufbau eingebracht. Während des Prüfvorganges wurden dabei die Daten der Teilentladungsmessung (UHF, 60270), der Videoaufzeichnung und der Spannungswert erfasst.

8 Ergebnisse

8.1 Allgemeines

Das übergeordnete Ziel der Untersuchungen ist es, das Bewegungsverhalten von frei beweglichen Partikeln zu analysieren, um daraus Maßnahmen gegen frei bewegliche Partikel zu entwickeln. Dabei wurde das Bewegungsverhalten intensiv an einem Versuchsaufbau mit realen GIS/GIL-Komponenten erforscht. Die Vorzüge eines realen Versuchsaufbaus sind praxisgerechtere Versuchsbedingungen, allerdings bei einem erheblich größeren zeitlichen wie arbeitstechnischen Aufwand. Aus diesem Grund kann eine größere Anzahl an Wiederholungen von Versuchsabläufen nur schwer durchgeführt werden.

Die gemessenen und ermittelten Werte sind daher zum größten Teil (gemittelte) Einzelwerte, die keiner statistischen Auswertung unterzogen worden sind. Es wurde deshalb besonderes Augenmerk auf eine akkurate Messung gelegt, um möglichst genaue Messwerte bestimmen zu können.

Hauptaugenmerk der Versuche waren dabei die Untersuchung der Partikeldynamik unter hoher Gleichspannung. Dabei wurden bestimmte polaritätsabhängige Bewegungsmuster beobachtet, Schwellwerte erkannt und physikalische Effekte festgestellt sowie Grundgrößen ermittelt.

Aus den daraus gewonnenen Erkenntnissen konnten damit Ansätze von möglichen Lösungen gegen frei bewegliche Partikel untersucht werden. Es stellte sich bereits am Anfang der Untersuchungen heraus, dass es jeweils für eine Polarität eine separate Lösung geben muss.

Wie bereits in Kapitel 5 beschrieben, besteht bei positiver Polarität eine hohe Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Partikel am Boden der Außenhülle. Im Gegensatz dazu befinden sich bei negativer Polarität die Partikel meist an der Oberfläche des Innenleiters. Die logische Überlegung dazu ist, dort, wo eine hohe Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Partikel besteht, sollten Maßnahmen in diesen Bereichen gesetzt werden. Eine Möglichkeit wäre daher die Schaffung von feldfreien Räumen, in denen es keine elektrische Kraftwirkung mehr gibt, damit sich die Partikel dort einfinden und verbleiben können.

Des Weiteren wurden, als Referenz zur Gleichspannung, Messungen mit Partikeln bei Wechsellspannung durchgeführt. Die daraus ermittelten Werte wurden analysiert und den Ergebnissen der Gleichspannungsuntersuchungen gegenübergestellt.

Dabei wurden neben dem Bewegungsverhalten der Partikel auch noch deren Auswirkungen auf das Teilentladungsverhalten untersucht. Wie im Kapitel 6.4.3 eingehend beschrieben, gibt es unter hoher Gleichspannung keine Phasenkorrelation. Die Analyse von Teilentladungen von hoher Gleichspannung gilt daher als äußerst anspruchsvoll. Es wird daher nicht näher auf die Interpretation von Teilentladungsmustern in dieser Arbeit eingegangen, sondern nur eine allgemeine Erklärung darüber gegeben.

Eine weitere Eingrenzung wird bezüglich der Darstellung der Teilentladungsmessmethoden gemacht. Da beide Messmethoden (UHF, 60270) Teilentladungen in der gleichen Impulsfolge darstellen, werden Messwerte nur von der konventionellen Messmethode dargestellt. Diese hat den Vorteil, dass die scheinbare Ladung als Kenngröße von Teilentladungen als aussagekräftiger Wert bestimmt werden kann. Da im geschirmten Hochspannungsprüffeld bei einem Grundstörpegel von $\leq 1 \text{ pC}$ keine besondere Störumempfindlichkeit gefordert ist, liegt es nahe, nur Werte der Teilentladungsmessung nach 60270 darzustellen. Grundsätzlich bietet die UHF-Methode, mit dem Vorteil einer größeren Stö-

runempfindlichkeit, auch die Möglichkeit einer Erkennung von Partikeln, da Parameter wie Teilentladungseinsetz- bzw. -aussetzspannung sowie Impulsabstände auch auf Partikel schließen lassen.

Neben den Untersuchungen des Bewegungsverhaltens von frei beweglichen Partikeln konnten auch weitere Beobachtungen von Bedeutung gemacht werden. Zum einen wurden Durchschläge im Gas und Gleitüberschläge mit Partikelbeteiligung registriert. Zum anderen konnte auch beobachtet werden, wie Partikel auf die Oberfläche eines Isolators gelangten. Dies sind Entdeckungen am Rande der Untersuchungen, welche nur kurz beschrieben werden.

8.2 Partikelverhalten

Das Verhalten von frei beweglich leitenden Partikeln gliedert sich im Allgemeinen in das Abheben der Partikel, in eine stehende Bewegung an der Elektrodenoberfläche und in eine Auf- und Abbewegung. Dabei zeigen sich markante Polaritätsunterschiede, welche sich auch im Teilentladungsverhalten abbilden.

Im Folgenden werden die gemessenen Abhebefeldstärken von verschiedenen Partikelarten und -formen bei unterschiedlichen Polaritäten dargestellt. Die dabei auftretenden Bewegungsmuster wurden bereits eingehend in Kapitel 5.1.1 erläutert.

8.2.1 Abhebefeldstärken der Partikel

Einer der Parameter zur Bestimmung des Bewegungsverhaltens von Partikeln, als eine aussagekräftige Kenngröße, ist die Abhebefeldstärke. Diese lässt sich relativ einfach durch Beobachtung oder durch die Teilentladungsmessung bestimmen und unterliegt meist einer geringen Streuung der Messwerte. Überdies kann diese für bestimmte Partikelformen mit guter Näherung auch theoretisch errechnet werden.

Beispielhaft kann dies für ein 6 mm langes zylinderförmiges Kupferpartikel, wie es in Kapitel 7.1.1 dargestellt ist, gezeigt werden. Die Berechnung der theoretischen Abhebefeldstärke erfolgt nach Gleichung 15 und beträgt für ein Kupferpartikel mit 6 mm Länge und 0,26 mm Durchmesser $0,93 \frac{kV}{mm}$.

Grundsatzuntersuchungen mit Kupferpartikeln: Vor den Untersuchungen mit realen Komponenten wurden vorweg Grundsatzuntersuchungen durchgeführt. Diese hatten unter anderem das Ziel, durch Änderung der Versuchsparameter etwaige Einflussfaktoren zu bestimmen. Dabei wurden zwei unterschiedliche Elektrodenanordnungen verwendet, bei welchen das Partikelverhalten in einer homogenen Platte-Platte-Anordnung untersucht wurden [54]. Die Versuchsparameter, welche variiert wurden, waren:

- Partikellänge
- Partikeldurchmesser
- Elektrodenabstand
- Druck
- Polarität

Die verwendete Messschaltung der Grundsatzuntersuchungen ist in Abbildung 8-1 dargestellt.

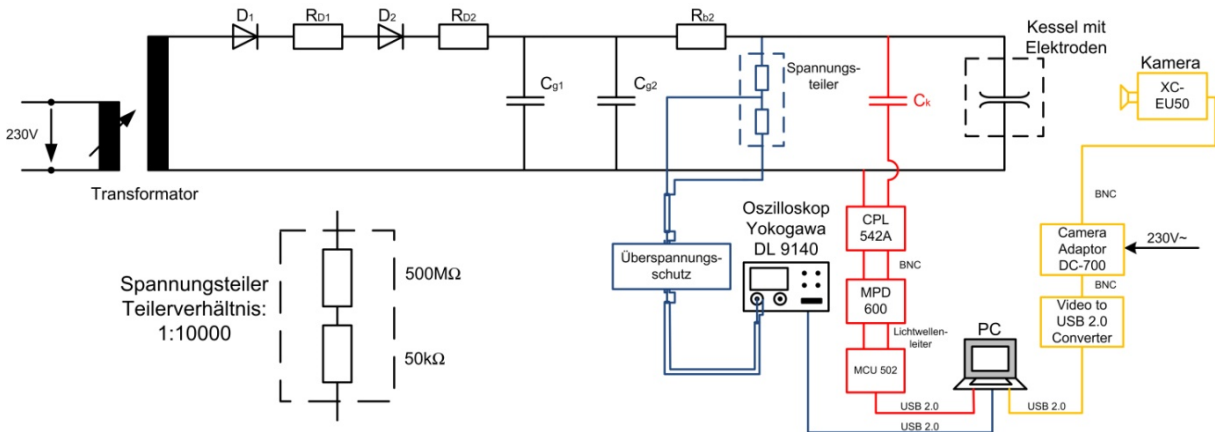


Abbildung 8-1: Messschaltung der Grundsatzuntersuchungen

Wie bei den Versuchen mit der realen GIL-Anordnung, wurde auch hier eine Kameraaufzeichnung in Kombination mit der Teilentladungsmessung durchgeführt. Der dabei verwendete Prüfkessel, wie er in Abbildung 8-2 dargestellt ist, besitzt ein Fassungsvermögen von 70 Litern.



Abbildung 8-2: Prüfkessel

Über eine am Deckel befestigte Durchführung wird die obere Elektrode auf Hochspannungspotential gelegt. Die untere Elektrode ist mit dem Prüfkessel kontaktiert und befindet sich daher auf Erdpotential. Um eine homogene Feldverteilung mit einem Ausnutzungsfaktor $\eta = 1$ zu erlangen, wurden dabei zwei identische Plattenelektroden mit einem Rogowski-Profil verwendet, wie dies Abbildung 8-3 zeigt.

Für eine glatte Oberfläche und um möglichst ideale Bedingungen zu schaffen, wurde diese verchromt, sodass der Einfluss der Rauheit verringert wurde.

Das ermittelte Messergebnis wurde auch einer statistischen Auswertung unterzogen, um möglichst genau den Mittelwert bestimmen zu können. Dabei wurden mindestens 20 Wiederholungen durchgeführt. Tabelle 7 zeigt eine Auflistung der durchgeführten Versuchsreihen mit den gemittelten Werten der Abhebefeldstärke von zylinderförmigen Kupferpartikeln.



Abbildung 8-3: Plattenelektrode

Tabelle 7: Platte-Platte-Anordnung: Abhebefeldstärken von zylinderförmigen Kupferpartikeln bei Änderung der Versuchsparameter

Länge [mm]	Ø [mm]	Elektroden- abstand [mm]	Prüfdruck [MPa]	Abhebefeldstärken [kV/mm]	
				pos. Polarität	neg. Polarität
2	0,26	9,6	0,1	1,059	-1,039
4	0,26	9,6	0,1	0,987	-1,049
6	0,26	9,6	0,1	1,05	-1,074
6	0,26	19,6	0,3	1,032	-1,003
6	0,26	9,6	0,1	1,051	-1,094
4	0,4	9,6	0,1	1,144	-1,15

Es kann dabei festgestellt werden, dass die Abhebefeldstärken unabhängig von Druck, Polarität, Partikellänge und Elektrodenabstand sind. Im Gegensatz dazu ist die Abhebefeldstärke vom Durchmesser des Partikels abhängig.

Weitere Grundsatzuntersuchungen wurden mit einer optimierten Elektrodenanordnung durchgeführt [55]. Dabei wurden die Abmessungen der GIL-Rohrleiteranordnung des Hauptversuches zu einem Drittel verkleinert und daraus ein Kreissegment entnommen. Werden alle Abmessungen im selben Verhältnis verkleinert, bleibt auch der Ausnutzungsgrad $\eta = 0,57$ erhalten. In Abbildung 8-4 ist die optimierte Elektrodenanordnung mit den Abmessungen dargestellt.

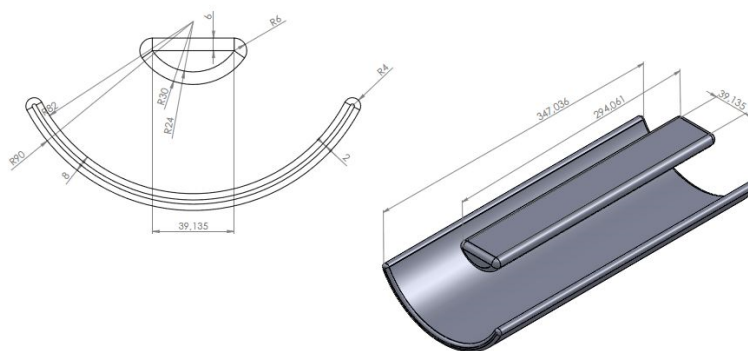


Abbildung 8-4: Optimierte Elektrodenanordnung

Mit dieser Elektrodenanordnung konnte erreicht werden, dass das Bewegungsverhalten der Partikel dem Hauptversuch angenähert wurde. Die Elektrodenanordnung hat dabei nur sehr geringe Auswirkungen auf die Abhebefeldstärken der Partikel, wie dies die untenstehende Tabelle 8 zeigt.

Tabelle 8: Optimierte Elektrodenanordnung: Abhebefeldstärken von zylinderförmigen Kupferpartikeln bei Änderung der Versuchsparameter

Länge [mm]	Ø [mm]	Prüfdruck [MPa]	Abhebefeldstärken [kV/mm]	
			pos. Polarität	neg. Polarität
2	0,26	0,1	-	0,95
4	0,26	0,1	0,957	0,97
6	0,26	0,1	0,917	0,95
6	0,26	0,4	0,94	0,96

Der Vergleich zwischen den ersten Versuchsreihen der homogenen Feldverteilung und der zweiten mit der quasihomogenen Feldverteilung zeigt nur einen geringen Unterschied der Abhebefeldstärken. Es muss aber dabei beachtet werden, dass die beiden Elektrodenanordnungen unterschiedliche Oberflächen aufweisen, welche einen erheblichen Einfluss auf das Messergebnis haben.

Kupferpartikel in realen Komponenten: Im Vergleich dazu zeigt die Tabelle 9 die ermittelten Werte der Abhebefeldstärken von Kupferpartikeln bei realen Komponenten.

Tabelle 9: Abhebefeldstärken der zylinderförmigen Kupferpartikel

Material	Länge [mm]	Polarität pos./neg.	Abhebefeldstärke [kV/mm]
Cu	6	+	1,10
Cu	6	-	1,10

Es zeigen sich dabei geringe Abweichungen von der theoretisch bestimmten Abhebefeldstärke zu den Grundsatzversuchen mit homogener Elektrodenanordnung und dem realen Versuchsaufbau sowie eine gute Übereinstimmung mit dem realen Versuchsaufbau und der Grundsatzuntersuchung mit quasihomogener Elektrodenanordnung.

Die Ermittlung der Abhebefeldstärken lässt sich verhältnismäßig einfach reproduzieren, und es kann behauptet werden, dass hinsichtlich der Bestimmung der Abhebefeldstärken die Grundsatzversuche ausreichend korrekte Ergebnisse liefern.

Aluminiumpartikel in realen Komponenten: Da zylinderförmige Kupferpartikel in gasisolierten Systemen kaum vorkommen, liegt das Hauptaugenmerk dieser Arbeit auf dem realistischeren Fall von spanförmigen Aluminiumpartikeln. Die Berechnung der theoretischen Abhebefeldstärke für spanförmige Partikel ist wesentlich komplexer und sollte daher empirisch bestimmt werden.

Die Abbildung 8-5 zeigt ein Diagramm der Abhebefeldstärken von 2, 4, und 6 mm

Aluminiumpartikeln bei positiver und negativer Polarität in der koaxialen Rohrleiteranordnung mit realen Komponenten.

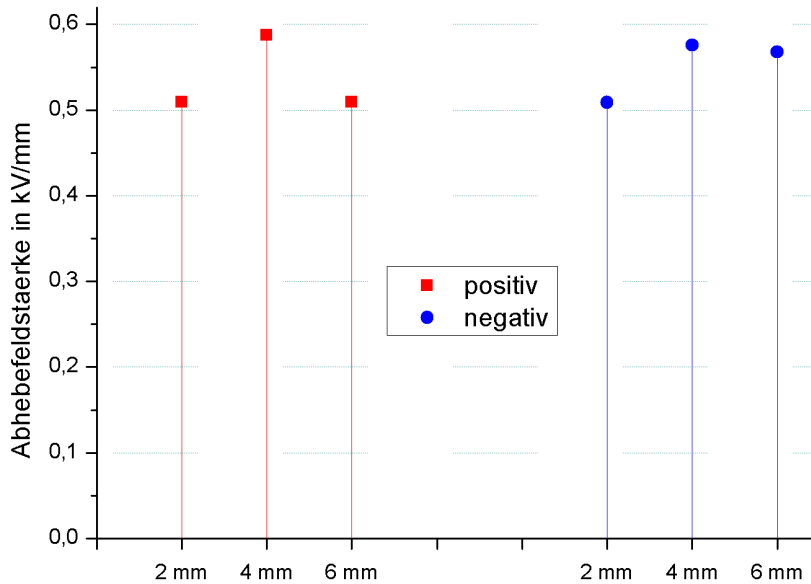


Abbildung 8-5: Abhebefeldstärken von 2, 4, und 6 mm Aluminiumpartikeln bei positiver und negativer Polarität in realer Versuchsanordnung

Es ist ersichtlich, dass dabei die Werte um einen Mittelwert zwischen $0,5$ und $0,6 \frac{kV}{mm}$ streuen. Es zeigt sich auch, dass wie bei den zylinderförmigen Partikeln die Abhebefeldstärke nicht abhängig von der Länge des spanförmigen Partikels ist.

Der Vergleich der Abhebefeldstärken zwischen Kupferpartikeln und Aluminiumpartikeln zeigt, dass aufgrund des geringeren spezifischen Gewichts von Aluminium die Abhebefeldstärken deutlich unter jenen von Kupfer sind, was auch zu erwarten ist.

Eisenpartikel in realen Komponenten: Um bei gasisolierten Systemen die mögliche Verwendung von Eisen mitzuberücksichtigen, wurden auch Untersuchungen mit Eisenspänen durchgeführt. Diese Partikel haben eine ähnliche Form wie die Aluminiumpartikel, sind jedoch etwas schmaler und dünner. Eine genauere Beschreibung der Eisenpartikel findet sich im Kapitel 7.1.1. In Abbildung 8-6 sind die Abhebefeldstärken von 2 und 6 mm Eisenpartikeln dargestellt.

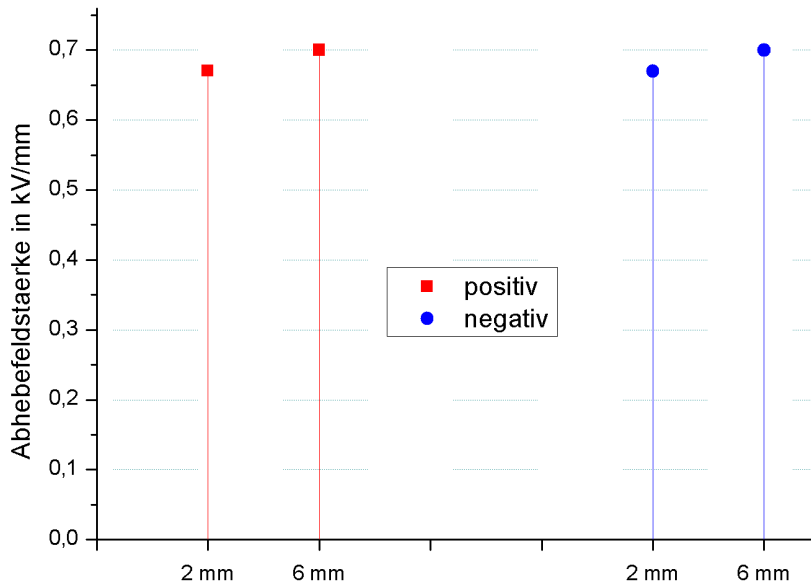


Abbildung 8-6: Abhebefeldstärken von 2 und 6 mm Partikeln bei positiver und negativer Polarität

Da die Abhebefeldstärken der 4 mm Partikel auch im Bereich von den 2 und 6 mm Eisenpartikeln liegen, wurden diese aus Übersichtsgründen nicht im Diagramm berücksichtigt. Wie bereits bei den Aluminiumpartikeln dargestellt, war auch bei Eisenpartikeln keine Abhängigkeit der Partikellänge feststellbar.

Aufgrund der höheren spezifischen Dichte der Eisenpartikel gegenüber den Aluminiumpartikeln ist folglich auch die Abhebefeldstärke trotz kleinerer Abmessungen höher als die der Aluminiumpartikel.

Druckabhängigkeit: Unter anderem wurden Untersuchungen auch bei 0,1 MPa, 0,2 MPa und 0,4 MPa unternommen, wobei bei diesen Versuchen das Hauptaugenmerk auf dem Bewegungsverhalten der Partikel und den daraus resultierenden Teilentladungserscheinungen lag. Wie bereits in Kapitel 3.1.2 dargelegt, ist der Gasdruck keine Funktion der Abhebefeldstärke, wie auch in Gleichung 15 beschrieben ist.

Die Druckunabhängigkeit der Abhebefeldstärke konnte bei diesen Versuchen nur bestätigt werden.

8.2.2 Partikelbewegung bei positiver Polarität

Da eine Vielzahl an Parametern eine Auswirkung auf das Partikelverhalten hat, wird sich die Darstellung auf ein Beispiel mit einem 6 mm Aluminiumpartikel entsprechend der Beschreibung in Kapitel 7.1.1 bei einem Druck von 0,4 MPa beschränken.

Nach dem Abhebevorgang bei einer Spannung von ungefähr 130 kV wird sich das Partikel in eine aufrechte Position versetzen und entlang der Außenhülle eine stehende Bewegung

(entsprechend c) in Abbildung 5-2) ausführen, wie dies in Abbildung 8-7 dargestellt ist. Die Spannung wird dabei auf 500 kV hochgefahren und eine bestimmte Zeit lang gehalten. Die dabei auftretenden Teilentladungen ergeben ungefähr einen Wert von $\leq 17\text{ pC}$.

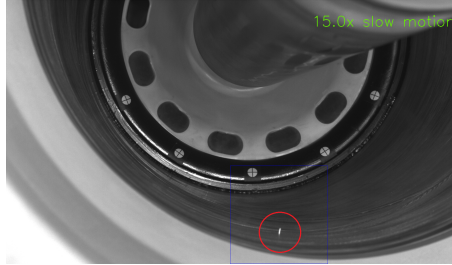


Abbildung 8-7: Beispiel einer stehenden Bewegung des Partikels am Boden der Außenhülle

Nach Ablauf der Versuchsdauer wurde die Spannung wieder auf Null reduziert. Bei Reduzierung der Spannung wurde die Partikelbewegung unruhiger, und das Bewegungsmuster änderte sich in eine Auf- und Abbewegung des Partikels (entsprechend d) in Abbildung 5-2). Dabei sprang das Partikel meist in das Winkelement und kam dort zu liegen. Aufgrund der Beschichtung und des größeren Abstandes zum Innenleiter konnte das Partikel nicht mehr aktiviert werden. Ein neues Partikel konnte dann eingebracht werden.

8.2.3 Partikelbewegung bei negativer Polarität

Im Falle der negativen Polarität gelten die gleichen Versuchsbedingungen wie davor im Abschnitt 8.2.2. Wird die Spannung bis zur Prüfspannung von -500 kV gesteigert, kommt es bei ungefähr dem gleichen Wert der Spannung, wie bereits bei positiver Polarität, zum Abheben des Partikels. Im Gegensatz dazu wird sich das Partikel sofort nach dem Abheben zum Innenleiter bewegen und dort verbleiben, wie dies Abbildung 8-8 zeigt.



Abbildung 8-8: Beispiel einer stehenden Bewegung des Partikels an der Oberfläche des Innenleiters

Nach Ablauf der Prüfdauer zeigten sich ähnliche Effekte wie bei positiver Polarität. Auch in diesem Fall wird die Partikelbewegung mit abnehmender Spannung immer instabiler, bis das Partikel in eine Auf- und Abbewegung übergeht und dann im Winkelement zur Ruhe kommt.

8.3 Vergleich von unterschiedlichen Spannungsarten

Das Partikelverhalten bei Wechselfeldspannung ist durch eine Vielzahl von Untersuchungen gut bekannt. Daher wurden als Referenz auch für Wechselfeldspannungen Untersuchungen durchgeführt und mit der Gleichspannung verglichen. Für diesen Vergleich wurde eine Visualisierung durchgeführt, wie diese bereits in Kapitel 6.2 beschrieben worden ist.

Die folgenden Darstellungen zeigen einen Ausschnitt von 2,66 Sekunden der typischen Partikelbewegungen von 2 und 6 mm Aluminiumpartikeln. Bei der Versuchsdurchführung mit 6 mm Aluminiumpartikeln wurde eine Kameraeinstellung mit 150 Bildern/Sekunde gewählt. Es konnten damit eine zeitliche Abtastrate von 6,6 ms erreicht werden. Aufgrund der höheren Geschwindigkeit der 2 mm Partikel musste auch die Kameraeinstellung mit 200 Bildern/Sekunde nachjustiert werden. Daher ergibt sich alle 5 ms ein Messpunkt der 3D-Koordinaten.

Nach einer Koordinatentransformation auf ein Computermodell, konnten aus der Anzahl der Messpunkte die Trajektorien der Partikel rekonstruiert werden. Da Zeit und Weg bekannte Größen sind, lässt sich dadurch auch die Geschwindigkeit der Partikel bestimmen. Diese ist in farbcodierter Darstellung in den Abbildungen 8-9 bis 8-13 als m/s angegeben.

Die folgenden Visualisierungen stammen von Untersuchungen, welche bei einem Gasdruck mit SF_6 von 0,4 MPa stattfanden.

8.3.1 Wechselfeldspannung

Der Vergleich mit einer Wechselfeldspannung bei einem Effektivwert von 500 kV zeigt ein wesentlich differenzierteres Partikelverhalten als unter Gleichspannung.

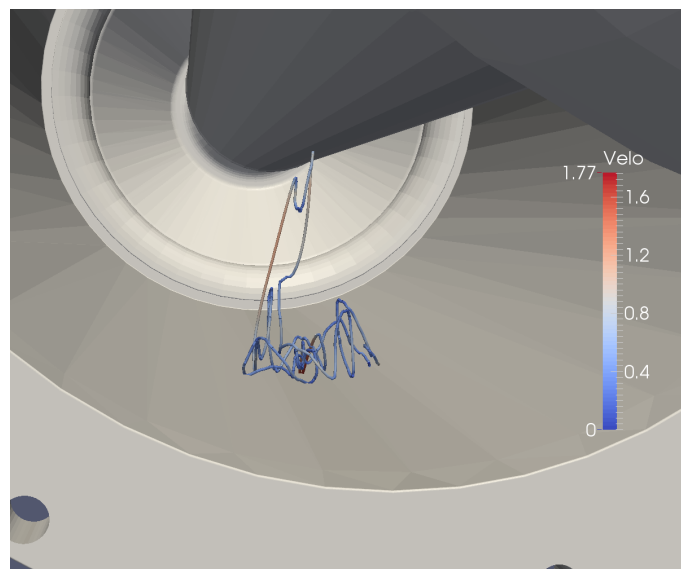


Abbildung 8-9: Partikeltrajektorie eines 6 mm Aluminiumpartikels bei Wechselfeldspannung

Entsprechend den Momentanwerten der Spannung wirkt auch die elektrostatische Kraft in unterschiedlicher Größe und Richtung auf das Partikel. Durch die relativ hohe Frequenz der Spannung kann das Partikel aufgrund seiner Trägheit nicht ganz der Kraftwirkung folgen. Es entstehen dabei zufällig wirkende Trajektorien, welche unter Umständen

auch bis zum Innenleiter reichen können, wie dies in Abbildung 8-9 dargestellt ist. Es ist dabei ersichtlich, dass die Geschwindigkeit nach Erreichen des Innenleiters mit ungefähr $1,7 \text{ m/s}$ am höchsten ist.

Ein Phasenbezug der Trajektorie ist aufgrund einer zu geringen Abtastrate nicht möglich. Bei einer Abtastung von $6,6 \text{ ms}$ werden bei einer Periodendauer von 20 ms lediglich drei Messpunkte bestimmt, welche für eine Rekonstruktion der Phase nicht ausreichend sind.

8.3.2 Positive Gleichspannung

Das Partikelverhalten bei positiver Gleichspannung gliedert sich in eine stehende Bewegung am Boden der Außenhülle und in eine Auf- und Abbewegung. Die Wahrscheinlichkeit, dass es zu einer Auf- und Abbewegung kommt, ist umso größer, je kleiner das Partikel ist. Die folgende Abbildung 8-10 zeigt ein 2 mm Aluminiumpartikel, welches eine Auf- und Abbewegung bei 500 kV vollführt und dabei kaum den Innenleiter erreicht. Das bedeutet, dass das Partikel, während es die Gasstrecke durchfliegt, sich dabei entladen muss. Diese Entladung muss gering genug sein, um nicht detektiert werden zu können, dabei aber genügend groß sein, um keine ausreichende Kraftwirkung mehr auf das Partikel, die die Gewichtskraft dabei überwindet, ausüben zu können. Dies ist ein spezieller Fall, der nur bei dieser Art von Partikeln und nur bei positiver Polarität beobachtet werden konnte. Längere Partikel führen dagegen, wenn es zu einer Auf- und Abbewegung kommt, immer eine Bewegung zwischen Außenhülle und Innenleiter aus. Die Geschwindigkeit mit zirka 3 m/s , die dabei bestimmt worden ist, ist die höchste festgestellte Geschwindigkeit bei den Untersuchungen des Partikelverhaltens.

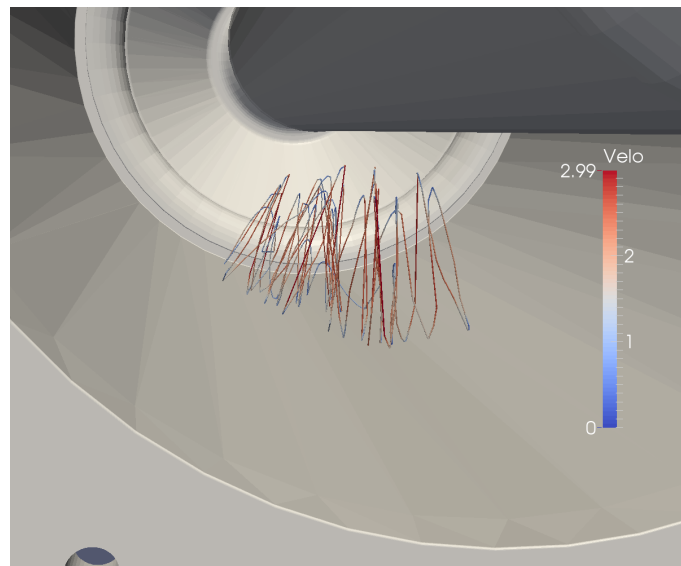


Abbildung 8-10: Trajektorie eines 2 mm Aluminiumpartikels bei positiver Polarität

Anhand eines Beispiels mit einem 6 mm langen Aluminiumpartikel kann eine stehende Bewegung am Boden der Außenhülle gezeigt werden, wie diese in Abbildung 8-11 dargestellt ist. Da das Partikel ständig Kontakt mit der Außenhülle hat, nimmt es kontinuierlich Ladung auf. Bei gleichzeitiger Entladung kann es nicht genügend Ladung halten, um abgestoßen bzw. von der Gegenelektrode angezogen zu werden. Das Partikel vollführt in diesem Fall eine relativ langsame Bewegung am Boden der Außenhülle.

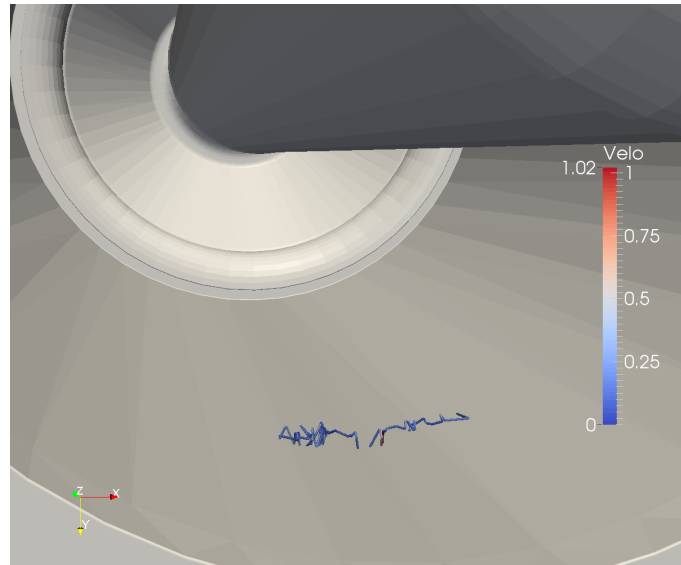


Abbildung 8-11: Trajektorie eines 6 mm Aluminiumpartikels bei positiver Polarität

8.3.3 Negative Gleichspannung

Ähnlich wie bei positiver Gleichspannung gibt es auch hier zwei auffällige Bewegungsmuster: Die einer Auf- und Abbewegung und die einer stehenden Bewegung.

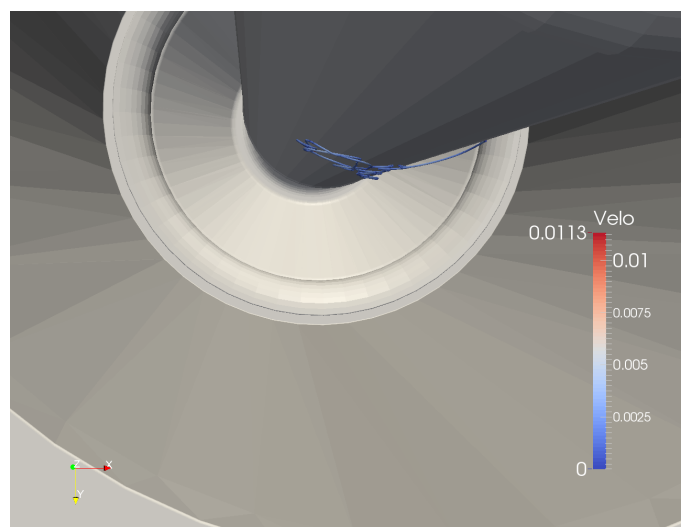


Abbildung 8-12: Trajektorie eines 2 mm Aluminiumpartikels bei negativer Polarität

Im Gegensatz zur positiven Polarität findet die stehende Bewegung bei der negativen Polarität immer am Innenleiter statt. Da in diesem Bereich höhere Feldstärken vorherrschen, gibt es einen stärkeren Effekt einer stehenden Bewegung am Innenleiter. Das bedeutet, dass die Auf- und Abbewegung des Partikels eine nicht so häufige Erscheinung darstellt, wie dies bei positiver Polarität der Fall wäre. In Abbildung 8-12 dargestellt ist ein 2 mm Aluminiumpartikel, welches eine stehende Bewegung an der Oberfläche des Innenleiters vollführt. Es zeigt sich in diesen Fall, dass selbst ein 2 mm Aluminiumpartikel eine stehende Bewegung bei -500 kV ausführen kann. Eine Auf- und Abbewegung zwischen Innenleiter und Außenhülle wäre daher nur bei Reduktion der Spannung möglich.

Eine stehende Bewegung an der Oberfläche ist umso wahrscheinlicher, je größer das Partikel ist. Daher kommt es vorzugsweise für ein 6 mm Aluminiumpartikel zu einer stehenden Bewegung an der Oberfläche des Innenleiters. Ähnlich wie beim 2 mm Aluminiumpartikel ist die Bewegung relativ langsam und vollführt dabei eine Hin- und Herbewegung entlang eines Kreissegmentes des Innenleiters, wie dies in folgender Abbildung 8-13 dargestellt ist.

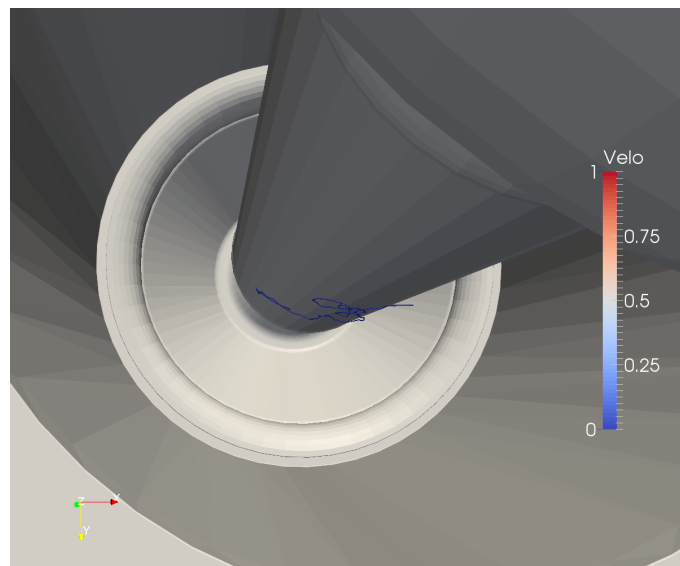


Abbildung 8-13: Trajektorie eines 6 mm Aluminiumpartikels bei negativer Polarität

8.3.4 Polaritätswechsel

Je nach Spannungshöhe und Umpolzeit kann ein Polaritätswechsel einen kritischen Moment darstellen, welcher vor allem Grenzflächen außerordentlich beanspruchen kann. Befinden sich zusätzlich Partikel in einer koaxialen Rohrleiteranordnung, kann eine ohnehin intensive Beanspruchung weiter verschärft werden. Es wurde deshalb eine Versuchsreihe mit 6 mm Aluminiumpartikeln durchgeführt, bei der positive und negative Polaritätswechsel untersucht wurden. Dabei wurde eine Prüfspannung von $\pm 500\text{ kV}$ gewählt, bei einer Umpoldauer von zirka 10 Sekunden.

Vor dem Polaritätswechsel von negativer auf positive Polarität führte das Partikel eine stehende Bewegung am Innenleiter aus. Während der Umpolung wird die Spannung

sehr schnell stark reduziert und springt im Moment, wenn die Dioden gewendet werden, auf den Wert Null. Spätestens in diesem Augenblick fällt das Partikel zu Boden. Der Spannungswert wird dann sehr schnell auf den Wert von 500 kV gesteigert, wobei das Partikel bei Erreichen der Abhebespannung abhebt, um darauf eine stehende Bewegung am Boden der Außenhülle auszuführen.

Im gegenteiligen Fall eines Polaritätswechsels von einer positiven auf eine negative Prüfspannung führt das Partikel wie üblich eine stehende Bewegung am Boden der Außenhülle aus. Wie auch im ersteren Fall, kommt das Partikel spätestens beim Wenden der Dioden zum Liegen und erhebt sich wieder bei Erreichen der Abhebespannung, um anschließend die Gasstrecke zu durchlaufen. Am Innenleiter angelangt, führt es wiederum eine stehende Bewegung aus.

8.4 Partikel auf Isolatoroberfläche

Bei der Versuchsdurchführung konnte festgestellt werden, dass frei beweglichen Partikel nach einer bestimmten Zeitdauer auf die Oberfläche des Isolators gelangen könnten. Trotz einer großen Anzahl an Versuchen konnte dieses Ereignis nur bei negativer Polarität beobachtet werden, wenn das Partikel an der Unterseite des Innenleiters eine stehende Bewegung ausführte. Wenn das Partikel auf die Isolatoroberfläche gelangt ist, verbleibt es dort aufgrund der statischen Aufladung des Isolierstoffes. Es wurde daher ein Polaritätswechsel von -500 kV auf $+500\text{ kV}$ mit einer Umpolzeit von zirka einer Minute durchgeführt. Dabei konnten drei Fälle von Partikelverhalten beobachtet werden:

- a) Partikel verbleibt an Ort und Stelle
- b) Partikel bewegt sich entlang der Isolatoroberfläche
- c) Partikel springt von der Isolatoroberfläche

Die Abbildung 8-14 zeigt ein spannförmiges 6 mm Aluminiumpartikel auf der Oberfläche der konkaven Seite des Isolators.

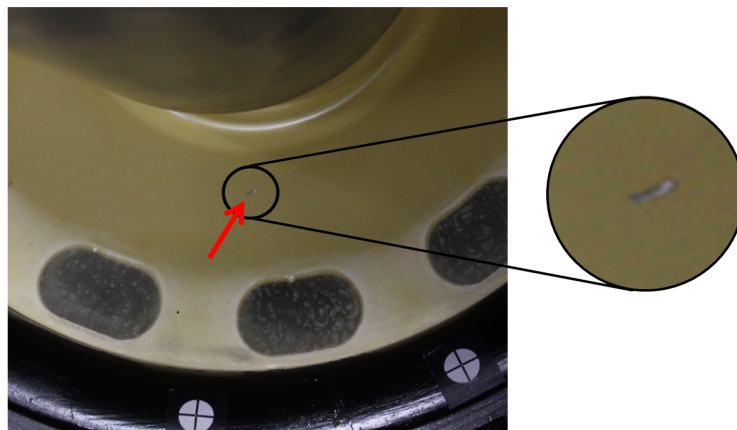


Abbildung 8-14: 6 mm Aluminium-Partikel auf der Isolatoroberfläche

Die Partikel bewegen sich meist zu höheren Feldstärken hin. Bei Querschnittsänderungen und Rundungen treten daher in diesen Bereichen immer höhere Feldstärken auf als bei der übrigen Leiteroberfläche. Dort, wo die Verjüngung des Innenleiters vorliegt, meist in der Nähe eines Isolators, ist daher die Aufenthaltswahrscheinlichkeit eines Partikels

relativ groß. Das bedeutet, dass gerade in diesem Bereich, wo die Anwesenheit eines Partikels am wenigsten wünschenswert ist, die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Partikels am größten ist. Zum einen kann das Partikel laufend Ladungen auf die Isolatoroberfläche aufbringen und so Gleitentladungen an der Grenzfläche hervorrufen, und zum anderen könnte das Partikel unter Umständen auf die Isolatoroberfläche gelangen und dort verbleiben. In Abbildung 8-15 dargestellt ist ein Ausschnitt eines gasisolierten Rohrleiters mit einem Partikel am Innenleiter. Es befindet sich in der Nähe der Querschnittsänderung, wo es von dort aus auf die Oberfläche des Isolators gelangen kann. Dieses Ereignis konnte mehrfach bei den Versuchsausführungen beobachtet werden.

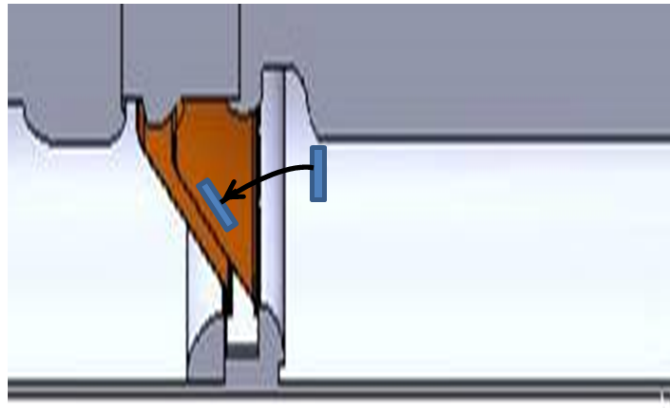


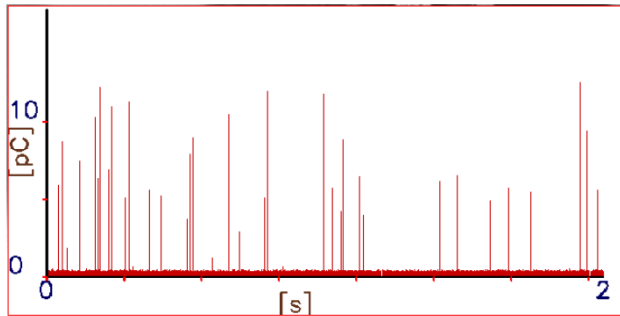
Abbildung 8-15: Partikel am Innenleiter, welches auf die Isolatoroberfläche gelangt

Befindet sich erst einmal ein Partikel auf der Isolatoroberfläche, lässt es sich kaum durch eine der beiden Teilentladungsmessmethoden (UHF, IEC 60270) detektieren. Das bedeutet, dass die Amplituden der Teilentladungsimpulse niedriger sind als der Grundstörpegel ($< 1pC$). Da Partikel auf einer Isolatoroberfläche zu den kritischen Defekten zählen, welche vor allem bei transients Überspannung die Isolierfestigkeit mindern, ist dies ein bedenkliches Ereignis, welches unbedingt untersucht werden muss.

8.5 Partikelverursachte Teilentladungserscheinungen

Partikel verursachen aufgrund ihrer Bewegungen charakteristische Teilentladungsmuster. Im folgenden Abschnitt wird ein Vergleich der Teilentladungsimpulse zwischen Wechsel-, positiver und negativer Gleichspannung dargelegt. Untersucht wurde dabei ein 6 mm Kupferpartikel bei $0,4\text{ MPa}$ Isoliergasdruck mit SF_6 .

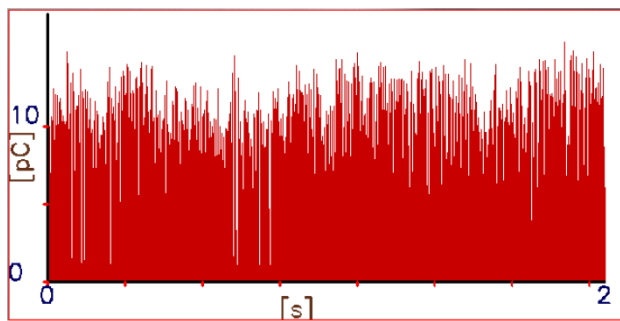
Aufgrund des Teilentladungsmusters lassen sich auch Rückschlüsse auf die Bewegung einzelner Partikel ziehen. Wenn das Partikel auf die Elektrodenoberfläche aufschlägt (oder kurz davor), lässt sich ein deutlicher Impuls detektieren [56]. Es macht daher einen Unterschied, ob das Partikel eine stehende Bewegung an der Elektrodenoberfläche ausführt oder ob es sich zwischen den Elektroden auf und ab bewegt. Bei Wechselspannung hingegen wird das Partikel einmal nach oben und einmal nach unten beschleunigt. Aufgrund seiner Massenträgheit kann das Partikel der Frequenz von 50 Hz nicht ganz folgen, und es beginnt zu springen. Je nach Größe und Gewicht wird das Partikel dabei mehr oder weniger auf und ab bewegt. Diese Bewegungsart hat ebenfalls ein charakteristisches Teilentladungsmuster, wie dies in Abbildung 8-16 dargestellt ist.



Wechselfspannung
 $U_{eff} \dots 300 \text{ kV}$
 $\hat{U} \dots 424 \text{ kV}$

Abbildung 8-16: Amplituden und Impulsfolge bei Wechselfspannung

Die Spannung U_{eff} von 300 kV wurde dabei so gewählt, dass ungefähr gleich große Amplitudenwerte wie im Vergleich zur positiven Gleichspannung auftreten. Dagegen zeigt die Abbildung 8-17 eine Impulsfolge der positiven Gleichspannung bei 500 kV . Dabei führt das Partikel eine stehende Bewegung am Boden der Außenhülle aus. Es ist daher klar ersichtlich, dass das Partikel ständig Ladungen von der Elektrode aufnimmt und diese dann wieder durch Teilentladungen in den Gasraum abgibt.

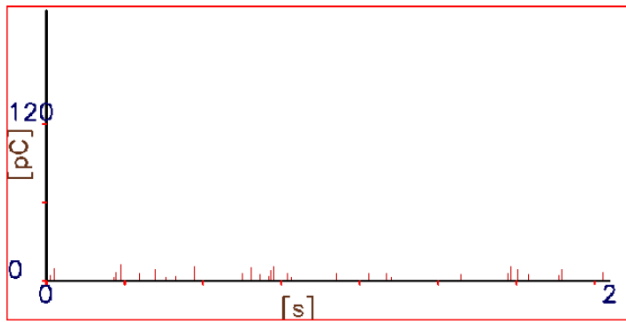


Gleichspannung positiv
 $U = \dots 500 \text{ kV}$

Abbildung 8-17: Amplituden und Impulsfolge bei positiver Gleichspannung

Es kann dabei ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Teilentladungsmustern erkannt werden, welche die Bewegung der Partikel widerspiegeln. Da das Partikel bei Wechselfspannung eine springende Bewegung ausführt und Entladungen nur bei Kontakt mit der Elektrode stattfinden, entspricht die Impulsfolge den Aufschlagszeitpunkten des Partikels bei entsprechender Einsetzspannung.

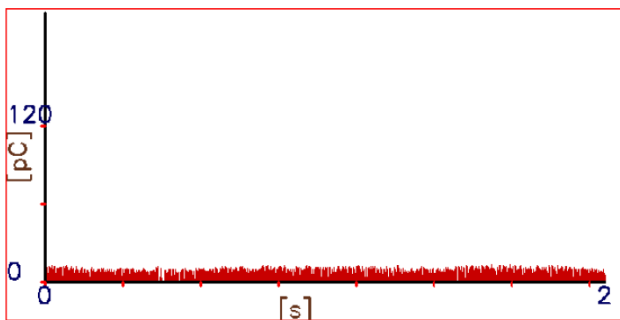
Um die Vergleichbarkeit besser darzustellen, sind die folgenden Abbildungen mit gleicher Skalierung versehen. Abbildung 8-18, Abbildung 8-19 und Abbildung 8-20 zeigen im Wesentlichen eine Gegenüberstellung zwischen Wechselfspannung, positiver und negativer Gleichspannung im vergleichbaren Maßstab der Amplitudenhöhe.



Wechselspannung

 $U_{eff} \dots 300 \text{ kV}$ $\hat{U} \dots 424 \text{ kV}$

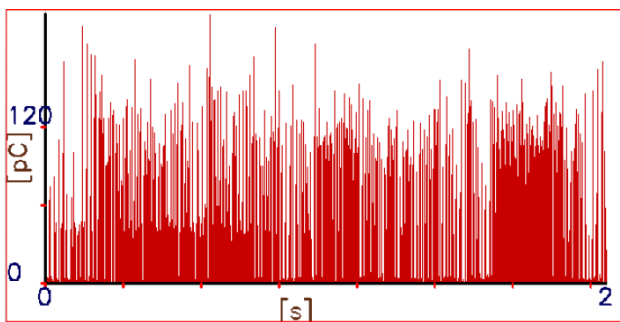
Abbildung 8-18: Amplituden und Impulsfolge bei Wechselspannung



Gleichspannung positiv

 $U_{=} \dots 500 \text{ kV}$

Abbildung 8-19: Amplituden und Impulsfolge bei positiver Gleichspannung



Gleichspannung negativ

 $U_{=} \dots 500 \text{ kV}$

Abbildung 8-20: Amplituden und Impulsfolge bei negativer Gleichspannung

Es kann bei dieser Gegenüberstellung deutlich erkannt werden, dass die Art der Spannungsbeanspruchung signifikante Auswirkungen auf das Teilentladungsverhalten des Partikels hat. Entsprechend diesem Vergleich weist die negative Polarität der Gleichspannung die höchsten Teilentladungsamplituden bei einer sehr hohen Impulsdichte auf. Dies lässt sich dadurch erklären, dass das Partikel sich in einem Bereich aufhält, in dem die höchste Feldstärke auftritt und dabei ständigen Kontakt mit dem Innenleiter hat.

Die folgenden Tabellen zeigen die ungefähren Werte der scheinbaren Ladung, welche mit der konventionellen Teilentladungsmessung ermittelt worden sind, der unterschiedlichen Partikelarten und -längen, bei verschiedenen Polaritäten und Drücken. In Tabelle 10 sind die Werte der scheinbaren Ladung von 6 mm zylinderförmigen Kupferpartikeln dargestellt.

Tabelle 10: Werte der scheinbaren Ladung für 6 mm Kupferpartikel

Druck [MPa]	Material	Länge [mm]	Polarität [pos./neg.]	TE bei 500 kV [pC]
0,4	Cu	6	+	≥ 15
0,4	Cu	6	-	≥ 80

Da die Hauptuntersuchungen mit spanförmigen Aluminiumpartikeln stattfanden, wurden diese ausführlicher mit unterschiedlichen Längen getestet. In Tabelle 11 finden sich die Werte der scheinbaren Ladung für 2, 4 und 6 mm Aluminiumpartikel bei einer Prüfspannung von ± 500 kV.

Tabelle 11: Werte der scheinbaren Ladung für 2, 4 und 6 mm Aluminiumpartikel

Druck [MPa]	Material	Länge [mm]	Polarität [pos./neg.]	TE bei 500 kV [pC]
0,4	AL	2	+	≥ 2
0,4	AL	2	-	≥ 14
0,4	AL	4	+	≥ 8
0,4	AL	4	-	≥ 60
0,4	AL	6	+	≥ 17
0,4	AL	6	-	≥ 70

Da der Gasdruck wesentlichen Einfluss auf das Teilentladungsverhalten hat, wurde der Fall von 0,1 MPa Isoliergasdruck untersucht. Da bei diesem Druck die Isolationsfestigkeit mit ± 500 kV nicht gegeben ist, wurde daher auch die Prüfspannung mit ± 300 kV limitiert. Die Tabelle 12 zeigt die Werte der scheinbaren Ladung von 2 und 6 mm Aluminiumpartikel, welche bei geringerem Druck und Spannung getestet wurden.

Tabelle 12: Werte der scheinbaren Ladung für 2 und 6 mm Aluminiumpartikel

Druck [MPa]	Material	Länge [mm]	Polarität [pos./neg.]	TE bei 300 kV [pC]
0,1	AL	2	+	≤ 1
0,1	AL	2	-	≤ 1
0,1	AL	6	+	≥ 15
0,1	AL	6	-	≥ 80

Es zeigt sich deutlich, dass bei negativer Polarität signifikant höhere Amplitudenwerte der scheinbaren Ladung auftreten als dies bei positiver Polarität der Fall ist. Des Weiteren wurde auch festgestellt, dass bei einem Isoliergasdruck von $0,4 \text{ MPa}$ Aluminiumpartikel von 2 mm Länge gerade noch erkannt werden können. Allerdings kann ein 2 mm Partikel, wegen einer geringeren Prüfspannung von $\pm 300 \text{ kV}$, bei $0,1 \text{ MPa}$ nicht mehr detektiert werden.

9 Resümee

Aus den Untersuchungen mit leitfähigen Partikeln im koaxialen Rohrleiter unter hoher Gleichspannungsbeanspruchung konnten umfangreiche Erkenntnisse gewonnen werden. In erster Linie wurde das Bewegungsverhalten von Partikeln eingehend analysiert. Dabei wurde mittels Kamerasystem nicht nur eine visuelle Aufzeichnung vorgenommen, sondern es konnten damit auch Partikel detektiert werden. Mit den dabei ermittelten dreidimensionalen Koordinatenpunkten konnten daher die Trajektorien der Partikel rekonstruiert werden.

Allgemeines Partikelverhalten: Partikel benötigen für das Abheben von der Elektrodenoberfläche eine erforderliche Mindestfeldstärke. Wird diese erreicht, beginnt sich das Partikel aufzurichten. Der Abhebevorgang ist abhängig von der Form und der Art des Partikels sowie von der Elektrodenoberfläche und der dort auftretenden Feldstärke. Er ist aber unabhängig vom verwendeten Isoliergas, vom Gasdruck und von der Partikellänge. Es konnten markante Unterschiede der Abhebefeldstärken zwischen Kupfer, Eisen und Aluminiumpartikeln festgestellt werden. Aufgrund des größeren spezifischen Gewichtes sind die Abhebefeldstärken bei Partikeln aus Kupfer und Eisen wesentlich höher als jene von Aluminium.

Gleich nach dem Abhebevorgang stellt sich ein für das Partikel unter den Umgebungsbedingungen typisches Bewegungsmuster ein, bei dem zwei unterschiedliche Arten festgestellt werden können. Entweder kommt es zu einer stehenden Bewegung an der Elektrodenoberfläche oder zu einer Auf- und Abbewegung zwischen den beiden Elektroden. Welche Bewegung sich dabei einstellt, hängt hauptsächlich von der erhaltenen Ladungsdichte an der Oberfläche des Partikels ab. Das bedeutet, dass bei zu starker Entladung in Form von Teilentladungen die Wahrscheinlichkeit einer stehenden Bewegung des Partikels größer ist. Es gibt daher Faktoren, welche Teilentladungen begünstigen, wie:

- a) Geringerer Gasdruck
- b) Geringere Isolationsfestigkeit des Gases
- c) Größere Partikellänge
- d) Entsprechende Partikelform (z. B. spitz, scharfkantig)
- e) Bereiche höherer Feldstärke (z. B. Innenleiter)
- f) Höhere Spannung

Wird eine stehende Bewegung ausgeführt, nimmt das Partikel kontinuierlich Ladungen von der Elektrode auf und entlädt sich dabei gleichzeitig in den Gasraum. Die dabei auftretenden Teilentladungen zeigen daher eine Impulsfolge geringer Impulsabstände. Das bedeutet, dass dieses Teilentladungsmusters charakteristisch für diese Art der Bewegung ist.

Da der Teilentladungsstrom durch Elektronenemission größtenteils negativ ist, verbleibt am Partikel eine positive Nettoladung. Das Partikel wird daher zu der immer negativeren Elektrode angezogen. Aufgrund dieser Tatsache kommt es daher zu einem polaritätsabhängigen Effekt, bei dem das Partikel bei negativer Spannung eine stehende Bewegung am Innenleiter ausführt und bei positiver Spannung eine stehende Bewegung am Boden der Außenhülle. Da die koaxiale Rohrleiteranordnung ein radialsymmetrisches Feld besitzt, existiert an der Oberfläche des Innenleiters die Höchstfeldstärke. Bei gleichen

Versuchsbedingungen und bei gleichen Partikeleigenschaften kommt es daher bei negativer Polarität zu wesentlich höheren Werten der Teilentladungen als vergleichsweise bei positiver Polarität. Im Gegensatz dazu ist bei geringerer Entladung des Partikels eine Auf- und Abbewegung zwischen Innenleiter und Außenhülle wahrscheinlicher. Die Faktoren, die diese Bewegungsart begünstigen, sind im Grunde genommen die gegenteiligen, die eine stehende Bewegung wahrscheinlicher machen, wie:

- a) Höherer Gasdruck
- b) Größere Isolationsfestigkeit des Gases
- c) Kleinere Partikellänge
- d) Entsprechende Partikelform (z. B. rund, stumpf)
- e) Geringere Spannung

Die dabei auftretenden Teilentladungen zeigen sich darin, dass das Partikel erst bei Kontakt mit der Elektrode (oder kurz davor) einen Teilentladungsimpuls verursacht. Die dabei detektierten Teilentladungsimpulse zeigen entsprechend dem Bewegungszyklus des Partikels große Impulsabstände. Die Auf- und Abbewegung kommt bei gleichen Polaritäten gleichermaßen vor, ist jedoch bei positiver Polarität häufiger aufgetreten. Dies lässt sich damit begründen, dass das Partikel bei negativer Polarität zum Innenleiter hin angezogen wird und sich dabei in einem Bereich höherer Feldstärken befinden. Aufgrund dessen kommt es vermehrt zu Teilentladungserscheinungen, bei denen tendenziell das Partikel eine stehende Bewegung ausführt. Des Weiteren wurde auch bei 2 mm Aluminiumpartikeln bei einem Gasdruck von $0,4\text{ MPa}$ beobachtet, dass diese zwar eine Auf- und Abbewegung vollzogen, dabei aber den Innenleiter nicht berührten. Dies ist nur bei einer Ladungsänderung, während das Partikel die Gasstrecke durchläuft, möglich. Das Partikel muss sich dabei entladen, sodass die elektrostatische Kraft nicht mehr ausreicht, um die Gewichtskraft überwinden zu können.

Des Weiteren wurde auch beobachtet, dass Partikel zu Bereichen höherer Feldstärke hingezogen werden und dort verbleiben. Bereiche erhöhter Feldstärke sind meist Querschnittsänderungen des Innenleiters. Dies konnte gerade bei negativer Polarität beobachtet werden. Verbleibt das Partikel an der Verjüngung des Innenleiters im Bereich des Isolators, kann dieses durch ständige Teilentladungen Ladungen auf die Oberfläche des Isolators bringen und dabei die Grenzfläche zusätzlich beanspruchen. Im Extremfall könnten dadurch auch Gleitentladungen begünstigt oder sogar ausgelöst werden.

Partikel auf Isolatoroberfläche: Unter anderem konnten auch Beobachtungen von Partikeln gemacht werden, welche bei negativer Polarität sich im Bereich des Isolators aufhielten und nach kurzer Dauer eine pendelnde Auf- und Abbewegung am Innenleiter ausführten. Dabei kam es vor, dass das Partikel auf die Oberfläche des Isolators gelangte. Es verblieb dort in einer Ruhelage und konnte mittels Teilentladungsmessung nicht mehr detektiert werden. Dieses Ereignis konnte mehrfach beobachtet werden, allerdings nur bei negativer Polarität, wenn das Partikel am Innenleiter eine stehende Bewegung ausführte. Im Falle eines Partikels an der Isolatoroberfläche wurde ein Polaritätswechsel von -500 kV auf $+500\text{ kV}$ durchgeführt. Entweder fiel das Partikel von der Isolatoroberfläche oder es bewegte sich entlang der Oberfläche des Isolators und verblieb dort oder es verblieb an derselben Stelle. Das bedeutet, dass gegebenenfalls ein Polaritätswechsel eine Maßnahme gegen Partikel am Isolator sein kann, aber nicht zwingend sein muss.

Partikelverhalten bei Wechselfeldspannung: Überdies wurden Referenzmessungen mit Wechselfeldspannung durchgeführt, welche den Messungen mit Gleichspannung gegenübergestellt wurden. Im Gegensatz zu Gleichspannung ist die Partikelbewegung bei Wechselfeldspannung wesentlich dynamischer, da in einem Wechselfeld sich die Kraftwirkung durch das elektrische Feld ständig ändert. Das Partikel kann dabei der Frequenz aufgrund seiner Massenträgheit nicht ganz folgen, und es ergeben sich dabei scheinbar zufällig wirkende Auf- und Abbewegungen. Unter Umständen kann es auch vorkommen, dass das Partikel dabei auch den Innenleiter erreicht. Aufgrund dieser dynamischen Bewegung bewegen sich Partikel, anders als bei Gleichspannung, nicht in Richtung Bereiche höherer Feldstärken. Daher verbleiben diese auch nicht an bestimmten Stellen, sondern bewegen sich scheinbar willkürlich durch den Gasraum.

Fazit: Aufgrund von höheren Teilentladungsaktivitäten und aufgrund von Ladungsträgeremission durch Partikel auf Grenzflächen, welche Gleitüberschläge begünstigen könnten, sowie aufgrund des Auftretens von Partikeln auf Oberflächen von Isolatoren ist die negative Polarität der wesentlich kritischere Fall.

Da die Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Partikeln bei negativer Polarität am Innenleiter am größten ist, sollten Maßnahmen gegen Partikel auch dort erfolgen.

Der Vergleich zur Wechselfeldspannung zeigte auch Parallelen mit der Gleichspannung bei positiver Polarität. In beiden Fällen bewegen sich die Partikel am Boden der Außenhülle, dabei erscheint das Partikel bei positiver Polarität sogar wesentlich ruhiger als jenes bei Wechselfeldspannung. Die Maßnahmen gegen Partikelbewegung bei positiver Polarität könnten dabei an jene der Wechselfeldspannung angelehnt werden.

10 Ausblick

10.1 Allgemeines

Frei beweglich leitfähige Partikel stellen ein großes Gefährdungspotential für die Zuverlässigkeit einer gasisolierten Anlage dar. Da Verunreinigungen mit Partikeln nie ganz ausgeschlossen werden können, ist es daher unbedingt erforderlich, Maßnahmen dagegen zu ergreifen.

Eine Möglichkeit dabei wäre, die Abhebefeldstärken der Partikel soweit hinaufzusetzen, dass diese bei Betriebsspannung von vornherein nicht erreicht werden können. Dies könnte mittels einer Beschichtung der Außenhülle gelöst werden. Partikel haben dadurch keinen unmittelbaren Kontakt mit der Elektrode und können daher Ladungen nicht mehr direkt aufnehmen, sondern es wirken andere Mechanismen der Ladungsaufnahme. Die Ladungsaufnahme findet zum einen über die Leitfähigkeit der Beschichtung statt, welche in der Regel sehr niedrig ist, und zum anderen kann das Partikel aus dem Gas vorhandene Ladungsträger aufnehmen [57]. Die Abhebefeldstärke wird dadurch erheblich erhöht und kann für die meisten Partikel eine wirksame Maßnahme gegen das Abheben sein. Außerdem glättet eine Beschichtung die Elektrodenoberfläche, welche auch die Durchschlagsspannung erhöht [58].

Die Abhebefeldstärke kann aber auch durch eine Erhöhung der Adhäsionskraft bewirkt werden, indem eine klebrige Beschichtung aufgetragen wird. Kommt ein Partikel auf die Oberfläche, bleibt es am Boden kleben. Dies kann nur als eine kurzfristige Lösung angesehen werden, da aufgrund der Alterung diese Wirkung über einen längeren Zeitraum abgeschwächt wird [59].

10.2 Partikelfalle

Die Partikeldynamik unter Gleichspannung unterscheidet sich wesentlich von jener der Wechselfspannung. Bei Wechselfspannung zeigen die Partikel eine Auf- und Abbewegung, welche der Netzfrequenz, aufgrund ihrer Trägheit, nicht ganz folgen können. In manchen Fällen können sie unter Umständen dabei den Innenleiter berühren [60]. Im Gegensatz zur Gleichspannung bewegen sich Partikel bei Wechselfspannung nicht in Richtung höherer Feldstärken, sondern zeigen ein völlig zufälliges Bewegungsverhalten am Boden der Außenhülle. Partikelfallen für Wechselfspannung sind im Wesentlichen Aluminiumschienen, welche im Rohr an ihrer tiefsten Stelle der Länge nach einen Bereich abschirmen. Die Wahrscheinlichkeit ist relativ hoch, dass sich nach kurzer Zeitdauer Partikel in diesen Bereich einfinden und dort aufgrund der Schirmwirkung der Partikelfalle die elektrostatische Kraft nicht mehr ausreicht, um das Partikel zu bewegen. Einen abgeschirmten Bereich zu schaffen, indem die Feldstärke stark herabgesetzt wird bzw. Feldfreiheit herrscht, ist das eigentliche Prinzip von Partikelfallen. Solche abgeschirmten Bereiche könnten eventuell Schlitze, Löcher, Ecken oder andere geometrische Formen bilden [11]. Partikel unter hoher Gleichspannung einzufangen, ist wesentlich anspruchsvoller als unter Wechselfspannung. Anders als bei Wechselfspannung bewegen sich Partikel zu Bereichen höherer Feldstärke hin und verbleiben oft an der Stelle [61]. Darüber hinaus sind die Aufenthaltsbereiche der Partikel im Rohrleiter wesentlich stärker verteilt. Unter Umständen können Partikel, welche sich bereits in einer Partikelfalle befinden, aus dieser

wieder austreten [62]. Aufgrund dieser Tatsache sind gesonderte Lösungen der Partikelproblematik bei hoher Gleichspannung erforderlich [63].

Bei hoher Gleichspannung können drei verschiedene Fälle der Bewegungsmuster unterschieden werden, welche aus zwei Fällen der Polarität resultieren. Bei einer stehenden Bewegung sind die Aufenthaltsbereiche bei positiver Polarität am Boden der Außenhülle und bei negativer Polarität an der Unterseite des Innenleiters. Eine Auf- und Abbewegung hingegen ist bei beiden Polaritäten möglich, bei der sich die Partikel zwischen Innenleiter und Außenleiter bewegen.

Maßnahmen gegen Partikel sollten daher dort angesetzt werden, wo eine hohe Aufenthaltswahrscheinlichkeit von ihnen besteht. Das bedeutet die Schaffung von feldfreien Bereichen am Innenleiter und an der Außenhülle. Unter anderem gibt es noch allgemeine Anforderungen an Teilchenfallen. Im Wesentlichen sind dies:

- a) Gute Wirksamkeit über einen großen Bereich
- b) Hohe Partikeleinfangrate [60]
- c) Dauerhafter Verbleib der Partikel im feldfreien Raum
- d) Keine Beeinflussung auf die Isolationsfestigkeit des Isoliergases (Feldverzerrungen)
- e) Einfache Montage bzw. Herstellung
- f) Gutes Langzeitverhalten

Ein Patent von John G. Trump aus dem Jahre 1970 schlägt eine Lösung von einer Partikelfalle am Innenleiter vor. Ist der Innenleiter hohl, befindet sich bereits ein feldfreier Raum im Inneren des Leiters, und es könnten durch Löcher Partikel dort eingefangen werden [64]. Dies wäre ein Beispiel einer Maßnahme bei negativer Polarität, wo Partikel am Innenleiter eliminiert werden könnten. Bei positiver Polarität empfiehlt Trump die Schaffung feldfreier Räume durch am Boden der Außenhülle angebrachte Rohre beziehungsweise einen Schlitzboden oder eine Furche entlang des Rohrleiterbodens [64].

Des Weiteren gäbe es noch Möglichkeiten, das Partikelverhalten insofern zu kontrollieren, indem Partikel zu einer Stelle geleitet werden, wo eine Partikelfalle wirksam werden kann. Dies geschieht mittels sogenannten „Particle Driver“, wie dieser in Abbildung 10-1 zu sehen ist [16].

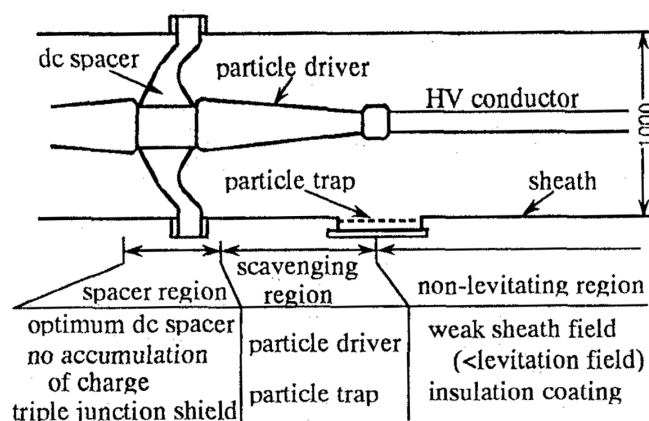


Abbildung 10-1: Möglichkeit der Kontrolle von Partikelbewegungen und Einfang an einer Stelle [16]

Die Funktionsweise dieser Konstruktion basiert auf der Einteilung in drei Bereiche, dem Isolatorbereich, dem Bereich der Partikelkontrolle und dem Bereich, wo das Abheben der Partikel nicht mehr möglich ist. Da Isolatoren besonders anfällig für Partikelverunreinigungen sind, gilt es, diese besonders zu schützen. Daher beginnt an dieser Stelle der „Particle Driver“, welcher im Prinzip ein konischer Leiter ist, dessen Feldstärke vom Isolator weg immer mehr zunimmt. Da Partikel ohnehin zu höheren Feldstärken hingezogen werden, werden die Partikel weg vom Isolator in Richtung Teilchenfalle bewegt. Die Teilchenfalle befindet sich unter einer Leiterhülse bei der, aufgrund einer Schirmwirkung, ein feldschwacher Bereich entsteht. Das elektrische Feld reicht dort nicht mehr aus, um das Partikel zu halten, und es fällt aufgrund der Gewichtskraft Richtung Teilchenfalle. Im dritten Bereich wird die Abhebespannung durch eine Beschichtung der Außenhülle erhöht sowie durch einen entsprechend großen Außendurchmesser, sodass es Partikel nicht mehr möglich ist sich aufzurichten.

10.3 Weitere Untersuchungen

Trotz umfangreicher Untersuchungen des Bewegungsverhaltens von leitfähigen Partikeln unter hoher Gleichspannung sind noch weiterführende Untersuchungen notwendig.

Es wäre von praktischer Bedeutung, weitere Partikelarten zu untersuchen, wie beispielsweise spiralförmige Partikel. Dabei könnten unterschiedliche Windungszahlen einen Einfluss auf das Abhebeverhalten haben [8].

Von weiterem Interesse wären Gasgemische von SF_6 und N_2 bei unterschiedlichen Drücken bis zirka 1 MPa. Zu erwarten wären dabei ein verändertes Teilentladungsverhalten und somit auch unterschiedliche Bewegungsmuster der Partikel.

Weitere Untersuchungen mit positiver und negativer Polarität der Prüfspannung mit einem dabei überlagerten Stoß wären vor allem bei negativer Polarität von Interesse, da sich das Partikel meist am Innenleiter befindet, wo die höchste Feldstärke herrscht. Das Partikel vollführt dabei eine stehende Bewegung am Innenleiter und wirkt dabei wie eine Spitze im Raum, die dort einen Durchschlag begünstigen könnte.

Transiente Beanspruchungen im Allgemeinen stellen eine außerordentliche Belastung dar. Daher sollten auch schnelle Polaritätswechsel durchgeführt werden, insbesondere bei Partikeln auf einer Isolatoroberfläche. Während einer schnellen Umpolung sollten bestimmte Effekte beobachtet werden können.

Darüber hinaus sollten auch künftige Partikelfallen auf ihre Tauglichkeit mittels Polaritätswechsels getestet werden. Dies insbesondere deswegen, da Partikel in den Fallen wieder aktiviert werden können.

Da bekanntlich Partikel Risiken darstellen, sollten diese auch mittels Teilentladungsdiagnose erkannt werden können. Wegen eines fehlenden Phasenbezugs der Teilentladungsimpulse müssen Zusatzinformationen ergründet werden, um bestimmte Defekte bewerten zu können. Daher ist es notwendig, unterschiedliche Teilentladungsmuster von verschiedenen Defekten zu klassifizieren. Auch gilt es, bestimmte Risiken mittels Teilentladungsdiagnose zu bewerten [56].

Ein weiterer zu untersuchender Fall wäre eine schräg gestellte Versuchsanordnung. Unter Laborbedingungen werden immer optimale Bedingungen gefordert, wie beispielsweise eine nivellierte Ausrichtung des Versuchsaufbaus. Eine praktischere Herangehensweise

wäre die Untersuchung des Partikelverhaltens mit unterschiedlichem Gefälle respektive Steigung der Versuchsanordnung. Erwartungsgemäß müssten die Partikeln die Gesetze der Schwerkraft befolgen und sich zu tieferen Punkten hinbewegen.

11 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Verhalten von frei beweglich leitenden Partikeln unter hoher Gleichspannungsbeanspruchung in gasisolierten Rohrleitern. In umfangreichen Untersuchungen wurde dabei das Bewegungs- und Teilentladungsverhalten der Partikel analysiert. Hauptaugenmerk dabei galt einer praxisnahen Durchführung der Experimente mittels eines Versuchsaufbaus aus realen GIS/GIL-Komponenten.

Einleitung: Der zunehmende Bedarf an elektrischer Energie macht dynamischere Energieversorgungslösungen notwendig. Zum einen bringt die HGÜ-Technologie den Vorteil, dass Übertragungsverluste und auch die Trassenbreite der Leitung verringert werden können. Zum anderen bringt die gasisolierte Technik den Vorteil einer Reduktion der Baugröße gegenüber luftisolierten Anlagen. Durch Anwendung der HGÜ-Technik auf gasisolierte Systeme ergeben sich neue Chancen, aber auch Herausforderungen.

Aufgabenstellung: Einige der am häufigsten auftretenden und kritischsten Defekte in gasisolierten Systemen sind frei beweglich leitfähige Partikel. Diese können entweder bei Montage, Vibrationen oder aber auch durch Abrieb von Schaltkontakten entstehen. Sie sind daher unregelmäßig in Form und Größe. Die Aufgabe bestand darin, Partikel mittels eines Kamerasystems zu erfassen und mit einem Teilentladungsmesssystem zu synchronisieren. Die Partikelbewegung wird dabei den Teilentladungen zugeordnet. Ziel der Arbeit ist es, das Bewegungsverhalten von unterschiedlichen Partikeln zu untersuchen und zu klassifizieren.

Grundsätzliches über frei bewegliche Partikel: Grundsätzlich wirken auf leitfähige Partikel die elektrostatische Kraft, die Erdanziehungskraft und der Strömungswiderstand. Dabei wirken sich gewisse Einflussfaktoren auf das Partikelverhalten aus wie beispielsweise Größe und Form des Partikels, Isoliergas und Druck sowie Polarität der Spannung. Da bei einer Gleichspannungsbeanspruchung die elektrostatische Kraft immer in eine Richtung gerichtet ist, verhalten sich Partikel bei wechselnder Kraftwirkung unter Wechselspannung wesentlich anders. Das bedeutet, dass Lösungen für Wechselspannungsbeanspruchung nicht für Gleichspannungsbeanspruchung gelten.

Allgemeines über Rohrleiter: Gasisolierte Rohrleiter sind im Allgemeinen mit einem Innenleiter und einer Außenhülle koaxial aufgebaut. Dabei ergibt sich ein radialsymmetrisches Feld, bei dem die maximale Feldstärke am Innenleiter auftritt. Um den Innenleiter in der Mitte der Rohranordnung zu positionieren, muss dieser mittels Isolatoren gestützt werden. Daraus ergibt sich eine Isolieranordnung von fester und gasförmiger Materie, bei der auch Grenzflächeneffekte auftreten. Des Weiteren treten bei hoher Gleichspannung noch physikalische Phänomene auf, welche das Partikelverhalten zusätzlich beeinflussen.

Partikel im gasisolierten Rohrleiter für Anwendung mit Gleichspannung: Aufgrund einer quasihomogenen Feldstärkeverteilung ergeben sich dadurch stark ausgeprägte Bewegungsmuster der Partikel. Im Allgemeinen können sich zwei unterschiedliche Arten von Bewegungsmuster der Partikel ausbilden. Zum einen kann eine stehende Bewegung an einer Elektrodenoberfläche stattfinden und zum anderen eine Auf- und Ab-

bewegung zwischen Innenleiter und Außenhülle. Durch ständige Ladungsaufnahme von der Elektrode und gleichzeitige Teilentladungen ergibt sich für das Partikel eine positive Nettoladung. Es wird dabei immer von der negativeren Elektrode angezogen. Das bedeutet, dass bei positiver Polarität am Innenleiter das Partikel eine stehende Bewegung an der Außenhülle vollführt. Umgekehrt, bei negativer Polarität, eine stehende Bewegung am Innenleiter. Kann aber das Partikel genug Ladung aufgrund schwacher Teilentladungsemission halten, kommt es zu einer Auf- und Abbewegung zwischen Innen- und Außenleiter. Dieses Bewegungsmuster kann bei beiden Polaritäten auftreten.

Versuchsaufbau: Für die Beobachtung der Partikelbewegungen wurde eigens ein Kamerasystem konzipiert. Zweck dieses Systems ist es, mit zwei baugleichen Kameras das Partikelverhalten aufzuzeichnen, dabei das Partikel zu detektieren, um damit die dreidimensionalen Koordinaten zu bestimmen. Da für jedes Bildpaar ein bekannter Koordinatenpunkt des Partikels vorliegt, kann aufgrund der großen Anzahl an Bildern die Trajektorie des Partikels rekonstruiert werden. Da Zeit und Aufenthaltsort bekannte Größen sind, kann daraus die Geschwindigkeit des Partikels bestimmt werden. Darüber hinaus wurde auch eine Teilentladungsmessung mittels konventioneller und UHF-Methode durchgeführt. Um das Bewegungsverhalten der Partikel den Teilentladungsimpulsen zuzuordnen, wurde das Kamerasystem mit dem Teilentladungsmesssystem synchronisiert.

Versuchsplanung und Durchführung: Die für die Hauptuntersuchungen verwendeten Proben waren spanförmige Aluminiumpartikel, welche 2, 4 und 6 mm Länge aufwiesen. Diese sollten eine repräsentative Verunreinigung darstellen, welche auch häufig in gasisolierten Anlagen anzutreffen ist. Des Weiteren wurden auch Kupfer- und Eisenpartikel untersucht und Versuchsparameter festgelegt, wie beispielsweise Druck, Spannung sowie Polarität.

Ergebnisse: Im Allgemeinen wurden das Abhebeverhalten, die Bewegungsmuster und die Änderung dieser untersucht sowie das dabei entstehende Teilentladungsverhalten. Dafür wurden einzelne Versuchsparameter variiert, wie beispielsweise Gasdruck, Partikelgröße, Partikelform und Partikelmaterial. Dabei konnten aus den Untersuchungsergebnissen einige typische Bewegungsmuster identifiziert werden sowie deren Abhängigkeiten, Schwellwerte und Grundgrößen.

Resümee: Wenn es bei negativer Polarität zu einer stehenden Partikelbewegung kommt, findet diese immer an der Oberfläche des Innenleiters statt. Dabei konnte festgestellt werden, dass es aufgrund höherer Feldstärken am Innenleiter bei negativer Polarität zu wesentlich höheren Teilentladungserscheinungen kommt. Unter anderem wurde entdeckt, dass Partikel tendenziell zu Stellen mit höherer Feldstärke hingezogen werden, im Besonderen bei negativer Polarität, wenn sich Partikel am Innenleiter befinden. Dort gibt es stellenweise Querschnittsveränderungen, wo naturgemäß höhere Feldstärken auftreten, vor allem im Bereich von Isolatoren. Das bedeutet, dass gerade in der Nähe von Isolatoren die Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Partikeln bei negativer Polarität erheblich größer ist. Zum einen können Partikel durch ihre Teilentladungen zusätzlich Ladungen auf die Isolatorenoberfläche bringen, und zum anderen könnten Partikel auf die Isolatorenoberfläche gelangen und dort die Isolationsfestigkeit der Grenzfläche mindern. Das

bedeutet, dass die negative Polarität der wesentlich kritischere Fall ist als jener der positiven Polarität.

Ausblick: Aufgrund der Problematik von frei beweglichen Partikeln ergibt sich daher die Notwendigkeit, Maßnahmen gegen diese zu treffen. Sie sollten dort ansetzen, wo eine große Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Partikeln besteht. Da bei negativer Polarität Partikel erwartungsgemäß am Innenleiter anzutreffen sind, respektive bei positiver Polarität am Boden der Außenhülle, sollten Partikelfallen in diesen Bereichen installiert werden. Partikelfallen arbeiten meist nach dem Prinzip eines feldfreien Bereiches, in diesem sich Partikel einfinden und dort dauerhaft verbleiben. Des Weiteren können noch weiterführende Arbeiten vorgeschlagen werden, welche die Untersuchungen ergänzen würden, wie Partikeluntersuchungen mit unterschiedlichen Gasgemischen, Polaritätswechsel, spiralförmige Partikel oder nichthorizontale Lage des Innenleiters.

Literatur

- [1] U. Riechert and P. Skarby, “Entwicklung gasisolierter Systeme für die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ),” GIS Anwenderforum, 2013.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change, “The Science of Climate Change,” Contribution of Working Group I to the second Assessment Report of the IPCC, Tech. Rep., 1996.
- [3] H. Anis and K. Srivastava, “Free Conducting Particles in Compressed Gas Insulation,” Electrical Insulation, IEEE Transactions on, vol. EI-16, no. 4, pp. 327–338, Aug 1981.
- [4] Cigré WG D1.03, “Risk Assessment on Defects in GIS Based on PD Diagnostics,” Cigré, Tech. Rep., 2013.
- [5] M. Li, Influence of Conducting Particles on the SF6 Gas Gap Breakdown and Spacer Flashover in GIS, ser. Doktorsavhandlingar vid Chalmers tekniska högskola: Ny serie. Chalmers tekniska högsk., 1987.
- [6] M. Wohlmuth, Einfluss beweglicher Partikel auf das Isolationsverhalten gasisolierter Schaltanlagen, ser. Fortschritt-Berichte VDI / 21: Elektrotechnik. VDI-Verlag, 1996.
- [7] Cigré WG D1.28, “Optimized Gas-Insulated Systems by Advanced Insulation Techniques,” Cigré, Tech. Rep., 2014.
- [8] S. Leijon, Diagnosis and Classification of Metallic Particles in GIS: Laboratory Work and On-site Measurements, ser. Doktorsavhandlingar vid Chalmers Tekniska Högskola. School of Electrical and Computer Engineering, Chalmers tekniska högskola, 1987.
- [9] A. H. Cookson, “Gas-Insulated Cables,” Electrical Insulation, IEEE Transactions on, vol. EI-20, no. 5, pp. 859–890, Oct 1985.
- [10] W. Mosch and W. Hauschild, Hochspannungsisolierungen mit Schwefelhexafluorid. VEB Verlag Technik Berlin, 1979.
- [11] C. Cooke, R. E. Wootton, and A. H. Cookson, “Influence of particles on AC and DC electrical performance of gas insulated systems at extra-high-voltage,” Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, vol. 96, no. 3, pp. 768–777, May 1977.
- [12] Cigré WG D1.03, “Gas Insulated Systems for HVDC: DC Stress at DC and AC Systems,” Cigré, Tech. Rep., 2012.
- [13] K. Grote and J. Feldhusen, Dubbel. Springer, 2007.
- [14] A. H. Cookson, O. Farish, and G. Sommerman, “Effect of Conducting Particles on AC Corona and Breakdown in Compressed SF6,” Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, vol. PAS-91, no. 4, pp. 1329–1338, July 1972.
- [15] T. Berg, C. Müller, T. Malcher, M. Muhr, and D. Imamovic, “Influence of Particles on DC Dielectric Performance of Insulating Gas (SF6),” in 18th International Symposium on High Voltage Engineering, 2013.
- [16] T. Hasegawa, K. Yamaji, M. Hatano, F. Endo, T. Rokunohe, and T. Yamagiwa, “Development of Insulation Structure and Enhancement of Insulation Reliability of

- 500 kV DC GIS,” Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 12, no. 1, pp. 194–202, Jan 1997.
- [17] S. Zhang, M. Morcos, H. Anis, S. Gubanski, and K. Srivastava, “The Impact of Electrode Dielectric Coating on the Insulation Integrity of GIS/GITL with Metallic Particle Contaminants,” Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 17, no. 2, pp. 318–325, Apr 2002.
- [18] R. Piccin, “Partial Discharge Analysis in HVDC Gas Insulated Substations,” Ph.D. dissertation, TU Delft, 2013.
- [19] Cigré WG D1.03, “Effects of Particles on GIS Insulation and the Evaluation of Relevant Diagnostic Tools 15-103,” Tech. Rep., 1994.
- [20] K. Asano, R. Hishinuma, and K. Yatsuzuka, “Bipolar Corona Discharge From a Floating Filamentary Particle Between Parallel Plate Electrodes,” in Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE, vol. 1, 2000, pp. 606–609 vol.1.
- [21] K. Asano, K. Anno, and Y. Higashiyama, “The Behavior of Charged Conducting particles in Electric Fields,” in Industry Applications Society Annual Meeting, 1994., Conference Record of the 1994 IEEE, Oct 1994, pp. 1353–1359 vol.2.
- [22] Y. Khan, K.-I. Sakai, S. Okabe, J. Suehiro, and M. Hara, “Importance of the Consideration of Electrical Gradient Force in the Deactivation of Free Conducting Particle under DC Voltage,” in Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES, vol. 2, Oct 2002, pp. 904–908 vol.2.
- [23] G. Hilgarth, Hochspannungstechnik, ser. Leitfaden Der Elektrotechnik. Vieweg+Teubner Verlag, 1997.
- [24] A. Schwaiger, Beitrag zur elektrischen Festigkeitslehre, ser. Mitteilung aus dem Hochspannungslaboratorium des Elektrotechnischen Instituts der Technischen Hochschule Karlsruhe. Hochspannungslaboratorium, 1922.
- [25] H. Prinz, Hochspannungsfelder. R. Oldenbourg, 1969.
- [26] A. Schwab, Begriffswelt der Feldtheorie. Springer, 2013.
- [27] K. Küpfmüller, W. Mathis, and A. Reibiger, Einführung in die theoretische Elektrotechnik, ser. Springer-Lehrbuch. Springer, 1984.
- [28] R. Arora and W. Mosch, High Voltage and Electrical Insulation Engineering, ser. IEEE Press Series on Power Engineering. Wiley, 2011.
- [29] S. I. Bektas, O. Farish, and M. Hizal, “Computation of the Electric Field at a Solid/Gas Interface in the Presence of Surface and Volume Charges,” Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education - Reviews, IEE Proceedings A, vol. 133, no. 9, pp. 577–586, December 1986.
- [30] F. Messerer, Gas Insulated Substation (GIS) for HVDC, ser. Fortschritt-Berichte VDI / 21: Elektrotechnik. VDI-Verlag, 2002.
- [31] H. Koch, Gas Insulated Transmission Lines (GIL), ser. EngineeringPro collection. Wiley, 2011.
- [32] U. Straumann, M. Schuller, and C. Franck, “Theoretical Investigation of HVDC Disc Spacer Charging in SF₆ Gas Insulated Systems,” Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, vol. 19, no. 6, pp. 2196–2205, December 2012.

- [33] S. Qin and S. Boggs, "Design Considerations for High Voltage DC Components," Electrical Insulation Magazine, IEEE, vol. 28, no. 6, pp. 36–44, Nov 2012.
- [34] B. Lutz, Einflussfaktoren auf die elektrische Feldverteilung in Isoliersystemen mit polymeren Isolierstoffen bei Gleichspannungsbelastung, ser. Berichte aus der Energietechnik. Shaker, 2011.
- [35] C. Cooke, "Charging of Insulator Surfaces by Ionization and Transport in Gases," Electrical Insulation, IEEE Transactions on, vol. EI-17, no. 2, pp. 172–178, April 1982.
- [36] K. Nakanishi, A. Yoshioka, Y. Arahata, and Y. Shibuya, "Surface Charging On Epoxy Spacer At Dc Stress In Compressed SF6 Gas," Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, vol. PAS-102, no. 12, pp. 3919–3927, Dec 1983.
- [37] D. Imamovic, "Umweltfreundliche Isoliergase für gasisolierte Leitungen zur Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung," Ph.D. dissertation, Technische Universität Graz, 2011.
- [38] G. Raju, Dielectrics in Electric Fields, ser. Power engineering. Taylor & Francis, 2003.
- [39] F. Messerer and W. Boeck, "Field Optimization of an HVDC-GIS-Spacer," in Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1998. Annual Report. Conference on, vol. 1, Oct 1998, pp. 15–18 vol. 1.
- [40] M. El Bahy, S. A. Ward, R. Morsi, and M. Badawi, "Particle-Initiated Breakdown in Gas-Insulated Co-Axial Configuration," in Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2011 Annual Report Conference on, Oct 2011, pp. 722–727.
- [41] T. Berg, M. Zamani, M. Muhr, and D. Imamovic, "Investigations of Conductive Particles in Gas Insulated Systems under DC-Conditions," in Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2013 IEEE Conference on, Oct 2013, pp. 1000–1003.
- [42] J. Laghari and A. H. Qureshi, "A Review of Particle-Contaminated Gas Breakdown," Electrical Insulation, IEEE Transactions on, vol. EI-16, no. 5, pp. 388–398, Oct 1981.
- [43] A. M. Imano and K. Feser, "Einfluß einer leitfähigen Störstelle auf einem Stütziolator auf das Überschlagsverhalten in reinem N₂-Gas und in SF₆/N₂-Gemischen," in Einfluß von Grenzflächen auf die Lebensdauer elektrischer Isolierungen. ETG-Fachtagung, 1999.
- [44] S. Tenbohlen and G. Schröder, "Der Einfluß von Oberflächenladungen auf die Entladungsentwicklung an Stützern unter SF₆," in Einfluß von Grenzflächen auf die Lebensdauer elektrischer Isolierungen. ETG-Fachtagung, 1999.
- [45] Hochspannungs-Prüftechnik, Teilentladungsmessungen, IEC EN 60270 Std.
- [46] A. Küchler, Hochspannungstechnik: Grundlagen - Technologie - Anwendungen, ser. VDI-Buch. Springer, 2005.
- [47] G. Wanninger, Ultrahochfrequente Teilentladungssignale in gasisolierten Schaltanlagen (GIS). VDI-Verlag, 1998.
- [48] M. Lerchbacher, "Teilentladungen (TE) bei Generatorstab-Isoliersystemen," Ph.D. dissertation, Technische Universität Graz, 2014.

- [49] R. Schwarz, Messtechnik und Diagnostik an elektrischen Betriebsmitteln. TU Graz, 2009.
- [50] J. Twittmann, C. Balkon, U. Broniecki, W. Kalkner, T. Nentzl, M. Schuchardt, and R. Plath, "Optimierung von Prüfaufbauten bei Teilentladungsmessung unter Höchstspannungs-DC-Beanspruchungen," ETG FACHBERICHTE;, vol. ETG-Fachtagung, Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, 2012.
- [51] I. J. Seo, J. Y. Koo, Y. J. Lee, B. W. Lee, J. T. Kim, and J. H. Lee, "Identification of Insulation Defects by modified Chaotic Analysis of Partial Discharge under DC Stress," CIGRÈ Main Session, 2012.
- [52] K. Rethmeier, M. Krüger, A. Kraetge, A. Kückler, M. Liebscher, and C. Krause, "Neue Ansätze zur Interpretation von Teilentladungsmessungen bei DC Prüfspannung," Internationaler ETG-Kongress 2009, 2009.
- [53] J. Beyer, Space Charge and Partial Discharge Phenomena in High Voltage DC Devices, 2002.
- [54] C. Müller, "Leitfähige Partikel im homogenen elektrischen Gleichspannungsfeld," Master's thesis, Technische Universität Graz, 2012.
- [55] M. Zamani, "Das Verhalten von Partikeln im quasihomogenen Gleichfeld," Master's thesis, Technische Universität Graz, 2013.
- [56] A. G. Sellars, O. Farish, and B. Hampton, "Assessing the Risk of Failure due to Particle Contamination of GIS using the UHF Technique," Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, vol. 1, no. 2, pp. 323–331, Apr 1994.
- [57] H. Parekh, K. Srivastava, and R. G. Van Heeswijk, "Lifting Field of Free Conducting Particles in Compressed SF6 with Dielectric Coated Electrodes," Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, vol. PAS-98, no. 3, pp. 748–758, May 1979.
- [58] M. Morcos, S. Zhang, K. Srivastava, and S. Gubanski, "Dynamics of Metallic Particle Contaminants in GIS with Dielectric-Coated Electrodes," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 15, no. 2, pp. 455–460, Apr 2000.
- [59] I. Bortnik and C. Cooke, "Electrical Breakdown and the Similarity Law in SF6 at Extra-High-Voltages," Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, vol. PAS-91, no. 5, pp. 2196–2203, Sept 1972.
- [60] M. Morcos and K. Srivastava, "On Electrostatic Trapping of Particle Contamination in GITL Systems," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 7, no. 4, pp. 1698–1705, Oct 1992.
- [61] Y. Khan, K.-I. Sakai, E. Lee, J. Suehiro, and M. Hara, "Motion Behavior and Deactivation Method of Free-Conducting Particle Around Spacer Between Diverging Conducting Plates Under DC Voltage in Atmospheric Air," Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, vol. 10, no. 3, pp. 444–457, June 2003.
- [62] S. Dale and M. Hopkins, "Methods of Particle Control in SF6 Insulated CGIT Systems," Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, vol. PAS-101, no. 6, pp. 1654–1663, June 1982.
- [63] M. Ouyang, "A System Approach to Particle Control for HVDC GITL," Gaseous Dielectrics IV: Proceedings of the Fourth International Symposium on Gaseous Dielectrics, Knoxville, Tennessee, U.S.A., April 29-May 3, 1984, no. v. 4, 1984.

- [64] J. Trump, "Dust precipitator," United States of America Patent 3,515,939, June 2., 1970.