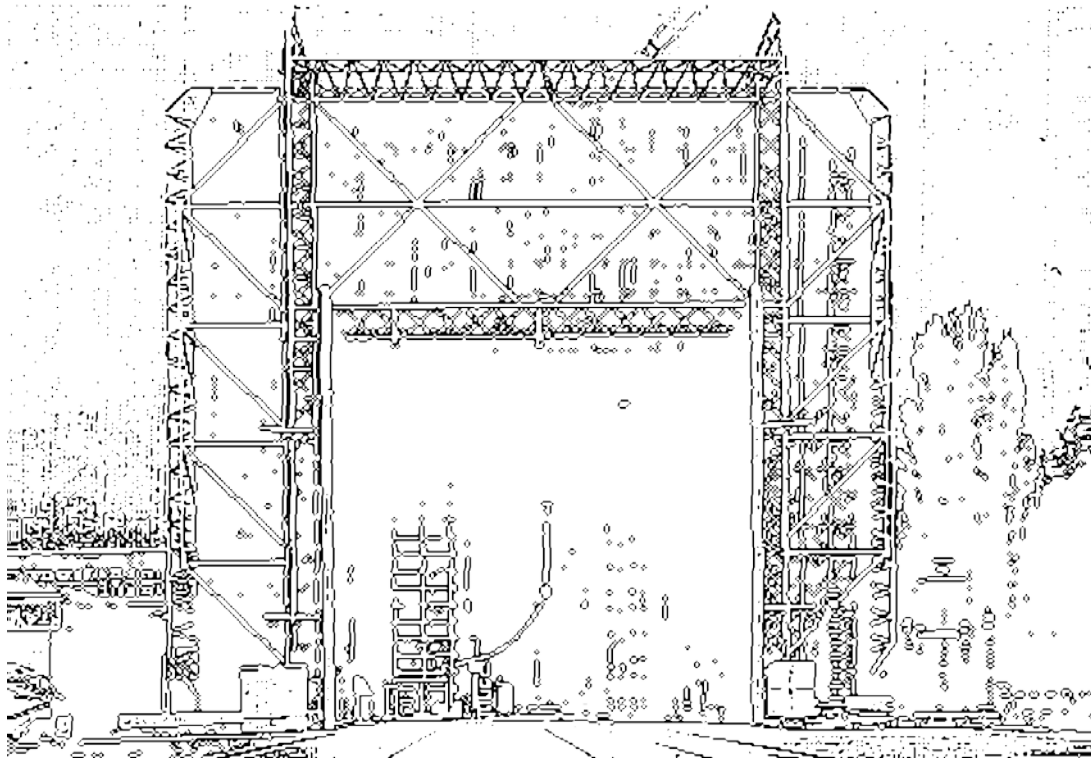


Technische Universität Graz

Masterarbeit



INSNTITUT FÜR HOCHSPANNUNGSTECHNIK
UND SYSTEMMANAGMENT

Masterarbeit

Technische Universität Graz

Das Verhalten von Partikeln im quasihomogenen Gleichfeld



INSTITUT FÜR HOCHSPANNUNGSTECHNIK UND SYSTEMMANAGEMENT

Dezember 2013

Begutachter: Em.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Hans Michael Muhr

Betreuer: Dipl.-Ing. Thomas Berg

Verfasser: Mohammad Zamani

EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die den Benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 19.12.2013

Unterschrift

STATUTORY DECLARATION

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

Graz 19.12.2013

signature

تقدیم بہ پدرم و مادرم

(Für meine Eltern)

Kurzfassung

Gasisolierte Systeme sind seit Jahren in der Hochspannungstechnik im Einsatz. Sie bewähren sich durch ihre hohe Zuverlässigkeit. Trotz dieser Eigenschaft ist sie von verschiedenen Defekten gefährdet. Dabei stellen frei bewegliche Partikel eines der häufigsten kritischen Probleme dar. Die Partikel können während der Herstellung oder aufgrund von Abreibung und Beschädigungen am Innenleiter oder auch Außenleiter resultieren. Weil sich das Verhalten der Partikel unter DC-Beanspruchung sich sehr von der AC-Spannung unterscheidet, muss es genauer untersucht werden. In dieser Arbeit wurde die Bewegung der freien Partikel bei einer realistischen Elektrodenanordnung in einem quasihomogenen Feld unter DC-Beanspruchung mittels einer CCD-Kamera beobachtet. Um eine optimierte Feldverteilung zu erhalten, wurden verschiedene Elektrodenanordnungen mittels eines FEM-Programms simuliert und bei den Experimenten verwendet wurden. Bei den Messungen wurde versucht, den Einfluss bekannter Parameter wie Partikellänge und Gasdruck auf die Bewegung der Partikel bei verschiedenen Gleichspannungspolaritäten genauer zu betrachten. Eine statistische Auswertung wurde zusätzlich durchgeführt, um die gemessenen Parameter vergleichen zu können.

Schlüsselwörter: Gasisolierte Leitung, SF₆, Partikelverhalten, quasihomogenes Feld

Abstract

Gas insulated systems have proven to be reliable in high voltage techniques for many years. Despite of high security of supply, they are at risk of various defects. Thereby providing free moving particles is one of the most critical problems. The contamination of these particles can be inferred from mechanical abrasion and enclosure damage during assembly. Due to the different particle behaviour under DC compared to AC-condition, it must be investigated more accurately. In this study, the particle movement in a real gas insulated line or a quasi-homogeneous field under DC-condition was observed by using on optimized electrode arrangement and a CCD Camera. To achieve an optimized field distribution, simulations by a FEM-program were undertaken as well as different electrode forms were used in the experiments. For more details an attempt was made to monitor the influence of known parameters such as particles length and gas-pressure on the particle movement. Also a PD-measurement was performed. Additionally a statistical evaluation has been made to compare the measured results.

Keywords: Gas insulated Line, SF₆, particle behaviour, quasi homogeneous field

Danksagung

Zunächst bedanke ich mich bei Herrn **Em.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Hans Michael Muhr** für seinen angenehmen und zuvorkommenden Führungsstil und für das Angebot, eine interessante und spannende Arbeit wie diese durchführen zu können und mich weiterbilden zu dürfen.

Weiters möchte ich meinem geduldigen Betreuer Herrn **Dipl.-Ing Thomas Berg** für die vielen kollegialen kurzen und langen Besprechungen, sowie für die hervorragende Unterstützung meiner Masterarbeit meinen besten Dank aussprechen. Ohne diese Unterstützungen wäre meine Arbeit kaum zu bewältigen gewesen.

Natürlich vergesse ich nicht, mich bei Herrn **Dipl.-Ing. Dr.techn. Univ.-Doz. Christof Sumereder** und Herrn **Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Rudolf Woschitz** für die wissenschaftliche Hilfestellung zu bedanken.

Abschließend möchte ich mich bei Herrn **Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stephan Pack** und Herrn **Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Kurt Preis** für ihre Unterstützung bedanken.

Mohammad Zamani

Dez. 2013

1 Inhaltsverzeichnis

2	Einleitung	10
2.1	Aufgabestellung.....	11
3	Elektrische Gleichfelder	12
3.1	Homogenes Feld.....	13
3.2	Inhomogenes Feld	15
3.3	Quasihomogenes Feld.....	16
3.4	Frei bewegliche Partikel in einem elektrisch beanspruchten Feld.....	21
4	Grundlagen der Gasentladungen homogener und inhomogener Felder (selbstständige Entladungen)	23
4.1	Elektronegativität.....	24
4.2	Townsend-Effekt (Generationsmechanismus).....	25
4.3	Stabile Teilentladungen.....	25
4.4	Einfluss der Oberflächenrauigkeit.....	28
4.5	Feste Isolierstoffe in Gasräumen.....	29
5	Messschaltungen	34
5.1	30kV-Schaltung.....	34
5.2	100kV-Schaltung.....	35
5.3	200kV-Schaltung.....	36
6	Untersuchungen des Partikelverhaltens	38
6.1	Allgemeines	38
6.2	Übersicht auf Versuche und Zeitaufwand.....	40
6.3	Kugel-Platte-Anordnung.....	41
6.4	Messergebnisse.....	44
6.4.1	Abhebefeldstärken und Teilentladungsmessung.....	44
6.4.2	Vergleich mit der homogenen Anordnung.....	46
6.5	Optimierte Anordnung.....	47
6.5.1	Messaufbau	47
6.6	Messergebnisse.....	50
6.6.1	Abhebefeldstärke und Teilentladungsmessung.....	50
6.6.2	Einfluss der Partikellänge	50
6.6.3	Einfluss der verschiedenen Drücke	53

6.6.4	Partikelverhalten	55
6.6.5	Diskussion.....	59
7	Zusammenfassung	60
8	Weiterführende Arbeit	61
8.1	Allgemeines	61
8.2	Isolierschicht.....	63
8.3	Platte-Platte-Anordnung	64
8.4	Beschichtete optimierte Anordnung.....	65
8.4.1	Messergebnisse	66
8.5	Partikelverhalten	69
9	Literaturverzeichnis	70
Anhang	71

2 Einleitung

Metallgekapselte gasisolierte Schaltanlagen sind seit über 40 Jahren im Einsatz und finden aufgrund ihrer vielfältigen Vorteile gegenüber konventionellen Hochspannungsanlagen in zunehmendem Maß Verwendung. (vgl. hierzu: Wohlmuth, 1996). Durch den Begriff „gasisoliert“ wird zum Ausdruck gebracht, dass als Isoliermedium innerhalb der Schaltfelder nicht atmosphärische Luft genutzt wird. (vgl. hierzu: ABB Schaltanlagen-Handbuch, 2012). Die hohe elektrische Festigkeit und die gute Lichtbogenlöschfähigkeit haben zur breiten Anwendung des Isoliergases SF₆ geführt. Durch Metallgekapselte Bauweise mit erhöhtem Isoliergasdruck im Inneren und den vielseitigen Anlagenaufbau kann der Raumbedarf einer Anlage auf den Bruchteil einer konventionellen Freiluftschaltanlage reduziert werden. Vor allem in Ballungsgebieten stellen diese Anlagen eine ökonomische und platzgerechte Komponente der Energieversorgung dar. Die Kapselung macht SF₆-isolierte Anlage weitgehend unempfindlich gegen Verschmutzungen und extreme klimatische Einflüsse und bietet zudem einen zuverlässigen Schutz gegen Berührung. Eine weitere Form von gasisolierten Systemen ist die sogenannte gasisolierte Leitung. Diese wird hauptsächlich zur Übertragungsleitung großer Leistungen bei Kraftwerksausleitungen oder als Verbindungsleitung in Schaltanlagen verwendet. Die Vorteile einer GIL sind im wesentlichen jenen eines GIS.

Vorteile der gasisolierten Leitungen: (vgl. hierzu: Koch, 2012)

- Kompakte Bauweise
- Geringe Verluste
- Niedrige kapazitive Impedanz
- Hohe Nennleistung
- Hohe Zuverlässigkeit
- Hohe Sicherheit gegen Berührung
- Lange Lebensdauer
- Keine thermische Alterung
- Niedrige Beanspruchung durch elektromagnetische Felder

Trotz vieler Vorteile können jedoch Defekte auftreten, welche die Isolationsfestigkeit mindern. Typische Defekte sind in Tabelle 1 dargestellt:

- Spitzen an Hochspannungselektrode
- Spitzen am Außenleiter
- Frei bewegliche Partikeln
- Partikeln am Isolator
- Hohlräume im Isolator

type of defect	critical defect		detectable length of defect at U_n
	length	apparent charge according to IEC 60270	
moving particle	3 - 5 mm	2 - 10 pC	3 - 5 mm
protrusion on HV conductor	around 1 mm	1 - 2 pC	3 - 4 mm
protrusion on enclosure	4 - 6 mm	2 pC	10 - 15 mm
particle on insulation	1 - 2 mm	about 0.5 pC	3 - 10 mm depending on location
Void	3 - 4 mm (diameter)	1 - 2 pC	2 - 3 mm depending on location

Tabelle 1: kritische und detektierbare Defektlänge der gasisolierten Leitungen (Cigre 525, February 2013)

Frei bewegliche Partikeln stellen einen der häufigsten Defekte dar. Sie können von der mechanischen Bearbeitung der Anlagenteile bei der Fertigung und von der Montage der einzelnen Komponenten zurückbleiben oder während des Betriebs durch Antrieb von beweglichen Kontakten bei Schalthandlungen entstehen. Ein metallisches Partikel, das sich in leitfähigem Kontakt mit der geerdeten Kapselung der in weiten Teilen horizontal aufgebauten Anlagen befindet, nimmt von dieser im elektrischen Feld eine gleichnamige Ladung an. Somit wirkt eine elektrostatische Kraft auf das geladene Partikel. (vgl. hierzu: Wohlmuth, 1996)

Deren Auswirkungen auf die Durchschlagspannung sind besonders gravierend, jedoch ist die der dabei wirkende Mechanismus außerordentlich kompliziert. Elektrische Entladungsprozesse sind mit komplizierten Bewegungsvorgängen der Partikel verknüpft, sodass die Systematisierung der auftretenden Erscheinungen erhebliche Schwierigkeiten bereitet. (vgl. hierzu: Mosch & Hauschild, 1979)

2.1 Aufgabestellung

Diese Masterarbeit wurde am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement an der Technischen Universität Graz erstellt.

Das Verhalten der Partikeln in einem homogenen Feld wurde schon vorher untersucht. Ziel dieser Arbeit ist das Partikelverhalten in einer im Kleinversuch realistischen Anordnung zu untersuchen. Deshalb wurde versucht, die im Labor verwendeten Elektroden einer realen gasisolierten Leitung anzunähern. Verschiedene Parameter wurden während der Versuche geändert, um deren Zusammenhang mit den bekannten Parametern des elektrischen Feldes zu untersuchen. Die gemessenen Werte, welche im Versuch ermittelt wurden, konnten durch eine numerische Feldberechnung gut erklärt werden. Es wurden zwei verschiedenen Anordnungen geprüft: Kugel-Platte, optimierte Anordnung. Außerdem wurde eine Literaturrecherche durchgeführt, um die vorkommenden Phänomenen theoretisch erklären zu können.

3 Elektrische Gleichfelder

Betrachten wir N Ladungen $q_1 \dots q_N$, die an den Orten $r_1 \dots r_N$ ruhen, erfährt eine weitere Ladung q bei r die Kraft

$$F(r) = \sum_{i=1}^N q q_i \frac{r-r_i}{|r-r_i|^3} = qE(r) \quad (3.1)$$

Das Kraftfeld $F(r)$ ist ein Vektorfeld. Das Verhältnis F/q definiert das elektrische Feld $E(r)$,

$$E(r) = \frac{F(r)}{q} \quad (3.2)$$

Die Größe E wird auch elektrische Feldstärke genannt; wir sprechen aber meist kurz vom elektrischen Feld (vgl. hierzu: Fließbach, 2012).

Elektrische Quellenfelder bestehen in der Umgebung aus elektrischen Ladungen. Die Existenz dieser Felder lässt sich durch ihre Kraftwirkung auf Körper, die in die Umgebung der Ladungen gebracht werden, nachweisen. Die Feldlinien elektrischer Quellenfelder besitzen einen Anfangs- und Endpunkt, Sie entspringen bzw. enden an Quellen bzw. Senken.

Sie lassen sich Problemabhängig in verschiedene Problemklassen einteilen. Wir unterscheiden im Folgenden zwischen Newton und Laplace-Feldern (vgl. hierzu: Schwab, 2013).

- Newton-Felder existieren in der räumlich unbegrenzten Umgebung einer Ladungskonfiguration $Q_v(r)$ bzw. Raumladungsdichte $\rho(r)$. Ihr Name rührt von der Analogie mit dem Gravitationsfeld der Gestirne. Es liegen keine Ränder im Endlichen vor.
- Laplace-Felder existieren in der Umgehung von Elektroden, die eine Potentialdifferenz untereinander bzw. gegenüber ihrer Umgebung aufweisen. Die Ursachen dieser Felder liegen in der Existenz von Flächenladungsdichten σ auf den Elektroden. Die Flächenladungsdichten sind jedoch gewöhnlich nicht bekannt und werden bei der analytischen Lösung ignoriert. Stattdessen sind die Geometrien der Elektroden gegeben, so genannte Randwertprobleme.

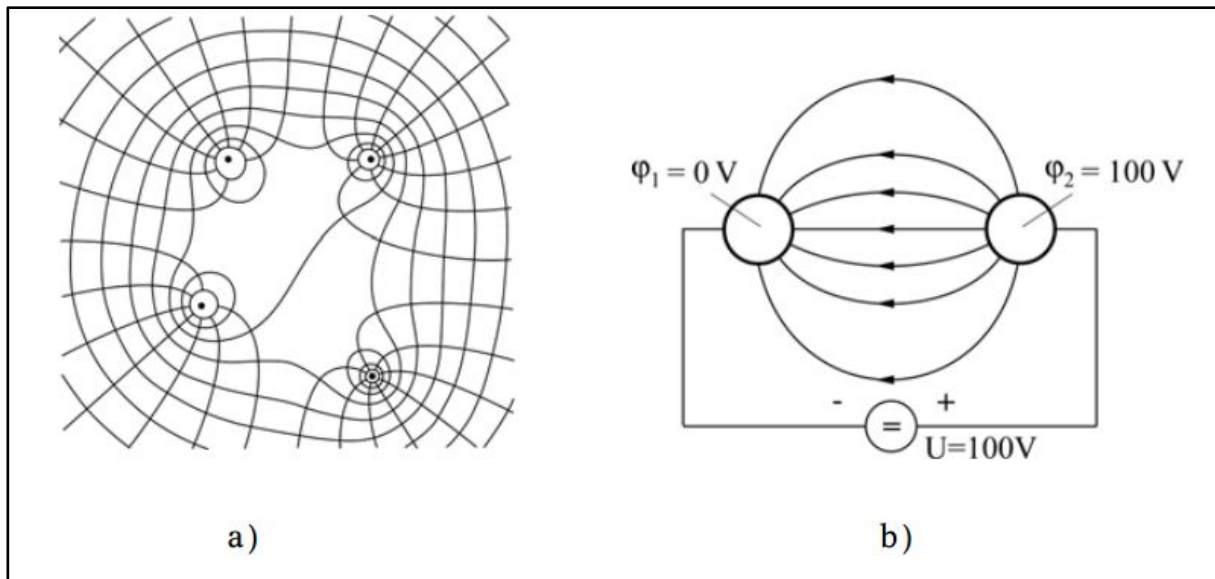


Abbildung 1: Elektrische Quellenfelder, a) *Newton*-Feld einer gegebenen Linienladungsverteilung $Q_V(r)$ bzw. Raumladungsdichte $\rho(r)$ ohne Ränder im Endlichen, b) *Laplace*-Feld zwischen zwei mit einer Spannungsquelle verbundenen Elektroden mit gegebenen Potentialen $\phi_1=0\text{V}$ und $\phi_2=100\text{V}$, so genanntes *Randwertproblem*. (Schwab, 2013)

Der Homogenitätsgrad (auch als Ausnutzungsfaktor oder Faktor von Schwaiger bekannt) einer Elektrodenanordnung wird mittels Formel (2.3) definiert. Manchmal wird auch der Reziprokwert anstatt des Inhomogenitätsgrades $1/\eta$ verwendet. Ist $\eta = 1$, handelt es sich um ein homogenes Feld. Im stark inhomogenen Feld ist $\eta \ll 1$ (vgl. hierzu: Crastan, 2011).

$$\eta = \frac{E_m}{E_{max}} \tag{3.3}$$

- η Homogenitätsgrad
- E_m mittlere Feldstärke
- E_{max} maximale Feldstärke

Das Design gasisolierter Rohrleiter lässt die Annahme einer quasi-homogenen Feldverteilung zu, welche einer Felddausnutzung von ca. 65% entspricht (vgl. hierzu: Imamovic, 2011).

3.1 Homogenes Feld

Zwischen zwei ebenen parallelen Elektroden im Abstand d besteht ein homogenes elektrisches Feld mit der konstanten elektrischen Feldstärke $E = \frac{U}{d}$ („Plattenkondensator“). Die Feldverzerrungen an den Elektrodenrändern sollen zunächst vernachlässigt werden. (Küchler, 2009)

Zwischen den Elektroden sind D (dielektrische Verschiebung) und dA parallel, sodass das Produkt der Vektoren durch das Produkt der Beträge ersetzt werden kann. Auf der Fläche A ist D nahezu konstant und wird vor das Integral gezogen. Die verbleibende Integration von dA über die Fläche ergibt den Wert der Fläche A : (vgl. hierzu: Küchler, 2009)

$$Q = D \iint dA = DA = \varepsilon E A \tag{3.4}$$

Q aufgenommene Ladungen
D dielektrische Verschiebung
E elektrische Feldstärke
A effektive geschlossene Fläche
 ε Permittivität

Daher ist der Betrag der elektrischen Feldstärke *E* konstant. Für alle Werte von *x* zwischen der Elektrode gilt:

$$E(x) = \frac{Q}{(\varepsilon A)} = E_0 = const. \tag{3.5}$$

E(x) Feldstärkeverlauf
E₀ Grundfeldstärke

Durch Integration der Feldstärke *E(x)* von der einen zur anderen Elektrode ergibt sich

$$U = E_0 d = \frac{\varepsilon A}{Qd} \tag{3.6}$$

U an der Elektrode angelegte Spannung
d Elektrodenabstand

Daher:

$$Q = \frac{\varepsilon A U}{d} \tag{3.7}$$

Die Kapazität des Plattenkondensators folgt aus

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{\varepsilon A}{d} \tag{3.8}$$

C Kapazität des Plattenkondensators

In einem homogenen Feld erfolgt beim Erreichen der kritischen Feldstärke *E_a* unmittelbar der Durchschlag. Die Durchschlagsspannung ist somit gleich zur Zündspannung: (vgl. hierzu: Crastan, 2011).

$$U_d = U_a = \eta a E_a \tag{3.9}$$

E_a Zündfeldstärke. charakterisiert die elektrische Festigkeit des Isoliermittels
U_d Durchschlagsspannung
a Elektrodenabstand

3.2 Inhomogenes Feld

In der Abwesenheit von Raumladungen hat die durchschnittliche elektrische Feldstärke E einen Maximalwert in einem inhomogenen Feld an der Oberfläche eines Leiters, wo sich der kleinste Radius der Krümmung befindet. Minimumwert jedoch ist dort, wo der größte Radius der Elektrode ist. (vgl. hierzu: Naidu & Kamaraju, 2009)

In der Abbildung 2 ist der Feldverlauf bei starker Inhomogenität des Feldes veranschaulicht.

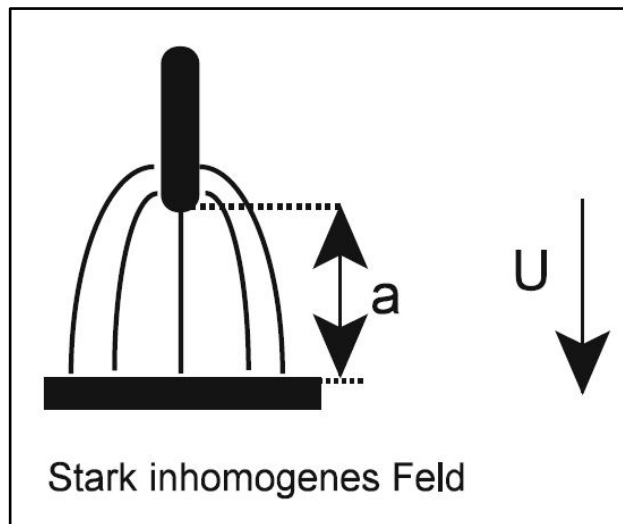


Abbildung 2: Inhomogene Felder (Crastan, 2011)

Mit a wird der kürzeste Elektrodenabstand der Schlagweite bezeichnet. Die Feldstärke ist ortsabhängig. Die maximale Feldstärke E_{max} sei durch weitere Feldberechnung ermittelt worden. Man definiert:

$$E_m = \frac{U}{a} \quad (3.10)$$

a kürzester Elektrodenabstand der Schlagweite

Im stark inhomogenen Feld treten Teildurchschläge bei der Spitze auf, wenn $E_{max} = E_a$. In Gasen tritt der Durchschlag erst bei höheren Spannungen als die TE-Einsatzspannung auf. Somit gilt: (vgl. hierzu: Crastan, 2011)

$$U_a = \eta a E_a \quad (3.11)$$

$$U_d > U_a \quad (3.12)$$

3.3 Quasihomogenes Feld

Für eine koaxiale Anordnung wie in Abbildung 3 gilt die Gleichungen:

$$E_{max} = \frac{U}{r \ln \frac{R}{r}} \tag{3.13}$$

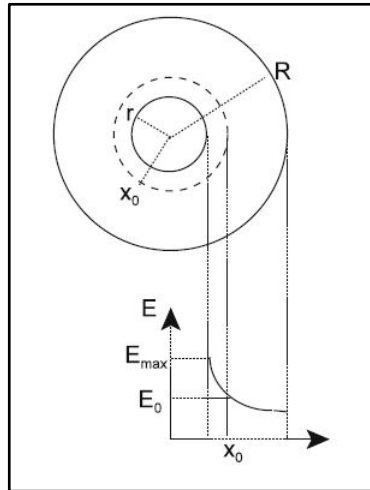


Abbildung 3: Radiale Feldstärkeverlauf im Zylinder (Crastan, 2011)

Das Feld in jedem beliebigem Punkt zwischen dem Außenmantel und Hochspannungsleiter ist gleich:

$$E(x) = \frac{U}{x \ln \frac{R}{r}} = E_{max} \frac{r}{x} \tag{3.14}$$

$$E_0 = \frac{U}{x_0 \ln \frac{R}{r}} \tag{3.15}$$

$$x_0 = \frac{U}{E_0 \ln \frac{R}{r}} = r \frac{E_{max}}{E_0} \tag{3.16}$$

- r Radius des Innenleiters
- R Radius des Außenleiters
- U Spannung des Innenleiters
- x der Punkt zwischen den Leiter
- $E(x)$ Feldstärke am Punkt x
- E_0 Grenzfeldstärke

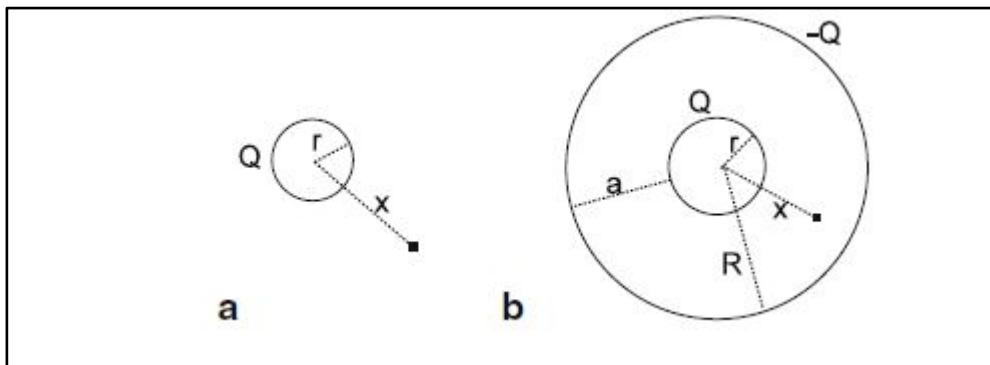


Abbildung 4: a: Kugel im homogenen Raum ,b: konzentrische Kugeln (Crastan, 2011)

Für ein Kugelfeld gilt auch analog:

$$U = \varphi_r - \varphi_R = \frac{Q}{4\pi\epsilon} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right) \tag{3.17}$$

- U Potentialdifferenz zwischen Kugeln
- φ_r Potential an der Innenkugel
- φ_R Potential an der Außenkugel
- r Radius der Innenkugel
- R Radius der Außenkugel

und

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{4\pi\epsilon}{\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R}\right)} \tag{3.18}$$

Gilt für das maximale Feldstärke:

$$E_{max} = \frac{Q}{4\pi\epsilon r^2} = \frac{U}{r^2 \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R}\right)} = \frac{U}{a r} \tag{3.19}$$

$$\eta = \frac{E_m}{E_{max}} = \frac{U}{a E_{max}} = \frac{r}{R} \tag{3.20}$$

- Q Oberflächenladungen
- C Kapazität der Anordnung
- a Radiusdifferenz
- η Homogenitätsgrad

man erhält dann für die Zündspannung des Kugel- und Zylinderfeldes:

$$U_a = E_a r \left(1 - \frac{r}{R} \right), \text{ Kugelfeld} \tag{3.21}$$

$$U_a = E_a r \ln \frac{R}{r}, \text{ Zylinderfeld} \tag{3.22}$$

Für SF₆ entspricht allgemein der lineare Ansatz:

$$\frac{\alpha^*}{\delta} = k \left(\frac{E}{\delta} - E_{0n} \right)^2 \text{ mit } \alpha^* = \alpha - \eta \quad (3.23)$$

- δ Gasdichte = $\frac{p \cdot T_0}{p_0 \cdot T}$; $T_0 = 293K$, $p_0 =$ der Druck des Gases bei der Temperatur T_0
- α Ionisierungskoeffizient
- η Anlagerungskoeffizient
- α^* effektiver Ionisierungskoeffizient
- E_{0n} Für SF₆ entspricht $E_{0n} = \frac{E_0}{\delta} = 88,8 \frac{kV}{cm}$
- E_0 Grenzfeldstärke
- k $28kV^{-1}$ bis etwa $120 \frac{kV}{cm}$

Man erhält unmittelbar vor der Zündung wegen der oben eingeführten Gleichungen:

$$\alpha^* = k \left(E_a \frac{r}{x} - E_0 \right) \quad (3.24)$$

Setzt man den Ausdruck (2.24) in der Gleichung für die Zündbedingung $\int_0^{x_0} \alpha^* dx = K$ ein, erhält man durch Integration:

$$k \left(E_a r \ln \frac{x_0}{r} - E_a (x_0 - r) \right) = K \quad (3.25)$$

Und mit dem Wert von x_0 aus der Gleichung (2.16) für das Zylinderfeld:

$$r\delta = \frac{\frac{K}{k}}{\frac{E_a}{\delta} \ln \left(\frac{E_a}{\delta E_{0n}} \right) - \frac{E_a}{\delta} + E_{0n}} \quad (3.26)$$

und dazu analog fürs Kugelfeld:

$$r\delta = \frac{\frac{K}{k}}{\frac{E_a}{\delta} - 2 \sqrt{\frac{E_a}{\delta} E_{0n} + E_{0n}}} \quad (3.27)$$

Die Abbildung 5 zeigt den Verlauf der Zündfeldstärke in Abhängigkeit von $r\delta$ für beide Anordnungen (Kugel- und Zylinderfeld). Die beiden Kurven zeigen für gleiche Krümmung etwa den gleichen Wert:

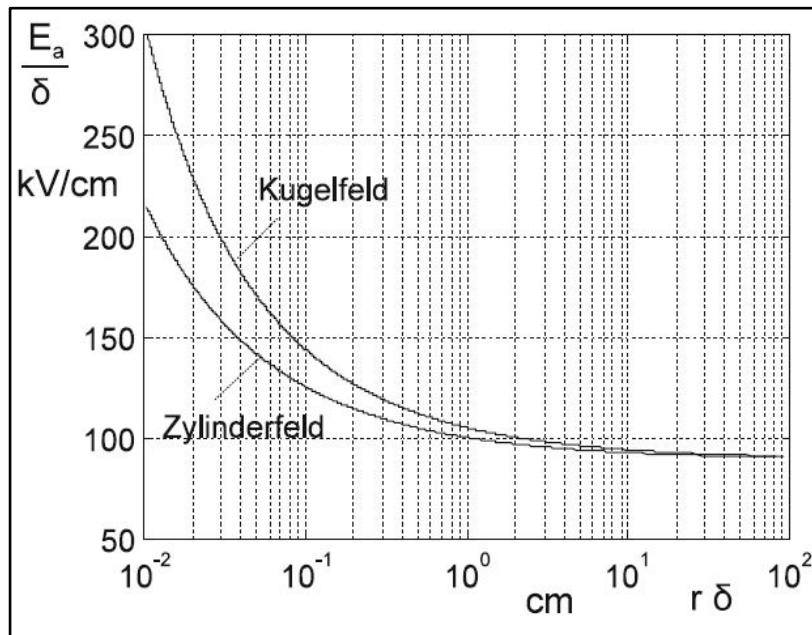


Abbildung 5: Zündfeldstärke von SF₆ im Zylinder und Kugelfeld $E_{0n} = 89.6$ kV/cm, $K/k = 0.65$ 1/kV (Crastan, 2011)

Verschiebt man die Zylinderfeldkurve um den Faktor 2 nach rechts, deckt sie sich weitgehend mit der Kugelfeldkurve. Da bei gleichem r die mittlere Krümmung des Zylinders genau die Hälfte der Krümmung der Kugel ist, bedeutet dies, dass die Kurve für das Kugelfeld auch für das Zylinderfeld verwendet werden kann, wenn man r als mittleren Krümmungsradius interpretiert.

Dieses Resultat lässt sich verallgemeinern:

- **Mit der Kurve für das Kugelfeld kann die Zündfeldstärke beliebiger Elektrodenformen ermittelt werden, ausgehend von deren mittlerer Krümmung im Punkt maximaler Feldstärke.**

Durch das Einsetzen der Gleichungen (2.26) und (2.27) erhält man in Abbildung 6 den dargestellten Verlauf in Abhängigkeit von $r\delta$ bei konstantem $R\delta$ oder mit konstantem Parameter r/R (\approx konstanter Homogenitätsgrad) beider Felder. Im zweiten Falle ist der Verlauf annähernd linear:

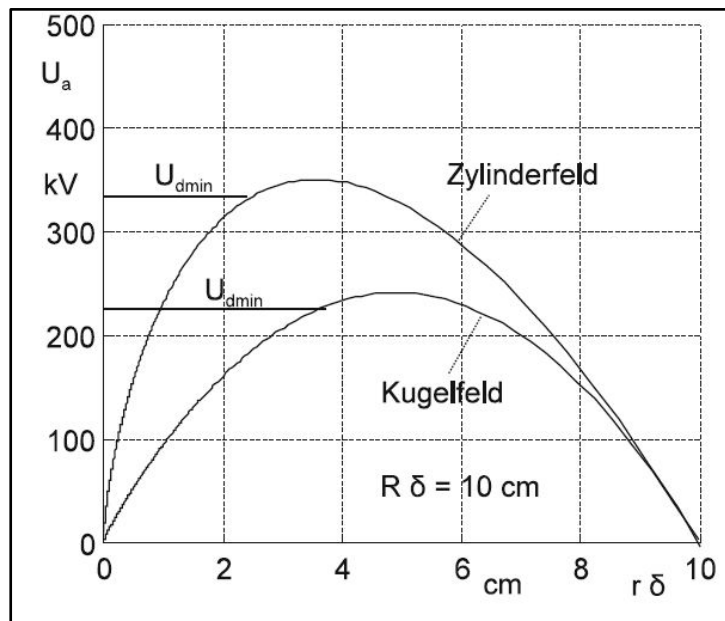


Abbildung 6: Zündspannung von SF6 im Zylinder- und Kugelfeld (Crastan, 2011)

Für die Werte oberhalb von $r/R=0,1...0,2$ ist das Feld quasihomogen und die Durchschlagsspannung identisch mit der Zündspannung. Für kleinere Werte von r/R (stark inhomogenes Feld) ist die Durchschlagsspannung höher. (vgl. hierzu: Crastan, 2011)

3.4 Frei bewegliche Partikel in einem elektrisch beanspruchten Feld

Befindet sich ein leitfähiges frei bewegliches Partikel auf einer unendlich langen elektrisch leitenden Elektrode, kann es in einem elektrischen Feld von der Elektrode elektrische Ladungen aufnehmen. Wie viele Ladungen ein Partikel aufnehmen kann, ist von seiner Oberfläche und der eingestellten elektrische Feldstärke an der Stelle, wo sich das Partikel befindet, abhängig.

Für ein zylinderförmige Partikel, das auf der Oberfläche einer Elektrode liegt gilt dann:

$$Q_{Zyl} = 2\pi\epsilon_0 r_{Zyl} l_{Zyl} E \quad (3.28)$$

Q_{Zyl} aufgenommene Ladungen
 r_{Zyl} Radius des Partikels
 l_{Zyl} Länge des Partikels
 E Feldstärke

Ab einer bestimmten Spannung, die man sich als Zündspannung von Teilentladungen für Partikel vorstellen kann, beginnt sich das Partikel zu bewegen. Diese Spannung nennt man Abhebespannung und die bezügliche Feldstärke, wo sich das Partikel befindet, wird Abhebefeldstärke genannt.

Die Abhebefeldstärke für ein zylinderförmiges Partikel ist gleich:

$$E = \sqrt{\frac{d \cdot \rho \cdot g}{2,86 \cdot \epsilon_0}} \quad (3.29)$$

E Abhebefeldstärke
 d Durchmesser des Partikels
 ϵ_0 Absolute Permittivität
 ρ Dichte des Materials der Partikel
 g Normfallbeschleunigung

Ist an der Hochspannungselektrode eine negative Spannung angelegt, nimmt das Partikel von der unteren Elektrode positive Ladungen auf und bewegt sich zu der negativen Hochspannungselektrode. Es bewegt sich an der negativen Hochspannungselektrode solange die Spannung angelegt ist. Reduziert man die Spannung, geht dieses in eine Auf- und Abbewegung (Bouncing-Motion) über.

Ist an der HSPE eine positive Spannung angelegt, nimmt das Partikel jedoch negative Ladung auf. Es erfährt eine stehende Bewegung an der unteren Elektrode. Reduziert man die Spannung erneut, reicht die elektrostatische Kraft zwischen dem Partikel und der unteren Elektrode nicht mehr aus, um das Partikel auf der negativen Elektrode zu halten. Das Partikel erfährt deshalb auch in dem Fall eine Auf- und Abbewegung.

Wenn ein Partikel in einem elektrischen Feld auf der blanken unteren Elektrode liegt, wirken auf dieses folgende Kräfte:

- Gravitationskraft
- Viskositätskraft
- Elektrostatische Kräfte

Aufladung der Partikel durch Firefly-Effekt

In gasförmigen Isoliermedien bilden sich durch elektrische Entladungen „Entladungswolken“, die das elektrische Feld sehr stark verändern. Auch in flüssigen und festen Isolierstoffe können unter der Wirkung elektrischer Beanspruchung Raumladungen entstehen. Befindet sich ein leitfähiges Partikel auf einer Metallkapselung, für den Fall, wenn die innere Elektrode eine negative Polarität hat, so nimmt das Partikel bei genügend hoher Feldstärke positive Ladungen von der Metallkapselung auf und fliegt zu der negativen Innenelektrode. Es gibt auch die positiven Ladungen an der negativen Innenelektrode ab und nimmt dabei negative Ladungen auf. Ist die Feldstärke hoch genug, sodass die Festigkeit des Isoliergases an der Spitze des Partikels überschritten wird, führt es zur Teilentladung. Es entstehen damit negative und positive Ladungsträger. Die positiven Ionen wandern zur Innenelektrode, die Elektronen hingegen zur Metallkapsel. Aufgrund von gleichnamigen Ladungen wird das Partikel wieder von der Innenelektrode abgestoßen. Es bewegt sich auf die Metallkapsel zu. Es befindet sich dann in der positiven Raumladungswolke, welche durch Ionisation entstanden ist. Es gibt deshalb seine negativen Ladungen ab und nimmt positive Ladungen auf. Aufgrund der anderen Polarität bewegt es sich wieder zu dem Innenleiter. Zum Zeitpunkt des Kontaktes mit der Innenelektrode kommt es dabei zu Leuchterscheinungen.

Ist aber an der Innenelektrode eine positive Spannung angelegt und befindet sich das Partikel an der Innenelektrode, entstehen aufgrund von Teilentladungen und Elektronenanlagerung an der SF_6 Moleküle negative Ionen. Die positiven Ionen befinden sich in diesem Fall an der negativen Außenelektrode. Befindet sich das Partikel freischwebend im Gasraum, kommt es zuerst in die negative Ladungswolke, das sich dann zu der Innenelektrode bewegt. Das Partikel gibt dann seine positiven Ladungen ab und wird wieder negativ aufgeladen. Es fliegt deshalb wieder aufgrund der elektrostatischen Kraft zu der Innenelektrode. Der Vorgang wird wiederholt, solange eine Spannung angelegt ist. (vgl. hierzu: Diessner & Trump, NOVEMBER/DECEMBER 1970)

4 Grundlagen der Gasentladungen homogener und inhomogener Felder (selbstständige Entladungen)

Gase sind unter der Wirkung niedriger elektrischer Feldstärken vergleichsweise sehr gute Isolierstoffe mit niedrigen Verlusten, niedriger Leitfähigkeit und einer nahezu frequenzunabhängigen relative Dielektrizitätszahl ϵ_r . Gase sind deshalb, insbesondere in Form der uns umgebenden Luft, der "naturegegebene" Isolierstoff schlechthin. Flüssige und feste Isolierstoffe sind aus elektrischer Sicht dann erforderlich, wenn die elektrische Festigkeit des Gases nicht ausreichend ist.

Im homogenen Feld und in einem niederohmigen Stromkreis führt das Erreichen der Zündspannung unmittelbar zu einem sehr starken Stromanstieg und zum Zusammenbruch der Spannung. Es kommt demnach zum Durchschlag. Es ist in diesem Fall die Zündspannung U_z^1 gleich der Durchschlagspannung U_D . In einem Stromkreis mit Strombegrenzung (durch einen Widerstand oder durch einen feldschwachen Bereich eines stark inhomogenen Feldes) ergibt sich bei Erreichen der Zündspannung einen stabilen Entladungszustand, ohne das es zum Durchschlag kommt. Diese Vorentladungen werden wegen der damit verbundenen Leuchterscheinungen auch als „Glimmen“ oder als „Glimmentladung“ bezeichnet. Daher ist in diesem Fall die Zündspannung U_z gleich der Einsatzspannung U_e für Vorentladungen oder Teilentladungen. Welche Entladungsformen sich einstellt, hängt von der Höhe der Quellenspannung und des Widerstandes im Stromkreis ab. In einem stark inhomogenen Feld wird die Zündbedingung für Gasentladungen beim Steigen der Spannung zunächst nur in einem sehr kleinen beanspruchten Feldvolumen unmittelbar vor stark gekrümmten Elektrodenkonturen erreicht. Die einsetzenden Entladungen können sich wie im homogenen Feld über die gesamte Isolationsstrecke ausbilden. Es kommt zu Vorentladungen bzw. äußere Teilentladungen. Dabei werden Spitzen, Kanten und Leiter mit kleinen Radien von einer sichtbaren Leuchterscheinung umhüllt. Schließlich kommt es zum Durchschlag der gesamten Isolationsstrecke mit einer nachfolgenden Bogen- der Funkenentladung. (vgl. hierzu: Küchler, 2009)

In homogenen und schwach inhomogenen Feldern führt das Einsetzen selbstständiger Entladungen unmittelbar zum vollständigen Durchschlag, während in stark inhomogenen Feldern die Entladungen durch eine extrem ungleichmäßige Feldstärkeverteilung als Teilentladungen räumlich stabilisiert werden. Da für SF_6 -Isolierungen ausschließlich schwach inhomogene Felder vorzusehen sind, können dafür die nachfolgend behandelten Bedingungen für den selbstständigen Entladungseinsatz als Durchschlagbedingungen gelten (vgl. hierzu: Mosch & Hauschild, 1979).

¹ Zündspannung: Durch Stoßionisation erzeugten Ladungsträger bzw. Stromanstieg unter selbstständiger Entladung aufgrund der konstanten hohen angelegten Feldstärke.

4.1 Elektronegativität

Die Elektronegativität ist ein Maß fürs Bestreben eines Atoms, die Elektronen einer Elektronenpaarbindung, an der das Atom beteiligt ist, an sich zu ziehen. Je größer die Differenz der Elektronegativitätswerte zweier Atome A und B ist, desto stärker ist der ionische Charakter der Bindung A-B. Die Elektronegativitätsskala reicht von 0.7 (Caesium und Francium) bis 4 (Fluor). Fluor mit der deutlich stärksten Elektronegativität wird gefolgt von Sauerstoff(3,5). Die Elektronegativität ermöglicht eine grobe Unterscheidung zwischen Metallen, Halbmetallen und Nichtmetallen. (vgl. Hierzu: Hädener & Kaufmann, 2006)

- Ist der Wert der Elektronegativität kleiner als 1.7, handelt es sich um Metalle; die Elektronenabgabe wird bevorzugt.
- Ist der Wert 1.7 bis 2.1, handelt es sich um Halbmetalle; einzelne davon sind als Halbleiter bekannt.
- Ist die Elektronegativität größer als 2.1 handelt es sich um Nichtmetalle; die Elektronenaufnahme wird bevorzugt.

In chemischen Bindungen geht die Elektronegativität zurück, jedoch zählt SF_6 immer noch zu den elektronegativen Gasen, insbesondere zur Luft. Obwohl die Luft selbst wegen der Bindungen von Sauerstoff eine hohe Elektronegativität besitzt.

Es ist für SF_6 bekannt, dass die Anlagerung eines Elektrons an dem SF_6 -Molekül bereits bei sehr geringer Elektronenenergie möglich ist, die schon ohne ein elektrisches Feld allein durch die thermische Bewegung erreicht werden kann. Nachdem das Elektron an einem SF_6 -Molekül angelagert ist, wird es durch Energieübertragung vom betroffenen Molekül entschieden ob das stabile Ion SF_6^- oder $\text{SF}_5^- + \text{F}$ gebildet wird. (vgl. hierzu: Mosch & Hauschild, 1979).

In der weiteren Folge wird eine kurze Zusammenfassung wichtigster Gasentladungsmechanismen gegeben.

4.2 Townsend-Effekt (Generationsmechanismus)

Angenommen wird eine homogene elektrische Feldverteilung und das Vorhandensein eines Startelektrons, welches z.B. durch Fremdionisation infolge äußerer Strahlung (UV-Licht, kosmische Strahlung) an der negativen Elektrode aus seiner Bindung gelöst wird. Wenn dessen kinetische Energie groß genug ist um neue Elektronen durch Zusammenstöße mit Gasmolekülen und negativer Elektrode auszulösen, ergibt sich eine Elektronenlawine. Bei weiteren Stößen der neu entstandenen Elektronen und Ionen mit den Molekülen und der Kathode werden weitere Startelektronen herausgelöst und es entstehen Folgelawinen. Dabei beeinflussen die Gaseigenschaften wie z.B. die Elektronegativität stark den beschriebenen Vorgang. Wenn das Isoliergas eine hohe Elektronegativität besitzt, überwiegt die Anlagerungsanzahl der Elektronen an den Gasmolekülen. Deshalb besitzt das Isoliergas eine hohe Isolationseigenschaft. Jedoch erfolgt der Entladungsaufbau nur bei sehr schwachen Inhomogenitäten noch nach dem Generationsmechanismus (Townsend-Effekt). Stärkere Inhomogenität (Homogenitätsgrad $< 0,9$), aber auch größere Elektrodenabstände s und höhere Isoliergasdrücke im homogenen Feld führen dazu, dass der Generationsmechanismus durch den Streamermechanismus abgelöst wird (vgl. hierzu: Mosch & Hauschild, 1979).

4.3 Stabile Teilentladungen

Streamerentladung

Wenn die Anzahl der Elektronen in einer von einem Startelektron ausgelösten Lawine reichlich genug ist, muss der Einfluss der Raumladungen, die die Grundfeldstärke des Raumes beanspruchen, herangezogen werden. Die Elektronen bleiben in dem Kopf der Lawine, die positiven Ionen jedoch in dem Lawinenschwanz. Durch erhöhte Feldstärke des Lawinenkopfes und Photoionisation aufgrund der Stoßionisation entstehen neue Startelektronen. Die genannten Lawinen können einen leitfähigen Kanal auslösen. Diese Art der Entladung kann zwischen den Elektroden mit großem Abstand einen Durchschlag verursachen.

Als Bedingung für den Streamereinsatz folgt bei nur einem Anfangselektron der Lawine und Betrachtung der Erwartungswerte $\int a^* dx \approx 10^{8,2}$ erreicht. (vgl. hierzu: Mosch & Hauschild, 1979)

² Für die Randbedingungen ist die Wegstrecke, in der eine Lawine die kritische Elektronenzahl erreicht, zu berücksichtigen.

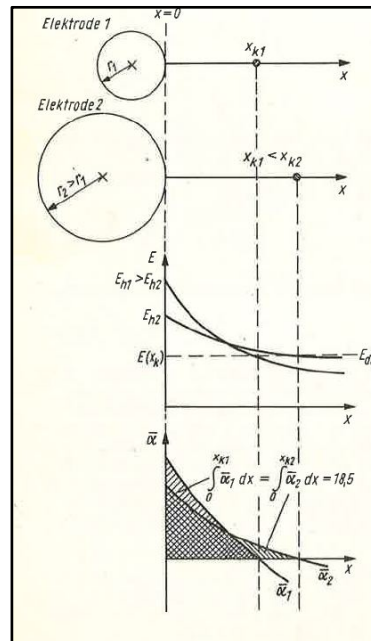


Abbildung 7: Abhängigkeit der Streamereinsatzes vor der Elektrodenkrümmung (Mosch & Hauschild, 1979)

Inhomogenitäten des Feldes durch Oberflächenrauigkeiten oder Partikel können oft eine niedrigere Grenzfeldstärke vortäuschen. Dies führt zu unterschiedlichen Angaben über die Höhe der Grenzfeldstärke. In einem inhomogenen Feld und in Gebieten mit hoher Feldstärke überwiegt die Ladungsträgerbildung durch Stoßionisation, in Gebieten niedriger Feldstärke die Anlagerung von Elektronen. Wird dabei die kritische Elektronenzahl erreicht, hat die Lawine genügend Raumladungen gebildet, um in die feldschwache Gebiete vorwachsen zu können, andernfalls ist die Zündbedingung nicht erfüllt.

Bei inhomogenen SF_6 -Isolierungen kann die kritische Elektronenzahl (zur Streamer-Bildung) schon bei verhältnismäßig kleinen Wegstrecken x erreicht werden, weil der effektive Ionisationskoeffizient bei Überschreiten der Grenzfeldstärke $(E/p)_0 = 8,87 \text{ kV}/(\text{bar} \cdot \text{mm})$ sehr viel stärker mit E/p zunimmt. Dadurch führen auch lokale sehr eng begrenzte **Feldstärkeerhöhungen durch Oberflächenrauigkeiten oder Partikel** zur Einleitung des Kanalmechanismus, auch wenn im makroskopischen Feld die Grenzfeldstärke noch nicht erreicht ist. (vgl. hierzu: Küchler, 2009)

Die stabilen Teilentladungen als Streamer setzen stets mit geringer Intensität als anderen TE-Formen ein. Im SF_6 setzen die Teilentladungen an einer Störstelle mit negativer Polarität bei niedriger Spannung ein als an einer mit positiver ohne sich aber in ihren charakteristischen Werten wesentlich zu unterscheiden. Jedoch ist der Polaritätseffekt der positiven und negativen Spitze der Hochspannungselektrode in SF_6 , welche in der Luft die Ausbildung von Streamern zur Folge hat und eine stabile glimmende Vorentladung verursacht, ausgeschlossen. (vgl. hierzu: Mosch & Hauschild, 1979)

Glimmentladung

Die von Glimmentladung bekannte stabile Teilentladung wird durch ein eng begrenztes Ionisationsgebiet gekennzeichnet, in dem ständig Lawinenprozesse nach dem Generationsmechanismus ablaufen und in dem intensiv Raumladungen erzeugt werden. Mit steigender Elektrodenspannung vergrößert sich das als diffuse leuchtende Kugel erkenntliches Ionisationsgebiet der Glimmentladung bei Gleich-, Wechsel- und Schaltspannung nur geringfügig.

Vor einer positiven Störstelle bilden die beim Lawinenaufbau zahlreiche entsendenden negativen Ionen eine Raumladungswolke, die das elektrische Feld zur positiven Störstellen verstärken und einem intensiven Lawinenprozess hervorrufen. In der Raumladungswolke stellt sich zwischen zugeführten und abgeführten negativen Ionen ein Gleichgewichtszustand ein, der die stationäre Existenz der Glimmentladung ermöglicht. Vor einer negativen Störstelle übernimmt eine aus positiven Ionen gebildete Raumladungswolke die gleiche Funktion. Die Summenladungen einer Glimmentladung bzw. einer Teilentladung bei negativer Störstelle (Partikel) sind höher, da scheinbar die Kathode unter der Wirkung der Feldstärkeerhöhung durch **Raumladungen** mehr Elektronen emittieren. (vgl. hierzu: Mosch & Hauschild, 1979)

4.4 Einfluss der Oberflächenrauigkeit

Natürlich beeinflusst die Rauigkeit der Elektrodenoberflächen auch die Durchschlagfeldstärke. Die Durchschlagspannung bzw. Durchschlagfeldstärke ist von den Mikroerhebungen und von den Dellen verursachten Spitzen abhängig. Sie verhalten sich wie festgebundene Partikeln auf der Oberfläche. Wenn die Feldstärke groß genug ist, kommt es an diesen Spitzen aufgrund der lokalen Feldstärkeerhöhungen zur Ionisation des Gases. Es kann beim Erreichen der kritischen Elektronenanzahl K im Gas zur selbstständigen Streamer-Entladung führen. Außerdem können die erwähnten Dellen das Aufladen der freibeweglichen Partikeln beeinflussen, sodass sie in niedrigere Feldstärke die benötigten Ladungsträger aufnehmen. Deshalb wird deren Abhebefeldstärke gesenkt. Bei beschichteten Elektroden können die Teilentladungen, die von der Oberflächenrauigkeit verursacht werden, zu einer Erosion der Beschichtung führen und deren Festigkeit herabsenken. Bei den Versuchen wurde die Rauigkeit der Elektrodenoberfläche soweit wie möglich einer realen gasisolierten Leitung nachempfunden. Die nächste Abbildung zeigt die Oberfläche der verwendeten Elektrode mit 40-facher Vergrößerung.

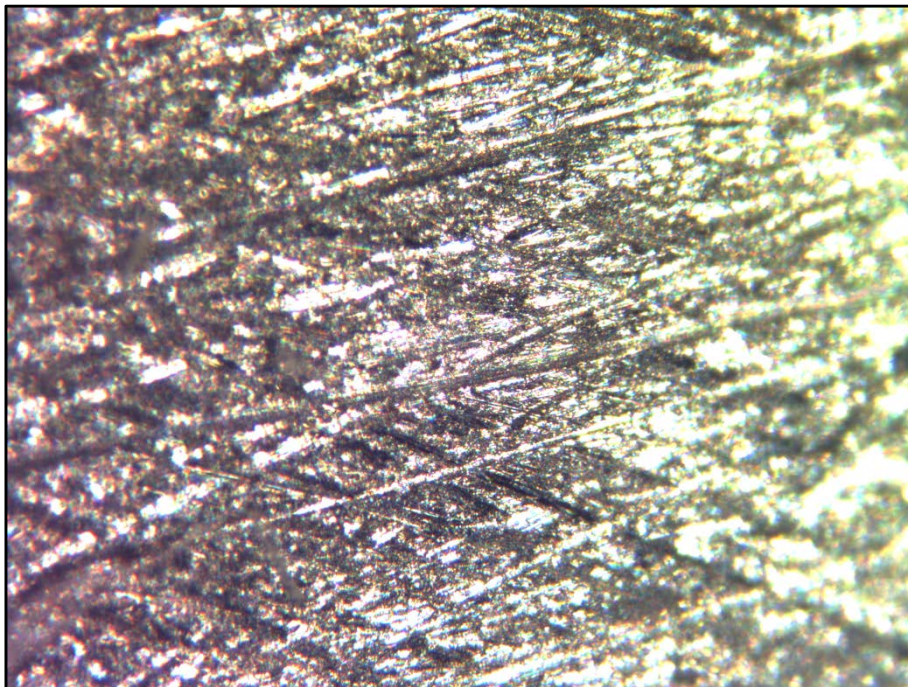


Abbildung 8: Oberflächenrauigkeit der verwendeten Elektroden

4.5 Feste Isolierstoffe in Gasräumen

Ortsfest gebundene positive und negative Ladungsträger können unter Kraftwirkung des elektrischen Feldes gegeneinander verschoben werden, es entsteht eine Polarisation des Isolierstoffs. Es gibt hauptsächlich fünf Polarisationsarten: Elektronen-, Atom-, Gitter-, Grenzflächen- und Orientierungspolarisation. Die Wirkung der unterschiedlichen Polarisationsmechanismen ist immer gleich und es entsteht ein zusätzliches elektrisches Feld nämlich E_{Dip} aus der Überlagerung vieler Dipolfelder, das sich dem ursprünglichen Feld E_0 entgegengesetzt: $E = E_0 - E_{Dip}$. Es ist üblich den Einfluss der Polarisation durch den Faktor ϵ_r , der sogenannten relativen Dielektrizitätszahl, zu beschreiben. Für die Polarisation folgt dann nämlich: (vgl. hierzu: Küchler, 2009)

$$P = \epsilon_0(\epsilon_r - 1)E \tag{4.1}$$

- P Polarisation
- E elektrische Feldstärke
- ϵ_0 Primitivität des Vakuums

Sie ist also von dem Isoliermaterial und die Feldstärke abhängig.

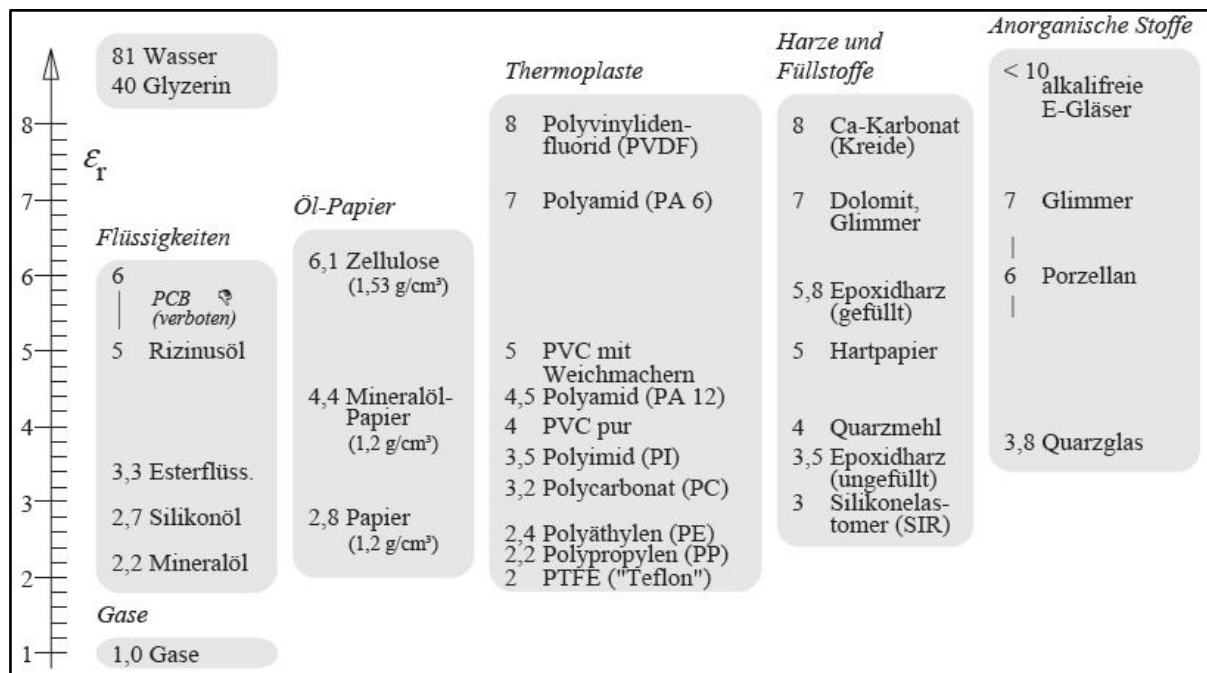


Abbildung 9: relative Dielektrizitätszahl verschiedener Stoffe (Küchler, 2009)

Wenn zwei Elektroden, zwischen denen ein Isoliermedium eingebracht worden ist, mit einer Spannungsquelle verbunden sind, sammeln sich auf den Elektroden weitere Ladungen, die von der Quelle zu Verfügung gestellt werden. Man definiert daher eine Feldgröße nämlich die elektrische Verschiebungsdichte $D = \epsilon \cdot E$, die im direktem Zusammenhang mit den felderzeugenden Ladungen steht. Sie gibt an, wie stark ein Körper durch das Elektrische Feld elektrisiert wird. Die

Verschiebungsdichte eines Isolierstoffes, welcher mit einer Spannungsquelle verbunden ist, ist um den Faktor ϵ_r größer als mit nicht verbundenen, also $D_{\text{neu}} = \epsilon_r D_{\text{alt}}$.

Eine weitere Größe, die in der Hochspannungstechnik von Bedeutung ist, ist die Flächenladungsdichte $\sigma \left[\frac{As}{m^2} \right]$. Diese beschreibt die Ladungsverteilung an einer Oberfläche eines Körpers. Die Flächenladungsdichte erzeugt eine bestimmte Feldstärke E .

In der Tabelle 2 sind einige chemische Stoffe aufgelistet. Die in blau angezeigten chemischen Stoffen werden in der Farbindustrie verwendet.

Stoff	Dielektrizitäts-zahl	Stoff	Dielektrizitäts-zahl
Phenylhydrazin	7,3	Phenol-Harz	7,4
Dibrommethan(Methylenbromid)	7	Propylformiat	7,7
Methylheptanol	7,1	Ethylsalicylat	7,9
Jodmethan	7,1	Ethylglykolacetat, "Cellosolveacetat"	7,5
Methylsalicylsäureethylester	7,7	Tetramethylenoxid	7,6
Monojodmethan	7	Anilin	7
Nitrolack	5,2	Benzylalkohol	6,6
Benzylchlorid	7	Chlortoluol	7

Tabelle 2: Die am häufigsten verwendeten chemischen Stoffe der Farbindustrie mit ihrer relativen Dielektrizitätszahl. (Holdefer, 1999)

Geschichtete Dielektrika

Bei praktisch ausgeführten Betriebsmitteln der elektrischen Energieversorgung kommen komplizierte aufgebaute Isolierungen vor, in denen mehrere unterschiedliche Dielektrika mit häufig komplexen Konturen vorhanden sind. Welche Auswirkungen das auf die elektrische Feldbeanspruchung hat, soll im Folgenden bei quer und längs geschichteten Dielektrika genauer betrachtet werden. Es ist zu beachten, dass bei einer Gleichspannungsbeanspruchung die elektrische Leitfähigkeit des Isolierstoffes zu berücksichtigen ist.

Bei einem geschichteten Dielektrikum sind die Tangentialkomponenten der elektrischen Feldstärke beiderseits der Grenzfläche gleich:

$$E_{t1} = E_{t2} \quad (4.2)$$

Ebenso folgen gleiche Normalkomponenten der Verschiebungsdichte beider Seiten aufgrund der Ladungsfreiheit der Grenzfläche:

$$D_{n1} = D_{n2} \quad (4.3)$$

Im geschichteten Dielektrikum (siehe Abbildung 10) gehen die Tangentialkomponenten der elektrischen Feldstärke und die Normalkomponente der elektrischen Verschiebungsdichte kontinuierlich von einem Dielektrikum in das andere über.

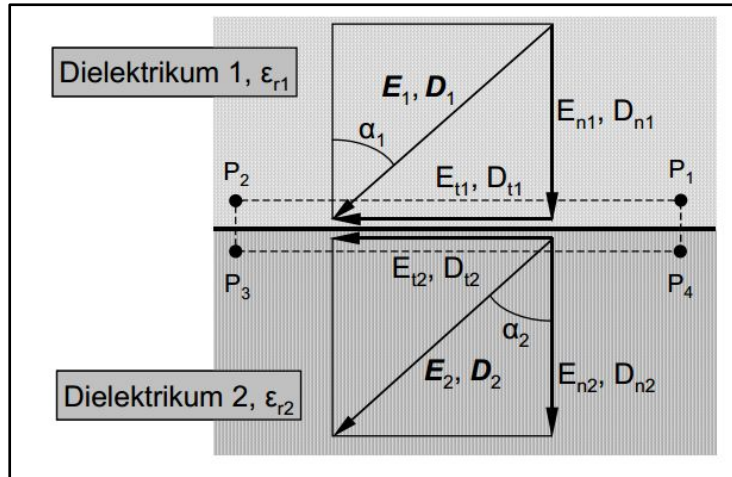


Abbildung 10: Elektrische Feldgrößen im geschichteten Dielektrikum. (Küchler, 2009)

Quer geschichtetes Dielektrikum

Ein quer geschichtetes Dielektrikum ist dadurch charakterisiert, dass die elektrische Verschiebungsdichte und die elektrische Feldstärke ausschließlich Normalkomponenten aufweisen. Die Beträge der beiden Feldgrößen entsprechen also den Beträgen ihrer Normalkomponenten: (siehe Abbildung 11)

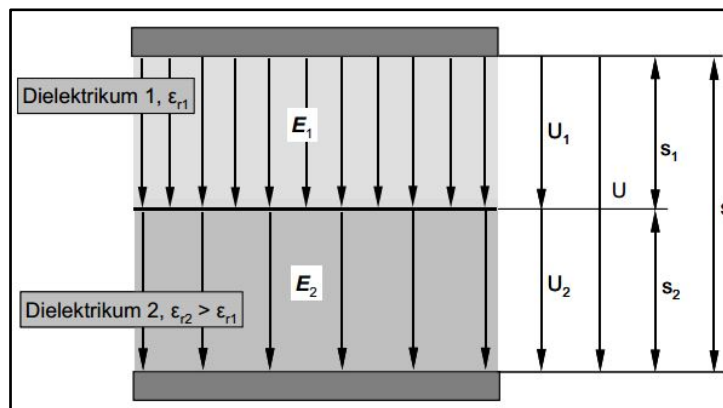


Abbildung 11: Verhältnisse im quer geschichteten Dielektrikum. (Küchler, 2009)

Es gilt:

$$D_1 = D_{n1} = \epsilon_0 \epsilon_1 E_1 = D_2 = D_{n2} = \epsilon_0 \epsilon_2 E_2 \quad (4.4)$$

Daraus folgt:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}} \quad (4.5)$$

Je niedriger die Dielektrizitätszahl des Dielektrikums ist, desto höher wird das Dielektrikum belastet. Eine höhere Dielektrizitätszahl verursacht im Dielektrikum eine niedrigere Feldstärke. Daher ist die Feldverdrängung bei Isoliermedien mit niedrigeren Dielektrizitätszahl höher. (vgl. hierzu: Küchler, 2009)

Längs geschichtetes Dielektrikum

Abbildung 12 zeigt ein längs geschichtetes Dielektrikum, in dem die elektrische Feldstärke nur eine Tangentialkomponente aufweist. Die Beträge der Feldstärke entsprechen den Beträgen der Tangentialkomponenten:

$$E_1 = E_{t1} = E_{t2} = E_2 \quad (4.6)$$

Die elektrischen Feldstärken sind zu beiden Seiten der Grenzfläche gleich groß, während sich die elektrischen Verschiebungsdichten zueinander verhalten wie ihre relativen Dielektrizitätszahlen:

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}} \quad (4.7)$$

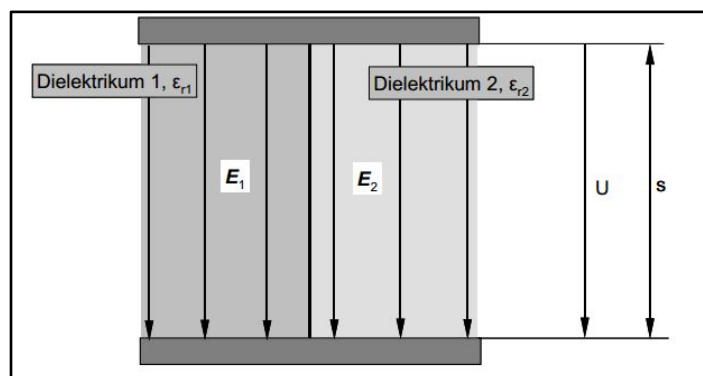


Abbildung 12: Verhältnisse im längsgeschichteten Dielektrikum
(vgl. hierzu: Küchler, 2009)

Zylindrisch geschichtetes Dielektrikum

Die Abbildung 13 zeigt einen Feldverlauf und die Potentialverteilung entlang der x-Achse bei einem zylinderkonzentrischen Leiter. Die Kapazität eines Zylinderkondensators lässt sich mit der Formel berechnen:

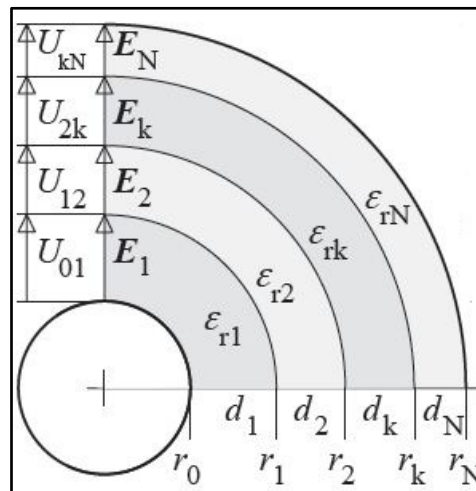


Abbildung 13: Zylinder symmetrische Schichtung (Küchler, 2009)

- E_N elektrische Feldstärke der Schicht
- r_i Radius der Beschichtung
- ϵ_{rN} relative Dielektrizitätszahl
- U_{kN} Spannungsabfall der schicht

$$C = \frac{4\pi\epsilon_0}{\sum_{i=1}^N \left\{ \frac{1}{\epsilon_i} \left(\frac{1}{r_{i-1}} - \frac{1}{r_i} \right) \right\}} \tag{4.8}$$

- C Kapazität der gesamten Anordnung
- r_i Radius der i.ten Beschichtung
- N Anzahl der schichte

Unter einer eingestellten Spannung U ist die vom Zylinderkondensator aufgenommene Ladung:

$$Q = \frac{4\pi\epsilon_0 \cdot U}{\sum_{i=1}^N \left\{ \frac{1}{\epsilon_i} \left(\frac{1}{r_{i-1}} - \frac{1}{r_i} \right) \right\}} \tag{4.9}$$

- Q die an der Elektrode gesammelten Ladungen
- U die angelegte Spannung

5 Messschaltungen

Für die Versuchsdurchführung wurde ein Baukastensystem verwendet. Die Einzelelemente können damit baukastenartig in entsprechend ausgebildete Knotenpunkte und Fußteile eingesteckt werden. Dadurch können die entsprechenden Schaltungen der Gleichspannungserzeugung aufgebaut werden. Mittels eines einstufigen Aufbaus des Baukastensystems wurde eine Gleichspannungsschaltung mit maximaler Gleichspannung von 100kV erstellt. Da die Bauteile für eine maximale Spannung von 100kV geeignet sind, muss man die Elemente für eine höhere Gleichspannungserzeugung bis 200kV zweistufig aufbauen. (vgl. hierzu: Messwandler-Bau GMBH). Die verwendete Schaltung beinhaltet zwei Dioden zum Gleichrichten der AC-Spannung, die jeweils eine Scheitelsperrspannung von 140kV mit einem Nennstrom von 5mA besitzen. Die weiteren Baukomponenten sind Glättungskondensatoren, 1M Ω -Widerstand zum Begrenzen des Durchschlagstroms und ein Erdungswiderstand. Die Abbildung 14 zeigt die Schaltung der Gleichspannungserzeugung und die dazu gehörigen Bauteile. Für die Gleichspannungserzeugung wurden drei Schaltungen aufgebaut. Vor Inbetriebnahme des Aufbaus wurde zu aller erst die Spannung mit dem Referenzteiler MR 0,54/271, Nr.869178 und dem Messgerät MU 14, Nr.878844 von SIEMENS überprüft. Die Teilentladungsfreiheit der aufgebauten Schaltungen wurde im Leerlauf mit dem MPD 600-System von der Firma OMICRON gemessen. Der Grundstörpegel betrug immer unter dem von dem Norm IEC 60270 empfohlenen Wert (<1pC). Es muss beachtet werden, dass die Teilentladungswerte der scheinbaren Ladung entsprechen, da der tatsächliche Wert messtechnisch nicht erfasst werden kann.

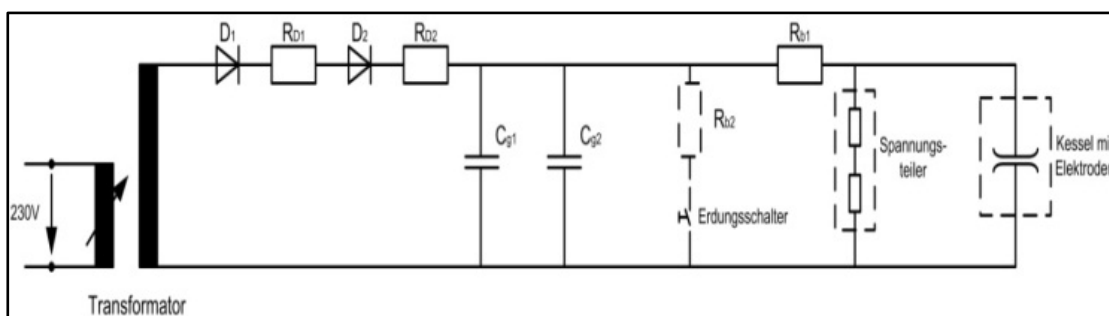


Abbildung 14: Ersatzschaltbild der Gleichspannungserzeugung (Berg, Zamani, Muhr, & Imamovic, 2013)

5.1 30kV-Schaltung

Die erste Schaltung wurde für die Messungen mit der Kugel-Platte-Anordnung verwendet. Die Maximalspannung, welche mit dieser Schaltung eingestellt wurde, betrug 30kV. Sie hat eine Welligkeit von 1,6%.

5.2 100kV-Schaltung

Da bei den Messungen gleichzeitig auch die Teilentladungen der untersuchten Partikeln gemessen werden sollten, wurde bei dem Aufbau der Schaltung großer Wert auf Teilentladungsfreiheit gelegt. Für die zweiten Messreihen, nämlich die der optimierten Anordnung wurde diese Schaltung verwendet. Damit konnte man bis 100kV Gleichspannung erzeugen.

Die Schaltung(siehe Abbildung 15) beinhaltet folgende Bauteile:



Abbildung 15: Aufbau der 100kV-Schaltung

Glättungskondensatoren.....10000pF+10000pF+6000pF=26000pF

Strombegrenzungswiderstand:10M Ω

Spannungsteiler:1: 10000

Koppelkondensator:100pF

Erdungswiderstand50k Ω

150kV-Gleichspannungstransformator

Obwohl die Schaltung mit einem Transformator mit eingebauten Dioden gespeist wurde, wurden zusätzlich drei weitere Glättungskondensatoren im Aufbau eingebaut, damit die auftretende Welligkeit soweit wie möglich unterdrückt wird. Die Welligkeit dieser Schaltung wurde mittels Oszilloskop ermittelt. Sie betrug bei einer eingestellten Spannung von 90kV, welche über dem Maximalwert der Prüfspannung ist, weniger als 300V. Dies entspricht 0,3% der Prüfspannung. Dieser Wert ist unter dem von der Norm empfohlenen Wert³.

³ Laut Norm ist eine Welligkeit unter 3% der maximal eingestellten Spannung empfohlen.

5.3 200kV-Schaltung

Um eine Spannung über 150kV erreichen zu können ohne dass am Aufbau Teilentladungen vorkommen, wurde die Schaltung erweitert, welche aus folgenden Bauteilen bestand (siehe Abbildung 16):

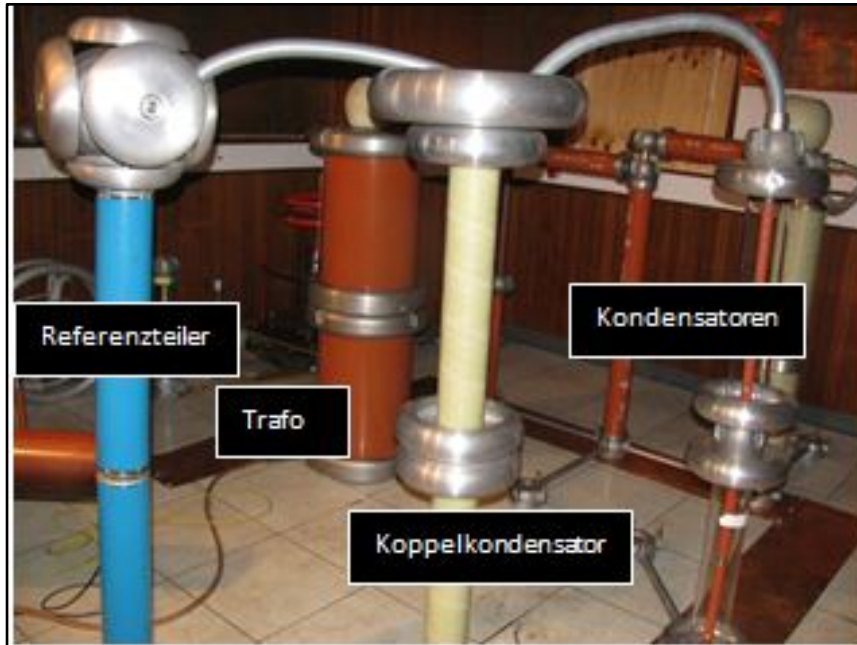


Abbildung 16: Aufbau der 200kV-Schaltung

Glättungskondensatoren..... $C_g=8000\text{pf}$

Strombegrenzungswiderstand $R=10\text{M}\Omega$

Koppelkondensator $C=100\text{pf}$

Transformator $2 \times 100\text{kV}$ in Serie geschaltet

Messgerät.....Referenzteiler

2-Dioden.....jeweils mit Scheitelsperrspannung= 140kV , Nennstrom= 20mA und $R=500\text{k}\Omega$

Mit dieser Schaltung wurden Spannungen bis 170kV erzeugt. Die Bauteile sind jeweils für einen maximalen Spannungswert Wert von 100kV ausgelegt. Aus diesem Grund wurde eine Serienschaltung der Bauteile verwendet. Die Abbildung 17 zeigt den Wechselspannungsanteil einer erzeugten Gleichspannung von 38kV . Die Welligkeit beträgt dann:

$$\frac{\Delta U}{U} \cdot 100\% = 1,45\%$$

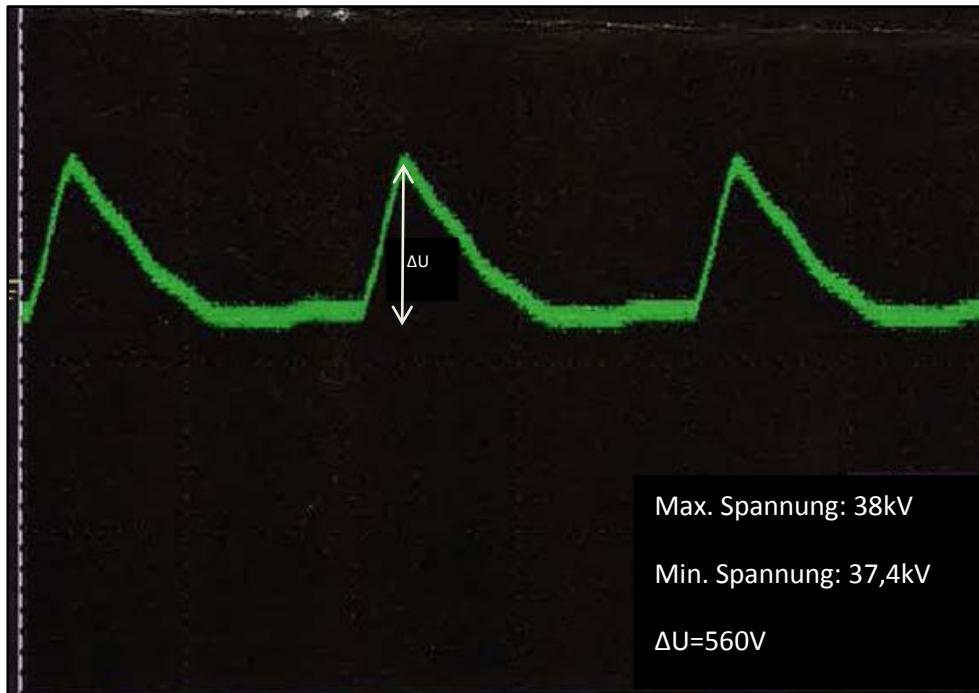


Abbildung 17: Welligkeit der Gleichspannung der 200kV-Schaltung

Die Welligkeit der Spannung wurde zusätzlich auch für höhere Gleichspannungen bis 160kV untersucht. Der Wert liegt bei den Messungen immer unter 2,5%.

6 Untersuchungen des Partikelverhaltens

6.1 Allgemeines

Die Messungen wurden mittels zwei Elektrodenanordnungen durchgeführt. Als erstes wurde der Homogenitätsgrad einer realen gasisolierten Leitung, welche ca. 57% beträgt, mittels einer Kugel-Platte-Anordnung nachempfunden. Bei der Kugel-Platte-Anordnung gibt es das Problem, dass das Partikel nicht immer exakt unter die Kugel in der Mitte der Platte, wo dieser bestimmte Homogenitätsgrad herrscht, gelegt werden kann. Deshalb können sich Messfehler stark auswirken. Um die Messungen genauer durchführen zu können und um die Versuche einer realen Anordnung der GIL anzunähern, wurde die zweite Messreihe mittels einer optimierten Anordnung, welche ein Segment einer realen GIL darstellt, durchgeführt. Die Elektrodenanordnungen wurde in einem zylinderförmigen Kessel (siehe Abbildung 18) eingeschraubt. Der Abstand zwischen den Elektroden kann mittels Abstandsstellern unter dem Kessel eingestellt werden. Mittels einer Partikelschleuse, welche am Deckel des Versuchskessels angebracht wurde, konnte man die Partikel von oben auf die Schale einbringen. Der Prüfkessel besitzt von den Seiten zwei Fenster, wodurch das Verhalten der Partikel mittels einer Kamera beobachtet werden kann. Desweiteren wurde der Kessel von innen mittels fünf LED-Streifen beleuchtet. Die Hochspannungselektrode im Kessel ist über eine Durchführung kontaktiert, an der eine Spannung angelegt werden kann.

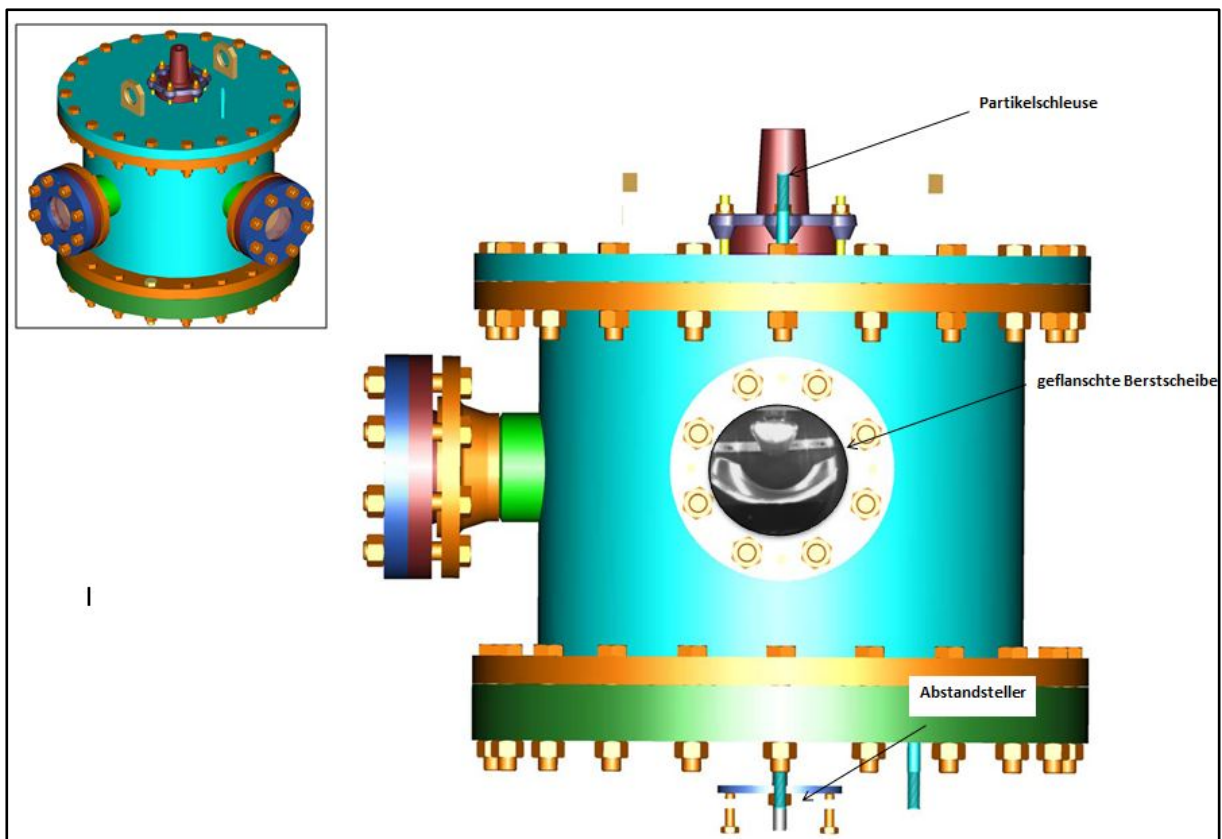


Abbildung 18: Prüfkessel

Während der Messungen wurden das Verhalten der Partikeln, die Teilentladungen sowie die eingestellte Spannung in Echtzeit synchron aufgenommen.

In der Arbeit von Müller ist erwähnt, dass für die zylinderförmige Partikeln die Lognormalverteilung und für die Kugeln die Normalverteilung am besten geeignet ist. Um die Werte vergleichen und die Standardabweichung in den Grafiken angeben zu können, wurden die gemessenen Werte mit der Normalverteilung analysiert. Bei der optimierten Anordnung besteht sowohl die Schale als auch die Hochspannungselektrode aus Aluminium-Platten mit einer nicht idealen Oberfläche. Daher weist die Oberfläche eine gewisse Rauigkeit auf, welche einer realen GIL ähnlich ist. Das hat zur Folge, dass es an der Oberfläche der Schale zu lokalen Feldstärkeerhöhungen kommen kann, die die Aufladung der Partikel stark beeinflussen können. Die gemessene Abhebefeldstärke kann aus diesem Grund Werte unter der theoretischen Abhebefeldstärke annehmen.

Dabei wurde aus folgenden Beobachtungen ein Vertrauensbereich geschaffen:

- Die theoretische Abhebefeldstärke ist erreichbar, manchmal sogar Werte leicht darunter. Dies war aus der Literatur und einigen Vorversuchen bekannt.
- Es gibt Beeinflussungen, die die Abhebefeldstärke der Partikel stark erhöhen (Werte bis zur doppelten Abhebefeldstärke sind die Folge durch unachtsames Arbeiten.)
- Nennenswerte Einflüsse, welche eine Abhebefeldstärke markant unter der theoretischen Abhebefeldstärke bewirken, waren nicht erkennbar. (vgl. hierzu: Müller, 2012)

Außerdem:

- Die Oberfläche der verwendeten Platte war nicht ganz ideal. Es gab nämlich leichte Unebenheiten bzw. Unreinheiten auf der Platte, die die Messergebnisse stark beeinflussen konnten.
- Im Falle der optimierten Anordnung konnte wegen der Enden der Hochspannungselektroden, obwohl diese abgerundet worden waren, eine Beeinflussung der Abhebefeldstärke der Partikel festgestellt werden.
- Mittels numerische Feldberechnung wurde aus der Geometrie der Elektrodenanordnung und der angelegten Prüfspannung die Feldstärken berechnet

Bei den Versuchen wurden Messwerte wahrgenommen, die höchstens um 0,13kV/mm über dem theoretischen Wert lagen also eine Obergrenze von 1,08kV/mm hatten. Werte über diesem Grenzwert wurden nicht wahrgenommen, sowie für eine Untergrenze von 0,85kV/mm eingesetzt. Bei den Messreihen konnten kaum Werte über bzw. unter den vorgesehenen Grenzwerten gemessen werden. Haben die gemessenen Werte den Grenzwert überschritten, so wurde angenommen, dass ein Fehler bei der Messung passiert ist. (wie z.B. Partikel ist wegen Staub und Unreinheiten auf der Schale geklebt oder es wurde von den Rändern der Hochspannungselektrode beeinflusst.)

in den Tabellen und Abbildungen dieser Arbeit sind die Grenzwerte bei der Kugel-Platte-Anordnung etwas höher angenommen worden als die vorausgesetzten Werte, da sich die Störgrößen dabei im Vergleich mit der optimierten Anordnung stärker auswirken (siehe 6.4).

Für die statistische Auswertung wurden insgesamt 17 Messreihen, die jeweils über 20 Versuche

6.2 Übersicht auf Versuche und Zeitaufwand

Druck	1MPa	1MPa
Partikellänge [mm]	Positiv	Negativ
6	Kupfer	Kupfer

Tabelle 3: Durchgeführte Versuche bei der Kugel-Platte-Anordnung

Druck	1MPa		2MPa		4MPa	
Partikellänge [mm]	Positiv	Negativ	Positiv	Negativ	Positiv	Negativ
2	-	Kupfer	-	Kupfer	-	Kupfer
4	Kupfer	Kupfer	Kupfer	Kupfer	Kupfer	Kupfer
6	Kupfer	Kupfer	Kupfer	Kupfer	Kupfer	Kupfer

Tabelle 4: Durchgeführte Versuche bei der optimierten Anordnung

Messreihen	17
Anzahl der Versuche	340
h/Versuch	1,5
Zeitaufwand	500h

Tabelle 5: Zeitaufwand der gesamten Versuche

6.3 Kugel-Platte-Anordnung

Vor den Versuchen wurde das elektrische Feld einer Kugel-Platte-Anordnung berechnet um einen bestimmten Homogenitätsgrad zu ermitteln. Um einen geeigneten Homogenitätsgrad zu bestimmen kann man entweder den Radius einer Kugel oder aber auch den Abstand zu einer Plattenelektrode verändern. Ausgangspunkt ist eine Kugel, bei welcher der Radius mit 15, 20, 25, 30mm variiert wurde. Ziel ist es nun den Abstand der Kugel zu einer Platte so zu verändern, dass ein Homogenitätsgrad von 57% erreicht wird. Dazu wurde jede Kugel auf sechs unterschiedliche Abstände von 10, 20, 30, 40, 50, 60mm eingestellt und für die erhaltene Anordnung eine Feldberechnung durchgeführt. Die Kugel wurde auf Hochspannungspotential gesetzt, die Platten-Elektrode hingegen auf Erdpotential. Für die Bestimmung des Homogenitätsgrades ist die Spannung nicht relevant. Sie wurde aber mit 20kV gewählt. Die maximale Feldstärke an der Hochspannungselektrode bzw. Kugel ist in der nächsten Tabelle zu sehen.

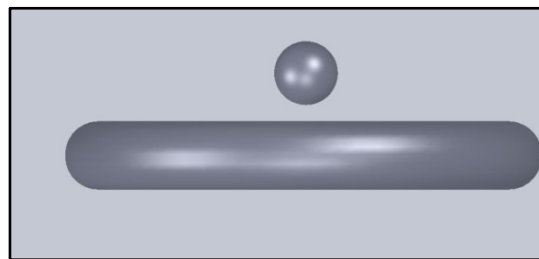


Abbildung 19: Model der Kugel-Platte-Anordnung

Radius der Kugel [mm]	Der eingestellte Abstand d [mm]						
		10	20	30	40	50	60
15	E_{max} [$\frac{kV}{mm}$]	3,17	2,15	1,78	1,54	1,59	1,49
20		2,87	1,88	1,49	1,31	1,24	*
25		2,71	1,68	1,31	1,14	*	*
30		2,67	1,54	1,22	*	*	*

Tabelle 6: Die auf der Platte maximale Feldstärke in Abhängigkeit von dem Kugel-Platte-Abstand und dem Radius der Kugel

Die Grundfeldstärke lautet:

$$E_0 = \frac{U}{d} \tag{4.1.1}$$

- E_0 Grundfeldstärke
- U die angelegte Spannung
- d der eingestellte Abstand

d [mm]	10	20	30	40	50	60
$\frac{E_0}{\frac{kV}{mm}}$	2	1	0,6	0,5	0,4	0,3

Tabelle 7: Grundfeldstärke in Abhängigkeit des Abstandes zwischen der Kugel und Platte U=20kV

Die Tabelle 8 zeigt den berechnete Homogenitätsgrad für die jeweiligen Anordnungen in Abhängigkeit vom Radius der Kugel und vom Abstand der beiden Elektroden.

Radius der Kugel [mm]	Der eingestellte Abstand d [mm]						
	10	20	30	40	50	60	
15	0,62	0,46	0,37	0,32	0,25	0,22	
20	0,69	0,53	0,44	0,37	0,32	*	
25	0,73	0,59	0,50	0,43	*	*	
30	0,74	0,64	0,54	*	*	*	

Tabelle 8: Der Homogenitätsgrad der Kugel-Platte-Anordnung in Abhängigkeit von Kugel-Platte Abstand und Radius der Kugel.

Aus der Abbildung 20 ist ersichtlich, dass der Homogenitätsgrad vom Kugelradius und vom Abstand der Kugel zur Platte abhängig ist.

Für den gewünschten Homogenitätsgrad von 0,57 kann man eine Linie einzeichnen. Dabei stellt sich

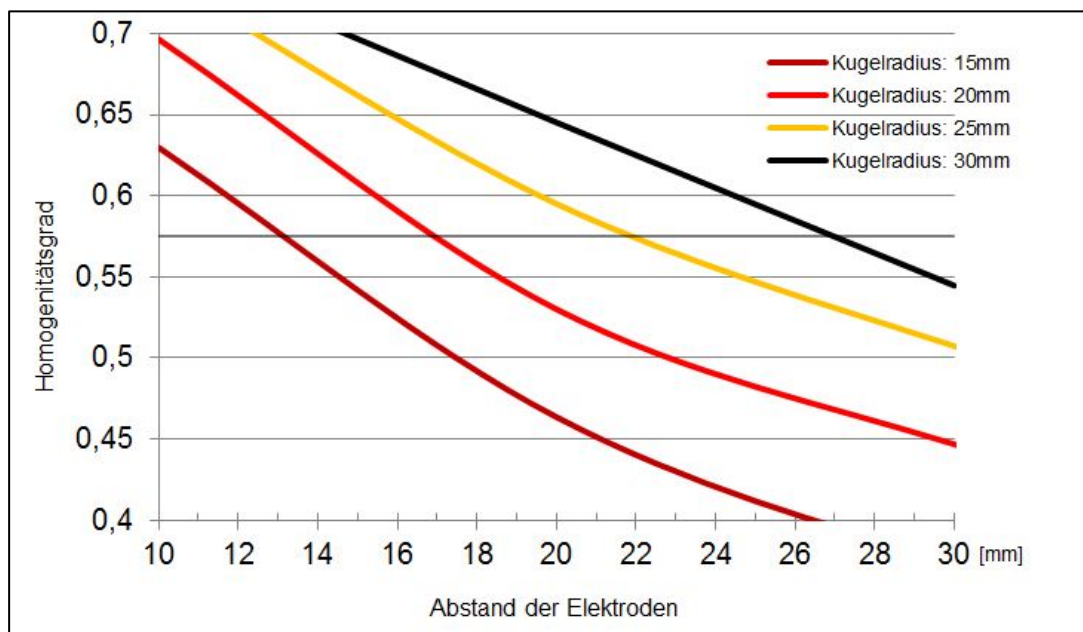


Abbildung 20: Homogenitätsgrad in Abhängigkeit des Abstandes zwischen der Kugel und Platte und verschiedenen Kugelradien.

für jeden Kugelradius der erforderliche Abstand ein. Aufgrund der geometrischen Verhältnisse im Prüfkessel, wurde ein Kugelradius von 20mm bei einem Abstand von 17mm gewählt.

Die Kugel besteht aus Stahl und die Oberfläche wurde außerdem mit feinem Schleifpapier poliert. Die Platte hingegen besteht aus Aluminium mit einer verchromten Beschichtung, damit deren Fläche möglichst ideal und eben ist. Sie ist direkt auf dem Erdpotential gelegt. Als frei bewegliche Partikel wurden 6mm langen Kupferdrähte mit einem jeweiligen Durchmesser von 0,26mm verwendet um eine gute Vergleichbarkeit mit vergangenen Untersuchungen im homogenen Feld zu erreichen.

Wie in der Abbildung 21 zu sehen ist, ist die Feldstärke auf der Platte ungleichmäßig verteilt. Deshalb wurde bei den Messungen darauf geachtet, dass die Partikel auf die Platte genau unter der Kugel, wo ein Homogenitätsgrad von 57% herrscht, gelegt wurden, damit immer die gleichen Versuchsbedingungen vorhanden waren. Die Messungen wurden unter negativer und positiver Polarität der Spannung bei 0,1MPa Gasdruck durchgeführt. Der senkrechte Verlauf der elektrischen Feldstärke von der Oberfläche der Kugel bis zu der Platte ist in der Abbildung 22 zu sehen.

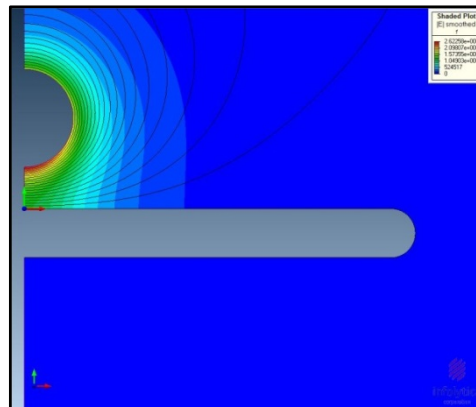


Abbildung 21: Feldbild einer Kugel-Platte-Anordnung

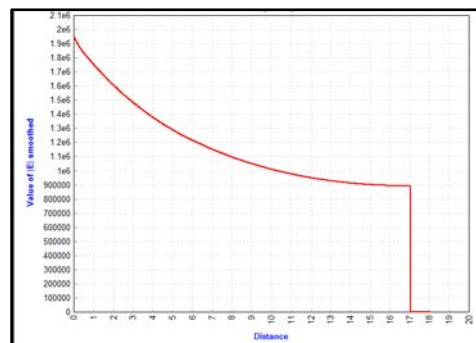


Abbildung 22: Liniengraph der elektrischen Feldstärke von der Kugel bis zu Oberfläche der Platte in Y-Richtung E in [V/mm], Distanz in [mm]

6.4 Messergebnisse

6.4.1 Abhebefeldstärken und Teilentladungsmessung

Die untenstehende Tabelle zeigt die gemessene Abhebefeldstärke der Partikel sowie deren Teilentladungseinsatzspannung.

Partikel [mm]	durchschnittliche Abhebespannung [kV]		durchschnittliche Abhebefeldstärke [kV/mm]	
	positiv	negativ	positiv	negativ
6	32,6	25	1,4	1,09

Tabelle 9: Abhebefeldstärke und- Spannung der 6mm-Partikel bei 0,1MPa SF6(Kugel-Platte-Anordnung)

Für eine statistische Auswertung wurden pro Polarität 30 Messungen durchgeführt. Die Auswertung dieser gemessenen Werte ist in der Abbildung 23 zu sehen. Die Abbildung beinhaltet die elektrische Feldstärke an der Stelle, wo das Partikel sich im Zeitpunkt des Abhebens befindet. Bei dieser Anordnung liegen die Werte von erreichter positiver als auch negativer Abhebefeldstärke über dem theoretischen Wert. Grund dafür ist möglicherweise die Form der Partikel. Also bei zylinderförmigen Partikeln liegt die Abhebefeldstärke, wenn die Oberfläche der Elektrode flach und glatt ist, über dem theoretischen Wert.

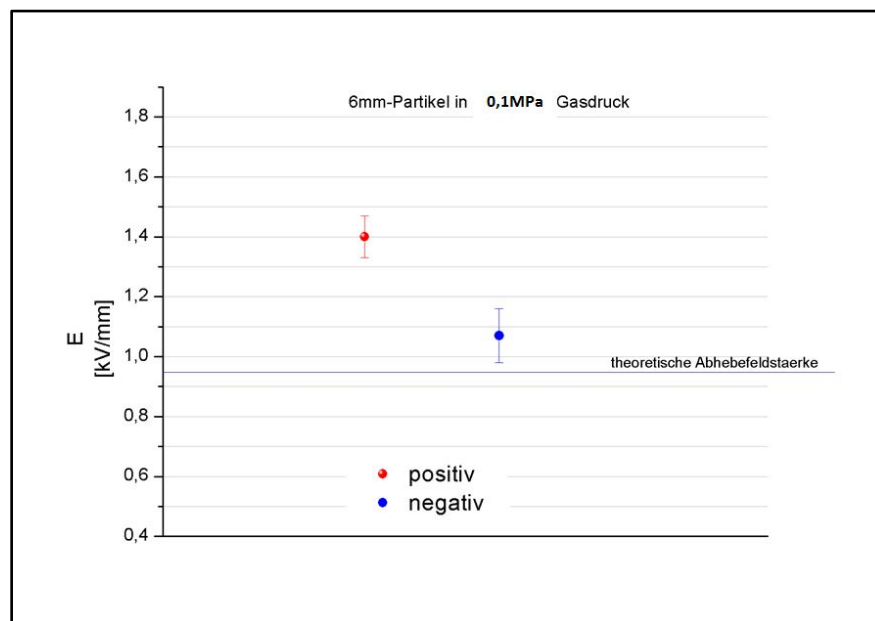


Abbildung 23: Abhebefeldstärke der 6mm Partikel, 0,1MPa SF6

Wie in der Tabelle 10 ersichtlich ist, sind die auftretenden Teilentladungen der negativen Spannung erheblich größer als die der Positiven. Der Grund dafür liegt möglicherweise

darin, dass sich die Partikel immer an der negativeren Elektrode aufhalten. Daher befinden sich die Partikeln bei einer negativen Polarität an der Hochspannungselektrode, wie in diesem Fall an der Kugel. Dort sind aber wesentlich höhere Feldstärken zu erwarten. Das Partikel hält sich also in einem Bereich mit großen Feldstärken auf, welche auch höhere Teilentladungen zur Folge haben. Die in der Tabelle angegebenen Teilentladungswerte gelten für einen Spannungswert von 30kV, welcher einer Feldstärke von $E=1,2\text{kV/mm}$ auf der Oberfläche der Platte und $2,89\text{kV/mm}$ an der Oberfläche der Hochspannungselektrode entspricht.

Partikel [mm]	Teilentladungen bei der positiven Spannung [pC]	Teilentladungen bei der negativen Spannung [pC]
6	5	243

Tabelle 10: Teilentladungsamplitude der 6mm Partikel bei 0,1MPa SF6

Die Abbildung 24 zeigt die Bewegung der Partikel bei positiver Spannung sowie dessen Teilentladungsimpulse.

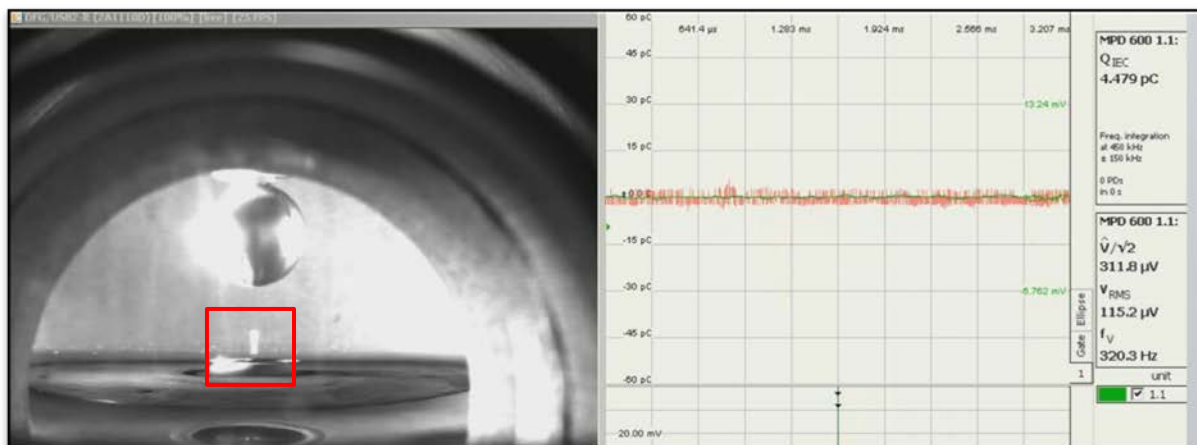


Abbildung 24: Die Bewegung der 6mm Partikel unter positiver Spannung

Bei negativer Spannung, wenn sich das Partikel länger an der Hochspannungselektrode bewegt, werden Teilentladungsimpulse mit Gegenpolarität gemessen (siehe Abbildung 25, (1)), die vermutlich durch den Firefly-Effekt und durch das Aufladen der Partikel in den Raumladungswolken erklärt werden können.

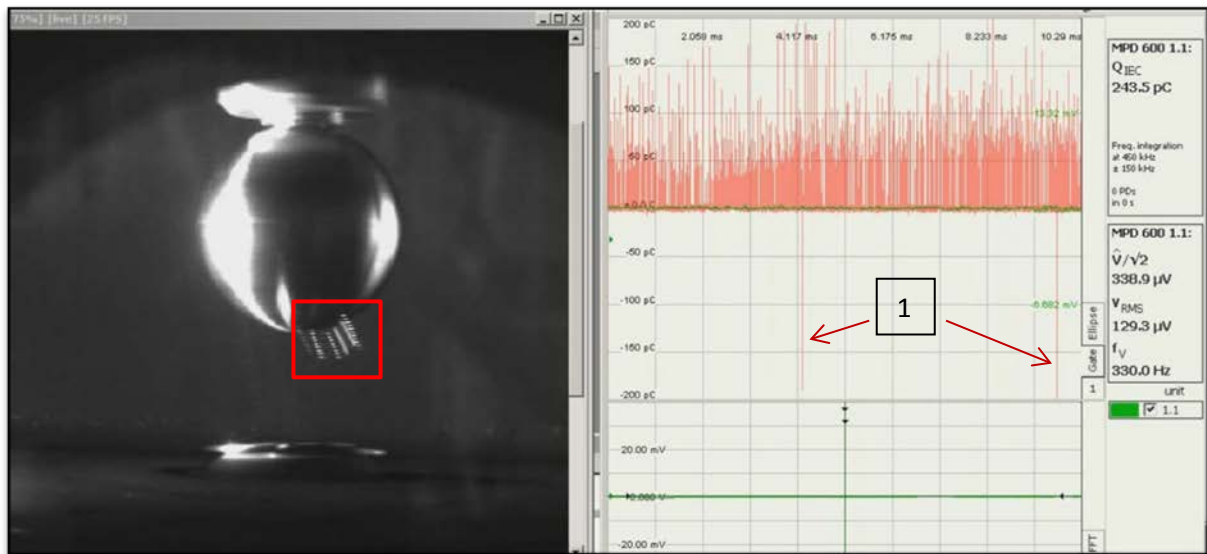


Abbildung 25: Die Bewegung der 6mm Partikel unter negativer Spannung

6.4.2 Vergleich mit der homogenen Anordnung

Vergleicht man die Partikelbewegung und das Teilentladungsverhalten dabei in einem quasi-homogenen Feld mit dem homogenen Feld, erkennt man dass:

- Die Abhebefeldstärke in einem quasi homogenen Feld etwas höher ist und die Standardabweichung von dem Mittelwert etwas geringer.
- Die Amplituden der Teilentladungswerte beim quasi-homogenen Feld sind kleiner (z.B. bei einem homogenen Feld mit 1,13kV/mm positiver Spannung erreichen die Amplituden der TE-Impulse bis zu 30pC beim Quasi-homogenen Feld entspricht 1,2kV/mm den Teilentladungsamplituden von 5pC).
- Genauso wie bei dem homogenen Feld haben 6mm Partikel unter positiver Spannung nur eine stehende Bewegung erfahren. Die Partikel richten sich nach dem Erreichen der Abhebefeldstärke, aufgrund deren Schwerkraft, auf der negativen Platte auf und gehen nicht mehr in eine Auf- und Abbewegung über.

Die Abbildung 28 zeigt die Schale und Hochspannungselektrode der optimierten Anordnung, welche aus Aluminium bestehen. Die Länge der Hochspannungselektrode beträgt 300 mm und die der Schale 350 mm.



Abbildung 28: Erdelektrode und Hochspannungselektrode der optimierten Anordnung

Die Anordnung ist ein Segment eines coaxialen Rohrleiters mit einem Winkel von 124° . Die effektive Innenfläche der Schale und Außenfläche der Hochspannungselektrode betragen jeweils $52 \cdot 10^3 \text{ mm}^2$ und $19 \cdot 10^3 \text{ mm}^2$:

$$A_{\text{eff.Fläche}} = 2\pi \cdot R \cdot l \cdot c \tag{6.2}$$

- $A_{\text{eff.Fläche}}$ effektive Innenfläche der Schale bzw. Außenfläche der Hochspannungselektrode
- R Radius der Schale bzw. Hochspannungselektrode
- l gemeinsame Länge
- c Korrekturzahl: $(124^\circ) / (360^\circ) = 0,34$

Die elektrische Kapazität der Anordnung beträgt laut Formeln $5,64 \text{ pF}$:

$$C_{\text{op.Anord.}} = C_{\text{zyl.kon.}} \cdot c \tag{6.3}$$

$C_{\text{op.Anord}}$ Kapazität der optimierten Anordnung

Die Kapazität der gesamten Anordnung wurde zusätzlich auch gemessen. Sie beträgt ca. 40 pF .

Berechnete Kapazität von der optimierten Anordnung	5,64pF
Gemessene Kapazität ⁴	40pF

Tabelle 11: Berechnete und gemessene Kapazität der optimierten blanken Anordnung

⁴ Da bei den Kapazitätsmessungen die Störkapazitäten nicht unterdrückt werden konnten, beinhaltet die gemessene Kapazität d zusätzlich Streukapazitäten, die parallel zu der Kapazität der optimierten Anordnung aufgebaut sind.

Die zu untersuchenden Partikel wurden aus einem Kupferdraht mit 2, 4 und 6mm zugeschnitten. Dieses hatte einen Durchmesser von 0,25mm. Da sich das Feld auf der Oberfläche der Schale an verschiedenen Stellen um kleine Werte unterscheidet, wurde bei den Messungen versucht, das Partikel immer genau unter die obere Elektrode bzw. auf den tiefsten Stellen des Schalenbodens zu legen, um immer die gleiche Bedingungen für alle Messreihen zu erreichen. Für jede Messreihe wurden mindestens 30 Versuche durchgeführt, um eine statistische Auswertung der Werte zu ermöglichen.

6.6 Messergebnisse

6.6.1 Abhebefeldstärke und Teilentladungsmessung

Im Folgenden wurden die gemessenen Abhebespannungen sowie die dabei auftretenden Teilentladungen genauer untersucht. Dabei ist zu beachten, dass wegen der besonderen Anordnung der Elektroden der Spannungswert beim Übergang von stehender Bewegung zur Auf- und Abbewegung nicht genau ermittelt werden konnte. Des Weiteren konnten noch folgende Beobachtungen gemacht werden:

- Zur Verbesserung der Isolierfestigkeit wurde der Druck des Gases auf 0,4MPa erhöht. Dabei wurden die Teilentladungen soweit unterdrückt, sodass kein nennenswerter Messwert mehr auftrat.

und

- Aufgrund ihres Gewichts und ihrer geringen Länge konnten die 2mm Partikel nicht auf der Schale verbleiben, sondern sprangen sofort nach Erreichen der Abhebefeldstärke aus der Anordnung heraus.

Daher konnten die TE-Größen sowie die Abhebespannung der 2mm Partikel bei positiver Spannung nicht bestimmt werden.

6.6.2 Einfluss der Partikellänge

Die Oberflächenladungen lassen sich mit der Formel (5.3) für die Erdelektrode bei einer Spannung von 80kV wie folgend berechnen:

$$Q = C \cdot U = 5,64 \cdot 10^{-12} \cdot 80 \cdot 10^3 = 4,512 \cdot 10^{-7} C \quad (6.4)$$

die Oberflächenladungsdichte auf der Schale beträgt dann:

$$\sigma_{\text{blanke Schale}} = \frac{Q}{A} = \frac{4,512 \cdot 10^{-7}}{52552 \cdot 10^{-6}} = 8,585 \cdot 10^{-6} \frac{C}{m^2} \quad (6.5)$$

Mit unterschiedlicher Partikellänge werden auch laut Formel (2.28) die aufgenommenen Ladungen der Partikel von der Erdelektrode variieren. Tabelle 12 zeigt die von verschiedenen Partikeln an der Schale aufgenommenen Ladungen unter 0,1, 0,2 und 0,4MPa SF₆. Zu beachten ist, dass die angegebenen Werte den von Partikeln aufgenommenen Ladungsgrößen im Zeitpunkt deren Aufrichten entsprechen:

Partikellänge	0,1MPa		0,2MPa		0,4Mpa	
	positiv	negativ	positiv	negativ	positiv	negativ
mm	[pC]	[pC]	[pC]	[pC]	[pC]	[pC]
2	-	13,81	-	13,76	-	13,81
4	27,68	28,06	26,96	27,71	28,34	27,77
6	39,79	41,22	40,48	40,96	40,78	41,65

Tabelle 12: Berechnete aufgenommenen Ladungsgrößen unterschiedlicher Partikellänge im Zeitpunkt deren Aufrichten in verschiedenen Drücken

Die Ladungsaufnahme der Partikel ist proportional ihrer Länge und verhält sich daher linear. Laut der theoretischen Formel ist die Ladungsaufnahme vom Gasdruck unabhängig. Abbildung 29 zeigt die Abhängigkeit der Ladungsaufnahme der verschiedenen Partikeln bei 0,2MPa Gasdruck unter positiver und negativer Spannung.

Ist die Spannung negativ, so ist die untere Elektrode auf Erdpotential, sie ist also die positive Elektrode. Geht das Partikel von der unteren Elektrode zu der Hochspannungselektrode, so setzt sich die Bewegung des Partikels ihrer Schwerkraft entgegen, da ja der Gewichtskraftvektor genau Richtung untere Elektrode wirkt. Deshalb ist auch die von der Ladungsaufnahme abhängige Feldstärke bei der negativen Spannung etwas höher als die der positiven. Die Diagramme der

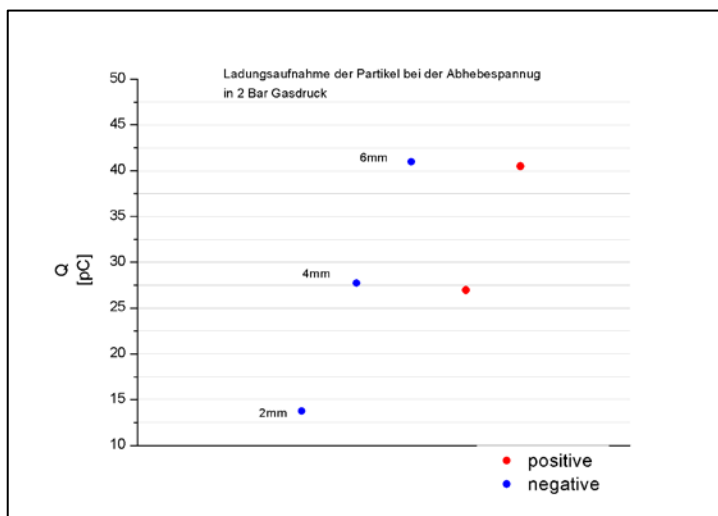


Abbildung 29: berechnete aufgenommene Ladungsgröße der 2, 4, 6mm Partikel in 0,2MPa Gasdruck

Ladungsaufnahme der verschiedenen Partikeln bei 0,1 und 0,4MPa Gasdruck sind im Anhang zu finden. Je länger die Partikel sind, desto größer ist naturgemäß deren Gewicht. Das Partikel benötigt dann nämlich eine größere Abhebefeldstärke. Jedoch mit der Größe des Partikels steigt auch die Ladungsaufnahme. Das kann man mit dem Vergleich der Abhebefeldstärke der 2mm und 4mm Partikel erkennen.

In der Tabelle 13 sind die theoretische und gemessene Abhebefeldstärke, bei der das Partikel von der Elektrode abhebt, für Partikellängen von 2, 4, 6mm bei 0,1MPa dargestellt.

Partikellänge	theoretische Abhebe Feldstärke	durchschnittliche Spannung		durchschnittliche Abhebefeldstärke	
		positiv	negativ	positiv	negativ
[mm]	[kV /mm]	[kV]	[kV]	[kV/mm]	[kV/mm]
2	0,948	-	78,28	-	0,955
4		78,39	79,53	0,957	0,97
6		75,13	78,56	0,917	0,95

Tabelle 13: Abhebefeldstärke und –spannung verschiedener Partikellängen bei 0,1MPa SF6

Die Tabelle 14 und 12 beinhalten die theoretische und gemessene Abhebefeldstärke für genannte Partikel bei 0,2 und 0,4MPa Gasdruck.

Partikellänge	theoretische Abhebe- Feldstärke	durchschnittliche Spannung		durchschnittliche Abhebefeldstärke	
		positiv	negativ	positiv	negativ
[mm]	[kV /mm]	[kV]	[kV]	[kV /mm]	[kV /mm]
2	0,948	-	78,01	-	0,952
4		76,39	78,55	0,932	0,958
6		76,45	77,4	0,933	0,944

Tabelle 14: Abhebefeldstärke und –spannung verschiedener Partikellängen bei 0,2MPa SF6

Partikellänge	theoretische Abhebe Feldstärke	durchschnittliche Spannung		durchschnittliche Abhebefeldstärke	
		positiv	negativ	positiv	negativ
[mm]	[kV /mm]	[kV]	[kV]	[kV /mm]	[kV /mm]
2	0,948	-	78,3	-	0,955
4		80,44	79,49	0,98	0,96
6		77,41	78,67	0,94	0,96

Tabelle 15: Abhebefeldstärke und –spannung verschiedener Partikellängen bei 0,4MPa SF6

6.6.3 Einfluss der verschiedenen Drücke

Wie in der Formel (2.29) ersichtlich ist, ist die Abhebefeldstärke vom Gasdruck unabhängig. In den Abbildungen der nächsten Seite ist zu sehen, dass es keine wesentlichen Unterschiede bezüglich der Abhebefeldstärke gibt, wenn der Druck erhöht wird. Die theoretische Abhebefeldstärke wurde aus der Formel (2.29) berechnet. Die gemessenen Werte der Abhebespannung beim quasihomogenen Feld liegen ungefähr im Bereich theoretischen Abhebefeldstärke, sowie auch die Werte beim homogenen Feld. Da die Partikeln sich mit der negativen Spannung zu der Hochspannungselektrode bewegen, ist die Abhebefeldstärke etwas größer als bei positiver Spannung.

Abbildung 30 zeigt die statistische Auswertung der Abhebefeldstärken der 2mm Partikel bei 0,1MPa und 0,4MPa Gasdruck.

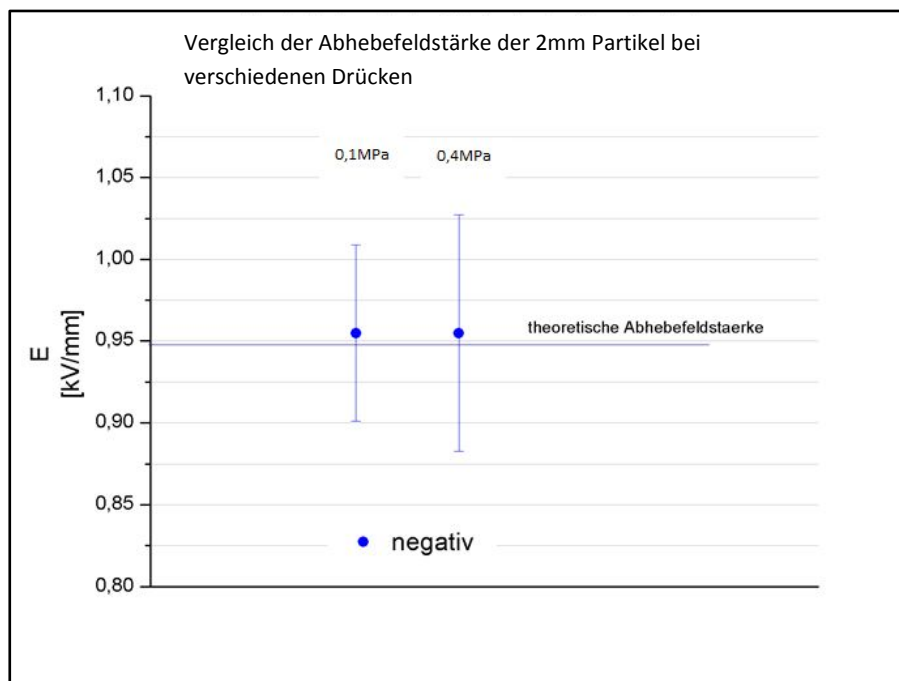


Abbildung 30: Abhebefeldstärke der 2mm Partikel bei 0,1 und 0,4MPa Gasdruck

und die Abbildungen der nächsten Seite zeigen auch die Abhebefeldstärken der 4mm bzw. 6mm Partikel bei 0,1MPa und 0,4MPa Gasdruck.

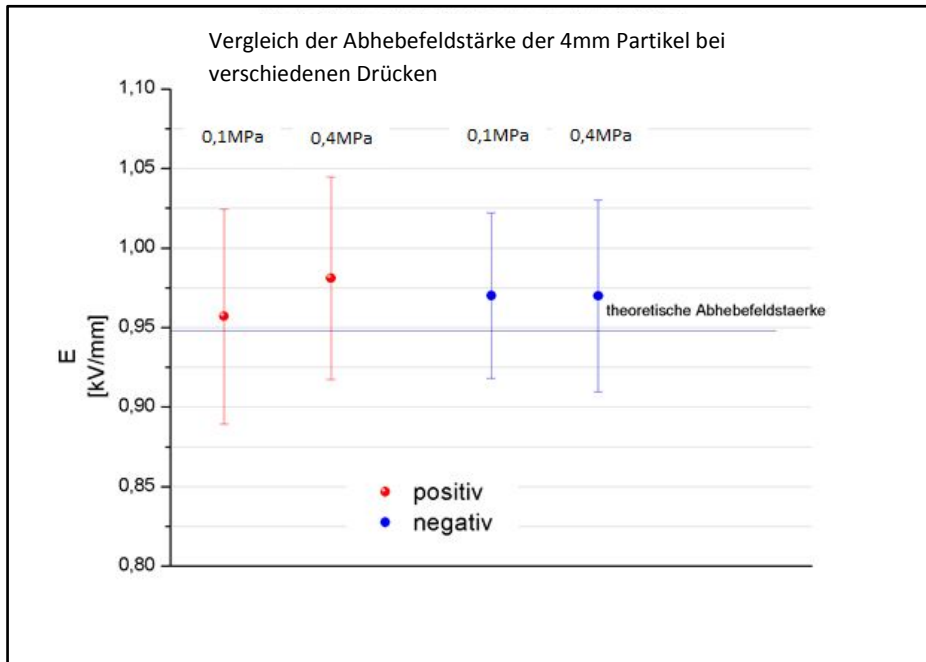


Abbildung 31: Abhebefeldstärke der 4mm Partikel bei 0,1 und 0,4MPa Gasdruck

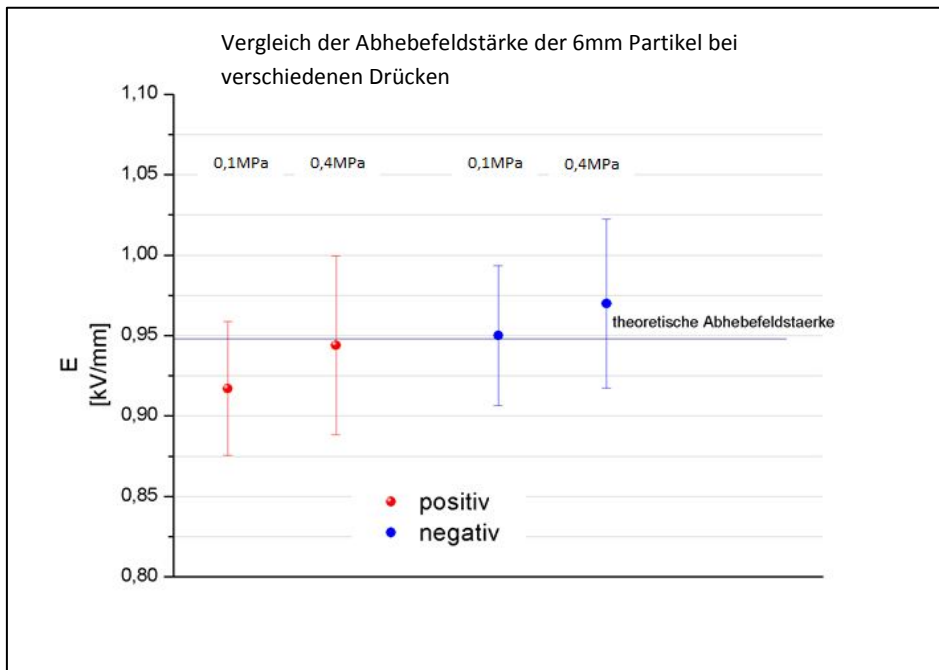


Abbildung 32: Abhebefeldstärke der 6mm Partikel bei 0,1 und 0,4MPa Gasdruck

Wenn man die Abbildungen genau betrachtet, merkt man, dass die 6mm Partikel Werte unter der theoretischen Abhebefeldstärke erreichen, was bei den 2mm bzw. 4mm Partikel nicht vorgekommen ist. Das könnte sich vermutlich durch die Rauigkeit der Oberfläche erklärt werden, da die 6mm

Partikel wegen ihrer Länge stärker von den lokalen Feldstärkeerhöhungen auf der Schale betroffen sind. Deshalb erreichen sie ihre Abhebefeldstärke schon früher als die kürzeren Partikellängen.

Zusammenfassend wurden folgende Punkte bei den Messungen unter höheren Gasdruck beobachtet:

- Stabilere Bewegung der Partikel im Vergleich zu 0,1MPa Gasdruck.
- Die Partikel bewegen sich bei höheren Gasdrücken eher zu den Kanten der Hochspannungselektrode (negative Polarität) bzw., dorthin wo eine höhere Feldstärke herrscht.
- Wird an der Hochspannungselektrode eine positive Spannung angelegt, gehen die Partikel mit kürzerer Länge gleich nach dem Aufrichten sehr rasch zu einer Auf- und Abbewegung über. Grund dafür ist, dass die TE-Aktivität bei höheren Drücken unterdrückt wird. Wenn das Partikel Ladungen von der Elektrode aufgenommen hat, behält es diese dann auch. Wobei es sich dann aufgrund gleichnamiger Ladung von der unteren Elektrode abstößt und von der oberen Elektrode angezogen wird. Denn die elektrostatische Kraft übersteigt alle anderen Kräfte, die entgegenwirken. Im Zeitpunkt des Aufrichtens reichen die entgegenwirkenden Kräfte nicht mehr aus um die Partikel auf der Elektrode zu halten. Das Partikel fliegt dann zu der Hochspannungselektrode. Dort kommt es zum Ladungsaustausch und auch zu einer mechanischen Reflexion. Das Partikel bewegt sich dann zur Gegenelektrode. Dieser Vorgang dauert solange, bis dass das Partikel die Elektrodenanordnung verlässt.
- Die 6mm langen Partikel sind im Vergleich mit anderen längen stärker von der Rauigkeit der Oberfläche betroffen, sodass die gemessenen Werte unter dem theoretischen Wert ergibt.

6.6.4 Partikelverhalten

Wenn das Feld entlang der Elektroden nicht gleichmäßig verteilt ist, führt dies zu Abhängigkeiten von der Ladungsaufnahme des Partikels. Dies führt zu Bewegungen des Partikels zu Stellen, wo eine höhere Feldstärke herrscht. (vgl. hierzu: Sakai, Abella, Suehiro, & Hara, 2002)

- Positive Spannung

Die Partikel richten sich ab einer bestimmten Spannung von der Schale auf. Es kommt dann zu einer stehenden Bewegung auf der erdseitigen Elektrode. Ist das Partikel erst entlang der Feldlinien ausgerichtet, kommt es zu ständiger Teilentladung. Bei der Erhöhung des Druckes wird die Teilentladungsintensität erschwert, weil die Festigkeit des Gases erhöht wird. Die Partikel bewegen sich nämlich instabiler auf der negativen Schale und erleben oft eine Ab-, und Aufwärtsbewegung (Bouncing-Motion), die aufgrund des Auf- und Entladevorganges der Partikel vorkommen. Abbildung 33 zeigt eine stehende Bewegung eines 6mm Partikel. In der

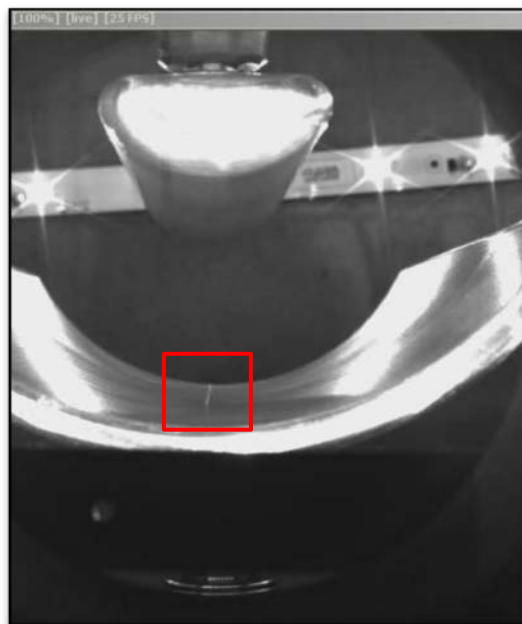


Abbildung 33: Bewegung eines Partikels auf der Schale, positive Spannung, 80kV

Abbildung 34 sind die Teilentladungsimpulse der positiven Spannung von 80kV ersichtlic.

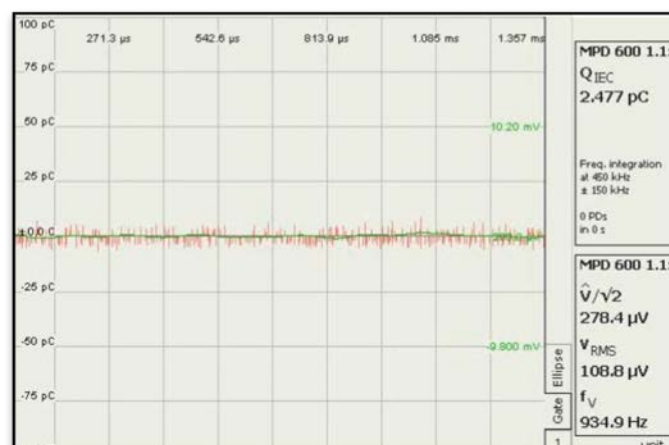


Abbildung 34: TE-Impulse der 6mm Partikel, 80kV positive Spannung

- Negative Spannung

Wie in der Abbildung 35 ersichtlich ist, bewegt sich das von der Schale positiv aufgeladene Partikel aufgrund einer elektrostatischen Kraft zu der negativen Hochspannungselektrode. An der negativen Hochspannungselektrode bewegt es sich bei einem niedrigen Gasdruck stabiler als bei höheren Drücken.

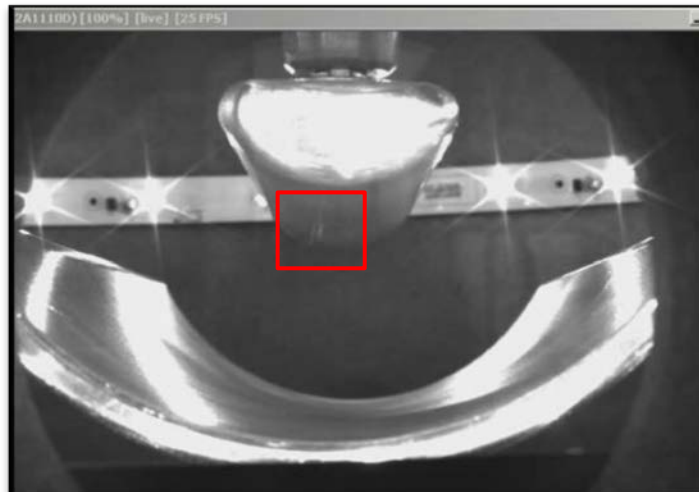


Abbildung 35: Bewegung der Partikel auf der Schale, negative Spannung 80kV

Während der Bewegung des Partikels an der Hochspannungselektrode wird regelmäßig der Kontakt unterbrochen, da aufgrund der Schwerkraft und elektrostatischen Kraft eine Wechselwirkung besteht. Die Teilentladungsimpulse wie in der Abbildung 36 dargestellt weisen daher große Differenzen bezüglich Impulsabstände und Amplitudenhöhe auf.

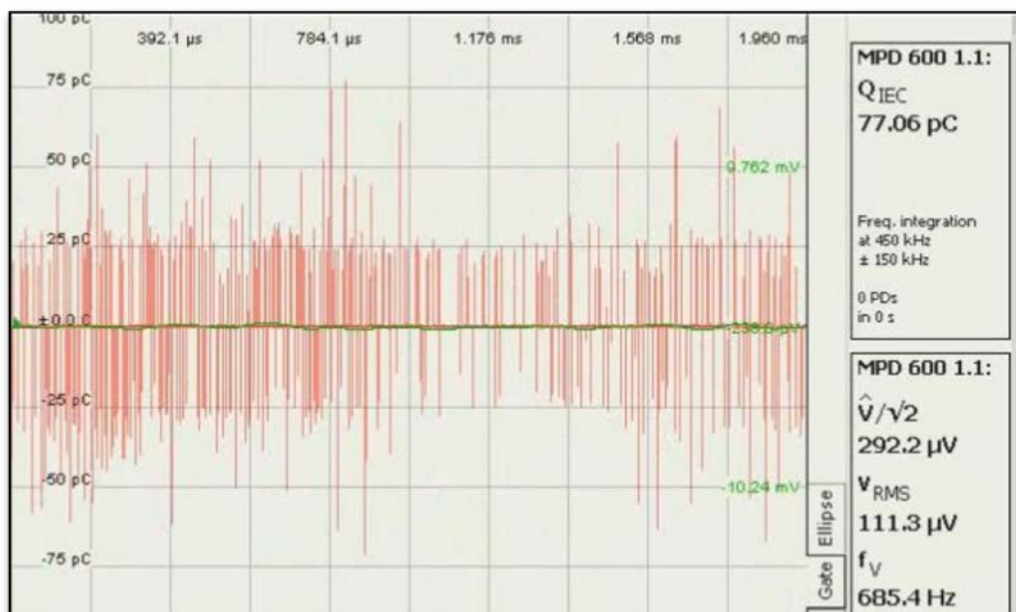


Abbildung 36: TE-Impulse der 6mm Partikel, negative Spannung 80kV

Je höher der Druck wird desto instabiler bewegen sich die Partikel und auch oft an den Stellen, wo eine höhere Feldstärke herrscht. Vergleicht man diese TE-Impulse mit den Impulsen der positiven Spannung, sind die Impulse der negativ verursachten Spannung wesentlich höher.

Der Gasdruck hat einen wesentlichen Einfluss auf die Bewegung der Partikeln. Da die Partikeln unter hohen Druck aufgrund der hohen elektrischen Festigkeit des Isoliergases keine stabile Teilentladung verursachen können. Es kommt daher öfters zu einer Auf- und Abbewegung und somit zu einem Umladevorgang an den Elektroden. Vor allem Partikel kürzerer Länge tendieren eher zu einer Auf- und Abbewegung. Die Gravitationskraft bei längeren Partikeln wirkt wegen deren Gewicht stabilisierenden auf die Partikelbewegung.

Da die Partikeln mit kurzen Längen bei den höheren Drucken öfter zu einer Auf- und Abbewegung kommen und nicht mehr von der Kamera zu erfassen sind, wurden in der Tabelle 16 nur die Teilentladungswerte von 6mm Partikel bei 0,1MPa SF₆ aufgelistet. Abhängig von der Polarität der angelegten Spannung bewegen sich die Partikel entweder an der Schale oder Hochspannungselektrode. Als Beispiel wurde eine Einsatzspannung von 80kV berücksichtigt. Diese Spannung entspricht einer Feldstärke von 0,98kV/mm auf der Schale und 2,86kV/mm an der Hochspannungselektrode. Daher ist zu beachten, dass die Teilentladungen unter gleichen Bedingungen mit negativer Spannung wesentlich höher sind.

Partikel [mm]	Teilentladungen bei der positiven Spannung [pC]	Teilentladungen bei der negativen Spannung [pC]
2	-	22
4	5,32	40
6	12	73

Tabelle 16: TE-Amplitude verschiedener Partikellängen unter negativen und positiven Spannung von 80kV

Durch Teilentladungsimpulse kann man es erkennen, ob das Partikel eine stehende Bewegung an der Elektrodenoberfläche ausführt oder es zu einer Auf- und Abbewegung kommt. Bei einer Auf- und Abbewegung sind nur einzelne Impulse zu erkennen, bei stehender Bewegung jedoch werden ständig aufeinanderfolgende Impulse detektiert.

6.6.5 Diskussion

Zu der Abhebefeldstärke:

- Die Abhebefeldstärke ist von der Ladungsaufnahme des frei beweglichen Partikels und dessen Länge, Durchmesser und speziell Gewicht abhängig. Das kann man aus dem Vergleich der gemessenen Werte mit dem theoretischen Wert erkennen.
- Ob ein Partikel nach dem Aufrichten in eine Auf- und Abbewegung übergeht oder nicht, ist von der Polarität der angelegten Spannung, der Feldstärke, der Partikellänge und dem Gasdruck abhängig.
- 2mm Partikel gehen bei einer positiven Spannung aufgrund ihrer geringeren Gewichtskraft öfter nach dem Aufrichten in eine Auf- und Abbewegung über.
- Die angegebenen Werte für Abhebefeldstärke zeigen bei den 6mm Partikel einen Unterschied. Sie sind größer als die der 2mm Partikel aber kleiner als die Werte der 4mm Partikel. Dies kann vermutlich dadurch erklärt werden, dass die elektrostatische Kraft sich der Gewichtskraft entgegensetzt. daher gibt es einen optimierten Wert für die Länge der Partikel, ab dem die elektrostatische Kraft einen größeren Einfluss auf das Partikel hat. Dies hat zur Folge, dass das Partikel sich bei einer niedrigeren Spannung aufrichtet.

Zu den auftretenden Teilentladungen:

- Je länger das Partikel, desto höher sind Teilentladungswerte.
- Die Teilentladungsamplituden sind bei höheren Drücken kleiner. Die Bewegung des frei beweglichen Partikels wird davon beeinflusst. Bei höheren Drücken kommt es öfter zu einer Auf- und Abbewegung.
- Das Partikel bewegt sich bei der negativen Spannung an der Hochspannungselektrode. Die Teilentladungswerte sind aufgrund der hohen Feldstärke an der Hochspannungselektrode im Vergleich zur positiven Spannung wesentlich größer.
- Wenn sich das Partikel im Gasraum befindet und nicht im Kontakt mit einer Elektrode ist, wird keine Teilentladung gemessen. Erst wenn das frei bewegliche Partikel im Kontakt mit den Elektroden kommt, können TE-Impulse detektiert werden.
- Man kann die Bewegungsart eines Partikels aufgrund der TE-Amplituden und der Impulsdichte über die Zeit erkennen.

7 Zusammenfassung

Trotz vieler Vorteile der gasisolierten Leitungen können die frei beweglichen Partikeln deren Zuverlässigkeit gefährden. Da das Verhalten des frei beweglichen Partikels unter DC-Beanspruchung in einem quasihomogenen Feld anders als in einem homogenen Feld und auch AC-Spannung ist, sollte deren Bewegung und die vorkommenden Teilentladungen genauer untersucht werden.

Die Untersuchungen wurden mit zwei Elektrodenanordnungen durchgeführt. Um eine optimierte Feldverteilung zu erhalten, wurden die Anordnungen aller zuerst mittels eines FEM-Programms simuliert. Der Abstand der Elektrode wurde so ausgewählt, damit das elektrische Feld sich zwischen den Elektroden einer realen gasisolierten Leitung nähert und ein Homogenitätsgrad von 57% herrscht. Für die ersten Messreihen wurde die Kugel-Platte-Anordnung verwendet. Die Kugel besteht aus Stahl, die Platte aus Aluminium. Die Oberfläche der Platte wurde mit Chrom beschichtet, damit eine gleichmäßige Feldverteilung an deren Oberfläche herrscht. Da aber die Partikeln nicht genau unter der Kugel gelegt werden können, wo der erwünschte Homogenitätsgrad gilt, wurden die weiteren Messungen mittels einer optimierten Anordnung durchgeführt. Die neue Anordnung ist ein Segment einer Rohrleitung. Der Abstand zwischen Elektroden beträgt 52mm.

Wenn bei einer koaxialen Rohrleiteranordnung an der Hochspannungselektrode eine **negative Spannung** angelegt wird, wird das auf der Erdelektrode liegende frei bewegliche Partikel von ihrer Oberfläche positive Ladungen aufnehmen. Es bewegt sich dann zu der Hochspannungselektrode, solange eine Hochspannung angelegt ist. Dabei treten an den Spitzen des beweglichen Partikels Teilentladungen auf. Die Höhe der Teilentladungen ist stark von der Partikelgröße abhängig. Aber auch von dem Gasdruck und der entsprechenden Feldstärke. Je höher der Gasdruck ist, desto niedriger sind die Teilentladungswerte der Partikel. Wird die Spannungshöhe gesenkt, beginnt das Partikel eine Ab- und Aufbewegung, bis es vollständig entladen ist und die Elektrodenanordnung verlässt. Je höher der Gasdruck und kürzer die Partikellänge ist, geht das Partikel öfter während der Messungen in eine Auf- und Abbewegung über.

Ist an der Hochspannungselektrode eine **positive Spannung** angelegt, richten sich die Partikeln nach dem Erreichen der Abhebespannung in Richtung der Feldlinien auf der Erdelektrode. Die größeren Partikel bewegen sich aufgrund deren Schwerkraft und aufgenommenen Ladungen stabiler. Die kürzeren Partikeln verlassen die Anordnung, wenn ihre Abhebefeldstärke erreicht wird. Die Einsatzspannung der Teilentladung ist gleich mit der Abhebespannung. Die längeren Partikeln verursachen einen höheren Teilentladungswert.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Länge der untersuchten Partikeln und der Gasdruck die Abhebespannung der Partikel kaum beeinflussen, wobei die längeren Partikeln stärker von der Viskositätskraft und Oberflächenrauigkeit beeinflusst sind. Die kürzeren Partikeln erleben aufgrund ihres Gewichts öfters eine Auf- und Abbewegung. Deshalb sind die 6mm Partikeln bei einer negativen Spannung aufgrund der hohen Teilentladungswerte kritischer.

8 Weiterführende Arbeiten

8.1 Allgemeines

- Eine Beschichtung kann den Ladungsfluss und daher den Ladevorgang eines auf der Schale liegenden Partikels beeinflussen. Aus diesem Grund ist es erforderlich den Aufladevorgang eines Partikels auf einer Isolierschicht genauer zu untersuchen. Abbildung 37 zeigt den Feldverlauf entlang einer zylinderförmigen gasisolierten Leitung, die auch als einen Zylinderkondensator betrachtet werden kann. Zwischen dem Innenleiter (links in der Abbildung) und der Außenhülle (rechts) befindet sich eine Gasschicht und ein fester Isolierstoff mit einer Dielektrizitätszahl von 7,7.

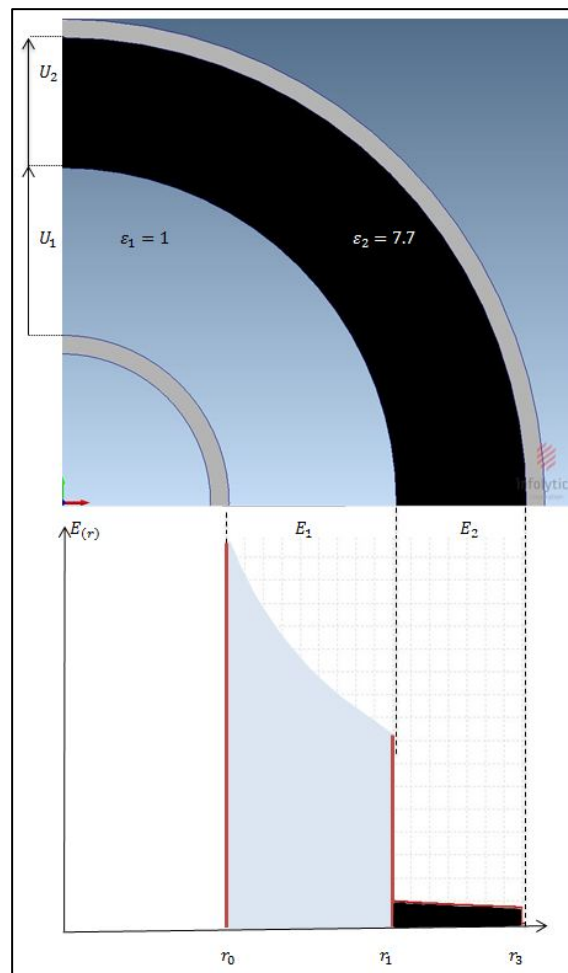


Abbildung 37: Zylindersymmetrische Schichtung unterschiedlicher relativen Dielektrizitätszahlen $\epsilon_1 : \epsilon_2 = 1 : 7.7$

Es ist zu beachten, dass der Zweck der Beschichtung in dem Fall den Einfluss auf den Ladevorgang des Partikels hat, wobei zusätzlich die Durchschlagspannung der gesamten Anordnung auch berücksichtigt werden müsste (Feldverdrängung). Eine hohe

Dielektrizitätszahl der Isolierschicht auf der Schale ergibt eine große Kapazität der gesamten Anordnung. Dies kann mit der Zeit zum Aufladen der Isolierschicht und zu hohen Flächenladungen der gaseitigen Isolierschicht führen.

Ein anderer Parameter ist der Widerstandswert der Isolierschicht. Der große Widerstand der Isolierschicht kann einen Ladungsfluss durch die Isolierschicht verhindern. Dabei ist auch das Aufladeverhalten der Isolierschicht zu berücksichtigen.

8.2 Isolierschicht

Um den Einfluss einer Beschichtung auf die Abhebespannung und die von den Partikel auftretenden Teilentladungen zu untersuchen, wurde die Hochspannungselektrode beschichtet

Die Lackschicht auf den Elektroden hat ungefähr eine Dicke von 0.1mm, deren Durchgangswiderstand laut IEC60093 gemessen wurde. Abbildung 38 zeigt das Diagramm des Widerstandswertes über der Zeit. Der genannte Lack hat im stationären Zustand einen Widerstand von $8,27 \cdot 10^{11} \Omega m$ bzw. eine Leitfähigkeit von $1,21 \cdot 10^{-12} S/m$. Des weiteren wurde die Permittivität der Isolierschicht gemessen, welche den Wert von 7,7 hat.

Da die Lackschicht nicht gleichmäßig auf der Oberfläche der Elektroden verteilt ist, weist sie an unterschiedlichen Stellen unterschiedliche Durchgangswiderstandswerte auf. Das Fließen der Ladungsträger durch die Isolierschicht kann dadurch beeinflusst werden.

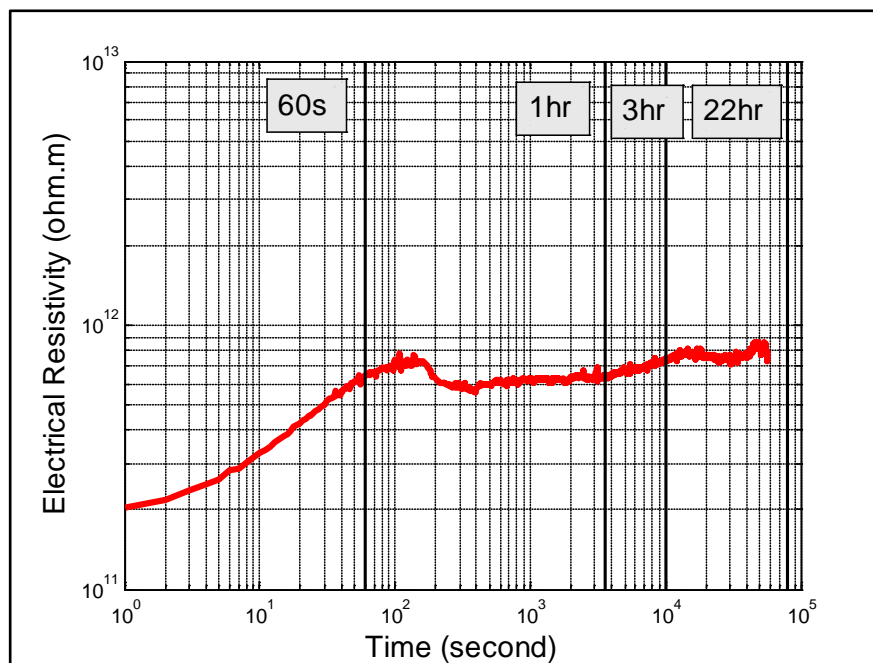


Abbildung 38: Messung des Durchgangswiderstandes der Isolierschicht

Die Messungen mit beschichteten Elektroden wurden in drei verschiedenen Varianten durchgeführt:

- Beschichtete Hochspannungselektrode – blanke Schale
- Platte-Platte Anordnung

Für die Messreihen wurden 6mm Kupferpartikel mit einem Radius von 0,26mm bei verschiedenen Drücken mit SF_6 von 0,1MPa, 0,2MPa und 0,4MPa verwendet. Da bei der optimierten Anordnung die Abhebefeldstärke nicht erreicht wurde, wurden weitere Messungen mittels beschichteter Platte-Platte-Anordnung durchgeführt, um den Einfluss der Beschichtung in einem homogenen Feld untersucht werden zu können.

8.3 Platte-Platte-Anordnung

Um ein elektrisch homogenes Feld zu erreichen, wurden zwei kreisförmige Plattenelektroden mit Rogowski-Profil verwendet. Die Elektroden, welche aus Aluminium bestehen, wurden verchromt, um eine möglichst glatte Oberfläche zu erhalten. Die Abbildung 39 zeigt die homogenen Feldlinien zwischen den Elektroden bei einem Abstand von 10mm und einer Spannung von 10kV. (Müller, 2012)

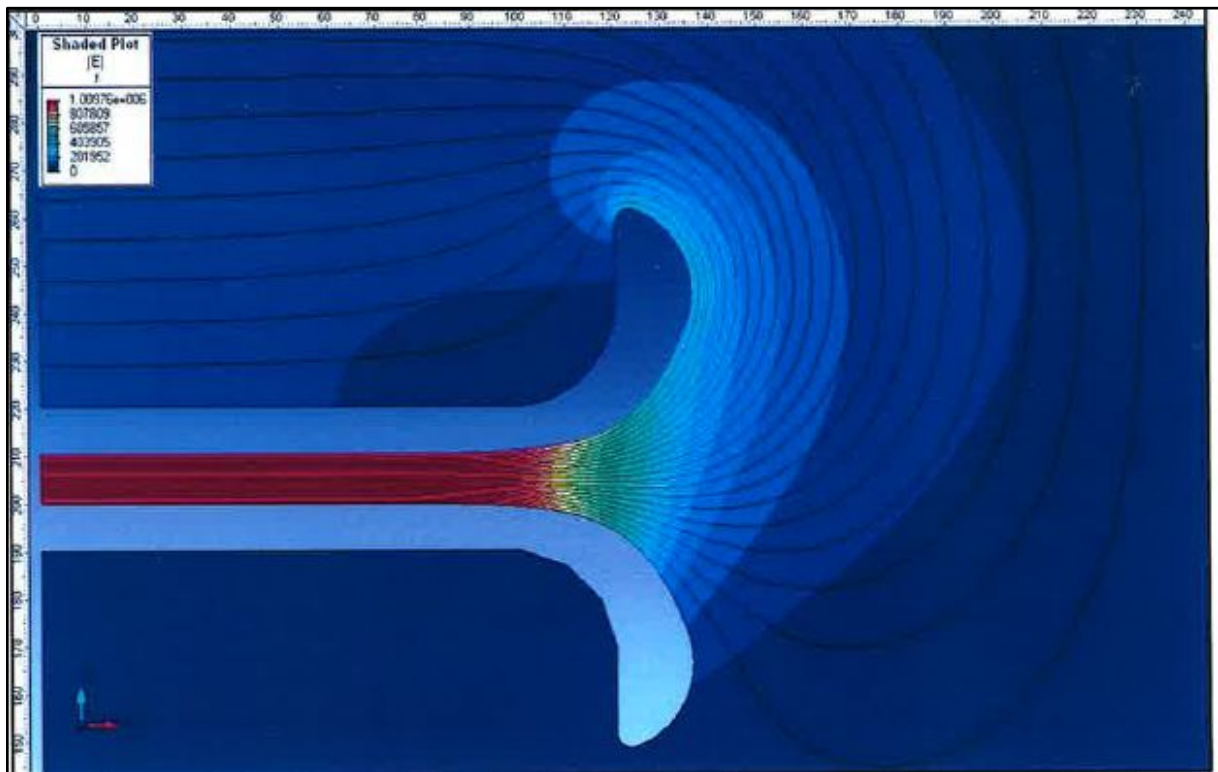


Abbildung 39: Feldverlauf zwischen den Platte-Platte-Elektroden (Müller, 2012)

Es wurde die untere geerdete Platte mit dem gleichem Lack beschichtet, welcher bei der optimierten Anordnung verwendet worden ist. Die Messungen wurden bei zwei unterschiedlichen Abständen 5mm und 10mm und nur negativer Spannung durchgeführt. Bei diesen Messungen konnte festgestellt werden, dass die Durchschlagsfestigkeit nicht groß genug war um die Abhebespannung der Partikeln zu erreichen.

Bei negativer Spannung kommt es bei den Abständen von 5mm bzw. 10mm, entsprechend der Feldstärken von ca. 3,5- und 8kV/mm, ohne dass das Partikel sich bewegt, zum Durchschlag. Der Durchschlag kommt nicht unbedingt dort vor, wo sich das Partikel befindet. Am Messgerät wurden weder TE-Impulse noch Abhebespannung gemessen. Das heißt, dass der Durchschlag ohne Teilentladungen stattfindet.

Die Isolierschicht der Oberfläche der Platten war nach dem Durchschlag beschädigt. Aus diesem Grund konnten keine weiteren Messungen durchgeführt werden. Die Platten müssten nämlich

nochmal beschichtet werden, was hinsichtlich der geänderten Dicken der Isolierschicht die Bedingungen verändern könnte, sodass keine gleichen Voraussetzungen mehr herrschen würden. Außerdem waren das Kabel und die Durchführung des Aufbaus wegen der Höhe der auftretenden Durchschlagsspannung beschädigt, sodass bei den darauffolgenden Messungen äußere Teilentladungen gemessen wurden.



Abbildung 40: Überschreiten der Durchschlagfestigkeit des SF₆-Gases bei einer Platte-Platte-Anordnung, bevor die Abhebegeldstärke erreicht ist. Die Punkte zeigen die Durchschlagkontakte auf der Isolierschicht

8.4 Beschichtete optimierte Anordnung

Die Isolierschicht hat eine hohe relative Dielektrizitätszahl ϵ_r , die die Ladungsaufnahme der Partikel beeinflusst. Aus diesem Grund wurde die Kapazität der beschichteten Anordnung neu ausgemessen.

Hat die Beschichtung eine Dicke von 0,1mm, beträgt dann die gemessene Kapazität der Gesamtanordnung in dem Fall **39.9pF**, welche sich von der Kapazität der blanken Anordnung kaum unterscheidet.

Laut Feldberechnung verursacht die Isolierschicht keine nennenswerte Änderung der Feldverteilung zwischen der Hochspannungselektrode und der Schale. Die elektrische Feldstärke erhöht sich im

diesem Fall aufgrund der dünnen Schichtdicke an der Oberfläche der Isolierschicht nur um 0,01kV/mm.

8.4.1 Messergebnisse

Beschichtete Hochspannungselektrode – blanke Schale

- **Positive Spannung:**
Die Abhebefeldstärke bei positiver Spannung wurde in diesem Fall nur um 0,045 kV/mm erhöht. Das heißt, dass die Beschichtung der Hochspannungselektrode keine große Änderung der Abhebespannung bzw. Abhebefeldstärke verursacht. Wegen der Aufladung der Isolierschicht an der Hochspannungselektrode verhalten sich die Partikel gleich wie bei der blanken Anordnung.
- **Negative Spannung:**
Die Partikelbewegung bei negativer Spannung mit Beschichtung unterscheidet sich grundlegend von der blanken Anordnung. Die Partikel laden sich auf der Schale mit positiven Ladungen auf und bewegen sich dann zu der negativen Hochspannungselektrode. Sie werden dort an der Lackschicht entladen und dann zu der Schale zurückgestoßen. Dadurch sieht man, dass im Vergleich zur blanken Anordnung öfters eine Auf-, Abwärtsbewegung der Partikel zwischen den Elektroden zustande kommt. Wegen der Rauigkeit, und ungleichmäßigen Beschichtung und der hohen Feldstärke an der Hochspannungselektrode kommt es zu unterschiedlich starken Auf- und Abbewegungen (Bouncing- oder Standing-Motion) der Partikeln.

Aufgrund der Auflösung der Kamera kann das Verhalten der Partikel nach dem Entladen an der Hochspannungselektrode nicht genau beobachtet werden. Trotz des hohen Durchgangswiderstands der Isolierschicht könnten die Ladungsträger doch aufgrund der hohen Feldstärke durch die Schicht fließen und eine Aufladung der Partikel verursachen.

Es wird vermutet, dass an den niederohmigen Kontaktpunkten mehr Ladungsträger durch die Isolierschicht fließen können. An den hochohmigen jedoch, da der Ladungsfluss im Vergleich mit der blanken Hochspannungselektrode erschwert ist, überwiegt die Schwerkraft die elektrostatische Kraft. Aufgrund dessen kann das Partikel nicht mehr an die Hochspannungselektrode bleiben. Zusätzlich können Raumladungen, welche aufgrund von Teilentladungen entstehen, die positive Aufladung der Partikel im Gasraum und damit die zufällige Auf- und Abbewegung der Partikel verstärken.

In der Abbildung 41 sind die Abhebefeldstärken der 6mm-Partikel bei beschichteter Hochspannungselektrode-blanker Schale und den blanken Elektroden beim 0,1MPa Gasdruck zusammengefügt.

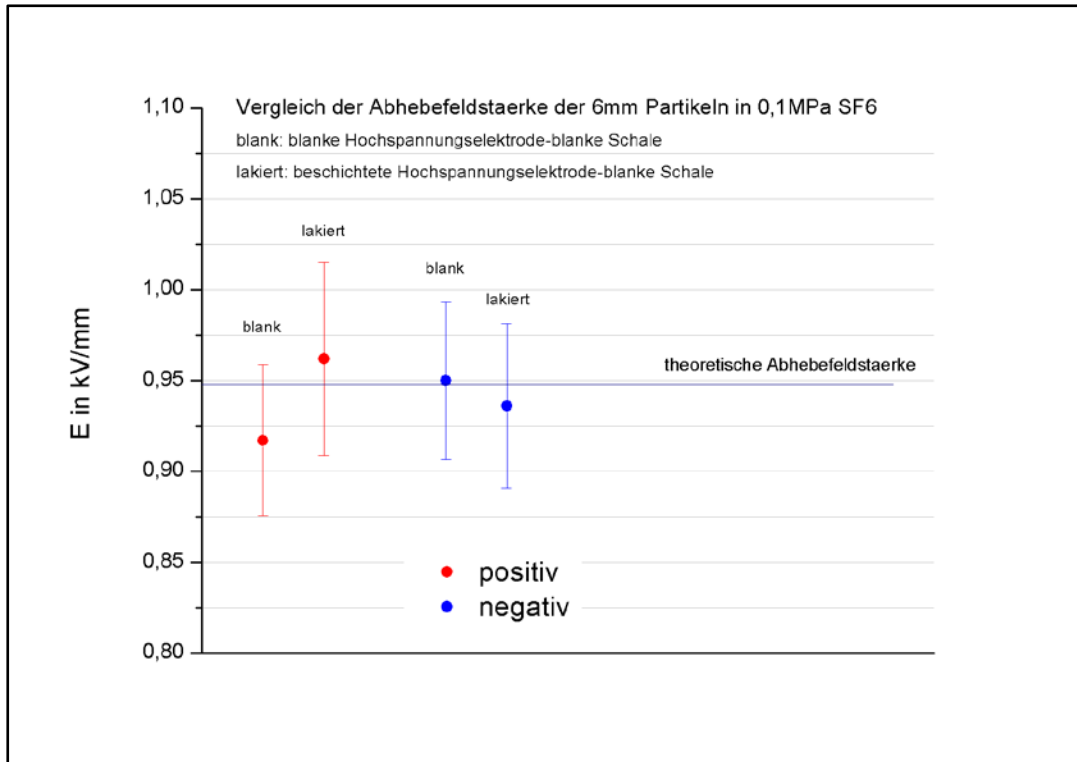


Abbildung 41: Abhebefeldstärke der 6mm Partikel

Die Teilentladungswerte der Partikel bei positiver und negativer Spannung von 80kV und 0,1MPa Gasdruck bei beschichteter Hochspannungselektrode- blanker Schale sind in der Tabelle 17 zu sehen. Bei der Teilentladungsmessung wurde keine erhebliche Änderung der Teilentladungsimpulsen bzw.-amplituden im Vergleich mit der blanken Anordnung beobachtet.

Partikel [mm]	Teilentladungen bei der positiven Spannung [pC]	Teilentladungen bei der negativen Spannung [pC]
6	15	100

Tabelle 17: TE-Amplitude der 6mm-Partikel auf einer beschichteten Schale unter 80kV und 0,1MPa

Man kann behaupten dass:

- Da die Partikel sich vor dem Anlegen einer Spannung liegend auf den Elektrodenoberflächen befinden, werden sie auch dort aufgeladen. Es gibt daher keinen großen Unterschied zwischen den Abhebefeldstärken dieser Anordnung (beschichtete Hochspannungselektrode-blanke Schale) und der der blanken Anordnung.
 - Bei negativer Polarität wird die Bewegung des Partikels von der beschichteten Hochspannungselektrode beeinflusst. Das kann durch den Ent- und Aufladeprozess des Partikels an der Isolierschicht erklärt werden. Es unterscheiden sich zwei Fälle der Partikelaufladung:
 - Es wird durch die Isolierschicht aufgeladen dann wird auf das geladene Partikel aufgrund der abstoßenden Kraft der gleichnamigen Ladungen von der beschichteten Hochspannungselektrode abgestoßen.
 - oder das Partikel wird nur an der Oberfläche der Hochspannungselektrode entladen, wenn der Durchgangswiderstand der Isolierschicht groß genug ist, sodass keine Ladungsträger zum Partikel fließen können. Es fällt dann aufgrund der Schwerkraft auf die Schale. Dort wird es dann wieder von der Elektrode aufgeladen. Der Vorgang wiederholt sich so lange eine Spannung angelegt ist.
 - Die Bewegung der Partikel ist von der dicke der Isolierschicht abhängig. Eine ungleichmäßige Isolierung an der Elektrodenoberfläche kann unterschiedliche Durchgangswiderstände verursachen. Der Ladungsfluss ist dann davon abhängig.
-

8.5 Partikelverhalten

Ein Partikel kommt erst in Bewegung, wenn es aufgeladen ist. Die dafür nötigen Ladungen werden von der Elektrode aufgenommen. Bei blanker Erdelektrode fließen die Ladungsträger über direkten Kontakt mit dem Partikel.

Ist aber die Erdelektrode beschichtet, können die Ladungen entweder von den freien Ladungsträger des Gases über den Volumenwiderstand der Isolierschicht oder aber auch durch Teilentladungen zwischen Partikel und Isolierschicht aufgenommen werden.

Damit aber Ladungen durch Teilentladung entstehen können, wird eine hohe Feldstärke benötigt. Aufgrund der hohen Festigkeit des Isoliergases, welches bei den Versuchen verwendet wurde und da keine hohen Feldstärken an der Oberfläche der Schale erreicht werden konnte, wurde das Partikel nicht vollständig aufgeladen um Abheben zu können. Daher die dafür benötigte Feldstärke überschreitet Isoliervermögen des Gases.

Auch das Aufladen über den Volumenwiderstand der Lackschicht benötigt eine hohe Feldstärke und auch eine entsprechend lange Dauer. Da diese Bedingungen nicht erfüllt wurden, konnten die Partikeln nicht zur Bewegung kommen.

9 Literaturverzeichnis

- Crastan, V. (2011). *Elektrische Energieversorgung 1*. Berlin Heidelberg: Springer.
- ABB Schaltanlagen-Handbuch*. (2012). Berlin: Cornelsen Verlag Scriptor GmbH & Co. KG.
- Berg, T., Zamani, M., Muhr, M., & Imamovic, D. (2013). Investigations of conductive Particles in Gas Insulated Systems under DC-Conditions.
- Cigre 525, S. C.-R. (February 2013). *Risk Assessment on Defects in GIS based on PD Diagnostics*. Cigre 525.
- Diessner, A., & Trump, J. (29. Januar NOVEMBER/DECEMBER 1970). FREE CONDUCTING PARTICLES IN A COAXIAL COMPRESSED-GAS-INSULATED SYSTEM. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, S. 1970 - 1978.
- F., E., A., G., A., G., H., H., M., H., k., J., et al. (2012). *gas insulated systems for HVDC: Ds Stress at DC and AC systems*. cigre.
- Fließbach, T. (2012). *Elektrodynamik, Lehrbuch zur Theoretischen Physik 11*. Springer.
- Hädener, A., & Kaufmann, H. (2006). *Grundlagen der allgemeinen und anorganischen Chemie*. Basel, Schweiz: Birkhäuser.
- Holdefer, M. (1999). *Relative Dielektrizitätskonstante ϵ_r (DK-Werte) von flüssigen und festen Medien*. Weil am Rhein: Endress+Hauser Meßtechnik GmbH+Co.
- Imamovic, D. (2011). *Umweltfreundliche Isoliertgase für gasisolierte Leitungen zur Hochspannungs-Gleichstromübertragung*. Graz: Graz university of technology.
- Koch, H. (2012). *Gas Insulated Transmission Lines (GIL)*. John Wiley & sons, Ltd.
- Küchler, A. (2009). *Hochspannungstechnik*. springer.
- Messwandler-Bau GMBH. (kein Datum). *Liste HS-B 72- Hochspannungsbaukasten bedienungsanleitung*. Bamberg.
- Morcos, M., Zhang, s., gubanski, S., & Srivastava, K. (08. October 2000). Performance of Particle contaminated GIS with dielectric Coated Electrodes. *Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE*, S. 725 - 731 vol.2.
- Mosch, W., & Hauschild, W. (1979). *Hochspannungsisolierungen mit Schwefelhexafluorid*. Berlin: VEB Verlag Technik.
- Müller, C. (2012). *Leitfähige Partikeln im homogenen elektrischen Feld*. Graz.
- Naidu, M., & Kamaraju, V. (2009). *HIGH VOLTAGE ENGINEERING*. New Delhi: Tata McGraw-Hill.

-
- Negara, Y., Yaji, K., Suehiro, J., Hayashi, N., & Masanori, H. (17. Januar 2007). DC Corona Discharge from Floating Particle in Low Pressure SF₆. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, S. 1208 - 1216.
- Parekh, H., srivastava, K., & Heeswijk, R. (may/jun 1979). lifting field of free conducting particles in compressed SF₆ with dielectric coated electrodes. *iee transaction on power apparatus and systems*, S. 748-758.
- Sakai, k.-i., Abella, D., Suehiro, J., & Hara, M. (Agust 2002). Charging and Behavior of a Spherically Conducting Particle on a Dielectrically Coated Elektrode in the Presence of Electrical Gradient Force in Atmospheric Air. *IEEE transaction on Dielectrics and Electrical Insolution*, S. 577 - 588.
- Schwab, A. (2013). *Begriffswelt der Feldtheorie, Elektromagnetische Felder, Maxwell-Gleichungen, Gradient, Rotation, Divergenz*. Berlin Heidelberg: Springer.
- SIROTISKI, L. (1955). *Hochspannungstechnik Teil 1: Gasentladungen*. Berlin: VEB Verlag Technik.
- Srivastava, K., & van Heeswijk, R. (Januar 1985). DIELECTRIC COATINGS - EFFECT ON BREAKDOWN AND PARTICLE MOVEMENT IN GITL SYSTEMS. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, S. 22 - 31.
- Wohlmuth, M. (1996). *Einfluß beweglicher Partikel auf das Isolationsverhalten gasisolierter Schaltanlagen*. Düsseldorf: VDI-Verlag.

Anhang I

Ladungsaufnahme der verschiedenen Partikel unter 0,1MPa und 0,4MPa

Die Abbildungen 37 und 38 zeigen die von der Oberfläche der Erdelektrode aufgenommenen Ladungen von verschiedenen Partikeln bei 0,1 und 0,4MPa Gasdruck.

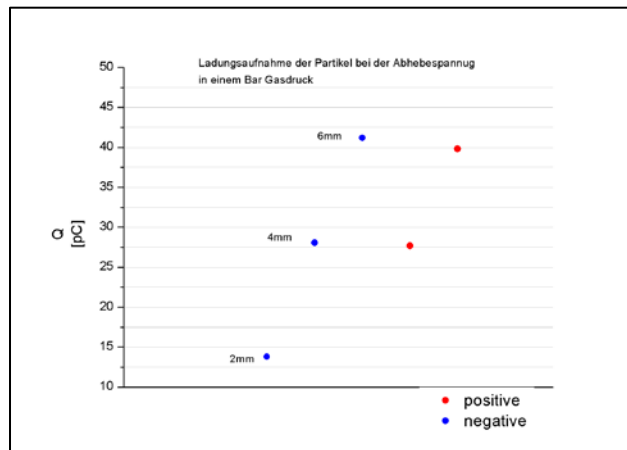


Abbildung 42: berechnete aufgenommene Ladungsgröße der 2, 4, 6mm Partikel in 0,1MPa Gasdruck

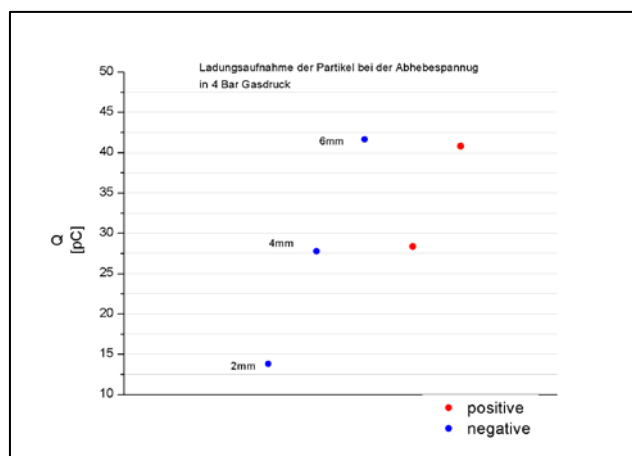


Abbildung 43: berechnete aufgenommene Ladungsgröße der 2, 4, 6mm Partikel in 0,4MPa Gasdruck

Anhang II

Geräteverzeichnis

- 1x10M Ω MWB-Widerstand
- 4x10nf MWB-Kapazitäten
- 2x140kV MWB-Gleichrichter, Nennstrom: 5mA, Schutzwiderstand: 500k Ω
- 2x100kV MWB-Prüftransformator
- 1x150kV BAUR- Transformator
- 1x 1:10000 – Spannungsteiler
- 1x270kV SIEMENS-Referenzteiler-MR 0,54/271, Nr.869178
- 1x270kV AC/DC SIEMENS-Peak-Voltmeter-MU 14, Nr.878844
- 1xCCD FUJINON Kamera- XC-EU50
- 5x25V-LEDstreifen
- 1xPFEIFFER-VACUUM-Druckmessgerät
- 1xTrenntrafo
- 1xYOKOGAWA-Oszilloskop DL9040
- 1x50k Ω MWB-Erdungswiderstand
- 1xScheinwerfer
- 1x100pf MWB-Koppelkondensator
- 1x600pf Koppelkondensator
- 1x30V MANSON-NRP2630-Spannungsversoger
- 1xMPD600 und MCU600 OMICRON
- 1xDILO B093R10-Gaswartungsmachine-

