Peng Li

Einfluss des Materials und der Kontaktierung der Barrieren auf die Homogenität von Barrierenentladungen

Elektrotechnik





Einfluss des Materials und der Kontaktierung der Barrieren auf die Homogenität von Barrierenentladungen

Von der Gemeinsamen Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

> Zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte

Dissertation

von

M.Sc. Peng Li

aus Hunan, V.R.CHINA

Eingereicht am:	12.07.2004
Mündliche Prüfung am:	17.08.2004
Referent:	Professor DrIng. Manfred Lindmayer
Referent:	Professor Dr. Claus-Peter Klages
Vorsitzender:	Professor DrIng. Michael Kurrat

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <u>http://dnb.ddb.de</u> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2004 Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2004 ISBN 3-86537-213-9

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2004 Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen Telefon: 0551-54724-0 Telefax: 0551-54724-21 www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen. 1. Auflage, 2004 Gedruckt auf säurefreiem Papier

ISBN 3-86537-213-9

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen der Technischen Universität Braunschweig.

Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Lindmayer gilt mein besonderer Dank für die mir ermöglichte wissenschaftliche Tätigkeit am Institut. Seine zahlreichen wertvollen Ratschläge und seine Hilfsbereitschaft haben sehr zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr. Klages für die Übernahme der Mitberichterstattung sowie für das Interesse, das er der Arbeit entgegengebracht hat. Herrn Professor Dr.-Ing. Kurrat danke ich für den Prüfungsvorsitz.

Herrn Dr.-Ing. U. Braunsberger danke ich besonders für die zahlreichen Unterstützungen und für seine Hilfsbereitschaft. Herrn Dr.-Ing. J. Tepper danke ich für wertvolle Anregungen in vielen fachlichen Diskussionen. Auch allen anderen Mitarbeitern des Instituts gilt mein herzlicher Dank. Durch ihre jederzeit vorhandene Hilfsbereitschaft konnte ich eine schöne und harmonische Zeit in Deutschland verbringen.

Meine Arbeit wurde durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) finanziell gefördert. Auch hierfür bedanke ich mich sehr.

Meiner Familie danke ich ganz herzlich für die seelische Unterstützung.

Übersicht

Bisher ist aus der Literatur bekannt, dass homogene Barrierenentladungen im Allgemeinen nur in recht engen Bereichen der Speisespannung oder der Spaltabstände existieren. In einer Vorgängerarbeit [Tepper 02] konnten zwei grundlegend unterschiedliche homogene Entladungsformen (Typ 1 von Okazaki und Typ 2 von Massines) nachgewiesen werden. Ziel dieser Arbeit war es, durch systematische Versuche und ergänzende Simulationen konkrete Erkenntnisse über erzielbare und technisch nutzbare Existenzbereiche, sowie den Einfluss der Kontaktierungsart und des Materials der Barrieren auf die Homogenität von Barrierenentladungen zu gewinnen.

Bei 50 Hz zeigen alle untersuchten Anordnungen mit Drahtgitter oder resistiven Schichten zwischen Barrierenrückseiten und Elektroden beim Entladungseinsatz zunächst grundsätzlich eine stromschwache homogene Entladung des Typs 2. Bei einigen Kontaktierungsvarianten schlägt die zunächst reine Typ-2-Entladung in eine kombinierte Typ-2/Typ-1-Entladung um, die bis zur höchsten Speisespannung sehr stabil existiert. Das 50 Hz-Verhalten von Barrierenanordnungen mit Kontaktierungs-Schichten bei Luft und Stickstoff als Arbeitsgas ist nahezu identisch.

Bei der homogenen Typ-2-Entladung im kHz-Bereich engt sich mit zunehmender Spaltweite Dieser Spannungsexistenzbereich ein Spaltweitenexistenzbereich wurde deren mit zahlreichen Barrierenmaterialien untersucht. Es wurden entweder massive Platten oder Kombinationen unterschiedlichen zweischichtige mit Permittivitäten der dem Entladungsraum zugewandten Seite (Oberflächenpermittivität) verwendet. Als wichtiges neues Ergebnis wurde die Erkenntnis gewonnen, dass der Existenzbereich nicht von der resultierenden Barrierenkapazität, sondern ausschließlich von der Oberflächenpermittivität der Barrieren abhängt.

Die homogenen Entladungen wurden einer Leistungsanalyse unterzogen. Weiterhin wurden Stromverteilungsmessungen, Hochgeschwindigkeitsaufnahmen und Emissionsspektroskopie durchgeführt. Zur Ergänzung und Deutung dienen Simulationen.

Influence of the material and the contact of the barrier on the homogeneity of barrier discharges

Abstract

It has been known that homogeneous barrier discharges exist generally only within quite narrow ranges of the supply voltage or the gap distance. In a former work [Tepper 02] two fundamentally different homogeneous discharge forms (type 1 by Okazaki and type 2 by Massines) were differentiated. The goal of this work was to gain knowledge over attainable and technically usable existence ranges of homogenous discharges, as well as the influence of the material and the contact of the barriers on the homogeneity, by systematic experiments and supplementing simulation.

Investigations at 50 Hz show that in all arrangements with grid or resistive layers between barrier and electrode the discharge starts with a type 2 homogeneous discharge, which carries a weak current. With certain contacting layers this pure type 2 discharge develops into a combined type 2/type 1 discharge, which can exist stably up to the highest available supply voltage. The behaviour of barrier arrangements with contacting layers is almost identical in air and nitrogen at 50 Hz.

The voltage existence range of a homogeneous type 2 discharge at kHz is strongly restricted by an increasing gap distance. The gap existence ranges were measured with numerous barrier materials, either with solid plates or with two-layered combinations with different permittivities facing the discharge gap (surface permittivity). As an important new result it was found that the gap existence range depends not on the barrier capacity, but exclusively on the surface permittivity of the barriers.

The investigations are accomplished by power analysis, current distribution measurements, high-speed photographs and emission spectroscopy of homogeneous discharges. Additionally, simulations were carried out for the interpretation of the experimental results.

Inhaltverzeichnis

1	Einführung	1
	1.1 Barrierenentladung und Mikroentladung	1
	1.2 Formen der homogenen Barrierenentladungen	6
	 1.2.1 Typ-1-Entladung nach Okazaki u.a. 1.2.2 Typ-2-Entladung nach Massines u.a. 1.2.3 Bisher bekannte Eigenschaften und Einflussgrößen 1.2.4 Andere homogene Entladungsformen 	7 10 13 14
	1.3 Kontaktierung zwischen Barrieren und Elektroden	15
	1.4 Ziel der Arbeit	18
2	Versuchseinrichtung	20
	2.1 Hochspannung, Gasversorgungseinrichtung und Versuchsreaktor	20
	2.2 Elektrode-Kontakt-Barriere	22
	2.3 Messung elektrischer Größen	24
	 2.3.1 Spannung 2.3.2 Strom 2.3.3 Ladung 2.3.4 Ermittlung der Permittivität des Barrierenmaterials 2.3.5 Durchgangswiderstand der Kontaktierungen 	25 25 26 26 27
	2.4 Optische Messungen	28
	2.4.1 Hochgeschwindigkeitskamera.2.4.2 Emissionsspektroskopie	28 28
3	Homogene Entladungsformen und ihre Existenzbereiche	30
	3.1 Übersicht	30
	3.2 Homogene Entladungen bei 50 Hz	31
	3.2.1 Typ-2-Entladung bei 50 Hz.3.2.2 Kombinierte Typ-2/Typ-1-Entladung bei 50 Hz.	31 36
	3.3 Typ-2-Entladung im kHz-Bereich	42
	3.4 Typ-1-ähnliche Entladung bei 7 kHz	54
	3.5 Zusammenfassung der Entladungsformen und der Einflüsse der Kontaktschichten	55

4	Leistungsanalyse	58
	4.1 Leistung der Typ-1- bzw. kombinierten Typ-2/Typ-1-Entladung	58
	4.1.1 Leistungsauswertung aus Lissajous-Figur	
	4.1.3 Leistungsvergleich verschiedener Varianten	59
	4.2 Leistung der Typ-2-Entladung	62
	4.2.1 Auswertung	62
	4.2.2 Typ-2-Entladung bei 50 Hz	62
	4.2.3 Typ-2-Entladung bei 7 kHz	64
	4.3 Messung der Stromaufteilung durch getrennte Elektrodenflächen	66
5	Optische Messungen und Spektralanalyse	
	5.1 Aufnahmen mit der Hochgeschwindigkeitskamera	71
	5.1.1 Typ-1-Entladung bei 50 Hz.	71
	5.1.2 Typ-2-Entladung bei 7 kHz	72
	5.2 Spektralanalyse der Typ-2-Entladung im kHz-Bereich	75
6	Simulation [*]	79
	6.1 Typ-2-Entladung	
	6.1.1 Einleitung	
	6.1.2 Pspice-Modell	
	6.1.3 Vergleich der Messung und Simulation	
	6.1.4 Koronaparameter bei verschiedenen Barrieren	
	6.2 Kombination der Typ-2- und Typ-1-Entladungen	89
6.3 Simulation zur Erklärung des Einflusses der Oberflächen-Permittivität des		
	Barrierenmaterials auf die Homogenitätsgrenze	92
Z	usammenfassung	
L	iteraturverzeichnis	103
L	ebenslauf	107

1 Einführung

1.1 Barrierenentladung und Mikroentladung

Eine dielektrische Barrierenentladung (Dielectric Barrier Discharge, DBD) bildet sich zwischen zwei Elektroden beim Anlegen einer Wechselspannung aus, wenn der Stromfluss durch mindestens eine dielektrische Barriere (Isolator) behindert wird [Kogelschatz 01, 02]. Bild 11 zeigt das Schema der in dieser Arbeit verwendeten ebenen Doppelbarrierenanordnung, in welcher zwei Elektroden, zwei Barrierenschichten und ein Entladungsbereich (Gasspalt) in einer elektrischen Reihenschaltung existieren.



Bild 1.1 Schema der ebenen Doppelbarrierenanordnung

Abhängig von der Anwendung kann die Breite des Gasspaltes von weniger als 0,1 Millimeter bis zu ungefähr 100 Millimeter und die angewandte Frequenz von unterhalb 50 Hz bis zu einigen GHz [Alexeff 02] reichen. Als die typischen Materialien der Barrierenschichten werden Glas, Quarz, Keramik und auch dünne Plastikschichten verwendet [Kogelschatz 02].

DBD bei Atmosphärendruck sind wegen ihrer niedrigeren Kosten und des höheren Durchsatzes im Vergleich zu Niederdruckentladungen für industrielle Anwendungen sehr attraktiv. Die Barrierenentladung bei Atmosphärendruck steht nicht im thermischen Gleichgewicht und besitzt örtlich und für kurze Zeit Eigenschaften, die denen von Niederdruckentladungen ähnlich sind. In der Plasmatechnologie ermöglicht sie Prozesse, die an sich Vakuumverfahren vorbehalten sind [Salge 98]. Da diese Plasmenprozesse jedoch gewöhnlich im Vakuum ablaufen, sind sie für viele industrielle Anwendungen, wie zum Beispiel für großflächige Niedrigpreisprodukte, nicht anwendbar [IST]. Das Prinzip der Barrierenentladung ist verwirklicht in Ozongeneratoren, die weltweit in großtechnischen Anlagen zu Desinfektionszwecken eingesetzt werden [Kogelschatz 01]. Ein weiterer Einsatzbereich ist bislang die Vorbehandlung von Kunststofffolien und Papier zur Erhöhung der Benetzbarkeit und Haftung von Klebern, Lacken und Druckfarben [Softal]. In neuerer Zeit wird auch bei der Behandlung von Abgasen (NO_x, SO_x) die Barrierenentladung versuchsweise eingesetzt [Chang]. Eine weitere aktuelle Anwendung ist die Nutzung der Barrierenentladung als Excimerquelle [Müller 88, Müller 91, Stockwald 95]. Im Stadium von Entwicklungsarbeiten ist darüber hinaus der Einsatz von Barrierenentladungen zur Behandlung von Wolle, Textilien und Schüttgütern [Thode 03, Thomas 02, Ermel 03, Mori 95].

In der Praxis gebräuchliche Barrierenentladungen bestehen – im Gegensatz zu den meisten Niederdruckentladungen – gewöhnlich aus einer Vielzahl lokaler Mikroentladungen, so genannter Filamente, von sehr kurzer Lebensdauer (ca. 10 ns). In diesen Mikroentladungen werden Gase durch elektronische Anregung, Ionisation und Dissoziation aktiviert und chemisch sehr reaktive Spezies gebildet. Dabei wird bei hoher Elektronentemperatur die mittlere Gastemperatur im Entladungsspalt nur um wenige Kelvin erhöht; die Entladung bleibt also "kalt", so dass auch temperaturempfindliche Substrate behandelt werden können. Trotz der Filamentierung der Entladungen lässt sich durch eine geeignete Prozessführung gewöhnlich eine sehr gleichmäßige Oberflächenbehandlung erzielen [IST], wenn die Entladungsfilamente statistisch gleichmäßig über die zu behandelnde Fläche verteilt sind.

Die filamentierte Barrierenentladung ist wohl die heute am meisten genutzte Plasmaart im Bereich von Atmosphärendruck [Softal]. In dieser Form besteht die Barrierenentladung aus vielen kurzzeitigen filamentartigen Streamern. Typische gemessene Spannungs- und Stromverläufe bei einer filamentierten Barrierenentladung sind in Bild 1.2 gezeigt. Diese Untersuchung wurde bei Barrieren aus 2 mm Dicke Glas, 2,5 mm Spaltweite, in Stickstoff und bei 7 kHz sinusförmiger Spannungserregung gemacht. Außer dem kapazitiven Verschiebungsanteil zeigt die Stromkurve deutlich viele kurzzeitige Spitzen mit begrenzten Diese Stromspitzen kennzeichnend kurzzeitigen Amplituden. sind für die Entladungsfilamente.



Bild 1.2 Spannungs- und Stromkurve bei einer typischen filamentierten DBD



Bild 1.3 Entwicklung filamentierter Barrierenentladungen nach [Gibalov92, Braun 92, Tepper 02], schematisch

Die folgende Beschreibung der Entwicklung filamentierter Entladungen wurde von [Tepper 02] übernommen, der sich auf [Gibalov 92] und [Braun 92] bezieht, siehe Bild 1.3:

Townsendphase: Die Entladung ist durch Anfangselektronen im Spalt verursacht, welche in dem angelegten elektrischen Feld beschleunigt werden und durch Ionisation von Neutralteilchen im Gas zu einer Lawine führen. Wenn diese die Anode erreicht, kommt es zu Ansammlung von Ladungsträgern vor der Anodenbarriere und zu einer einer Elektronenansammlung auf der Anodenbarrierenoberfläche. Die Ansammlung von Ladungsträgern vor der Anodenbarriere führt zu einer Erhöhung der Leitfähigkeit in dieser Region und somit zu einer Änderung der elektrischen Feldverteilung. Die elektrische Feldstärke in dieser Region sinkt, während die Feldstärke in Richtung der Kathodenbarriere steigt, bzw. eine Überhöhung aufweist. Weitere Anfangselektronen, die zwischen der Kathodenbarriere und der Feldüberhöhung ausgelöst werden, erfahren eine Beschleunigung in Richtung der Feldüberhöhung. Es kommt zur Bildung weiterer Elektronenlawinen, die zusätzliche Ladungsträger in den Bereich der Feldüberhöhung bringen. Dadurch steigt die Amplitude des elektrischen Feldes an dieser Stelle und die Leitfähigkeit in der Region vor der Anodenbarriere steigt weiter. Ferner bewegt sich die Feldüberhöhung in Richtung Kathodenbarriere weiter. Ein sich selbst verstärkender Effekt ist eingetreten.

<u>Streamerphase</u>: Ist die Überhöhung des elektrischen Feldes im Bereich dieser Raumladung so groß, dass sie das ursprüngliche elektrische Feld im Spalt verzerrt, verursacht dies die Auslösung von Photoelektronen. Diese stehen als Anfangselektronen zur Verfügung und erzeugen wiederum neue Lawinen, die sich auf die Feldüberhöhung zu bewegen. Es bildet sich ein Streamer aus, der innerhalb weniger ns die Kathodenbarriere erreicht und den Entladungsspalt überbrückt. Alternativ kann sich eine Streamerentladung aus der primären Elektronenlawine bilden, wenn das homogene elektrische Ausgangsfeld innerhalb der Zündverzugszeiten so weit steigt, dass die Dichte der Elektronen im Lawinenkopf einen kritischen Wert von ca. 10⁸ cm⁻³ erreicht und das elektrische Ausgangsfeld hierdurch verzerrt wird.

Katodenfallausbildung: In dieser Phase erreicht der Strom seinen Maximalwert. Die Stromdichte erreicht Werte einer normalen Glimmentladung. Es bildet sich ein Kathodenfallgebiet. Elektronen werden durch den leitfähigen Streamerkanal auf der

Anodenbarrierenoberfläche deponiert. Da die Barrieren durch einen leitfähigen Kanal miteinander verbunden sind, werden nun auch Elektronen von der Barrierenoberfläche der Kathode abgezogen, so dass eine positive Oberflächenladung zurückbleibt.

<u>Abklingphase:</u> Die auf den Barrieren deponierten Oberflächenladungen schwächen das äußere elektrische Feld lokal soweit, dass dieses zum Verlöschen der Entladung führt.

Nach [Kogelschatz 02] erfolgt die Phase der Streamerbildung einer Barrierenentladung ähnlich wie bei einer Entladung ohne Barriereschichten. Ein entscheidender Unterschied liegt in den auf den Barrierenoberflächen deponierten Ladungen: Die Ansammlung von Ladungsträgern auf den Barrierenoberflächen führt zu einem lokalen Zusammenbruch des elektrischen Feldes. Dadurch wird die Dauer einer Streamerbildungsphase auf einige Nanosekunden, die transportierte Ladung durch den Kanal auf ca. 100 pC, and die Energie auf μ J (1 mm Spalt bei 1 bar) begrenzt. Die gesamte Entladungsdauer beträgt zwischen 1-10 ns. Der Radius einer Streamerkanals liegt bei ca. 0,1 mm. Aufgrund ihrer kurzen Dauer, der geringen Abmessungen der Entladungskanäle sowie ihrer geringen Energie wird diese Entladung auch Mikroentladung genannt [Tepper 02].

Auf dem Gebiet der Diagnostik und Modellierung von filamentierten Barrierenentladungen leisteten Kogelschatz et al. [Kogelschatz 01] einen wesentlichen Beitrag zum Verständnis. Auch Arbeiten an der TH Karlsruhe unter Neiger [Müller 88, Müller 91, Stockwald 95], oder die Arbeiten von Gibalov und Pietsch [Gibalov 00] sind hier zu nennen.

Wenn Ladungen auf Barrierenoberflächen deponiert werden, entstehen von den Fußpunkten ausgehende tangentiale Felder längs der Barrierenoberflächen, als deren Folge eine tangentiale Ausbreitung der Entladung entsteht [Gibalov 00]. Nach den experimentellen Ergebnissen in [Gibalov 00] wird der geladene Bereich auf den Barrieren wesentlich durch die Permittivität des Barrierenmaterials beeinflusst. Je niedriger dessen Permittivität ist, desto größer ist die Fläche der auf den Barrieren hinterlassenen Oberflächenentladung. Die Stromamplitude der gesamten Entladung hängt ebenfalls von der Permittivität ab. Je niedrige die Permittivität, desto kleiner ist die Stromamplitude. Eine physikalische Begründung liegt in [Gibalov 00] nicht vor.

Kang und Kollegen haben berichtet [Kang 02], dass praktische Barrierenmaterialien nicht vollkommen nichtleitend sind, wodurch die auf den Barrierenoberflächen angesammelten

Ladungen in die dielektrische Barriere abfließen. Nach den theoretischen Überlegungen und Simulation in [Kang 02] ist dieser elektrische Verlust ein Schlüsselfaktor des Wiederauftretens von Mikroentladungen, wobei die Entladung umso stärker filamentiert, je bessere die Leitfähigkeit die Barriere ist.

1.2 Formen der homogenen Barrierenentladungen

Barrierenentladungen in ihrer bisher industriell weit verbreiteten Form, gespeist aus kontinuierlichen Mittelfrequenz-Sinusgeneratoren mit Spannungen bis zu einigen 10 kV, weisen wegen der Entladungsfilamentierung Nachteile und Grenzen auf, insbesondere im Hinblick auf empfindliche und gleichmäßig zu behandelndes Behandlungsgut. Die lokale Leistungskonzentration kann zu inhomogenen Behandlungs- und Abscheidergebnissen bis hin zu lokalen thermischen Schädigungen führen.

Im Gegensatz zu den filamentierten Barrierenentladungen existiert unter speziellen Bedingungen eine andere Form der Barrierenentladung - homogene Barrierenentladungen, die im Gasspalt ein gleichmäßigeres und schonenderes Behandlungsergebnis implizieren. Bei der homogenen Barrierenentladung ist in dem Entladungsbereich (Gasspalt) eine homogene Leuchterscheinung statt vieler diskreter Entladungskanäle zu beobachten.

Bartnikas hat zwischen 1968 und 1971 [Bartnikas 68, 71] berichtet, dass eine Pseudo-Glimmentladung in Helium, Luft und Stickstoff zwischen zwei parallelen dielektrisch beschichteten metallischen Elektroden beobachtet wurde. Fünf Jahre später realisiert Donohoe diese Entladungsform mit einer viel größeren Spaltweite (einige Zentimeter) in einem Gasgemisch aus Helium und Äthylen [Donohoe 76].

Homogene Barrierenentladungen wurden bis jetzt bei Atmosphärendruck mit Gasen wie Helium, Neon, Argon-Stickstoff-Gemisch, Sauerstoff und Luft erreicht. Umfangreiche Arbeiten über homogene Barrierenentladungen wurden durch die Gruppe von S. Okazaki an der Sophia Universität in Japan [Okazaki 93], durch F. Massines u.a. in Toulouse, Frankreich [Ségur 00, Massines 92, 98, 00, 01], und von J. R. Roth und seine Gruppe an der Universität von Tennessee, USA [Roth 92, 95] durchgeführt. Von J. Tepper wurden, basierend auf den Arbeiten um Okazaki und Massines, umfangreiche weitere Untersuchungen an homogenen Barrierenentladungen unter Variation zahlreicher Parameter durchgeführt. Die nachfolgende Unterscheidung zwischen Typ 1 und Typ 2 geht auf ihn zurück.

1.2.1 Typ-1-Entladung nach Okazaki u.a.

Bei dieser Entladung sind die Anordnungen durch eine Schicht von feinmaschigem Gitter als Kontaktierung zwischen der Stromzuführung und der Barriere gekennzeichnet. Nach Okazaki und Kollegen [Okazaki 93, Kogoma 94] wird damit eine Methode vorgestellt, stabile homogene Entladungen "in allen Gasen" bei 50 Hz zu erzeugen. Diese homogenen Entladungen werden hier als Typ 1 bezeichnet. Diese Entladung ist dadurch charakterisiert, dass je Halbschwingung nur ein kurzer Entladungsstrompuls, gleichzusetzen mit einem Ladungssprung, auftritt.

Bei Darstellung in einem Spannungs-Ladungs-Diagramm ("Lissajous-Figur") tritt dieser steile Ladungssprung besonders hervor. Dies wird als Methode zur Erkennung homogener Entladungen im Gegensatz zu filamentierten beschrieben, wo kontinuierliche Schleifen auftreten. Zeitdauer und Höhe des Stromes sind in den von Okazaki wiedergegebenen Oszillogrammen nicht erkennbar.

Von Okazaki wurden besonders ausgeprägte Existenzbereiche mit Barrieren aus PET erzielt. In der Arbeit von Tepper [Tepper 98, 00a, 00b, 02, 02b] wurden erstmals die Strom- und Spannungsverläufe der Typ-1-Entladungen mit Gitterschichten und Mylar- (=PET-) Barrieren mit hoher Zeitauflösung gemessen.

Bild 1.4 zeigt einen typischen Verlauf des Gesamtstroms sowie der Gesamtspannung über der Barrierenanordnung bei einer homogenen Typ-1-Entladung aus einem eigenen Versuch in der eigenen Arbeit. Es treten hohe Stromimpulse mit Dauern im Sub-Mikrosekunden-Bereich und Amplituden im Bereich bis zu mehreren Ampere (bei 20 cm² Elektrodenfläche) auf. Die Versuchsbedingungen bei dieser Messung sind Barrierenschichten aus 100 µm dicker Mylar-Folie auf 2 mm dicker Glas-Unterlage, 3,8 mm Spaltweite, mit 16 l/ Stickstoff und bei 50 Hz sinusförmiger Hochspannung (30 kV Peak-Peak). Während der Entladung bricht der Wert der 50 Hz-Spannung, verursacht durch Spannungsabfall an der Innenimpedanz der Quelle, nur geringfügig ein.



Bild 1.4 Strom- und Spannungsverläufe einer homogenen Typ-1-Entladung



(a) Ladungs- und Spannungsverlaufe



(b) Ladungs-Spannungs-Schleife (Lissajous-Figur)

Bild 1.5 Ladungs- und Spannungsverläufe einer homogenen Typ-1-Entladung

Bild 1.5 zeigt die zeitlichen Ladungs- und Spannungsverläufe, bzw. die Ladungs-Spannungs-Schleife, auch Lissajous-Figur genannt, aus einem anderen Versuch mit einer homogenen Typ-1-Entladung. In dieser Versuchsanordnung sind die Barrieren 0,5 mm dicke Teflon-Platten, versehen mit einer rückwärtigen Gitter-Kontaktierung "Mesh #325" (siehe Kapitel 2). Der Versuch wurde bei 4 mm Spaltweite und mit 16 l/min Stickstoff gemacht. Die sinusförmige Spannung besitzt 50 Hz Frequenz. Die Homogenität bei dieser Entladungsform kann durch die einmaligen Ladungssprünge je Halbschwingung erkannt werden [Tepper 02]. Bei steifer Spannungsquelle und im Vergleich zur 50 Hz-Periode sehr kurzer Entladungszeit würden die Sprünge senkrecht verlaufen. Die wiedergegebene Ladungs-Spannungs-Schleife einer Periode ist nicht vollständig geschlossen, da die einzelnen Ladungssprünge statistischen Schwankungen unterliegen.

Seitens Okazaki und Kogoma, welche das Phänomen erstmals erwähnten, wird keine detaillierte Erklärung über diese mit hohen, kurzen Strompulsen verknüpfte Entladungsform gegeben [Okazaki 93, Kogoma 94]. Es wird auf die Rolle von Metastabilen hingewiesen. Die Wirkung der Gitterkontaktierung der Barriere beim Zustandekommen homogener Entladungen ist keinesfalls geklärt.

In [Tepper 98] wird die Ursache für diese schlagartige homogene Entladung zunächst in einem nichtlinearen Verhalten des PET-Dielektrikums vermutet. Dies konnte in den unter 1.3 beschriebenen Versuchen [Tepper 02] nicht bestätigt werden. In [Tepper 02] wird auch berichtet, dass im untersuchten Bereich unterschiedlicher Gitter-Maschenweiten die Homogenität umso besser ist, je feiner das Gitter ist.

Als Schlussfolgerung in [Tepper 02] wird für den Mechanismus der homogenen Typ-1-Entladungen ein "homogener kathodengerichtete Streamer" im Entladungsspalt vermutet. Während des Entladungsvorganges treten an der feinen Gitterkontaktierung Teilentladungen auf. Diese Gitterkontaktierung wirkt dadurch wie ein feines Netzwerk von verteilten Widerständen, wodurch ein vergleichmäßigender Effekt auf den Stromfluss durch die Barrieren und durch die Entladung erzielt wird. Zur Initiierung der homogenen Entladung sind die Barrieren durch zeitlich vorher aufgetretene Entladungen, unter dem Einfluss feiner Gitterkontaktierung, gleichmäßig aufgeladen. Die weitere Entwicklungsphase ist ähnlich wie bei einer Filamententladung. Nur unter dem Einfluss gleichmäßig aufgeladener Barrieren tritt eine gleichmäßig raumladungsbehaftete Zone, bzw. gleichmäßig verteilte Elektronenlawinen auf. Da die folgende Verzerrung des elektrischen Feldes dann nicht wie bei einer Filamententladung in einem kleinen Bereich stattfindet, sondern gleichmäßig in der Barrierenebene, entsteht eine Art "homogener" kathodengerichteter Streamer.

1.2.2 Typ-2-Entladung nach Massines u.a.

Bei dieser Entladung waren die Elektroden herkömmliche Planelektroden und die Barrierenmaterialien Keramik. Zunächst standen He und He-Gemische im Vordergrund [Rabehi 97, Massines 98], jedoch wurde auch die Existenz stabiler homogener Plasmen in Stickstoff gezeigt [Gherardi 00, Ségur 00, Massines 01]. Auftretende homogene Entladungen werden von ihnen als "APGD" (Atmospheric Pressure Glow Discharge) und hier als Typ 2 bezeichnet.

Die Bilder 1.6 und 1.7 zeigen die gemessenen und berechneten elektrischen Größen bei einer typischen homogenen Typ-2-Entladung bei 7 kHz. Dieser Versuch wurde in einer Anordnung mit 1 mm Gasspalt und Barrieren aus 2 mm dickem Vitronit (siehe Abschnitt 2.2), sowie 16 l/min Stickstoff durchgeführt. Bild 1.6(a) zeigt die vom Oszilloskop gemessene Gesamtspannung und den Gesamtstrom. Wegen der kleinen Stromhöhe sind die Stromverläufe mit einem deutlich erkennbaren kapazitiven Anteil (Grundschwingung) überlagert. Bei bekannter Barrieren- und Gasraumkapazität lassen sich Entladungsstrom i_g und Spaltspannung u_g über dem Gasraum annähernd zurückrechnen [vereinfachtes Ersatzschaltbild nach Tepper 02], Ergebnisse in Bild 1.6(b).

Die Stromhöhen bei der Typ-2-Entladung sind um den Faktor 1000 kleiner und die Dauer um den Faktor 1000 länger als die bei der Typ-1-Entladung. Die Stromhöhe liegt typisch bei einigen Milleampere bei Elektrodenflächen von ca. 20 cm².



(b) Berechnete Spaltspannung und Entladungsstrom

Bild 1.6 Spannung und Strom bei einer homogenen Typ-2-Entladung bei 7 kHz

Auch der Ladungsverlauf und eine Ladungs-Spannungs-Schleife (Lissajous-Figur) sind in Bild 1.7(a) und (b) gezeigt., Die Steigung dieser Ladungs-Spannungs-Schleife lässt deutlich den Entladungseinsatz erkennen. Bevor die Entladung gezündet hat, entspricht die geringere Steigung der Gesamtkapazität, d.h. die beiden Barrierenkapazitäten (resultierender Wert C_b) in Reihe mit der Gasspaltkapazität C_g .

Charakteristikum dieser homogenen Entladungen sind stetige, einmal je Halbschwingung wiederkehrende Stromverläufe, während filamentierte Entladungen eine Vielzahl nadelförmiger Verläufe aufweisen (siehe Bild 1.2).





(b) Ladungs-Spannungs-Schleife (Lissajous-Figur)

Bild 1.7 Ladung und Spannung bei einer homogenen Typ-2-Entladung bei 7 kHz

Nach den Versuchsergebnissen in [Tepper 02] treten die homogenen Typ-2-Entladungen in einem bestimmten Spannungsbereich oberhalb der Entladungs-Anfangsspannung auf. Bei Steigerung der Spannung setzen parallel zu den weiterhin optisch erkennbaren homogenen Entladungen zunehmend Filamente ein.

Von [Massines 00] ist bekannt, dass es sich bei der homogenen Typ-2-Entladung in Stickstoff um eine nicht raumladungsbehaftete Townsend-Entladung handelt. Als Hauptionisationsmechanismus wird Penning-Ionisation durch Metastabile erkannt. Bei He sind hierzu Verunreinigungen notwendig (z.B. Stickstoff), damit dieser Mechanismus wirkt. Beim Stickstoff als Arbeitsgas wird die Entladung hauptsächlich durch N_4^+ -Ionen und Elektronen bestimmt, Ionisation erfolgt hauptsächlich durch Metastabile des Stickstoffs. Als Voraussetzungen für homogene Entladungen gilt ein hoher Ionisierungskoeffizient bei kleinem E/N. Im Zündmoment der neuen Entladung ist hohe Anfangs-Elektronendichte ($10^6 - 10^7 \text{ cm}^{-3}$) notwendig ("Vorionisation"). Die in Stickstoff homogene Entladung filamentiert, wenn ein geringer Sauerstoffanteil vorhanden ist [Miralai 00]. Dies wird auf den Quench der Metastabilen durch den Sauerstoff zurückgeführt [Massines 00].

Simulationen der homogenen Typ-2-Entladung in Helium [Rabehi 92, Massines 92] und in Stickstoff [Ségur 00] wurden durchgeführt. Die Ausgangspunkte der Simulationsrechnung, verglichen mit den experimentellen Ergebnissen, berücksichtigen, dass eine hohe Anfangselektronendichte im Entladungsbereich durch Ionisationsprozesse mit metastabilen Gaszuständen erzeugt wird und in Folge dessen die Entladung homogen wird. Von Golubovski und Kollegen [Golubovski 02] wurden in jüngster Zeit ähnliche Simulationen durchgeführt. Die Schlussfolgerungen unterscheiden sich teilweise davon: Nach Golubkovski et al. ist die homogene Entladung in Stickstoff auch eine Townsend-Entladung, und der maßgebliche Mechanismus für die Elektronenauslösung an den Barrieren ist die Desorption von vorher auf der Barriere absorbierten Elektronen. Die Ursache für die Desorption ist noch unklar, infrage kommen thermische und/oder durch Metastabile verursachte Desorption.

Diese homogenen Entladungen sind zunächst nur auf einen engen Existenzbereich oberhalb der Entladungs-Anfangsspannung begrenzt, weshalb eine robuste technische Anwendung Probleme bereitet.

1.2.3 Bisher bekannte Eigenschaften und Einflussgrößen

Nach [Tepper 02] sind die Eigenschaften und Einflussgrößen auf homogene Typ-1- und Typ-2-Barrierenentladungen in Tabelle 1.1 schematisch zusammengefasst.

Tabelle 1.1 Bisher bekannte Eigenschaften und Einflussgrößen auf homogene Typ-1- und Typ-2-Entladungen nach [Tepper 02]

	Typ 1	Тур 2
Barriere	- Mylar	- Keramik, Glas, Plastik-Folien
Kontaktierung zwischen Elektrode und Barriere	 Gitter (Mesh) Bessere Homogenität bei feiner Maschenweite des Gitters. 	- Mit oder ohne Gitter
Frequenz	Meistens 50 Hzauch bei kHz	 Meistens kHz Bei 50 Hz bislang noch nicht gefunden
Strom	ns DauerA Stärke	Zig µs DauermA Stärke
Spannung	- Höhere Speisespannung verschlechtert Homogenität	- Höhere Speisespannung verschlechtert Homogenität
Spaltweite		- Geringere Spaltweite verbessert Homogenität
Gas (bei atmosphärischem Druck)	 In "allen" Gasen: Helium, Argon, Luft, Sauerstoff und Stickstoff Zunehmend homogener in Reihenfolge Luft, N₂, Ar, He 	 Nur in einigen Gasen: Helium, Argon und Stickstoff Zunehmend homogener in Reihenfolge N₂, Ar, He
Gasfluss		 Höherer Gasfluss vergrößert Homogenitätsbereich
Übergangsformen zur filamentierten Entladung	- "Teil-homogene" Entladung	- Vielfältige
Parallelkapazität	- Einfluss auf Homogenität und Leistung (Optimum)	

Anscheinend unabhängig von Typ-1- und Typ-2-Entladungsarten schlug die Gruppe von J.R. Roth das OAUGDP (One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma) [Roth 92, 95, Monitie 00] vor. In einer Gasmixtur von Helium und Luft kann eine homogene Entladung in einem Gasspalt von 10 cm Durchmesser und 3 cm Abstand erzeugt werden.

Statt einer Gitterschicht zwischen der Elektrode und Barriere wurde in ihren Versuchsanordnungen ein Gitter als Mittenebene zwischen zwei Elektroden eingesetzt. Diese Anordnung kommt für Anwendungen wie z.B. Erzeugung homogener Plasmen zur Textilbehandlung, in Frage [Kogelschatz 02]. Genauere Details der Entladung werden nicht beschrieben, eine schlüssige Erklärung des Mechanismus wird nicht gegeben.

Nach dem Bericht in [Kogelschatz 02], wurde versucht, die auf die Barrieren aufgebrachten Ladungen durch Änderung der Leitfähigkeiten der Oberflächen- und Grundmaterialien der Barrieren zu beeinflussen. Der Einfluss eines Isolierstoffs mit höherem Sekundäremissions-Koeffizient wurde auch in einigen Versuchen gefunden. Ebenfalls eine homogene Entladungsform wurde durch Einsatz eines Materials mit hohem spezifischen Widerstand statt eines Dielektrikums als Barrierenschicht auf der Elektrode bei atmosphärischem Druck und GHz erreicht [Alexeff 02].

1.3 Kontaktierung zwischen Barrieren und Elektroden

Eine besondere Kontaktierung der Barrieren in Form eines feinen Drahtgitters wurde in der Typ-1-Entladung [Okazaki 93] eingesetzt. Bild 1.8 zeigt einen schematischen Versuchsreaktor mit Kontaktierungsschichten zwischen Elektroden und Barrieren.



Bild 1.8 Schema des Versuchsreaktors mit Kontaktschichten

In ersten eigenen Versuchen des Instituts [Tepper 02] wurde herausgefunden, dass sich der Existenzbereich homogener Entladungen teilweise beträchtlich erweitern lässt, wenn als eine Schicht hinter den Barrieren ("Kontaktierung") entweder Drahtmaschengitter oder Graphitpulver verwendet wird. Nach diesen Versuchsergebnissen wurde eine deutliche Verbesserung der Homogenität bei der Typ-1-Entladung beobachtet. Es wurde noch berichtet, dass sich auch bei der Typ-2-Barrierenentladung eine deutliche Aufweitung des Homogenitätsbereichs mit der Gitterkontaktierung ergibt.

Die Frage ist, welche Rolle ein rückwärtiges Drahtgitter zur Barrieren-Kontaktierung bei der Verbesserung der Entladungshomogenität spielt. Es wurde vermutet, dass sich in den elektrisch hoch beanspruchten Zwickelräumen zwischen Gitter und rückwärtiger Barrierenoberflächen lokal verteilte Entladungen ausbilden, welche sich wie flächig verteilte Widerstände auswirken. Um das Verhalten der Kontaktschicht zu untersuchen, wurde in [Tepper 02] zwei Experimente durchgeführt. Bild 1.9 [Bild 4.3 b) in Tepper 02] zeigt die Ergebnisse aus den zwei Experimenten.

In dem ersten Experiment wurde eine Barriereschicht (0,35 mm dick, Mylar) ohne das eigentliche Gasvolumen der Barrierenentladung direkt zwischen zwei plane Elektroden eingesetzt. Zur Vermeidung von unerwünschten Hohlraum- oder Kantenentladungen wurde die Kontaktierung zusätzlich von Isolieröl umgeben. Bei angelegter 50 Hz-Wechselspannung wurde neben dieser Spannung die als Spannung über einen Integrationskondensator abgegriffene, durch die Dielektrikums-Platte verschobene Ladung $q = \int i dt$ erfasst. Aus diesem Experiment bekommt man eine gerade Spannungs-Ladungskennlinie, $q = const \cdot u$. Das bedeutet, dass dieses Isoliermaterial praktisch ein verlustfreies Dielektrikum mit linearen Eigenschaften ist, und somit nichtlineares Verhalten der Barriere ausgeschlossen werden kann.

In dem zweiten Experiment wurde eine Kontaktierung durch mechanisch angedrücktes Drahtgewebe (Gitter, Mesh #325), wie in den Versuchen mit Barrierenentladungen (Okazaki), eingesetzt. Hierbei treten Lissajous-Figuren auf, die durch einen "ohmschen" Anteil verursacht werden, und deren Fläche der umgesetzten Wirkleistung proportional ist. Anders als bei R-C-Reihenschaltungen mit konstantem Widerstand, wo die Lissajous-Figur eine schräg liegende Ellipse ist, weist sie Knicke und deutlich erkennbar zwei unterschiedliche Steigungen auf. Durch orientierende Simulationsrechnungen unter Zugrundelegung eines "Koronamodells" für die Kontaktierung (siehe auch Abschnitt 6.1, dort für die Entladung im Hauptspalt) konnte diese Erklärung gefestigt werden [Tepper 02].



Bild 1.9 Unterschiedliche Lissajous-Figur bei planen Elektroden und bei Elektroden mit Gitterkontaktierung

Die Ursache sind, wie vermutet, offensichtlich Teilentladungen (Koronaentladungen), die in dem Bereich hoher elektrischer Feldstärken zwischen den Gitterdrähten, der Barrierenoberfläche und dem rückwärtigen Gasraum entstehen ("Triple Junction"), und die elektrisch mit der Barrierenkapazität in Reihe geschaltet sind.

Als Ergebnis dieser Untersuchungen entstand die Hypothese, dass sich die an der Gitter-Kontaktseite entstehende Korona ähnlich wie ein lokal fein verteiltes Widerstandsnetzwerk verhält, siehe Bild 1.10 Bei beginnender Filamentierung fließt dort ein lokal erhöhter Ladestrom, der zu einem erhöhten lokalen Spannungsfall und einer Strom-Umverteilung führt, die der Filamentierung entgegenwirkt. Basierend auf dieser Hypothese wurden erste orientierende Untersuchungen durchgeführt. Mit keramischem Barrierenmaterial wurden alternativ Plattenelektroden mit Gitter, sowie Graphit zur Kontaktierung eingesetzt. Der letzte Fall stellt eine andere Ausführungsform räumlich fein verteilter ohmscher Widerstände dar. Es ergaben sich erste Anhaltspunkte, dass damit eine Erweiterung der Existenzbereiche homogener Barrierenentladungen möglich ist.



Bild 1.10 Modell des Widerstandsnetzwerks der Kontaktschicht

1.4 Ziel der Arbeit

Homogene Barrierenentladungen waren bisher auf einen recht engen Bereich kurz oberhalb der Anfangsspannung beschränkt. Bei weiterer Spannungssteigerung erfolgt eine Filamentierung, so dass eine robuste technische Realisierung homogener Barrierenplasmen bisher Schwierigkeiten bereitet.

Bisher konnte noch nicht systematisch geklärt werden, ob die Entladungsformen Typ 1 und Typ 2 ineinander übergehen, oder ob es sich um grundlegend unterschiedliche Formen handelt. Ziel des Vorhabens ist es, durch systematische Versuche und ergänzende Simulationen die Entladungsmechanismen abzugrenzen und konkrete Erkenntnisse über erzielbare und technisch nutzbare Existenzbereiche zu gewinnen.

Neben dem grundsätzlichen wissenschaftlichen Interesse werden Erkenntnisse erwartet, deren technische Umsetzung Verbesserung Plasmenbehandlungsanlagen bei zur von Zum einen betrifft dies die Atmosphärendruck führen. Erzielung homogener Behandlungsplasmen in einem weiten, gegenüber verschiedenen Einflüssen unempfindlichen Parameterbereich.

Zur Erreichung dieser Ziele sollten systematische Untersuchungen durchgeführt werden, die so angelegt sind, dass Aufschlüsse über die Mechanismen gewonnen werden, die zu einer Ausweitung des Existenzbereiches homogener Entladungen führen.

Folgende Teil-Untersuchungen waren vorgesehen:

- An ausgewählten Barrieren-/Kontakt-Anordnungen, die sich als signifikant unterschiedlich in den Vorversuchen gezeigt haben, sollen detaillierte Messungen (Spannungs-, Strom- und Ladungsverläufe, Leistungsdichten im Plasma, optische die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen) durchgeführt werden sowie erzielbaren Existenzbereiche homogener Formen in typischen Frequenzbereichen ausgelotet werden.
- Es soll die Rolle unterschiedlicher Barrierenmaterialien untersucht werden
- Zur Abgrenzung der Existenzbereiche unterschiedlicher homogener Entladungstypen sollen die Parameter soweit variiert werden, dass ein eventuell vorhandener stetiger Übergang zwischen Typ-2- und Typ-1-Entladungen sichtbar wird.
- Die Wirkung verschiedener Barrierenkontaktierungen, z.B. mit körnigem Medium (Graphit) oder mit Widerstandspaste, soll verglichen werden.
- Parallel zu den Experimenten sollen einfache Simulationsrechnungen der Wechselwirkung zwischen Stromkreis und den Strom- und Spannungsparametern der Entladung zur Interpretation der Ergebnisse beitragen. Die Entladung selbst kann nicht in all ihren physikalischen Prozessen modelliert werden.

2 Versuchseinrichtung

Bild 2.1 zeigt ein Schema der Versuchseinrichtung, bestehend aus dem Versuchsreaktor, einem Hochspannungsgenerator, einer Einrichtung zur Erzeugung definierter Gasflüsse, sowie den Messeinrichtungen.



Bild 2.1 Schema der Versuchseinrichtung

2.1 Hochspannung, Gasversorgungseinrichtung und Versuchsreaktor

Für die Untersuchungen stehen Hochspannungsgeneratoren zur Verfügung, welche schon in den Vorgänger-Arbeiten verwendet werden [Tepper 02]. Einer besitzt eine feste Frequenz von 50 Hz, ein anderer erzeugt über eine Schwingkreis-Wechselrichterschaltung Spannungen mit Frequenzen zwischen 200 Hz und 15 kHz. Beide Generatoren erzeugen eine sinusförmige Wechselspannung mit Amplituden bis 20 kV. Zum anderen steht noch ein kommerzieller Mittelfrequenz-Generator der Firma Softal zur Verfügung, der Spannungen im Bereich bis 20 kV mit Frequenzen zwischen 10 kHz und 30 kHz erzeugt.

Die Gasversorgungseinrichtung ist für den Versuchszweck notwendig. Außer mit ruhender Luft wurden die meisten Versuche mit Stickstoff (Westfalen AG, Stickstoff 5.0, Reinheit 99,999 Vol. %) durchgeführt. Über Gasdurchflussregler der Firma MKS wird ein definierter Gasfluss in den Versuchsreaktor eingebracht, welcher regelbar zwischen 1 l/min und 16 l/min mit einer Stufung von 1 l/min liegt. Die entsprechenden mittleren Strömungsgeschwindigkeiten bei verschiedenen Spaltweiten in dem Versuchsreaktor (Breite 100 mm) zeigt Tabelle 2.1. Versuche mit ruhender Luft bedeuten, dass kein Gas in den Versuchsreaktor extra eingebracht wird.

Gasfluss l/min	Spaltweite mm	Mittlere Strömungs- Geschwindigkeiten m/s
1	1	0,17
16	1	2,7
1	2	0,083
16	2	1,3
1	3	0,056
16	3	0,89

Tabelle 2.1 Mittlere Strömungsgeschwindigkeiten bei verschiedenen Gasflüssen und Spaltweiten

Bild 2.2 [Tepper 02] zeigt einen Querschnitt des Versuchsgefäßes, das bei den meisten Untersuchungen verwendet wurde. Der Träger des Versuchsreaktors ist aus Acrylglas, auf dem Barrieren und Elektroden angebracht sind. Die Elektroden werden mit dem Anschlusskabel verbunden und zusammen mit den zugehörigen Barrieren von hinten mit Silikonkautschuk übergossen. Um eine genaue Spaltweite einzustellen, kann die Höhe der oberen Elektrode-Barriere durch eine Mikrometerschraube verstellt werden. Eine homogene Gasspülung im Gasspalt wird durch Gasduschen erreicht. Um optische "Side-On"-Aufnahmen der Entladung durch eine Hochgeschwindigkeitskamera zu erfassen, ist ein seitliches Sichtfenster aus für UV-Licht durchlässigem Quarzglas angebracht. Das Versuchsgefäß aus Acrylglas ist so gestaltet, dass ein Eindringen von Umgebungsluft in die Anordnung vermieden wird. Hierzu sind einerseits die trennbaren Gefäßteile gegeneinander abgedichtet. Andererseits erfolgt das Ausblasen des Arbeitsgases N₂ ausschließlich über einen langen, dünnen Schlauch (ca. 1 m lang, 2 mm Innendurchmesser), um die Sauerstoffdiffusion entgegen dem N₂-Strom gering zu halten, siehe auch Abschnitt 3.3.



Bild 2.2 Querschnitt des Versuchsgefäßes

2.2 Elektrode-Kontakt-Barriere

Die Untersuchungen mit verschiedenen Barrierenmaterialien sowie mit unterschiedlicher Kontaktschicht zwischen Elektrode und Barriere sind eines der Hauptthemen dieser Arbeit.

In den Versuchsanordnungen ohne zusätzliche Kontaktschicht oder mit einer Kontaktschicht aus festen Widerstandpasten (Carbolloid oder Graphitspray, siehe nachstehende Beschreibung) wurde als Elektrode i.a. eine aufgepinselte runde Leitsilberschicht (Dicke ca. 20 µm, Durchmesser ca. 50 mm), die direkt auf der Barriere oder der ohmschen Kontakt-Zwischenschicht aufgebracht ist, verwendet. Hierdurch werden Teilentladungen verhindert, die sonst in unvermeidbaren kleinen Spalten zwischen der festen Metallelektrode und der Barrierenrückseite entstehen würden, und welche die Ergebnisse verfälschen könnten. Für die Versuche mit einer Kontaktschicht aus Graphitpulver oder Drahtgitter wurde eine Messingplatte als Elektrode benutzt.

Die verwendeten dielektrischen Barrieren in einer Abmessung von 100 x 100 mm und verschiedenen Dicken besitzen nominell plane und glatte Oberflächen. Sie sind entweder

massiv oder sie bestehen aus zwei miteinander verbundenen unterschiedlichen Schichten. Sie werden entsprechend in zwei Gruppen unterteilt:

<u>Gruppe 1: Massiv-Barriere</u>. Die Barrieren bestehen aus einer einzigen massiven Platte. Folgende Varianten wurden verwendet:

- Keramik-Platte Al₂O₃ 1 mm Dicke, Firma DOCERAM
- Keramik-Platte Vitronit 2 mm Dicke, Firma VITRON (Vitronit ist eine Glimmer-Glas-Keramik, die aus 60 % Kristallphase und 40 % Glasphase besteht)
- Glas-Platte 2 mm Dicke und 4 mm Dicke
- Mylar-Folie 350 μm Dicke, Firma Dupont
- Polycarbonat-Platte 2 mm Dicke

<u>Gruppe 2: Oberflächen-Barriere</u>. Die Barrieren dieser Gruppe sind dadurch gekennzeichnet, dass auf der dem Entladungsspalt zugewandten Seite eine relativ dünne Oberflächenschicht auf eine Trägerbarriere aus Glas oder Keramik aufgebracht ist. Folgende Oberflächen-Barrieren wurden bei den Versuchen verwendet:

- Tygaflor-Folie 76 µm Dicke und 124 µm Dicke, Firma Tygaflor Ltd. (Tygaflor ist ein Teflonband mit Klebschicht. Diese Folie ist mit der selbstklebenden Schicht auf die Unterlage geklebt)
- Mylar-Folie 100 µm Dicke, Firma Dupont.
 (Diese Folie ist mit zusätzlicher Klebschicht auf der Unterlage befestigt)
- HDPE-Folie 15 µm Dicke.
 (Diese Folie ist mit zusätzlicher Klebschicht auf der Unterlage befestigt.)
- Teflon-Spray ca. 5 μm Dicke, Firma OKS Spezialschmierstoff.

Kontaktschichten bestanden aus metallischem Gitter, körnigem Medium (Graphit) oder Carbolloid (Widerstandpaste). Beim Aufbau der Kontaktschicht müssen Luftspalte zwischen Elektroden und Barrieren vermieden werden, da dort sonst störende Teilentladungen entstehen. Zur Untersuchung der Arbeitshypothese über die Wirkung verteilter Widerstände wurde die Kontaktschicht zwischen Elektrode und Barrierenrückseite mit unterschiedlichen Materialien und Dicken ausgeführt. Die Kontaktschicht hat im Allgemeinen Rundform. Ihr Durchmesser wurde etwa 2 mm größer als der Durchmesser der Elektrodenschicht bzw. Massivelektrode gewählt. Der Elektrodendurchmesser betrug ca. 50 mm entsprechend einer Fläche von ca. 20 cm². Auf diesen Bereich bzw. den geringfügig größeren Bereich der Kontaktschicht beschränkt sich die Entladung. Da die verwendeten Barrieren mit 100 x 100 mm Fläche seitlich weit darüber hinausragen, werden mögliche Gleitentladungen am Rand weitgehend vermieden. Ein schematischer Aufbau des Elektrode-Barriere-Systems mit Kontaktschicht wurde schon im Bild 1.8 dargestellt.

Folgende Varianten von Kontaktierungen wurden untersucht. Daneben wurde auch die direkte Barrierenkontaktierung durch Leitsilber verwendet.

- Graphit-Pulver 1,5 mm Dicke
 Das lose Graphit-Pulver wurde in einer Matrize geführten und an die Barriere gepresst.
- Graphitspray 15 μm Dicke, Firma CRC Industries
- Carbolloid MRX-713J, Dicke 100 µm oder 300 µm, Firma Elbas
 Carbolloid handelt sich um eine Dickschichtpaste f
 ür gedruckte Widerst
 ände.
- Gitter Mesh #325, Edelstahl(1.4301), Drahtdurchmesser 0,035 mm, Maschenweite 0,04 mm, Firma Willy.

Das Gitter wird durch eine plane Messingplatte an die Barriere gedrückt.

Die Dicke der Kontaktschichten wurde durch Messen der Gesamtdicke mit der Mikrometerschraube im Vergleich zum unbeschichteten Fall ermittelt. Die Methode zur Bestimmung der Durchgangswiderstände der Kontaktschichten und ihre typische Werte werden in Abschnitt 2.3.5 darstellt.

2.3 Messung elektrischer Größen

Für Messungen von Strömen und Spannungen steht ein digitales 4-Kanal-Oszilloskop (Tektronix TDS644B) zur Verfügung. Über einen GPIB-Anschluss werden die Daten auf einen PC übertragen und mit einem Analyseprogramm (LabVIEW) ausgewertet.

2.3.1 Spannung

Die Gasspaltspannung, von der Aufschlüsse über den Zustand und die Prozesse der Entladung im Gasspalt zu erwarten sind, ist einer direkten Messung nicht zugänglich, da z.B. Kontaktierungen die gesamte Anordnung verändern würden.

Bei der Typ-2-Entladung (Stromänderung im Bereich von mA/µs und ohne deutliche Spitze) kann unter der Voraussetzung, dass die Kapazitäten der Barriereschichten vorher gemessen oder mit Hilfe der Plattenkondensator-Formel abgeschätzt wurden, die Gasspaltspannung aus der Gesamtspannung zwischen den Elektroden umgerechnet werden [Tepper 02], siehe auch Abschnitt 6.1.1.

Zur Spannungsmessung wird ein Hochspannungstastkopf (P6015) der Firma Tektronix mit einem Teilungsverhältnis von 1000:1 eingesetzt. Die Grenzfrequenz des Tastkopfes beträgt nach dem Handbuch 70 MHz.

2.3.2 Strom

Der durch das Entladungsgefäß fließende Strom über die Barrierenanordnung wird durch verschiedene am Institut gebaute ohmsche Meßshunts erfasst (siehe Bild 2.1). Diese Shunts weisen eine koaxiale Struktur mit parallel geschalteten niederinduktiven Kohleschichtwiderständen auf, ihre Grenzfrequenz beträgt mindesten 30 MHz [Tepper 02]. Über ein Koaxialkabel (RG 58) mit zusätzlicher Schirmung wird die dem Strom proportionale Spannung zum Oszilloskop geführt.

Der Shuntwiderstand muss so gewählt werden, dass einerseits das Nutzsignal ausreichend hoch gegenüber Störungen, andererseits vernachlässigbar klein gegenüber den Spannungen der Versuchsanordnung ist. Für Typ-2-Entladungen bei 7 kHz mit einer Stromamplitude von maximal 100 mA wurde z.B. ein 1-Ohm-Shunt; für Typ-2-Entladungen bei 50 Hz mit einem Stromamplitude bis 200 µA ein 100-Ohm-Shunt verwendet.

Eine andere Methode der Strommessung wurde durch einen Stromwandler (Firma Tektronix, AM 503 Current Probe Amplifier, mit A 6302 Tastkopf, Frequenzbereich DC–50 MHz, max. Strom 50 A) realisiert.

2.3.3 Ladung

Bei der Typ-1-Entladung mit sehr kurzen, hohen Entladestrompulsen und nur geringen kapazitiven Verschiebungsströmen gerät, insbesondere bei 50 Hz, die direkte Strommessung sowohl im Hinblick auf die zeitliche Auflösung des Gesamtvorgangs, als auch im Hinblick auf die Stromauflösung an ihre Grenzen. Um das genaue Entladungsverhalten, z.B. die umgesetzte Leistung in der Entladung zu erfassen, ist eine Ladungsmessung, d.h. eine Messung des Strom-Zeit-Integrals, sinnvoll.

Die Ladungsmessung hat noch eine große Bedeutung bei den Analysen mit Ladungs-Spannungs-Figur (Lissajous-Figur), indem die Ladungsverläufe nicht nur als das Kriterium einer homogenen Typ-1-Entladung dienen, sondern auch als ein deutlicher guter Hinweis auf Übergange zwischen unterschiedlichen Entladungstypen, wie in Abschnitt 4.1.1 gezeigt werden wird.

Die Ladungsmessung erfolgt durch eine in den Stromkreis geschaltete Kapazität, deren Wert um mindestens den Faktor 1000 größer als die Kapazität der Entladungsanordnung ist (siehe Bild 2.1). Die Spannung über dem Kondensator ist dem zeitlichen Integral des Stromes proportional, d.h. sie ist direkt ein Maß für die transportierte Ladung.

2.3.4 Ermittlung der Permittivität des Barrierenmaterials

Die Permittivität $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ bzw. die Permittivitätszahl oder relative Dielektrizitätskonstante ε_r wurde mit der bekannten Plattenkapazitäts-Formel aus Kapazitätsmessungen an besonderen Proben mit einem RLC-Meßgerät (Firma FLUKE, PM6304 Programmable Automatic RCL Meter) ermittelt. Hierzu wurde das platten- bzw. folienförmige Barrierenmaterial beidseitig auf einer Fläche von ca. 20 cm² kontaktiert.

Bei der Kapazitätsmessung eines Barrierematerials mit niedriger Permittivitätszahl (z.B. Teflon) ist es sehr wichtig zu beachten, dass Fehlmessungen durch mögliche Luftspalte zwischen den Elektroden und den Barrierenoberflächen verhindert werden. Aus diesem Grund wurde immer eine Leitsilberschicht direkt auf die Barriereoberflächen aufgebracht.

Bei den Kapazitätsmessungen dünner Barrierenschichten (z.B. Oberflächen-Barrieren) sind die Randfelder vernachlässigbar, wodurch die genaue Permittivität des Materials direkt erfassbar ist. Bei den Kapazitätsmessungen dickerer Massiv-Barrieren, deren Randfeld nicht vernachlässigbar ist, wurden mehrere aufeinander gelegte Schichten des gleichen Materials, aber mit verschiedenen Gesamtdicken gemessen, und damit ein Tendenzwert der Permittivität auf eine Schichtdicke gegen Null extrapoliert.

2.3.5 Durchgangswiderstand der Kontaktierungen

Eine Messung des Durchgangswiderstands ist für die Versuchsvariante mit Kontaktschicht zwischen Barrieren und Elektroden sinnvoll. Versuchsergebnisse werden zeigen, dass die Widerstandeigenschaft dieser Kontaktschicht eine große Rolle für die Homogenität einer Barrierenentladung spielt.

Zur Vermeidung von Fehlmessungen aufgrund von Kontaktwiderständen der Stromzuführung wurde eine Messmethode nach Valdes, die sog. Vierspitzenmethode, verwendet [Philippow 68]. Eine Skizze dieser Meßmethode zeigt Bild 2.3. Für die Messung der Durchgangswiderstände wurde die Kontaktschicht anstatt auf die Barriere auf eine Messingplatte aufgebracht, und eine Leitsilber-Gegenelektrode wurde dann auf die andere Seite der Kontaktschicht (Graphitspray/Carbolloid) gepinselt, oder eine andere Messingplatte auf die andere Seite der Kontaktschicht (Graphit-Pulver/Gitter) eingesetzt. Auf beiden Elektroden wird über zwei Stromanschlüsse der Messtrom eingeprägt und über zwei Spannungsabgriffe der Spannungsabfall hochohmig gemessen. Diese Vierspitzenmethode ist bei dem vorhandenen RCL Messgeräte realisiert.



Bild 2.3 Skizze Vierspitzenmethode für Messung der Durchgangswiderstände der Kontaktschicht
2.4 Optische Messungen

2.4.1 Hochgeschwindigkeitskamera

Zur Messung der optischen Erscheinungsform steht eine Hochgeschwindigkeits-Kamera Hadland 486 mit UV-empfindlicher Bildwandlerplatte (Intensifier) Cinemax 3 und UV-Optik zur Verfügung. Das in die Kamera einfallende Licht wird zunächst von dem Intensifier verstärkt und UV-Lichtanteile in sichtbares Licht umgesetzt. Dann fällt das Licht auf einen Strahlenteiler, der das Bild auf vier weitere Intensifier aufteilt. Am Ausgang ist jeweils ein CCD-Chip angeordnet, der digitale Bilder in 576x385 Punkten und 256 Graustufen liefert. Die kurze Belichtungszeit wird durch Ein- und Ausschalten der Verstärkereinheit realisiert. Weiter steht entsprechende Bildbearbeitungssoftware auf einen PC zur Verfügung.

Die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen in dieser Arbeit wurden als "Side-On"-Aufnahmen durchgeführt. Ein "Side-On"-Bild zeigt die direkte Erscheinungsform im Entladungsbereich (Gasspalt) von der Seite, besonders die jeweilige räumliche und zeitliche Entladungsentwicklung zwischen Anode und Kathode.

2.4.2 Emissionsspektroskopie

Emissionsspektroskopie ist eine wichtige Diagnostikmethode, bei der die optische Emission des Entladungsbereichs (Plasmas) spektroskopisch ausgewertet wird. Elektronisch angeregte Atome, Moleküle, Radikale oder auch Ionen, die in diesem Spektralbereich spontan emittieren, können mit Hilfe der Emissionsspektroskopie zeitlich aufgelöst nachgewiesen werden.

Bild 2.4 zeigt das Schema des verwendeten Versuchsaufbaus. Die Erfassung der optischen Emission erfolgte mit einer Linse, die im Abstand von 25 mm von dem Rand des Entladungsbereiches angeordnet war, damit die Emissionsintensitäten über einen großen Teil des Entladungsbereichs gemittelt werden konnten. Das emittierte Licht wurde dann durch eine polymere Lichtleiterfaser mit einer Sammellinse am anderen Ende zu einem Monochromator transportiert.



Bild 2.4 Schema der Anlagen für die Emissionsspektroskopie

Zur spektralen Zerlegung der Strahlung wurde ein Monochromator (Typ HR 640 MSL, Firma Instruments S.A. Jobin-Yvon, Longjumeau) mit einer Fokuslänge von 0,64 m und einer Blende von f/5,2 verwendet. Die vollausgeleuchtete Bildfeldlänge beträgt 25 mm. Das eingesetzte Gitter hat eine Strichdichte von 1200 Striche/mm. Der gleichzeitig erfassbare Wellenlängenbereich bei voller Intensität ist 29 nm.

Registriert wurden Teilbereiche des Spektrums mit der CCD-Kamera Hadland 486. Die gemessenen Intensitäten wurden mit einer entsprechenden Bildauslesungs-Software erfasst und verarbeitet.

3 Homogene Entladungsformen und ihre Existenzbereiche

3.1 Übersicht

Wegen der Komplexität der Ergebnisse sollen die festgestellten Entladungsarten und ihre Existenzbereiche zunächst in dieser Übersicht vorangestellt und anschließend im Detail erläutert werden. Die Untersuchungen wurden einerseits bei Netzfrequenz (50 Hz), andererseits bei 7 kHz, in einigen Fällen auch bei 16 kHz durchgeführt.

Bei <u>50 Hz</u> tritt die von [Tepper 02] beschriebene Typ-1-Entladung bei Verwendung von Mylar- (= PET-) Barrieren mit Kontaktierung durch ein feines Drahtgitter direkt auf, sobald die für die Zündung notwendige Anfangsspannung erreicht ist. Bei Spannungssteigerung erfolgt ab einer bestimmten Grenze ein Umschlag zu inhomogenen, filamentierten Entladungen. Hingegen wurde in dieser Arbeit bei 50 Hz mit den überwiegend untersuchten Al₂O₃-Barrieren ein bisher unbekanntes, wesentlich differenzierteres Verhalten beobachtet:

Während bei direkter Kontaktierung mit Leitsilber in Luft ausschließlich filamentierte Entladungen, in Stickstoff nur in einem sehr engen Bereich homogene Typ-1-Entladungen existieren, zeigen alle Varianten mit Drahtgitter oder resistiven Schichten beim Entladungseinsatz zunächst grundsätzlich eine stromschwache homogene Entladung des Typs 2. Abhängig von der Kontaktierungsart bleibt die Existenz dieses Typs 2 entweder über einen weiten Spannungsbereich bis zur höchsten verfügbaren Spannung erhalten, oder sie schlägt nach einigen kV Spannungssteigerung in eine kombinierte homogene Typ-2/Typ-1-Entladung um, die bis zur höchsten Speisespannung sehr stabil existiert. Das 50 Hz-Verhalten von Barrierenanordnungen mit Kontaktierungs-Schichten bei Luft und Stickstoff als Arbeitsgas ist nahezu identisch.

Im Bereich von kHz treten als homogene Entladungen nahezu ausschließlich Typ-2-Entladungen auf, und zwar nur in Stickstoff. Bereits geringe Mengen von Luftsauerstoff führen zur Filamentierung. Während bei geringen Spaltweiten in einem weiten Spannungsbereich homogene Typ-2-Entladungen existieren, engt sich mit zunehmender Spaltweite deren Spannungs-Existenzbereich ein, bis beim Überschreiten einer Grenz-Spaltweite nur noch filamentierte Entladungen auftreten. Es zeigt sich, dass diese Grenzspaltweite eindeutig vom Barrierenmaterial abhängt, wobei die relative Permittivität der dem Gasspalt zugewandten Barrierenoberfläche maßgeblich ist. Im Gegensatz zu 50 Hz kann kein deutlicher Einfluss einer direkten Kontaktierung (Leitsilber) oder von Kontaktierungs-Zwischenschichten auf die Homogenitätsbereiche festgestellt werden.

3.2 Homogene Entladungen bei 50 Hz

In [Tepper 02] wurden intensive Untersuchungen mit Mylar- (= PET-) Barrieren und Gitter-Kontakt durchgeführt. Dabei traten beim Überschreiten der zur Zündung notwendigen Anfangsspannung sofort die stromstarken und kurzzeitigen Typ-1-Entladungen auf. Bei Steigerung der Versorgungsspannung erfolgte ab einer oberen Spannungsgrenze, die nur ca. 15 % über der Anfangsspannung liegt, der zunehmende Übergang zur filamentierten Entladung. Dieses Verhalten wurde durch einen wiederholten Versuch in dieser Arbeit bestätigt.

In dieser Arbeit wurden die Untersuchungen bei 50 Hz auf Anordnungen mit Al₂O₃-Barrieren konzentriert, wobei unterschiedliche Arten der Kontaktierung im Vordergrund standen. Bei diesen Untersuchungen wurden reine Typ-1-Vorgänge, die gekennzeichnet sind durch Strombzw. Ladungsverläufe gemäß Bild 1.4 und 1.5, nur bei direkter Barrierenkontaktierung mit Silberleitlack beobachtet. Hierauf wird in Abschnitt 3.2.2 im Zusammenhang mit Tabelle 3.3 noch näher eingegangen.

3.2.1 Typ-2-Entladung bei 50 Hz

In bisherigen Veröffentlichungen existiert eine homogene Typ-2-Entladung nur im kHz-Bereich. Als eine große Homogenitätserweiterung wurde in dieser Arbeit eine stabile homogene Typ-2-Barrierenentladung auch bei 50 Hz entdeckt. Diese Entladungsform trat grundsätzlich beim Einsatz von Kontaktschichten zwischen Elektroden und Barrieren auf, im Unterschied zur direkten Barrierenkontaktierung.

Als typisches Beispiel zeigt Bild 3.1 die erfassten Spannungs-, Strom- und Ladungsverläufe aus einer homogenen Typ-2-Entladung bei 50 Hz. In dieser Untersuchung wurde 1 mm dicke Al₂O₃-Keramik als Barrieren, Gitter (Mesh #325) als Kontaktschichten, Messingplatten als Elektroden, und Umgebungsluft als Reaktionsgas eingesetzt. Die Spaltweite war 4 mm, die sinusförmige Spannung besaß eine Höhe von 30 kV (Peak-Peak).



Bild 3.1 Spannungs-, Strom- und Ladungsverläufe einer homogenen Typ-2-Entladung bei 50 Hz

Der Strom aus dieser Entladungsform besitzt im Allgemeinen eine Amplitude bis zu einigen 100 μ A, die 100 mal niedriger als die Stromamplitude aus einer typischen Typ-2-Entladung im kHz-Bereich ist, weil bei der viel niedrigeren Frequenz die Barrierenimpedanz $\frac{1}{\omega C_b}$ viel

größer ist.

Wegen der niedrigen Stromhöhe können einige kleine hochfrequente Stromspitzen in dem Stromverlauf im Bild 3.1 beobachtet werden, die durch parasitäre Entladungen an der Spannungszuführung verursacht werden. Die optischen Beobachtungen der Entladung zeigen, dass diese im Kontaktspalt vollkommen homogen sind. Außer der Grundschwingung durch den kapazitiven Verschiebungsstrom kann in dem Stromverlauf ein deutlicher Stromanteil der homogenen Typ-2-Entladung identifiziert werden, vgl. Bild 1.5. Entsprechend dem stetigen Stromverlauf zeigt Bild 3.1 auch eine kontinuierlich verlaufende Ladungsänderung.

Zur Untersuchung des Einflusses der Barrierenkontaktierung wurden die in Tabelle 3.1 zusammengestellten Varianten bei 50 Hz verwendet. In allen Fällen bestehen die Barrieren aus 1 mm dicken Al₂O₃ Platten. Als Elektroden wurden Messingplatten oder Leitsilberschichten verwendet (siehe Abschnitt 2.2). Die in der Tabelle angegebenen Widerstandswerte sind die Durchgangswiderstände spezieller Proben, bei welchen die Kontaktierungen gegen eine Messingplatte, anstatt gegen die Barrieren, hergestellt wurden, siehe Abschnitt 2.3.5.

Bezeichnung	Kontaktierung	Widerstand gegen Messing Ohm	Spaltweite mm	Gas
Carbolloid100	100 µm Carbolloid	0,22	2	
Carbolloid300	300 µm Carbolloid	0,65	2	
Carbolloid100	100 µm Carbolloid	0,22	4	In ruhandar Luft
Carbolloid300	300 µm Carbolloid	0,65	4	oder
Graphitspray	Graphitspray 15 µm	0,04	4	mit 16 l/min N_2
Gitter	Gitter (Mesh #325)	0,04	4	
Graphit1,5	1,5 mm Graphit	0,1	4	

Tabelle 3.1 Versuchsvarianten mit Kontaktierungsschichten;

Die Ergebnisse sind in Bild 3.2 zusammengestellt. Die Spannungsexistenzbereiche (Peak-Peak-Werte) der "reinen" Typ-2-Entladungen – bevor die unter 3.2.2 beschriebenen kombinierten Typ-2/Typ-1-Entladungen auftreten – sind als dunkle Balken dargestellt. Diese Entladungen setzen bei allen Varianten mit Kontaktierungsschichten bei einer unteren Grenze der Versorgungsspannung ein, ab welcher die Bedingungen für eine Zündung der Entladung im Spalt erstmals vorliegen ("Anfangsspannung"). Beträgt die Obergrenze 40 kV, so war die Grenze der Spannungsversorgung erreicht, aber noch nicht die Existenz der homogenen Typ-2-Entladung.

Barrieren 1 mm Al₂O₃



(b) in ruhender Luft

Bild 3.2 Spannungsexistenzbereiche der homogenen Typ-2-Entladungen bei 50 Hz mit unterschiedlichen Kontaktierungen

Nachfolgend sind die Ergebnisse mit den homogenen Typ-2-Entladungen bei 50 Hz, wie sie sich auch in Bild 3.2 niederschlagen, zusammengefasst und diskutiert:

- Diese Entladungsform ist sehr stabil und vollkommen homogen.
- Die zwischen Elektroden und Barrieren eingesetzte Kontaktierung beeinflusst den Spannungsexistenzbereich deutlich. Während die Untergrenze (=Anfangsspannung) im Wesentlichen von der Spaltweite abhängt, über der vor der Zündung der Hauptanteil der Speisespannung abfällt, hängen die Obergrenzen stark von der Variante der Kontaktierung ab. Es fällt auf, dass in den Anordnungen mit den größeren Kontaktwiderstandswerten breitere Spannungsexistenzbereiche vorliegen. Bei den relativ hochohmigen Widerstandsschichten aus Carbolloid (beide Dicken 300 µm und 100 µm) existieren sehr breite Spannungsexistenzbereiche, in denen eine Typ-2-Entladung bis zur maximal verfügbaren Spannung immer vollkommen homogen ist. Bei Kontaktierungsschichten aus Graphit oder Gitter liegen die Obergrenzen einige kV oberhalb der Anfangsspannungen. Dann setzt der in 3.2.2 beschriebene Übergang zur Typ-1-Entladung ein.
 - Es muss betont werden, dass die Kontaktierungswiderstände gemäß Tabelle 3.1 auf den Spannungs- und Stromverlauf der Entladungsstrecke keinerlei Einfluss haben können, da deren Impedanz (< 1 Ω) im Vergleich zur 50 Hz-Barrierenimpedanz (Größenordnung 30 M Ω) vernachlässigbar klein ist. Auch bei sehr viel höheren Frequenzen, z.B. 1 MHz, liegen die Barrierenimpedanzen noch um ein Vielfaches über diesen Werten. Die Wirkung der Kontaktschichten liegt offenbar in der postulierten Vergleichmäßigung der Stromaufteilung, jedoch kann aus den Ergebnissen dieser Arbeit noch kein endgültiger Schluss gezogen werden. Es kann vermutet werden, dass im Gegensatz zu den sehr niederohmigen Widerständen der Kontaktierungen gegen Metallproben bei der Kontaktierung der Isolierstoffbarrieren andere Widerstandsmechanismen wirksam sind, die zu höheren Werten führen. Versuche anhand von Barrieren-Kontaktierungen durch Lissajous-Figuren gemäß Bild 1.9, die eine sorgfältige Vermeidung parasitärer Entladungen erfordern, konnten aus Zeitgründen nicht durchgeführt werden.

Die Gasarten und Flüsse zeigen kaum Einflüsse auf die Anfangsspannung und den Spannungsexistenzbereich. Mit eingeleitetem Stickstoff und in ruhender Luft sind die Ergebnisse nahezu identisch. Dies steht in deutlichem Gegensatz zu Typ-2-Entladungen im kHz-Bereich, wo in Luft nahezu keine homogenen Typ-2-Entladungen existieren. Dies wird in der Literatur [Massines 00, Miralai 00] auf die Quench-Wirkung des Sauerstoffs für Metastabile des Stickstoffs zurückgeführt. Daraus lässt sich der Schluss ableiten, dass sich bei 50 Hz der physikalische Mechanismus der Typ-2-Entladung von dem im kHz-Bereich unterscheidet.

- Bei den drei Kontaktierungsvarianten mit dem niedrigsten Durchgangswiderstand gegen Messing wird bei höheren Spannungen erstmals ein gleichzeitiges Auftreten von Entladungen des Typs 2 und des Typs 1 beobachtet. Auf diese Entladungsform wird in Abschnitt 3.2.2 nochmals gesondert eingegangen.
- Ein weiteres Merkmal dieser Entladungsform bei 50 Hz gegenüber der im kHz-Bereich ist, dass in den Untersuchungen noch keine obere Spaltweitengrenze beobachtet wurde. Bei einem Gasspalt von 2 mm bis 4 mm existieren die homogenen Typ-2-Entladungen noch sehr stabil. Größere Spaltabstände wurden während dieser Arbeiten nicht untersucht, jedoch ist auch noch bei größerer Spaltweite Homogenität zu erwarten.

3.2.2 Kombinierte Typ-2/Typ-1-Entladung bei 50 Hz

Bild 3.3 zeigt erstmals eine im Rahmen dieser Arbeit neu gefundene Entladungsform, die offensichtlich eine Kombination aus stromschwacher Typ-2-Entladung und einer daraus entstehenden stromstarken, kurzzeitigen Typ-1-Entladung darstellt. Der Bereich ihres Auftretens ist im Bild 3.2 (rechtes Drittel) besonders gekennzeichnet. Die Bild 3.3 zugrundeliegenden Versuchsbedingungen waren: 1 mm dicke Al₂O₃-Keramikbarriere, Graphitspray als Kontaktschicht, 4 mm Gasspalt, 50 Hz sinusförmige Spannung bei 36 kV (Peak-Peak) und mit 16 l/min Stickstoff.



(b) Ladung vs. Spannung (Lissajous-Figur)



Die homogene Eigenschaft dieser Entladung wurde durch optische Beobachtung bestimmt. Bild 3.3(a) zeigt zwei elektrischen Messkurven: Ladungskurve gegen Zeit und Spannungskurve gegen Zeit. Bild 3.3(b) zeigt die entsprechende Lissajous-Figur. Verglichen mit der in Kapitel 1 dargestellten Lissajous-Figur für "reine" Typ-1- oder Typ-2-Entladung besitzt Bild 3.3(b) besondere Eigenschaften, die durch folgende sechs Abschnitte gekennzeichnet sind:

I. B-A-B-C und E-F-E-G

Diese Segmente kennzeichnen den kapazitiven 50 Hz-Verschiebungsstrom, und entsprechen den Phasen, in denen die Entladung noch nicht gezündet ist. Die Steigungen dieser Abschnitte entsprechen der Kapazität der Gesamtanordnung

II. C-D und G-H

Diese Abschnitte zeigen die homogenen Typ-2-Entladungsphasen. Die Ladungs-Spannungs-Kurve weist eine gegenüber den Abschnitten I deutlich erhöhte Steilheit auf. In Kapitel 6 wird diese Steigung im Zusammenhang mit dem Koronamodell der Typ-2-Entladung diskutiert.

III. D-E und H-B

Diese Abschnitte zeigen die raschen Ladungssprünge der homogenen Typ-1-Entladungsphasen, während der die Gesamtspannung praktisch konstant bleibt. Da der Ladungssprung aus der Typ-2-Phase heraus erfolgt, wird auch klar, dass diese Typ-1-Phase durch plötzlichen Umschlag des Entladungsmechanismus aus einem hochohmigen (Typ 2) in einen um viele Größenordnungen niederohmigeren Zustand entsteht. Die nunmehr gut leitende Gasstrecke entlädt rasch die Gasspaltkapazität, wodurch die Entladung insgesamt verlischt, da auch die für den Entladungstyp 2 notwendige Gasspaltspannung nicht mehr vorhanden ist. Anschließend fließt deshalb wiederum nur der kapazitive Verschiebungsstrom, siehe I. In diesem Zusammenhang sei auch auf Abschnitt 6.2 und das dortige Bild 6.8 verwiesen, wo diese Verläufe bei kombinierten Typ-2/Typ-1-Entladungen in der Simulation nachgebildet sind.

Die Existenzbereiche kombinierter Typ-2/Typ-1-Entladungen und ihre Abgrenzung zur reinen Typ-2-Entladung sind bereits in Bild 3.2, Abschnitt 3.2.1. enthalten. Zum Vergleich mit den Kontaktierungsvarianten, bei welchen solche Entladungen auftraten, mit der direkten Barrierenkontaktierung soll noch ein weiteres Kriterium herangezogen werden.

Als Kriterium für die Homogenität bei reinen Typ-1-Entladungen wurde in [Tepper 02] eine Stabilitätszahl (Homogenitätszahl) definiert. Diese Stabilitätszahl ist auch hier geeignet, um die Homogenität des Typ-1-Anteils der kombinierten Typ-2/Typ-1-Entladung zu beurteilen. Sie wird aus typischen Oszillogrammen ausgewertet, wie in Bild 3.4 dargestellt. Diese Versuche wurden mit Al₂O₃-Barrieren und Gitter-Kontaktschicht in Luft bei 4 mm Gasspalt

durchgeführt. Der Peak-Peak-Wert der 50 Hz-Sinusspannung betrug 35,6 kV. Bei einer vollkommen homogenen Typ-1-Entladung darf nur ein Ladungssprung in jeder Halbschwingung der Entladung auftreten.



Bild 3.4 Zur Stabilitätszahl bei der Typ-1-Entladung

Bild 3.4 zeigt die Ladungsverläufe von insgesamt 25 Halbschwingungen, in denen 4 Halbschwingungen wegen ihre stufigen Ladungssprünge als inhomogene Phasen bewertet werden. Daraus resultiert eine Stabilitätszahl von 84 %.

Intensive elektrische Messungen wurden für Anordnungen mit Mylar-Barrieren und Gitter-Kontakt in [Tepper 02] durchgeführt. In dieser entstanden statt kombinierter Typ-2/Typ-1-Entladung nur "reine" Typ-1-Entladungen. Dieses Ergebnis wurde durch einen wiederholten Versuch in dieser Arbeit bestätigt.

Tabelle 3.2 Varianten der Kontaktschicht für Untersuchungen der Stabilitätszahlen der kombinierten Typ-2/Typ-1- und reinen Typ-1-Entladung bei 50 Hz

Namen der Varianten	Barriere	Kontaktierung	Widerstand gegen Messing
Leitsilber	1 mm Al ₂ O ₃	ohne Zwischenschicht	-
Graphitspray	$1 \text{ mm Al}_2\text{O}_3$	Graphitspray (15 µm)	0,04 Ω
Gitter	1 mm Al ₂ O ₃	Gitter (Mesh #325)	0,04 Ω
Graphit1,5	1 mm Al ₂ O ₃	1,5 mm Graphitschicht	0,1 Ω

In dieser Arbeit wurden die Stabilitätszahl bei direkter Barrierenkontaktierung mit Leitsilber verglichen mit Kontaktierungs-Varianten, bei welchen kombinierte Typ-2/Typ-1-Entladungen auftraten, siehe Bild 3.2. Hierzu wurden die in Tabelle 3.2 aufgeführten Versuchsvarianten mit Al₂O₃-Barrieren eingesetzt.

Während bei der ersten Variante der Tabelle 3.2 mit direkter Kontaktierung beim Erreichen der Anfangsspannung entweder sofort ausschließlich filamentierte Entladungen oder filamentierte Entladungen gemischt mit Typ 1 auftraten (d.h. Stabilitätszahl < 100 %), erfolgten bei den übrigen Varianten mit den Kontaktierungsarten "Graphitspray", "Gitter" und "Graphit1,5" zunächst ausschließlich Typ-2-Entladungen, die bei weiterer Steigerung der Spannung in gemischte Typ-2/Typ-1-Entladungen übergingen. Hingegen traten bei den Kontaktierungsarten "Carbolloid100" und "Carbolloid300" bis zur höchsten verfügbaren Spannung ausschließlich Typ-2-Entladungen auf, siehe Abschnitt 3.2.1. Die nachfolgenden Aussagen beziehen sich nur auf den Typ-1-Anteil bei den Anordnungen, wo ein solcher auftrat.

Tabelle 3.3 zeigt in einer Übersicht die Stabilitätszahlen der durchgeführten Untersuchungen als Kennzeichen für die Homogenität.

Varianten	Spaltweite mm	Gas $U(p-p)$ kV		Stabilitätszahl
Leitsilber	2	Luft	22,0*	0
Leitsilber	2	16 l/min N ₂	23,0	10 %
Leitsilber	2	16 l/min N ₂	24,2	10 %
Leitsilber	2	16 l/min N ₂	27,2	10 %
Leitsilber	2	16 l/min N ₂	41,2	10 %
Leitsilber	4	Luft	32,0*	0
Leitsilber	4	16 l/min N ₂	32,8	20 %
Leitsilber	4	16 l/min N ₂	34,4	50 %
Leitsilber	4	16 l/min N ₂	40,4	50 %
Gitter	4	Luft	35,6	84 %
Gitter	4	Luft	40,0	40 %
Gitter	4	16 l/min N ₂	Bis 40,0	100 %
Graphitspray	4	Luft	Bis 40,0	100 %
Graphitspray	4	16 l/min N ₂	Bis 40,0	100 %
Graphit1,5	4	Luft	Bis 40,0	100 %
Graphit1,5	4	16 l/min N ₂	Bis 40,0	100 %

Tabelle 3.3 Stabilitätszahlen der Typ-1-Entladungen bei 50 Hz; Barrieren 1 mm Al₂O₃

* Ab dieser Anfangsspannung ist die Entladung schon filamentiert.

Die Versuchsergebnisse können folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Bei bloßen Keramikbarrieren mit direkter Kontaktierung kann eine homogene Typ-1-Entladung nur in Stickstoff und nur mit niedrigen Stabilitätszahlen erreicht werden.
- Die ohmschen Kontaktschichten spielen eine entscheidende Rolle f
 ür die Homogenit
 ät der Typ-1-Entladung (oder des Typ-1-Anteils der kombinierten Typ-2/Typ-1-Entladung) bei 50 Hz. Bei den Kontaktvarianten "Graphitspray" oder "Graphit1,5" k
 önnen vollkommen

homogene Typ-1-Anteile der kombinierten Entladungen sowohl in Stickstoff als auch in Luft erreicht werden. Dies gilt bis zur höchsten verfügbaren Spannung von 40 kV.

- Bei der Anordnung mit Gitterkontaktierung liegt die Homogenitätszahl des Typ-1-Anteils teilweise unter 100 %. Hier sind die Homogenitäten der Entladungen in Stickstoff besser als in Luft.
- Die Spaltweite zeigt einen entgegengesetzten Einfluss bei der Typ-1-Entladung als bei der Typ-2-Entladung. So sind die Stabilitätszahlen bei größerer Spaltweite hier in der Anordnung mit bloßen Keramikbarrieren und direkter Kontaktierung noch höher.
- Der Einfluss der Spannungshöhe auf das Homogenitätskriterium "Stabilitätszahl" ist bei diesen Untersuchungen nicht deutlich. Nach [Tepper 02] nimmt sie deutlich mit der Spannung ab.
- Auch hier muss betont werden, dass der Spannungsabfall an der Kontaktschicht viel zu gering ist, den Entladungsstrom bzw. deren Spannung direkt zu beeinflussen. Er beträgt maximal 1 V bei 10 A Stromamplitude und 0,1 Ohm Schichtwiderstand.

Einige Untersuchungen wurden auch durchgeführt, um den Einfluss der Materialieneigenschaft der Barriere (Permittivität) auf den Homogenitätsexistenzbereich der Typ-1-Entladung bei 50 Hz zu erfassen. Es wurde aber kein deutlicher Einfluss beobachtet.

3.3 Typ-2-Entladung im kHz-Bereich

Die "klassische" homogene Typ-2-Entladung wurden bisher im kHz-Bereich beobachtet. In [Tepper 02] wurde diese Entladungsform intensiv untersucht. Danach sind diese homogenen Entladungen allerdings auf einen recht engen Bereich kurz oberhalb der Anfangsspannung beschränkt. Ferner können sie nur in Anordnungen mit relativ teueren Gasen wie Stickstoff, Helium oder Argon gute Homogenitäts-Eigenschaften zeigen.

Verglichen zur homogenen Typ-2-Entladung bei 50 Hz hat die "klassische" Typ-2-Entladung höhere Stromamplitude und deswegen höhere Leistung. Deshalb ist eine Erweiterung des

Homogenitätsbereichs der Typ-2-Entladung im kHz-Bereich für Industrieanwendungen besonders interessant.

Untersuchungen in dieser Arbeit zeigen, dass durch folgende Maßnahmen der Homogenitätsbereich der Typ-2-Barrierenentladungen im kHz-Bereich erweitert werden kann:

- Durch einen "abgeschlossenen Reaktor" kann die Homogenität einer Typ-2-Entladung in Stickstoff im kHz-Bereich verbessert werden.
- Durch den Einsatz eines Barrierenmaterials mit niedrigerer Oberflächenpermittivität kann die maximale Spaltweite (Spaltweitenexistenzbereich) für eine homogene Typ-2-Entladung im kHz-Bereich erhöht werden.

3.3.1 Abgeschlossener Reaktor

Bei den Barrierenentladungen mit Stickstoff als Arbeitsgas wird das Gas aus einem Gassystem in den Reaktor geblasen und strömt aus diesem in die Umgebungsluft aus. Ein "abgeschlossener Reaktor" bedeutet, dass der Ausgang des Versuchsgefäßes durch ein Schlauchsystem verlängert wird, damit ein Zutritt von Sauerstoff aus der Umgebungsluft durch Diffusion entgegen der Durchflussrichtung des Stickstoffs unterbunden wird (siehe auch Abschnitt 2.1). Der Vorionisierungsprozess durch Metastabile des Stickstoffs, nach [Massines 92, Rebehi 92, Ségur 00] die Hauptursache für die Entladungshomogenität ist, kann auf diese Weise nicht durch den Sauerstoff zerstört werden. Um diese Verhältnisse zu klären, wurde eine entsprechende Spektroskopieanalyse durchgeführt, denen Ergebnisse in Anschnitt 5.2 darstellt werden.

Einige Vergleichsuntersuchungen wurden durchgeführt, um den Effekt der "abgeschlossener Reaktor" Kondition auf die Entladungshomogenität zu bewerten. Die Versuche wurden in einer Anordnung mit Barrieren aus 1 mm dickem Al₂O₃ und Stickstoff bei 7 kHz gemacht. Tabelle 3.4 zeigt die Ergebnisse.

Spaltweite (mm)	Gasfluss	Entladungsform bei "offenem Gasausgang"	Entladungsform bei "abgeschlossenem Reaktor"
2	16 l/min N ₂	Bei der Anfangsspannung filamentiert	Homogen nach 10 min Gasspülungszeit
1,5	16 l/min N ₂	Bei der Anfangsspannung teil-homogen	
1,5	3 l/min N ₂	Bei der Anfangsspannung filamentiert	
1	16 l/min N ₂	Homogen bis zur Grenze der Spannungsversorgung	Homogen bis zur Grenze der Spannungsversorgung
1	4 l/min N ₂	Homogen in begrenztem Spannungsbereich	
1	3 l/min N ₂	Bei der Anfangsspannung filamentiert	

Tabelle 3.4 Effekt der "abgeschlossener Reaktor" Kondition

Bei Anordnungen mit offenem Gasausgang sind die Homogenitätsbereiche offensichtlich geringer. Nach Einsatz des abgeschlossenen Reaktors kann in dieser Anordnung eine vollkommen homogene Entladung in Stickstoff bei einer Spaltweite von 1,5 bis 2 mm erzeugt werden. Bei einer Spaltweite bis zu 1,5 mm kann die vollkommene Homogenität auch bei geringeren Gasflüssen (z.B. 3 l/min) ohne Spannungsbegrenzung (bis zur 40 kV Peak-Peak, Grenze des Generators) erreicht werden. Für 2 mm Spaltweite gilt dies nur bei einer Gasspülzeit von 10 Minuten. Danach spielt vermutlich die Desorption von Sauerstoff aus der Keramikoberfläche keine Rolle mehr.

Die folgenden Untersuchungen für Typ-2-Entladungen im kHz-Bereich wurden immer mit "abgeschlossenem Reaktor" durchgeführt.

3.3.2 Spaltweitenexistenzbereich

Als Beispiel des Homogenitätsbereichs der Barrierenentladung zeigt Bild 3.5 den Spannungsexistenzbereich einiger typischer homogener Typ-2-Entladungen bei 7 kHz mit -

Barrieren aus 2 mm dickem Glas und 100 μm Mylar-Folie (Glas/Mylar 100, siehe Tabelle 3.5), sowie 16 l/min Stickstoff.



Bild 3.5 Spannungsexistenzbereiche bei verschiednen Spaltweiten für eine homogene Typ-2-Entladung bei 7 kHz

Anderes als bei 50 Hz ist der Spannungsexistenzbereich der homogenen Typ-2-Entladung hier deutlich von der Spaltweite abhängig. Während die Spannungsuntergrenze, d.h. die Anfangsspannung der Entladung, erwartungsgemäß mit der Spaltweite ansteigt, nimmt die Obergrenze mit der Spaltweite ab, wie im Prinzip bereits aus [Tepper 02] bekannt. Schließlich existiert bei einer Grenzspaltweite, hier 2,2 mm, nur ein schmaler Homogenitätsbereich. Wird die Spaltweite weiter vergrößert, existieren nur noch filamentierte Entladungen. Die maximalen Spaltweiten sind für technische Anwendungen homogener Typ-2-Entladungen von Wichtigkeit.

Als ein Hauptergebnis wurde in dieser Arbeit der Spaltweiteexistenzbereich der Typ-2-Entladung in Stickstoff und im kHz-Bereich durch den Einsatz von Barrierenoberflächen mit niedriger Permittivität erweitert, wie im Folgenden gezeigt wird. Alle Untersuchungen wurden mit Stickstoff durchgeführt.

Bei ersten orientierenden Versuchen mit unterschiedlichen massiven, einschichtigen Barrierenmaterialien wurde ein starker Einfluss auf den Existenzbereich festgestellt, und zwar dergestalt, dass die Grenzspaltweite bei Materialien mit niedrigerer Permittivität (Dielektrizitätszahl) größer ist, und umgekehrt. Zur systematischen Untersuchung der Zusammenhänge wurden umfangreiche Versuchsserien sowohl mit Barrieren aus einem einheitlichen Material als auch mit zweischichtigen Barrieren aus unterschiedlichen Dielektrika durchgeführt. Die Barrierenmaterialien und ihre Dicken wurden gezielt so variiert, dass sie sich sowohl im Hinblick auf die resultierende Barrierenkapazität als auch im Hinblick auf das Material der dem Entladungsspalt zugewandten Barrierenseite unterscheiden. Tabelle 3.5 stellt alle untersuchten Varianten gegenüber.

Tabelle 3.5 Barrierenvarianten mit unterschiedlichen Schichten verschiedener Permittivitäten

Variante	Grund-Barriere	E _r	Oberfläche- Barriere	E _r	C _b pF		
Eine Barrierenschicht							
1mmAl ₂ O ₃	$1 \text{ mm Al}_2\text{O}_3$	5,9	-	-	52		
2mmAl ₂ O ₃	$2 \text{ mm Al}_2\text{O}_3$	5,9	-	-	26		
Vitronit	2 mm Vitronit	5,4	-	-	24		
2mmGlas	2 mm Glas	8	-	-	36		
4mmGlas	4 mm Glas	8	-	-	18		
Plexiglas (PMMA)	2 mm Plexiglas	2,9	-	-	13		
	Doppel-E	Barrierens	chichten				
Al ₂ O ₃ / Silikonkautschuk	1 mm Al ₂ O ₃	5,9	400 μm Silikonkautschuk	2,3	34		
Glas/HDPE	2 mm Glas	8	15 μm HDPE	2,4	35		
Glas/Tygaflor76	2 mm Glas	8	76 μm Tygaflor	2,1	31		
Glas/Tygaflor124	2 mm Glas	8	124 µm Tygaflor	2,1	29		
Glas/Teflon0,5	2 mm Glas	8	0,5 mm Teflon	2,1	18		
Glas/Mylar100	2 mm Glas	8	100 µm Mylar	3,0	31		
Doppel-Barrierenschichten, als Spray aufgebracht							
Al ₂ O ₃ / Teflon-Spray	1 mm Al ₂ O ₃	5,9	5 μm Teflon	2,1	52		
Glas/ Teflon-Spray	2 mm Glas	8	5 μm Teflon	2,1	35		

Bei den nachfolgenden Ergebnissen dient die Grenzspaltweite (Bild 3.5) als Kriterium für den Homogenitätsbereich der Entladungen. Tabelle 3.6 gibt zur Übersicht eine Reihenfolge der Grenzspaltweiten der verschiedenen Varianten für 7 kHz.

Tabelle 3.6 Spaltweiteexistenzbereiche bei verschieden Barrierenvarianten für homogene Typ-2-Entladungen mit 16 l/min Stickstoff bei 7 kHz

Dorrioronvorianto	Maximale Spaltweite
Bamerenvariante	mm
$1 \text{ mm Al}_2\text{O}_3$	1,5
$2 \text{ mm Al}_2\text{O}_3$	1,5
Vitronit	1,5
2 mm Glas	1,5
4 mm Glas	1,5
Plexiglas	2,2
Al ₂ O ₃ /Silikonkautschuk	2,8
Glas/HDPE	2,6
Glas/Tygaflor76	3,0
Glas/Tygaflor124	3,0
Glas/Teflon0,5	3,0
Glas/Mylar100	2,2
Al ₂ O ₃ /Teflon Spray	3,0
Glas/Teflon Spray	3,0

Es liegt nahe, die Barrierenkapazität als ausschlaggebende physikalische Größe zu vermuten, denn sie bestimmt die in die Entladung kapazitiv eingekoppelte Leistung und könnte somit auch entscheidend für den Umschlag in die inhomogene filamentierte Form sein. In Bild 3.6 ist die Grenzspaltweite als Funktion der Gesamtkapazität beider Barrieren in Reihe aufgetragen. Der breite Streubereich lässt keinerlei Tendenz einer Abhängigkeit erkennen.



Bild 3.6 Grenzspaltweite als Funktion der Gesamtkapazität beider Barrieren, Typ-2-Entladungen mit 16 l/min Stickstoff bei 7 kHz

In Bild 3.7 ist die Grenzspaltweite als Funktion der Permittivität der dem Gasspalt zugewandten Barrierenoberfläche für 7 kHz, in Bild 3.8 der gleiche Sachverhalt für 16 kHz aufgetragen. Hierbei ergibt sich ein eindeutiger Zusammenhang mit recht geringer Streuung, der bei dem gewählten invers-quadratischen Maßstab für die Permittivität einer Geraden entspricht.



Bild 3.7 Grenzspaltweite als Funktion der Permittivität der spaltseitigen Barrierenoberfläche, Typ-2-Entladungen mit 16 l/min Stickstoff bei 7 kHz



Bild 3.8 Grenzspaltweite als Funktion der Permittivität der spaltseitigen Barrierenoberfläche, Typ-2-Entladungen mit 16 l/min Stickstoff bei 16 kHz.

Insgesamt lassen sich die Ergebnisse folgendermaßen zusammenfassen:

- Der Permittivität des Materials der Barrierenoberfläche am Gasspalt besitzt einen großen Einfluss auf die maximale Spaltweite für eine homogene Typ-2-Entladung in Stickstoff. Je niedriger die Permittivität des Materials ist, desto weiter ist der Spalteweitenexistenzbereich.
- Die Abhängigkeit zwischen maximaler Spaltweite (Grenzspaltweite) und relativer Oberflächenpermittivität (ε_r) lässt sich als empirische Gleichung formulieren:

$$Spaltweite_{max} = K_1 + K_2 / \varepsilon_r^2$$

wobei K_1 und K_2 Konstanten sind.

- Die Gesamtkapazitäten beider Barrieren (Cb) zeigen hingegen keinerlei Beziehung zur Grenzspaltweite.
- Ein Einfluss der Dicke der Oberflächenschicht wurde nicht festgestellt. Sogar noch bei einer aufgesprühten Teflon-Oberfläche von 5 µm Dicke wurde das gleiche Verhalten wie bei eine 0,5 mm Teflonschicht festgestellt.

- Mylar zeigt bei homogenen Typ-2-Entladungen im kHz-Bereich die gleiche Eigenschaft wie andere Materialien mit ähnlich niedrigen Dielektrizitätszahlen.

Zur Einflusses Barrieren-Oberflächenmaterials auf Diskussion des des den Homogenitätsbereich sollte zunächst dass Eigenschaften man vermuten, der Ladungsträgererzeugung an den Barrierenoberflächen das Verhalten der homogenen Entladung und ihre Grenzen bestimmen, und dass diese Eigenschaften in monotoner Weise mit der Permittivität der Oberfläche zusammenhängen. Aus der Literatur sind jedoch keine Hinweise auf derartige Zusammenhänge bekannt. Eine andere Hypothese ist, dass beim Umschlag von homogenem zu lokal eng begrenztem filamentierten Stromfluss kapazitive Verschiebungsströme unmittelbar am Übergang zwischen Barriere und Entladung eine Rolle spielen können, und dass diese von der lokalen Dielektrizitätszahl abhängen. Im Zusammenhang mit Simulationsrechnungen wird diese Hypothese in Abschnitt 6.3 untersucht.

Nachfolgend sind in Bild 3.9 noch einige repräsentative Ergebnisse der Existenzbereiche für unterschiedliche Materialien der Barrierenoberflächen bei 7 kHz zusammengestellt. Dabei wird deutlich die geringere Grenzspaltweite bei Al₂O₃ mit hoher Dielektrizitätszahl (Bild 3.9a) gegenüber Teflon (Bild 3.9b) und Silikonkautschuk (Bild 3.9c) mit niedrigerer Dielektrizitätszahl sichtbar.



(a) 1mmAl₂O₃ mit 16 l/min N₂

(b) Al₂O₃ / Teflonspray mit 16 l/min N₂



(c) Al₂O₃/Silikonkautschuk mit 16 l/min N₂



Der Einfluss der Strömungsintensität des Stickstoffs auf den Homogenitätsbereich wird am Beispiel von Barrieren mit Silikonkautschuk in Bild 3.10 deutlich. Während die Anfangsspannung praktisch unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit ist, liegt die Obergrenze mit höherem Gasfluss höher, d.h. der Existenzbereich ist weiter.



Bild 3.10 Spannungsexistenzbereiche der homogenen Typ-2-Entladungen bei 7 kHz mit Al₂O₃/Silikonkautschuk-Barrieren und verschiedenen N₂-Gasflüssen

Wie bei den Typ-2-Entladungen bei 50 Hz wurden auch einige Untersuchungen bei 7 kHz in den Entladungsanordnungen mit Kontaktschichten auf der Barrierenrückseite (Graphitschicht, Graphitspray, Carbolloid, Gitter) durchgeführt. Bild 3.11 zeigt die Ergebnisse. In diesen Untersuchungen kann keine deutliche Verbesserung durch den Einsatz der Kontaktschichten beobachtet werden, verglichen zu den Ergebnissen aus Anordnungen mit bloßen Keramik-Barrieren und direkter Leitsilber-Kontaktierung, Bild 3.9a).



Bild 3.11 Spannungsexistenzbereiche der homogenen Typ-2-Entladungen bei 7 kHz in Anordnungen mit Kontaktschichten; Barrieren 1 mm Al₂O₃

3.4 Typ-1-ähnliche Entladung bei 7 kHz

In den meisten Barrierenanordnungen dieser Arbeit findet im kHz-Bereich (7 kHz) eine filamentierte Entladung (siehe Bild 1.2) statt, wenn die angelegte Spannung den Spannungsexistenzbereich oder die Spaltweite den Spalteweitenexistenzbereich für eine homogene Typ-2-Entladung überschreitet.

Bei Anordnungen mit niedriger Oberflächenpermittivität konnten bei großen Spaltabständen oberhalb der Grenzspaltweite für die homogene Typ-2-Entladung in einem engen Bereich um die Anfangsspannung manchmal Stromverläufe wie bei Typ-1-Entladungen, d.h. mit einmaligem Strompuls je Halbschwingung, beobachtet werden. Bild 3.12 zeigt ein solches Oszillogramm einer Entladung mit Barrieren aus 2 mm dickem Glas mit 124 µm dicker Tygaflor-Folie (Glas/Tygaflor124) mit 3,2 mm Spaltweite, 16 l/min Stickstoff und bei 7 kHz. Die Gesamtspannung (Peak-Peak) beträgt 31,6 kV. Je Halbschwingung tritt zunächst ein einmaliger, steiler und kurzer Strompuls auf, zu einem späteren Zeitpunkt gefolgt von dem für homogene Typ-2-Entladungen charakteristischen stetigen Stromverlauf.



Bild 3.12 Oszillogramme der Typ-1-ähnlichen Entladung bei 7 kHz

Tabelle 3.7 zeigt die Versuchsbedingungen, bei denen solche Typ-1-ähnlichen Oszillogramme beobachtet wurde.

Barriere (u.o. Kontaktschicht)	Spaltweite mm	U (p-p) kV	Gas
124µm Tygaflor auf Glas	3,2	31,6	16 l/min N ₂
76μm Tygaflor auf Glas	3,2	32	16 l/min N ₂
120µm Teflon auf Glas	4	26	Luft
100µm Mylar auf Glas	3,8	30	Luft

Tabelle 3.7 Existenz Typ-1-ähnlicher Entladungen im kHz-Bereich

Allerdings entsprechen die optischen Erscheinungen im Gasspalt (mit bloßem Auge gesehen) nicht denen einer homogenen Typ-1-Entladung bei 50 Hz, vielmehr existieren viele kleine Filamente wie bei der normalen filamentierten Barrierenentladung. Diese vom Stromverlauf Typ-1-ähnliche Entladungsform im kHz-Bereich wurde in dieser Arbeit nicht intensiver untersucht.

3.5 Zusammenfassung der Entladungsformen und der Einflüsse der Kontaktschichten

In Tabelle 3.8 sind die Entladungsformen bei verschiedenen Frequenzen und Barrieren/Kontaktschichten zusammenfasst.

Tabelle 3.8 Entladungsformen bei verschiedener Frequenz und Barrieren/Kontaktschichten

Frequenz	Entladungsformen mit zunehmender Spannung	Barrieren/Kontaktschichten
50 Hz	Typ 2 ab Anfangsspannung, bis zur Generatorgrenze 40 kV.	Al ₂ O ₃ -Barriere + Carbolloid-Kontakt
	Typ 2 ab Anfangsspannung, dann kombinierte Typ 2/Typ 1, bis zur Generatorgrenze 40 kV:	Al ₂ O ₃ -Barriere + Gitter/Graphit1.5/Graphitspray- Kontakt
	Typ 1, aber teils geringe Stabilität, ab Anfangsspannung, Übergang zur Filamentierung	Al ₂ O ₃ -Barriere + Leitsilber Mylar auf Glas-Barriere + Leitsilber (Bild 1.4) Teflon-Barriere + Gitter-Kontakt (Bild 1.5) Mylar-Barriere + Gitter-Kontakt ([Tepper 02])
	Typ 2 ab Anfangsspannung, Übergang zur Filamentierung	Fast alle Anordnungen
7 kHz	Knapp oberhalb Anfangsspannung Typ-1- ähnlicher Stromverlauf, aber filamentiert	Barrieren mit geringer Oberflächenpermittivität, große Spaltweiten > 3 mm

Zum Schluss enthält Tabelle 3.9 eine Übersicht der Einflüsse durch den Einsatz von Kontaktschichten im Vergleich zur direkten Kontaktierung.

Entladung	Ohne Kontaktschicht	Mit Kontaktschicht
Typ 2	 Homogene Typ-2-Entladung wurde nur im kHz-Bereich in N₂ beobachtet. Spannungs- und Spaltweitenexistenzbereiche sind sehr ausgeprägt. In ruhender Luft existiert diese homogene Entladung nicht. 	 Kein deutlicher Einfluss durch die Kontaktschichten auf die Homogenität der Typ-2-Entladung im kHz-Bereich. Mit Kontaktschichten homogene Typ-2-Entladung bei 50 Hz. Diese Entladung beginnt bei der Anfangsspannung, existiert bis zu einer Grenzspannung, bei welcher kombinierte Typ-2/Typ-1- Entladung auftritt. Spaltweitenexistenzbereich dieser 50 Hz-Entladung beträgt mindestens 4 mm. (Größere Spaltweiten nicht untersucht) Kein Unterschied zwischen N₂ und ruhender Luft bei Typ-2-Entladung bei 50 Hz.
Typ 1, sowie kombinierte Typ 2/Typ 1	 Bei Keramik-Barrieren und Leitsilber-Elektroden ohne Kontaktschichten Typ-1- Entladung bei 50 Hz nur in N₂ mit niedriger Stabilitätszahl. In Luft ist die Stabilitätszahl der Typ-1-Entladung null. 	 Mit Keramik-Barrieren und Kontaktschichten kann kombinierte Typ-2/Typ-1-Entladung bei 50 Hz in Luft und in N₂ existieren. Stabilitätszahl des Typ-1-Anteils kann 100 % betragen. Unter speziellen Bedingungen bei kHz in engem Bereich Oszillogramme ähnlich Typ 1, Entladung ist jedoch filamentiert.

Tabelle 3.9 Einflüsse von Kontaktschichten auf die Barrierenentladungshomogenität

4 Leistungsanalyse

Die umgesetzten Leistungen und Energien (Arbeit) aus Barrierenentladungen sind die wichtigsten Gesichtspunkte für industrielle Anwendungen. Geringere Leistung bedeutet weniger Behandlungseffekt bei den Plasmenprozessen.

Es ist schon aus früheren Untersuchungen bekannt, dass die umgesetzte Leistung aus einer homogenen Typ-2-Barrierenentladung meistens niedriger als die aus einer filamentierten Barrierenentladung ist. Ursache dafür ist, dass homogene Entladungen bei Steigerung der Spannung und damit der Leistungszufuhr in einen filamentierten Zustand übergehen, dessen Leistung dann natürlich höher ist. Trotzdem ist es sinnvoll, für homogene Barrierenentladungen unterschiedlicher Formen eine Leistungs- bzw. Energieanalyse durchzuführen.

Um vergleichbare Ergebnisse aus den Untersuchungen zu bekommen, wurde bei allen Versuchen die gleiche wirksame Entladungsfläche beibehalten (Durchmesser 50 mm, Fläche 20 cm²).

4.1 Leistung der Typ-1- bzw. kombinierten Typ-2/Typ-1-Entladung

4.1.1 Leistungsauswertung aus Lissajous-Figur

Um die umgesetzte Leistung in der Entladung zu erfassen, müssen normalerweise – Verlustfreiheit des Dielektrikums vorausgesetzt - die zeitlichen Verläufe von Spannung und Strom über der Gesamtanordnung gespeichert werden, wie im Zusammenhang mit der Analyse der Typ-2-Entladung mit langer Stromdauer beschrieben (siehe Abschnitt 4.2). Bei einer Typ-1-Entladung ist aber eine direkte und genaue digitale Strommessung wegen der Kombination von langer Schwingungsdauer (20 Millisekunden) und der kurzzeitigen Stromspitzen (Nanosekunden) problematisch. Auch kann der niedrige kapazitive Stromanteil (<1 mA) gegenüber den Impulsströmen im Ampere-Bereich nicht mehr aufgelöst werden. Deshalb wird eine Ladungsmessung statt der Strommessung für die Auswertung der Leistung bzw. Energie für eine Typ-1-Entladung verwendet, wobei die Ladung direkt als Spannungssignal an einer Integrationskapazität abgegriffen wird (analoge Integration), siehe Kapitel 2.

Nach [Tepper 02, Stockwald 91] kann die in einer Entladungsschwingung umgesetzte Energie nach Gleichung (4.1) berechnet werden:

$$W_{el} = \int_{q(t=0)}^{q(t=T)} u \cdot dq \tag{4.1}$$

Hierbei sind

u - die Spannung zwischen den beiden Elektroden.

q - die transportierte Ladung in der Reihenschaltung aus Barrieren und Gasspalt.

Als Ladungs-Spannungs-Diagramm dargestellt ergibt sich eine Schleife (Lissajous-Figur), wobei die von der Schleife umrandete Fläche genau die Energie nach Gleichung (4.1) ist. Eine Erklärung zur der Lissajous-Figur für eine "reine" homogene Typ-2- oder Typ-1-Entladung wurde schon in Kapitel 1, Bilder 1.4 bis 1.6, gegeben. Bild 3.3(b) zeigt ein Beispiel für eine kombinierte Typ-2/Typ-1-Entladung.

Über die mathematische Software MATLAB wurde der Flächeninhalt der Lissajous-Figuren ausgewertet. Er entspricht der elektrischen Energie W_{el} in einer Periode. Zum Vergleich verschiedener Varianten soll die mittlere umgesetzte Leistung pro Flächeneinheit P_A in dem effektiven Entladungsbereich verwendet werden, Gl. 4.2.

$$P_A = \frac{W_{el}}{T \cdot A} \tag{4.2}$$

Hier bedeuten

T: Dauer einer Entladungsschwingung,

A: Fläche des wirksamen Entladungsbereichs

4.1.3 Leistungsvergleich verschiedener Varianten

Tabelle 4.1 zeigt die Leistungsauswertung an einer typischen Lissajous-Figur je Bedingung bei 50 Hz. Bei diesen Untersuchungen existiert im Gasspalt entweder eine homogene Typ-1-Entladung oder eine Kombination von Typ-2- und Typ-1-Entladung. Die Spaltweite betrug in allen Fällen 4 mm.

Variante (Barriere/Kontaktschicht)	Gas	U (p-p) kV	P W/cm ²	P/UmA/cm ²
Leitsilber	16 l/min N ₂	31,2	0,057	1,83E-03
Leitsilber	16 l/min N ₂	32,4	0,047	1,45E-03
Leitsilber	16 l/min N ₂	32,8	0,065	1,98E-03
Graphitspray	16 l/min N ₂	36,8	0,100	2,72E-03
Graphitspray	Luft	34,0	0,064	1,88E-03
Gitter	16 l/min N ₂	36,0	0,108	3,00E-03
Gitter	Luft	34,8	0,041	1,18E-03
Graphit1,5	16 l/min N ₂	38,0	0,132	3,47E-03
Graphit1,5	Luft	38,0	0,115	3,03E-03
Teflon/Gitter	16 l/min N ₂	23,6	0,002	8,47E-05
Teflon/Gitter	Luft	20,8	0,001	4,81E-05

Tabelle 4.1 Leistungsauswertungen homogener Typ-1-Entladung oder kombinierter Typ-2/Typ-1-Entladung bei 50 Hz und 4 mm Spaltweite

Die Variante "Teflon/Gitter" bedeutet eine Anordnung mit Barrieren aus 0,5 mm dicken Teflonplatten mit Kontaktierung durch Gitter (Mesh #325). Die anderen Varianten entsprechen den Definitionen in Tabelle 3.5, besitzen also Barrieren aus 1 mm Al_2O_3 -Keramik. In Tabelle 4.1 sind in der letzten Spalte auch die Verhältnisse Leistungsdichte zu Spannung (=Stromdichte) aufgeführt. Zu beachten ist dabei, dass es sich bei der Definition der Spannung als Spitze-Spitze-Wert bei der Stromdichte in der letzten Spalte dann ebenfalls um Spitze-Spitze-Werte handelt. Bild 4.1 zeigt eine grafische Darstellung.



Bild 4.1 Leistungsvergleich homogener Typ-1-Entladungen oder der Kombination von homogenen Typ-2- und Typ-1-Entladungen bei 50 Hz und 4 mm Spaltweite

Aus den in Tabelle 4.1 und im Bild 4.1 gezeigten Informationen können folgende Ergebnisse für die Leistungsanalyse der homogenen Typ-1-Entladungen bzw. Kombinationen von Typ-1und Typ-2-Entladung bei 50 Hz zusammengefasst werden:

- Die homogene Typ-1-Entladung besitzt in Stickstoff höhere Leistung als in Luft.
- Im Stickstoff besitzt die homogene Entladung mit Keramik-Barrieren und ohmschen Kontaktschichten mehr Leistung als bei bloßen Keramik-Barrieren mit Leitsilber-Kontaktierung.
- Mit 1,5 mm dicker Graphitschicht ist die Leistungserhöhung noch deutlicher als mit dünnen Widerstandsschichten aus Graphitspray oder Gitter.
- Aus dem Vergleich bei Entladungen mit bloßen Keramik-Barrieren wurde keine direkte Beziehung zwischen Leistung und Spannung beobachtet.
- Bei der Teflon/Gitter-Variante ist die Entladungsleistung sehr niedrig.

4.2 Leistung der Typ-2-Entladung

4.2.1 Auswertung

Da die Entladungsströme bei Typ-2-Entladungen längere Dauer besitzen, ist die Auswertung der Wirkleistungen bei dieser Entladungsform einfacher. Wenn der Stromverlauf der Typ-2-Entladung durch einen ohmschen Shunt erfasst wird, kann die umgesetzte Leistung während einer Schwingung durch Integrieren des Produkts aus Spannung und Strom ausgerechnet werden, Gleichung 4.2.

$$P = \frac{1}{T} \int_{t=0}^{t=T} u \cdot idt \tag{4.2}$$

Hier sind

u die Spannung zwischen den Elektroden;

i der gemessene Strom durch den Shunt.

Der Entladungsanteil im Stromverlauf bei homogener Typ-2-Entladung ist von einem deutlich erkennbaren kapazitiven Anteil (Grundschwingung) überlagert. Nur der Stromanteil aus der Entladung ergibt die umgesetzte Leistung (Wirkleistung).

Da homogene Typ-2-Entladungen sowohl bei 50 Hz als auch im kHz-Bereich auftreten, wurden die Leistungsanalysen für beide Frequenzbereiche durchgeführt.

4.2.2 Typ-2-Entladung bei 50 Hz

Tabelle 4.2 zeigt die Leistungsauswertungen aus den Anordnungen mit Keramikbarrieren und Carbolloid-Kontaktschichten (Carbolloid100 oder Carbolloid300, siehe Tabelle 3.1), die durch ihren breiten Homogenitätsexistenzbereich der Typ-2-Entladung bei 50 Hz gekennzeichnet sind. Die Leistungsanalyse der Typ-2-Entladung bei 50 Hz wurde mit einigen Luft Versuchen in bei 2 mm oder 4 mm Spaltweite durchgeführt. Die Versorgungsspannungen U (Peak-Peak) bzw. die Anfangsspannungen U_{anf} sind in Tabelle 4.2 ebenfalls aufgeführt.

Spaltweite mm	Kontaktschicht	U _{anf} (p-p) kV	U (p-p) kV	P W/cm ²	$\frac{P/(U-U_{anf})}{\text{mA/cm}^2}$
2	Carbolloid300	18	36,4	0,0712	0,0039
	Carbolloid100	16	38,8	0,0799	0,0035
			41,2	0,0894	0,0035
4	Carbolloid300	30	31,2	0,0117	0,0098
			34,8	0,0388	0,0081
			39,6	0,0712	0,0074
	Carbolloid100	28,8	42,4	0,0908	0,0067

Tabelle 4.2 Leistungsauswertungen der homogenen Typ-2-Entladungen in Luft bei 50 Hz; Barrieren 1 mm Al₂O₃

Eine grafische Übersicht des Einflusses aller Versuchsparameter auf der Entladungsleistung *P* zeigt Bild 4.2.



Bild 4.2 Leistungsvergleich der homogenen Typ-2-Entladung bei 50 Hz
Es ist deutlich zu sehen, dass bei zunehmender Spannung die Entladungsleistung steigt. Um eine bessere Beurteilung des Spaltweiteneinflusses auf die Entladungsleistung zu ermöglichen, ist in Bild 4.3 anstatt der Leistung P das Verhältnis der Leistung zur Differenz zwischen Versorgungsspannung und Anfangsspannung $P/(U-U_{anf})$ aufgetragen.



Bild 4.3 Verhältnis der Leistung zur Spannungsdifferenz der homogenen Typ-2-Entladung bei 50 Hz

Bei einer bestimmten Spaltweite ändert sich $P/(U-U_{anf})$ nicht stark, wenn die Spannung und die Kontaktschicht-Dicke variiert werden. Je größer die Spaltweite bei der Entladungsanordnung ist, desto größere Werte von $P/(U-U_{anf})$ ergeben sich. Etwas überraschend ist die moderate Abnahme der bezogenen Leistung mit der Spannung bei 4 mm Spaltweite.

4.2.3 Typ-2-Entladung bei 7 kHz

Bei einem typischen Versuch mit homogenen Typ-2-Entladungen wurde zuerst der wichtige Einfluss der Versorgungsspannung auf die Entladungsleistung zusammenfasst. Diese Versuche wurden in einer Anordnung mit Barrieren aus 1 mm Al₂O₃, 1 mm Spaltweite, 16 l/min N₂, und bei 7 kHz gemacht, wobei die Anfangsspannung U_{anf} (Gesamtspannung, PeakPeak) der Entladung 13,2 kV beträgt. Mit zunehmender Spannung wurde eine annähernd lineare Beziehung zwischen der Entladungsleistung P und der Differenz der Versorgungsspannung zur Anfangsspannung $U-U_{anf}$ gefunden, wie Bild 4.4 zeigt.



Bild 4.4 Einfluss der Spannungsdifferenz auf die Leistung der homogenen Typ-2-Entladung



Bild 4.5 Verhältnis $P/(U-U_{anf})$ bei unterschiedlichen Barrierenvarianten und Spaltweiten der homogenen Typ-2-Entladung in Stickstoff bei 7 kHz

Weiter wurde der Einfluss der Spaltweite und der Barrieren-Kapazität auf die Entladungsleistung bei homogenen Typ-2-Entladungen analysiert. Hierzu wurden vier Varianten von Grund-Barriere und Oberflächen-Barriere ausgewählt: Glas/Mylar100, Al₂O₃/Silikonkautschuk, Al₂O₃/Teflonspray, und Al₂O₃ (siehe Tabelle 3.5). Die Untersuchungen wurden bei 7 kHz und mit 16 l/min Stickstoff durchgeführt, die Spaltweiten innerhalb des Bereichs homogener Typ-2-Entladungen variiert. Die Kapazität der Barrieren C_b sind in Bild 4.5 ebenfalls als Parameter angegeben.

Neben der vorherigen Aussage, dass die Leistung bei homogener Typ-2-Entladung bei zunehmender Spannung linear erhöht wird, werden aus Bild 4.5 noch folgende Ergebnisse für Leistungseigenschaften der homogenen Typ-2-Entladung bei 7 kHz zusammenfasst:

- Bei jeder Barrierenvariante ist das Verhältnis *P*/(*U*-*U*_{anf}) proportional zur Spaltweite, wobei die Tendenzlinien bei verschiedenen Barrierenvarianten unterschiedliche Steigungen besitzen. Dieses Verhalten ist ein Hinweis darauf, dass diese Entladungen Eigenschaften besitzen, die über die Spaltlänge annähernd homogen verteilt sind.
- Die Materialeigenschaft der Barrierenoberfläche, die Permittivität, besitzt auch einen deutlichen Einfluss auf die Steigung der Tendenzlinie. Zum Verglich dienen die Varianten Al₂O₃ und Al₂O₃/Teflonspray, wobei die Barrierenkapazitäten fast gleich sind, aber zwei deutlich verschiedene Steigungen der entsprechenden Tendenzlinie vorliegen. Je niedriger die Permittivität der Barrierenoberfläche ist, desto niedrigerer ist die Entladungs-Leistung.
- Die Steigung der Tendenzlinie hängt auch von der Barrierenkapazität ab. Je größer die Barrierenkapazität ist, desto höher ist die in die Entladung eingekoppelte Leistung, da die den Entladungsstrom bestimmende Barrierenimpedanz niedriger ist; siehe auch Abschnitt 6.1.1, Gleichung 6.4.

4.3 Messung der Stromaufteilung durch getrennte Elektrodenflächen

Zur Untersuchung der Gleichmäßigkeit der Stromverteilung über die Fläche wurde bei einigen Untersuchungen auf der geerdeten Barrierenseite eine Teilfläche von einigen mm² isoliert ausgeführt und der darüber fließende Strom getrennt erfaßt. Eine schematische Darstellung dieser Messung ist in Bild 4.6 gezeigt.



Bild 4.6 Schema zur Messung der lokalen Stromaufteilung

Sowohl in der Kontaktschicht als auch in der Leitsilberelektrode (bei Graphitspray-Kontakt) wurde durch einen schmalen ringförmigen Graben ein kreisförmiger Bereich von 7 mm² isoliert und bildet die innere Teilfläche, während der äußere Ring den Rest der Gesamtfläche von ca. 20 cm² ausmacht. Das Verhältnis von Gesamt- zu Teilfläche beträgt somit ca. 280.

Die Strommessungen beider Bereiche wurden durch getrennte Shunts mit 100 Ω für den inneren Bereich und 1 Ω für den äußeren Bereich erfasst, siehe auch Kapitel 2.

Die Strommessungen durch getrennte Elektrodenflächen wurden bei Versuchen mit 50 Hz durchgeführt, bei welchen sowohl homogene Typ-2-Entladungen als auch nachfolgende homogene Typ-1-Entladungen auftraten, siehe Abschnitt 3.2.2.

Bild 4.7 zeigt die Stromverläufe beider Bereiche aus diesen Versuchen. Die weiteren Bedingungen waren folgendermaßen: 1 mm dicke Al_2O_3 Barrieren, ohmsche Kontaktschicht Graphitspray (ca. 15 µm Dicke), Messing-Elektrode, 4 mm Spaltweite, Luft. Der dem kapazitiven Grundverlauf überlagerte Entladungsanteil (Stromanstieg zu den Zeitpunkten 1 ms, 11 ms und 21 ms) beträgt beim inneren Bereich ca. 0,4 bis 0,5 µA, und beim äußeren ca. 120 µA, also ein Verhältnis von ca. 240 bis 300. Unter Berücksichtigung der Ungenauigkeit der Flächenermittlung und der Strommessung entspricht dies recht gut dem Flächenverhältnis und ist ein Indiz für eine homogene Verteilung der Typ-2-Entladung über die Fläche.



Bild 4.7 Strommessungen durch getrennte Elektrodenflächen bei einer homogener Typ-2-Entladung bei 50 Hz

Bei dieser Messung fällt auf, dass die Verteilung der kapazitiven Grundanteile beider Ströme (innen mit Amplitude ca. 2 μ A; außen mit Amplitude ca. 30 μ A) mit einem Verhältnis von 1:15 stark vom Flächenverhältnis abweicht. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Teilkapazitäten zwischen der Hochspannungselektrode und der kleinen Erdelektrode (1) einerseits, sowie der Hochspannungselektrode und der Haupt-Erdelektrode (2) andererseits, welche die kapazitive Stromaufteilung bestimmen, nicht nur von den beiden Flächen, sondern von der gesamten Reaktorgeometrie abhängen.

Diese Aussage wurde durch eine 2-D rotationssymmetrische Simulation mit dem FEM-Softwarepaket ANSYS nachgewiesen. ANSYS kann eine Matrix der Teilkapazitäten der Elektroden ("Ground Capacitance Matrix") mit Hilfe eines Macros CMATRIX erstellen. Hierzu werden aus den numerisch berechneten elektrostatischen Feldern (siehe Bild 4.8) die Quotienten zwischen dielektrischen Verschiebungsflüssen und Spannungen ermittelt. Das Ergebnis aus dieser Simulation ergibt ein Kapazitätsverhältnis von ca. 14, was mit der Messung ziemlich gut übereinstimmt.



Bild 4.8 Simulation des elektrostatischen Feldes und der Kapazitäten bei getrennten Elektrodenflächen 1 (Mitte) und 2 (äußerer Ring)

Die Strommessung durch getrennten Elektrodenflächen für eine homogene Typ-1-Entladung (kombinierte Typ-2/Typ-1-Entladung) bei 50 Hz wurde unter den prinzipiell gleichen Bedingungen wie bei der oben gezeigten Typ-2-Entladung durchgeführt. Im Unterschied dazu wurde die Spannung noch erhöht, um auch Typ-1-Entladungsanteile zu erhalten. Weiterhin wurde Stickstoff als Arbeitsgas verwendet. Bild 4.9 zeigt in zeitlich hoher Auflösung (Typ-1-Entladungsphase) die Stromverläufe beider Bereiche.



Bild 4.9 Strommessungen durch getrennten Elektrodenflächen bei einer homogenen Typ-1-Entladung bei 50 Hz

Der Stromanteil des inneren Bereichs weist eine Amplitude von ca. 0,1 A auf, der des äußeren ca. 7 A, also ein Verhältnis von ca. 1:70, das deutlich vom Flächenverhältnis abweicht.

Es ist sichtbar, dass die Impulsantwort für die Messung des Gesamtstromes auf Grund des gesamten Messaufbaus mit einer Resonanzfrequenz von ca. 5 MHz (= Periodendauer 0,2 µs) behaftet ist. Hochfrequentere Signale oberhalb der Resonanzfrequenz werden dabei stark abgeschwächt übertragen, weshalb ein direkter Vergleich der Stromscheitel nur begrenzt aussagefähig ist. Auch bei Verfälschung eines steilen Sprungsignals durch Resonanz wird das Integral über das Signal und damit die Strom-Zeit-Fläche noch richtig wiedergegeben. Durch numerische Integration des Stroms über der Zeit wurden deshalb die Ladungssprünge für beide Bereiche ermittelt, siehe Bild 4.10. Ihr Verhältnis beträgt 160 und liegt immer noch deutlich unter dem Flächenverhältnis von 280. Umgerechnet bedeutet dies, dass die Stromdichte im Zentrum etwa das 1,75-fache der mittleren Stromdichte beträgt, die Entladung also eine vom Rand zur Mitte hin zunehmende Intensität aufweist. In diesem Zusammenhang sei auch auf Kapitel 5.1, Hochgeschwindigkeitsaufnahmen, verwiesen.



Bild 4.10 Ladungsverläufe aus der Stromintegration bei getrennten Elektrodenflächen bei einer homogenen Typ-1-Entladung bei 50 Hz

5 Optische Messungen und Spektralanalyse

5.1 Aufnahmen mit der Hochgeschwindigkeitskamera

Mit einer Hochgeschwindigkeitskamera können optische Aufnahmen der Entladungen erfasst werden, um mehr Informationen über den Entwicklungsprozess der Entladung oder die Homogenität zu bekommen. In dieser Arbeit wurden "Side-On" Aufnahmen bei den verschiedenen homogenen Entladungsformen mit unterschiedenen Belichtungszeiten durchgeführt.

Durch die Hochgeschwindigkeitskamera (IMACON 486) können vier voneinander zeitlich unabhängige Kurzzeitaufnahmen mit einer minimalen Belichtungszeit von 10 ns aufgenommen werden. Die Aufnahmefenster können im Oszillogramm dargestellt werden und somit zeitlich den erfassten elektrischen Größen zugeordnet werden.

5.1.1 Typ-1-Entladung bei 50 Hz

Bild 5.1 zeigt die "Side-On" Leuchterscheinungen einer homogenen Typ-1-Entladung bei 50 Hz, die entsprechenden Spannungs- und Stromverläufe sowie die Belichtungsfenster. Der Versuch wurde bei einer Anordnung mit 1 mm Al₂O₃ Barrieren und Graphitspray-Kontaktschichten, 4 mm Gasspalt und 16 l/min Stickstoff durchgeführt. Die Spannung betrug 36,8 kV (Peak-Peak). Die Aufnahmen wurden mit je 100 ns Belichtungszeit und 50 ns Pausenzeit durchgeführt.

Von der Initialphase (1. Phase im Bild 5.1) bis zur hellsten Phase (2. Phase im Bild 5.1) vergehen ca. 100 ns. Ab der dritten Phase ist die Helligkeit der Entladung bereits geringer, in der vierten Phase ist die Entladung praktisch verloschen. Die Bilder geben einen anschaulichen Eindruck von der Homogenität. Die über den gesamten Beobachtungszeitraum diffuse Entladung ist zu Beginn zunächst auf einen Bereich in der Mitte konzentriert und weitet sich dann über die Fläche aus. Eine weitere wichtige Aussage dieser Aufnahmen ist, dass die Leuchterscheinung, im Gegensatz zu den nachstehend beschriebenen Typ-2-

Entladungen, den Spalt zwischen Anode und Kathode gleichmäßig ausfüllt und keine Bevorzugung eines der Elektrodengebiete aufweist.



(b) Spannungs-, Stromverlauf und Belichtungsfenster

Bild 5.1 Optische Aufnahme einer homogenen Typ-1-Entladung bei 50 Hz

5.1.2 Typ-2-Entladung bei 7 kHz

Die Bilder 5.2 und 5.3 zeigen optische Aufnahmen einer homogenen Typ-2-Entladung bei 7 kHz, in denen beide Halbschwingungen der Entladung beobachtet wurden. Der Versuch wurde in einer Anordnung mit Barrieren aus 2 mm dickem Glas und Barrierenoberflächen aus Teflonspray, 2,5 mm Gasspalt, und 16 l/min Stickstoff durchgeführt. Die Belichtungszeit betrug je 10 µs mit 100 ns Pausenzeit.

Bild 5.2 entspricht der negativen Halbschwingung der Entladung, d.h. die obere, an Hochspannung liegende Elektrode ist Kathode, die untere Anode.



(a) "Side-On" Leuchterscheinungen



(b) Spannungs-, Stromverlauf und Belichtungsfenster

Bild 5.2 Optische Aufnahme der homogenen Typ-2-Entladung bei 7 kHz - Negative Halbschwingung



In Bild 5.3 ist die Polarität umgekehrt.

(a) "Side-On" Leuchterscheinungen



(b) Spannungs-, Stromverlauf und Belichtungsfenster

Bild 5.3 Optische Aufnahme der homogenen Typ-2-Entladung bei 7 kHz - Positive Halbschwingung

In beiden Bildern ist bereits im Teilbild 1, d.h. vor Beginn des Stromanstiegs, der die eigentliche Zündung der Entladung kennzeichnet, ein sehr schwaches Leuchten erkennbar. Es handelt sich noch um ein Restleuchten aus der Halbschwingung zuvor, die "out of charge"-Phase, in der nach [Massines 01] die für die Homogenität entscheidende Vorionisation erfolgt. Weiterhin ist erkennbar, dass die Leuchterscheinung bereits vom deutlicher sichtbaren Beginn an (Teilbilder 2) homogener über die Spaltbreite verteilt ist als bei der Typ-1Entladung. Dies steht in der Tendenz im Einklang mit den Messungen des Teilstroms in der Mitte im Vergleich zum Gesamtstrom, siehe Abschnitt 5.1.1. Während sich beim Typ-2-Verlauf die Anteile des Entladungsstromes in etwa entsprechend dem Flächenverhältnis aufteilten, d.h. eine homogene Stromverteilung vorliegt, ergab die Auswertung der Ladungssprünge der Typ-1-Entladung, dass die Stromdichte in der Mitte beim etwa 1,75fachen des Mittelwertes liegt. Aus den Helligkeitsprofilen der optischen Aufnahmen lassen sich auf einfachem Wege keine direkten Schlüsse auf die Stromverteilung ziehen, da bei runden Elektroden die Dicke des emittierenden Plasmas ortsabhängig ist und die optischen Eigenschaften nicht genau bekannt sind. Verglichen mit der homogenen Typ-1-Entladung wird noch ein wichtiger Unterschied deutlich, nämlich die Ortsabhängigkeit der Helligkeit längs der Spaltlänge. Stets ist das Leuchten an der Anode deutlich heller als an der Kathode. Dieses Verhalten entspricht den Ergebnissen von Simulationen und optischen Aufnahmen in [Massines 01]. Es wird dort damit erklärt, dass diese Typ-2-Entladung im kHz-Bereich eine Townsend-Entladung ist, in der noch keine positive Raumladung, die zur Bildung einer positiven Säule führt, herrscht.

5.2 Spektralanalyse der Typ-2-Entladung im kHz-Bereich

Homogene Barrierenentladungen können nur unter bestimmten Bedingungen erzeugt werden. Bei der homogenen Typ-2-Entladung bei 7 kHz ist ein größerer Stickstoff-Gasfluss notwendig. Wie in Abschnitt 3.3.1 gezeigt, kann die Homogenität der Entladung zerstört werden, d.h. sie filamentiert, wenn geringe Luftmengen in den Entladungsbereiche eindiffundieren.

Das Ziel dieses Abschnitts ist es, durch Emissionsspektroskopie Anhaltspunkte für Unterschiede in der Spezies zwischen homogener und filamentierter Entladung zu erhalten. Um die Spektrallinien zu erfassen, wurde die Versuchsapparatur in eine Dunkelkammer gebracht. Das optische Emissionssignal aus der "Side-On" Beobachtung des Entladungsbereichs wurden in den Eingang des Monochromators geführt, an dessen Ausgang das Spektrum mit Hilfe der CCD-Hochgeschwindigkeitskamera IMACON 486 aufgezeichnet und über PC mit der Software MATLAB dargestellt wird. Durch Triggerung der Kamera kann der Zeitpunkt der Aufnahme des Spektrums gewählt werden.

Die Untersuchungen wurden bei einer Barrierenanordnung mit 1 mm dicker Al₂O₃ Barriere, 1 mm Spaltweite und bei 7 kHz durchgeführt. Die Spannung betrug 30 kV (Peak-Peak). Die Untersuchungen wurden bei "offenem Gasausgang" (gegenüber der sonst verwendeten Variante "abgeschlossener Reaktor", siehe Kapital 3.4) durchgeführt. Um verschiedene Entladungsformen zu bekommen, wurden folgende Varianten von Gasart und Gasfluss verwendet:

- 1. mit 16 l/min Stickstoff
- 2. mit 1 l/min Stickstoff
- 3. in ruhender Luft

Aus den elektrischen Messungen war bekannt, dass nur bei der ersten Versuchsvariante eine "reine" homogene Typ-2-Entladung existiert.

Zum Spektralvergleich sind in Bild 5.4 die bekannten Atomspektrallinien des Stickstoffes und des Sauerstoffes im Wellenlängenbereich 320-380 nm dargestellt [NIST].



Bild 5.4 Bekannte Spektrallinien des Stickstoffes und des Sauerstoffes [NIST]

Der Zeitpunkt der Spektralaufnahmen konzentriert sich auf die sogenannte "out of charge"-Phase [Massines 01] der Entladung, d.h. kurz vor ihrer erneuten Zündung (Zeitpunkt etwa wie Teilbilder 1 in Bild 5.2 und 5.3. Nach [Massines 01] geschieht der für die Homogenität wichtige Vorionisierungsprozess in dieser Phase.

Bild 5.5 zeigt die mit 25 µs Belichtungszeit erfassten Spektren.





Bei der homogenen Entladungsvariante mit 16 l/min Stickstoff (Bild 5.5(a)) überragen deutlich die Linien 374,8 nm und 375,5 nm des Stickstoffspektrums von Bild 5.4. Wenn der Stickstoff-Gasfluss auf 1 l/min verringert wird, wechselt die Entladungsform zu einer filamentierten Entladung. Das Spektrum Bild 5.5(b) zeigt zahlreiche Sauerstofflinien, während die Stickstoff-Linien von Bild 5.5(a) kaum mehr zu sehen sind. Bild 5.5(c) für filamentierte Entladungen in ruhender Luft zeigt ziemlich andere Spektrallinien, die nicht auf einfache Art interpretiert werden können.

Nach den bisherigen Versuchsergebnissen existiert sowohl in Stickstoff auch in Luft eine homogene Typ-2-Entladung, wenn die Spannungerregung eine Frequenz von 50 Hz besitzt. Es wird vermutet, dass dann ein anderer Mechanismus die Homogenität dieser Entladung beherrscht.

6 Simulation^{*}

6.1 Typ-2-Entladung

6.1.1 Einleitung

Um die elektrischen Eigenschaften der homogenen Typ-2-Entladung zu beschreiben, sind die Verläufe der Spaltspannung und des durch den Gasspalt fließenden Entladungsstroms wichtige Parameter, welche das Verhalten des Entladungsraums während der Entladungszeit kennzeichnen. Ziel der nachfolgenden Betrachtungen und Rechnungen ist es, die Abläufe nachzubilden und die Entladungen durch vereinfachte Kenndaten zu charakterisieren.

In einer Barrierenentladung sind sowohl die Spaltspannung als auch der Strom einer direkten Messung unzugänglich, jedoch können die Verläufe unter der Annahme von Homogenität über die Barrierenfläche bei bekannter Ersatzschaltung zurückgerechnet werden.

Wenn die Entladung noch nicht gezündet hat, können die Barrierenschichten und der Gasspalt als reine Kapazitätskomponenten behandelt werden. C_{gesamt} ist die Kapazität der Reihenschaltung aus gesamten Barrierenkapazitäten C_b und Gasspaltkapazität C_g . Es gilt für den gesamten Strom über die Barrierenanordnung:

$$i(t) = C_{gesamt} \cdot \frac{du(t)}{dt}$$
(6.1)

mit

$$u(t) = \hat{U} \cdot \sin(\omega t) \tag{6.2}$$

$$\frac{1}{C_{gesamt}} = \frac{1}{C_b} + \frac{1}{C_g}$$
(6.3)

u(t) ist die gesamte Spannung zwischen den Elektroden, wird direkt gemessen.

i(*t*) ist der gesamte Strom über die Barrierenanordnung, wird durch Shunt gemessen.

^{*} Die Simulationen in diesem Kapitel wurden von M. Lindmayer durchgeführt.

Gleichung (6.1) gilt nicht mehr, wenn ein Stromanteil entsprechend der Entladung existiert und dann der Gasspalt nicht als eine rein kapazitive Komponente behandelt werden darf. Es gilt dann Gleichung (6.4) für den Gesamtstrom über die Barrierenanordnung:

$$i(t) = C_b \cdot \frac{d}{dt} [u(t) - u_g(t)]$$
 (6.4)

 $u_g(t)$ ist die Spaltspannung.

Aus der gemessenen Gesamtspannung u(t) und dem Gesamtstrom i(t) kann bei bekannter Kapazität der Barrierenschichten C_b (zwei Barrieren in Reihe, aus Messung oder mit Hilfe der Plattenkondensator-Formel berechnet) die Spaltspannung durch folgende Gleichung ausgerechnet werden:

$$u_g(t) = u(t) - \frac{1}{C_b} \int i dt + const$$
(6.5)

Die Konstante der Gleichung (6.5) wird so gewählt, dass die Amplitude der Spaltspannung symmetrisch zur Nulllinie verläuft, vorausgesetzt die Flächen in beiden Polaritäten der Entladung sind gleich. Bei einer symmetrischen Doppelbarrieren-Anordnung ist dies der Fall.

Der experimentell gemessene Gesamtstrom i(t) setzt sich aus dem kapazitiven Verschiebungsstrom und dem Entladungsstrom $i_g(t)$ zusammen. Nach dem vereinfachten Ersatzschaltbild der Barrierenanordnung [Tepper 02] wird für die Berechnung des Entladungsstromes $i_g(t)$ die folgende Gleichung verwendet:

$$i_g(t) = i(t) \cdot \left(1 + \frac{C_g}{C_b}\right) - C_g \cdot \frac{du(t)}{dt}$$
(6.6)

Außer den Spannungs- und Stromverläufen kann noch eine Lissajous-Figur (Spannungs-Ladungs-Kennlinie) zur Charakterisierung der Entladung dienen. Die Ladung kann durch numerische Integration des Stroms oder direkt durch Messung an einem Integrationskondensator (siehe Abschnitt 2) erfasst werden:

$$q(t) = \int i(t)dt + const \tag{6.7}$$

Die Konstante der Gleichung (6.7) wird ebenfalls so gewählt, dass die Ladung symmetrisch zur Nullinie verläuft.

Die Ladungs-Gesamtspannungs-Schleife einer typischen homogenen Typ-2-Entladung (siehe Bild 1.6) zeigt deutlich zwei verschiedenen Geraden, die den kapazitiven Strom vor der Zündung und den Gesamtstrom während der Entladung repräsentieren. Insbesondere ist die Ladung proportional zur Gesamtspannung, wenn die Entladung noch nicht gezündet hat.

$$q(t) = C_{gesamt} \cdot u(t) + const$$
(6.8)

Diese Gleichung bedeutet einen Geraden-Abschnitt mit konstanter, geringerer Steigung in der Lissajous-Figur, welche den kapazitiven Stromverlauf repräsentiert. Die Steigung der q-u-Kennlinie entspricht damit der Kapazität C_{gesamt} .

Während der Entladung ergibt sich für die Ladung aus der Integration von Gleichung (6.4)

$$q(t) = C_b \cdot [u(t) - u_g(t)] + const$$
(6.9)

Unter der Vereinfachung, dass die "Brennspannung" der Entladung u_g konstant ist, ergibt sich dafür als *q-u*-Kennlinie ebenfalls eine Gerade mit der höheren Steigung C_b .

Für die Modellierung einer nichtlinearen Koronaentladung im Gasspalt wird zunächst das übliche Koronamodell mit

$$i_{g}(t) = K \cdot [u_{g}(t) - U_{e}]^{n}$$
(6.10)

verwendet. Es bedeuten: Ue Korona-Einsetzspannung, K Konstante, n Exponent.

Ein vereinfachtes lineare Koronamodell (Korona Gleichung) lautet:

$$i_{g} = G_{c} \cdot (u_{g} - U_{e}), \quad \text{wenn } u_{g} > 0 \text{ und } u_{g} > U_{e}$$

$$i_{g} = G_{c} \cdot (u_{g} + U_{e}), \quad \text{wenn } u_{g} < 0 \text{ und } u_{g} < U_{e}$$

$$i_{g} = 0, \quad \text{wenn } |u_{g}| - |U_{e}| \le 0$$
(6.11)

 G_c , Einheit Siemens, ist ein die Entladung kennzeichnender Koeffizient ("Korona-Leitwert"), U_e die Korona-Einsetzspannung.

Solange der Betrag der Gasspaltspannung die Einsetzspannung noch nicht erreicht hat, fließt kein Entladungsstrom. Nach "Zündung" fließt ein Strom, dessen Betrag der Spannungsdifferenz zwischen momentaner Spaltspannung und Einsetzspannung proportional ist.

6.1.2 Pspice-Modell





Bild 6.1 Ersatzschaltbild des Entladungskreises bei Typ-2-Entladung

Die Spannung ist eine ideale sinusförmige Quelle mit vorgegebener Frequenz. Die gesamte Entladungsanordnung ist durch eine Reihenschaltung aus Gasspaltkapazität und den Kapazitäten der beiden Barrieren ersetzt. Die parallel zu den Kapazitäten eingesetzten Widerstände $10^{30} \Omega$ sind erforderlich, da sonst keine definierten Potentiale herrschen. Ihr Strom ist gegenüber dem kapazitiven Strom völlig vernachlässigbar.

Die gesteuerte Stromquelle ABMI1 dient zur Nachbildung der homogenen Typ-2-Entladung. Der von ihr eingeprägte Strom stellt den zum kapazitiven Anteil parallelen Entladungsstrom der Gasstrecke dar. Das Modell für die Nachbildung dieses Stromes entspricht dem Koronamodell nach der Gleichung (6.11).

Die weiter unten erläuterte Anweisung für die gesteuerte Stromquelle ABMI1 ist in einer von ABMI1 aufgerufenen Funktion strm(Spg) (im Include-File KoronaGleichung.inc) enthalten. V(a,b) entspricht der Spaltspannung $u_g(t)$. Der Koronastrom, nämlich Stromfluss bei Überschreiten von U_e bzw. kein Strom im anderen Fall, muss für beide Polaritäten gelten. Deshalb sind in der Gleichung für die Ausgangsgröße von ABMI1 mehrere IF-Bedingungen enthalten.

Die Anweisung ist folgendermaßen aufgebaut:



In der Schreibweise von Shematics lautet die komplette Gleichung für den Koronastrom: IF(spg>0,IF(spg>Ue,Gamma*(spg-Ue),0),IF(spg<0,IF(spg<-Ue,-Gamma*(-spg-Ue),0),0))

Die Bildung des Stromintegrals (Ladung) erfolgt folgendermaßen: ABM1 ist eine gesteuerte Spannungsquelle. Sie muss mit einem beliebigen Widerstand abgeschlossen werden, hier 1 k Ω . Ihre Steuergröße ist das Integral über dem Strom der Barrierenanordnung. Statt des Stroms wird die Spannung u_{cd} an R2 = 1 Ω verwendet. Sie entspricht betragsmäßig dem Strom. Die Schreibweise für das Integral lautet: SDT(V(c,d)). Die Ausgangsspannung von ABM1 (im Nanovolt-Bereich) ist damit das Integral *i*·*dt*. Über ABM2 wird in gleicher Weise nur der über R7 erfasste ohmscher Anteil des Stroms der Gasstrecke integriert.

Die Kapazitätsgrößen werden nach den tatsächlichen Werten bestimmt, die in den Experimenten ausgemessen wurden.

6.1.3 Vergleich der Messung und Simulation

Die Verläufe des aus den Messungen ermittelten Spaltstroms und der Spaltspannung zeigen zunächst, dass der Strom bei Überschreiten einer Einsetzspannung U_e , hier 4,6 kV, zu fließen beginnt, und dass er beim Wieder-Unterschreiten der selben Spannung (fast) wieder null ist. Somit ist die phänomenologische Beschreibung der Entladung durch das Korona-Modell (Gleichung 6.11) recht gut zutreffend. Aus dem Oszillogramm lässt sich, z.B. aus den gleichzeitig auftretenden Strom- und Spannungsmaxima, der Korona-Leitwert G_c abschätzen, hier 9·10⁻⁶ S. Wird dieser Wert zusammen mit U_e in der Simulation verwendet, so bestätigen die Verläufe die prinzipiell gute Übereinstimmung. Das bedeutet, dass ein Koronamodell geeignet für die Charakterisierung der homogenen Typ-2-Entladung ist.

Als Beispiel zeigt Bild 6.2 den Vergleich der Spaltspannung $u_g(t)$ bzw. des Entladungsstroms $i_g(t)$ bei einer Versuchsanordnung mit Barrieren aus 2 mm Glas mit Oberflächen aus 100 µm Mylar-Folie (Barrierenkapazität 31 pF für beide in Reihe geschalteten Barrieren), 1 mm Gasspalt, 16 l/min Stickstoff, und 22,8 kV (Peak-Peak) Spannung mit 7 kHz. Die Entladung war eine vollkommen homogene Typ-2-Entladung.



Bild 6.2 Vergleich der simulierten und gemessenen Spaltspannung und Entladungsstrom einer homogenen Typ-2-Entladung



Im Bild 6.3 ist die simulierte und gemessene Ladungs-Gesamtspannungs-Kennlinie unter denselben Konditionen wie in Bild 6.2 dargestellt. Auch hier besteht gute Übereinstimmung.

Bild 6.3 Vergleich der simulierten und gemessenen Ladungs-Gesamtspannungs-Kennlinie einer homogenen Typ-2-Entladung

Während der Brenndauer gilt $q(t) = C_b \cdot [u(t) - u_g] + const$. Nimmt man vereinfachend eine "konstante Brennspannung" u_g der Entladung an – dies trifft bei ausreichend hohem G_c zu, siehe Bild 6.3 mit Erläuterung, dann folgt daraus ebenfalls eine q-u-Gerade mit der Steigung C_b . Letztere ergibt sich aus der Reihenschaltung der Kapazitäten der beiden Barrieren. Die Steigung ist ebenso wie die Steigung nach Gleichung 6.8 für die ungezündete Gasstrecke, in Bild 6.3 eingezeichnet. Bei stromabhängiger Spaltspannung weicht die Steigung davon ab.

Mit dieser Simulation wurde auch der Einfluss des Koronaleitwertes G_c auf die Verläufe der Spaltspannung und des Gesamtstroms sowie Entladungsstroms i_g untersucht. Die Einsetzspannung U_e wurde mit 4,6 kV konstant gehalten, G_c zwischen 10⁻⁶ und 10⁻³ S variiert. Die weiteren Parameter entsprachen den vorstehenden Simulationen.



Bild 6.4 Strom- und Spannungsverläufe aus Simulationen der homogenen Typ-2-Entladung mit Korona-Modell und $G_c = 10^{-6}$ bis 10^{-3} S

Der Vergleich der Bilder 6.4 (a) bis (d) zeigt, dass sich die Höhen des Gesamtstromes und des Stromes der Gasentladung nur zwischen 5 und 15 mA verändern, wenn der Korona-Leitwert G_c um den Faktor 10³ variiert wird. Wenn die Zündspannung die Einsetzspannung U_e von 4,6 kV erreicht, fließt der Entladungsstrom. Bei $G_c = 10^{-6}$ S steigt die Spannung der Entladung ("Spaltspannung") noch deutlich erkennbar über U_e an (bis max. ca. 7 kV), bei $G_c = 10^{-5}$ S nur noch wenig, bei $G_c = 10^{-4}$ S und darüber ist sie praktisch konstant und nur sehr wenig über U_e .

6.1.4 Koronaparameter bei verschiedenen Barrieren

Wie in Kapitel 3 beschrieben sind die Homogenitätsbereiche, im Detail die maximale Spaltweite für eine homogene Typ-2-Entladung, deutlich von der Permittivität der Barrierenoberflächen abhängig. Bei Oberflächen mit niedriger Permittivität kann eine homogene Typ-2-Entladung noch bis zu größerer Spaltweite erzeugt werden. Der erste Gedanke des Einflusses der Oberflächenpermittivität auf die Homogenität ist, dass die physikalischen Eigenschaften, die das Entladungsverhalten bestimmen. vom Barrierenmaterial genauso wie seine Permittivität abhängen. Besonders könnte der Prozess der Erzeugung von Ladungsträgern an dem Interface zwischen Barrieren und Gasspalt, sei es durch Sekundäremission [Ségur 00] oder durch Desorption von Ladungen [Golubovski 02], unterschiedlich sein. In diesem Fall sollten die Eigenschaften der homogenen Typ-2-Entladung, besonders die Einsetzspannung Ue oder die Eigenschaft der Spannungs-Strom-Kennlinie, unterschiedlich sein. Dieses wurde in [Gherardi 98] beim Vergleich zwischen bloßem Aluminiumoxid und Aluminiumoxid mit Polymer-Beschichtung gefunden.

Entscheidende Einflüsse der Oberfläche des Barrierenmaterials auf die Entladung müssten sich dann in den Korona-Parametern niederschlagen. Aus diesem Grund wurden zusätzlich zu dem Ergebnis mit Glas-/Mylar noch Experimente mit weiteren Oberflächenmaterialien durchgeführt. Die Versuchsbedingungen blieben bei 1 mm Spaltweite, 16 l/min Stickstoff, Speisespannung 22,8 kV (Peak-Peak), Frequenz 7 kHz. Bild 6.5 zeigt die Messungen.



(b) Barriere aus Vitronit

Bild 6.5 Bestimmung der Koronaparameter bei verschiedenen Barrieren der homogenen Typ-2-Entladungen

Aus den Verläufen von Bild 6.2 und Bild 6.5 fasst Tabelle 6.1 die Ergebnisse zusammen.

 Tabelle 6.1 Vergleich der Parameter des Koronamodells mit verschiedenen Barrieren bei homogenen Typ-2-Entladungen.

Variante	C _b pF	<i>ɛ_r</i> Oberfläche	U_e kV	G_c S
Glas/Mylar100	31	3,0	4,6	9·10 ⁻⁶
Glas/Teflonspray	35	2,1	4,6	1.10^{-5}
Vitronit	24	5,4	4,6	9·10 ⁻⁶

Die Koronaeinsetzspannungen U_e bei allen Barrierenvarianten sind praktisch gleich. Die Koronaleitwerte G_c zeigten auch kaum Unterschiede. Das heißt, aus einer makroskopischen Analyse elektrischer Entladungsgrößen können kein deutlicher Einfluss der Oberflächenpermittivität auf die Koronaparameter geschlossen und die Permittivitäts-Homogenitäts-Beziehung nicht erklärt werden. Auf die vermutete Ursache wird im Zusammenhang mit weiteren Simulationen in Abschnitt 6.3 eingegangen.

An dieser Stelle sei noch erwähnt, dass die Auswertungen der Leistungsmessungen (Abschnitt 4.2.3, Bild 4.6) ein etwas davon abweichendes Ergebnis zeigen. Dort deutet sich an, dass bei gleicher Barrierenkapazität die umgesetzte Leistung bei Barrieren mit höherer Oberflächenpermittivität etwas höher liegt. Dies würde auch bedeuten, dass die Korona-Parameter mit der Oberflächenpermittivität im Zusammenhang stehen. Da die Leistungsmessungen sowie die Auswertung der Koronaparameter stärkeren Streuungen unterliegen, und nur eine begrenzte Anzahl von Messungen zur Verfügung stand, kann eine endgültige Aussage noch nicht gemacht werden.

6.2 Kombination der Typ-2- und Typ-1-Entladungen

Wie in Kapitel 4 darstellt, können sowohl homogene Typ-2- als auch Typ-1-Entladungen unter bestimmten Bedingungen innerhalb einer Halbschwingung der Barrierenentladung auftreten. Bild 6.6 zeigt das in PSpice aufgebautem Ersatzschaltbild für den Entladungskreis der Kombination der homogenen Typ-2- und Typ-1-Entladungen. Zur Nachbildung der stromstarken homogenen Entladung Typ 1 wird über den spannungsgesteuerten Schalter S6 der Widerstand R22 kurzzeitig parallel zur Gasstrecke geschaltet. Diese wird dann praktisch vollständig entladen. Der Schalter wird durch den Impulsgenerator V10 mit 100 Hz Repetierfrequenz angesteuert. Der Moment der "Zündung" der Typ-1-Entladung kann durch die Delay-Time des Pulsgenerators variiert werden. (In Wirklichkeit zündet diese Entladung nicht zeitgesteuert, sondern z.B. mit einer bestimmten Verzögerung gegenüber dem Typ-2-Einsatz oder ab einer bestimmten Leistung der Typ-2-Entladung).



Bild 6.6 Entladung Typ 2, nachgebildet durch ABMI1 und Entladung Typ 1, nachgebildet durch Widerstand R22 und zeitgesteuerten Schalter S6

Diese Simulationen wurden nur für $G_c = 9 \cdot 10^{-6}$ S durchgeführt. Über die Koronaeinsetzspannung (U_e) zwischen 15 kV und 5 kV wurde der Zündmoment der Typ-2-Entladung variiert. Über die Delay-Time (TD) wurde der Zündmoment der Typ-1-Entladung zwischen 2,1 ms und 1 ms, bezogen auf den Spannungsnull-Zeitpunkt, variiert. Die Höhe des Typ-1-Scheitelstroms kann über den Widerstand R22, der hier mit 2 k Ω konstant gehalten wurde, variiert werden.

Bild 6.7 zeigt die simulierten Strom- und Spannungsverläufe. Während in der Zeit der Typ-2-Entladung die Spaltspannung nahezu konstant ist, wird durch die niederohmige Typ-1-Entladung die Gasspalt-Kapazität praktisch vollständig entladen. Durch die Typ-1-Entladung ist auch die Typ-2-Entladung beendet, da die Spaltspannung unterhalb U_e liegt. Je Periode und Polarität treten jeweils eine Typ-2- und aus dieser heraus eine Typ-1-Entladung auf.



Bild 6.7 Simulierte Strom- und Spannungsverläufe bei Kombination der Typ-2-und Typ-1-Entladungen. Koronaeinsetzspannung 15 kV, Delay-Time 2,1 ms



Bild 6.8 Gemessene und simulierte Ladungs-Spannungs-Schleifen bei Kombination der Typ-2-und Typ-1-Entladungen: Koronaeinsetzspannung 15 kV, Delay-Time 2,1 ms

Bild 6.8 zeigt die Ladungs-Spannungs-Schleifen bei einer Entladung, in der sowohl homogene Typ-2- als auch homogene Typ-1-Entladungsphasen existieren. Die Typ-2-Entladung ist durch die Geraden-Abschnitte mit größerer Steilheit erkennbar. Die aus der Typ-2-Entladung heraus entstehende Typ-1-Entladung äußert sich durch die steilen Ladungssprünge. Die Verläufe stimmen mit den Messungen überein. Der Versuch wurde in einer Anordnung mit Barriere aus 1mm dicker Al₂O₃-Keramik und Graphitspray-Kontaktschichten, 4 mm Spaltweite, 50 Hz Sinusspannung und in Luft durchgeführt. Es muss beachtet werden, dass bei 4 mm Gasspalt der Randeffekt bei der Bestimmung der Kapazität des Entladungsbereichs nicht ignoriert werden darf. Deshalb wurde ein entsprechender Wert von 8 pF statt aus der Plattenkondensator-Formel gerechneten 5 pF in die Simulation eingesetzt.

6.3 Simulation zur Erklärung des Einflusses der Oberflächen-Permittivität des Barrierenmaterials auf die Homogenitätsgrenze

Die Ergebnisse in Abschnitt 3.2.2 zeigen, dass die Homogenitätsgrenze von Typ-2-Entladungen nicht von der Gesamt-Barrierenkapazität, sondern im Wesentlichen eindeutig von der Permittivität des dem Entladungsspalt zugewandten Barrierenmaterials abhängt, und zwar dergestalt, dass die Stabilitätsgrenze bei niedrigerer Permittivität höher liegt. Die zunächst nahe liegende Vermutung, dass für die Ladungsträger-Generierung an den Barrierenoberflächen Materialabhängigkeiten verantwortlich sind, die in eindeutigem Zusammenhang mit der Permittivität der Oberfläche stehen, konnte durch den Vergleich der Entladungsparameter "Einsetzspannung" und "Koronawiderstand" nicht bestätigt werden, siehe Abschnitt 6.1.

Deshalb wurde als weitere Erklärung in Betracht gezogen, dass für den Fall des Übergangs von der Homogenität zur inhomogenen, filamentierten Streamerentladung weniger der durch die gesamte Barrierenkapazität begrenzte Gesamtstrom eine Hauptrolle spielt, sondern vielmehr der über die lokale Barrierenkapazität in unmittelbarer Umgebung des Fußpunktes des sich entwickelnden Filaments eingespeiste Strom und damit auch die dortige Leistungsdichte. Die Vorstellung ist folgendermaßen:

Typische Parameter eines einzelnen Filaments sind [Kogelschatz 97, Gibalov 00]: Durchmesser 0,1 mm, Stromscheitel 100 mA, Anstiegszeit wenige Nanosekunden, Dauer bis zu einigen 10 ns. Unter Annahme eines zylindrischen Kanals und einer Spannung der Entladung in der Größenordnung 1 kV kann eine Filament-Leitfähigkeit der Größenordnung 10⁻³ bis 10⁻² S/mm abgeschätzt werden. Im Falle einer Streamerbildung wird dieser Wert innerhalb einiger Nanosekunden erreicht. Ohne in physikalische Einzelheiten der Streamerbildung gehen zu wollen, besteht sicherlich eine starke Rückwirkung zwischen der Streamerbildung und der Strom- bzw. Leistungsdichte, die in ihn unterhalb des engen Fußpunktes als Verschiebungsstrom im Dielektrikum eingekoppelt wird. Je höher der Strom und die Feldstärke im Gasraum, umso rascher ist die Streamerbildung zu erwarten. Die gleiche Tendenz muss für den Übergang von einer homogenen Townsend-Entladung in eine filamentierte Streamerentladung gelten. Wenn eine bestimmte kritische Feldstärke überschritten ist, beginnen eng begrenzte lokale Inhomogenitäten. Je höher die dann in die beginnende Inhomogenität eingespeiste Leistungsdichte ist, umso niedriger muss man den Umschlagspunkt erwarten.

Zur Untersuchung dieser Hypothese wurde ein 3D-Simulationsverfahren nach der Methode der Finiten Volumina entwickelt. Es wurde von einem Programm zur Lösung der Wärmeleitgleichung für Sicherungselemente abgeleitet [Lindmayer 99]. Weitere Einzelheiten zur Diskretisierung und zum Lösungsverfahren finden sich dort.

Das Programm löst die zeitabhängigen Potentiale der partiellen Differentialgleichung

$$div\left[\sigma \operatorname{grad} U + \frac{\partial}{\partial t} \left(\varepsilon_0 \varepsilon_r \operatorname{grad} U\right)\right] = 0$$
(6.12)

mit σ elektrische Leitfähigkeit, ε Permittivität, U el. Potential

Damit können Potentiale und davon abgeleitet Feldstärken, Verschiebungs- und Leitungsstromdichten, Leistungsdichten etc. berechnet werden. Die Gleichung besagt, dass die Divergenz der Gesamtstromdichte, zusammengesetzt aus dem ersten Term Leitungsstromdichte und dem zweiten Term Verschiebungsstromdichte, null ist [Lautz 69]. Sie kann das zeitliche Verhalten von Anordnungen mit rein resistiven, rein dielektrischen oder gemischt dielektrisch-resistiven Eigenschaften beschreiben. Die Eigenschaften könnten auch nichtlinear oder zeitabhängig sein.

Mit diesem Programm wurden symmetrische quadratische Barrierenanordnungen von 1 cm² Fläche, 2 mm Gasspalt, und den Eigenschaften je Barriere gemäß Tabelle 6.2 modelliert.

	Oberflächenschicht zum Gasspalt	Basismaterial der Barriere	Gesamtkapazität einer Barriere
#1	Basismaterial	1,5 mm $\varepsilon_r = 6$	3,54 pF
#2	0,1 mm $\varepsilon_r = 2$	1,2 mm $\varepsilon_r = 6$	3,54 pF
#3	Basismaterial	$0,5 \text{ mm } \varepsilon_r = 2$	3,54 pF

Tabelle 6.2 Barriereneigenschaften für die Simulation

Der beginnende "Streamer" wurde einfach durch einen einzelnen homogenen Kanal mit 0,1 mm x 0,1 mm Querschnitt (= gleiche Dimension wie die Dicke der Oberflächenschicht) nachgebildet, dessen elektrische Leitfähigkeit σ mit einer Zeitkonstanten von 10 ns von null auf 10⁻³ S/mm ansteigt, wenn eine Zündspannung von ca. 7 kV am Gasspalt erreicht ist.

Bild 6.9 zeigt einen Teil der Gesamtanordnung, bestehend aus der Barriere, diese ggf. aus zwei Schichten, dem Gasspalt, und dem nadelförmigen "Streamer" in der Mitte des Gasspalts, der vor dem Zündmoment zunächst die Eigenschaften des ihn umgebenden Gas-Dielektrikums besitzt. Aus Symmetriegründen wurde in x-Richtung nur die in Bild 6.9 dargestellte Hälfte der Doppelbarrieren-Anordnung simuliert. Die gleiche Anordnung mit Gitterlinien zeigt Bild 6.10. Hier ist auch der Ausschnitt des Bildes 6.11 gekennzeichnet. Die Geometrie und Diskretisierung in z-Richtung ist mit der in y-Richtung identisch. Die zwischen die planparallelen Elektroden (x = 0 und x = 2,3 mm) angelegte Spannung beträgt 20 kV (Peak-Peak), die Frequenz 10 kHz.



Bild 6.9 Simulierte Geometrie; Beispiel #2, Tabelle 6.2



Bild 6.10 Gitterlinien zu Bild 6.9 und Ausschnitt der folgenden Darstellung



Bild 6.11 Simulierte Momentaufnahmen der Stromverteilung zu 1 ns, 4 ns und 14 ns nach dem "Zündmoment"; Linke Bildhälfte #1, rechte Bildhälfte #2 aus Tabelle 6.2

In Bild 6.11 sind einige simulierte Momentaufnahmen der Stromverteilung (Verschiebungsplus Leitungsstromdichte) zu verschiedenen Zeitpunkten nach dem "Zündmoment" für die ersten beiden Anordnungen der Tabelle 6.2 gegenübergestellt. Es zeigt sich deutlich, dass trotz identischer Barrierenkapazität der Strom im "Streamerfußpunkt" bei der 0,1 mm dicken Oberflächenschicht mit $\varepsilon_r = 2$ deutlich geringer ist als bei massiver Barriere mit $\varepsilon_r = 6$. Den gleichen Sachverhalt demonstriert auch Bild 6.12, wo die mittleren Leistungsdichten als Funktion der Zeit für die drei Anordnungen der Tabelle zusammengefasst sind. Sowohl ihre Höhe als auch die Dauer hängen direkt von der Permittivität an der Oberfläche ab. Diese Ergebnisse unterstützen die Vorstellung von dem Einfluss lokal begrenzter kapazitiver Verschiebungsströme auf den Beginn der Entladungsinhomogenität.



Bild 6.12 Simulierte Leistungsdichten im Fußpunkt als Funktion der Zeit; Anordnungen entsprechend Tabelle 6.2

Aus der Tatsache, dass die Experimente den Permittivitäts-Einfluss selbst bei Schichtdicken von mehreren Mikrometern gezeigt haben, könnte man umgekehrt sogar schließen, dass sich der Übergang von der homogenen zur filamentierten Entladungsform in einem lateralen Maßstab von Mikrometern abspielt.

Zusammenfassung

Die bisher industriell weit verbreiteten Barrierenentladungen bei Atmosphärendruck weisen im Allgemeinen eine Filamentierung auf, d.h. sie bestehen aus einer Vielzahl enger, kurzzeitiger Entladungsfilamente, deren Behandlungswirkung möglichst gleichmäßig verteilt sein muss. Demgegenüber lassen Entladungsformen, deren Erscheinung von vornherein homogen über die Entladungsfläche verteilt ist, bereits vom Prinzip her noch gleichmäßigere Bisher ist aus der Literatur bekannt Ergebnisse erwarten. dass homogene Barrierenentladungen im Allgemeinen nur in recht engen Bereichen der Speisespannung oder der Spaltabstände existieren.

In einer Vorgängerarbeit [Tepper 02] konnten zwei grundlegend unterschiedliche homogene Entladungsformen nachgewiesen werden, wobei sich die folgenden Angaben auf ca. 20 cm² Elektrodenfläche beziehen. Die Typ 1 genannte Form trat überwiegend bei 50 Hz auf und ist durch einen kurzen (Sub-Mikrosekunden-), hohen Strompuls von mehreren Ampere je Halbschwingung gekennzeichnet. Hingegen konnten im Frequenzbereich von kHz unter bestimmten Bedingungen homogene Typ-2-Entladungen mit stetigen Stromverläufen im Milliampere-Bereich und Dauer im zig-Mikrosekunden-Maßstab beobachtet werden. Erstere wurde als großflächige Streamerentladung, Zweitere als Townsend-Entladung interpretiert. Es bestanden bereits Anhaltspunkte, dass die Kontaktierung zwischen Elektroden und Rückseite der Isolierstoffbarrieren die Existenzbereiche homogener Entladungen beeinflusst. Erkenntnisse über den Einfluss des Barrierenmaterials gab es hingegen nahezu keine.

Ziel dieser Arbeit war es, durch systematische Versuche und ergänzende Simulationen konkrete Erkenntnisse über erzielbare und technisch nutzbare Existenzbereiche, sowie den Einfluss der Kontaktierungsart und des Materials der Barrieren auf die Homogenität von Barrierenentladungen zu gewinnen.

Die Ergebnisse lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

a) Existenzbereiche bei 50 Hz

 Bei <u>50 Hz</u> tritt die von [Tepper 02] beschriebene Typ-1-Entladung bei Verwendung von Mylar- (= PET-) Barrieren mit Kontaktierung durch ein feines Drahtgitter direkt auf, sobald die für die Zündung notwendige Spannung erreicht ist. Bei Spannungssteigerung erfolgt ab einer bestimmten Grenze ein Umschlag zu inhomogenen, filamentierten Entladungen. Hingegen wurde in dieser Arbeit bei 50 Hz mit Al₂O₃-Barrieren ein bisher unbekanntes, wesentlich differenzierteres Verhalten beobachtet:

- Bei direkter Kontaktierung mit Leitsilber, d.h. ohne spezielle Kontaktzwischenschicht, existieren in Luft ausschließlich filamentierte Entladungen, in Stickstoff nur in einem sehr engen Bereich homogene Typ-1-Entladungen, jedoch mit sehr geringer Stabilität, die bei geringer Steigerung der Spannung ebenfalls in Filamente übergehen
- Hingegen zeigen alle Varianten mit Drahtgitter oder resistiven Schichten zwischen Barrierenrückseiten und Elektroden beim Entladungseinsatz zunächst grundsätzlich eine stromschwache homogene Entladung des Typs 2. Bei Kontaktierung über Dickschicht-Widerstandspaste mit 100 µm bzw. 300 µm Dicke (Carbolloid) bleibt die Existenz dieses Typs über einen weiten Spannungsbereich bis zur höchsten verfügbaren Spannung (40 kV Peak-Peak) erhalten. Bei den Kontaktierungsvarianten "Graphitspray" (Schichtdicke ca. 15 μm), "Graphit 1,5 mm" und "Drahtgitter" schlägt dagegen ab Spannungen von 2-3 kV (Peak-Peak) oberhalb der Anfangsspannung die zunächst reine Typ-2-Entladung in eine kombinierte Typ-2/Typ-1-Entladung um, die bis zur höchsten Speisespannung sehr stabil existiert. Durch Ladungs-Spannungs-Lissajous-Figuren und Vergleich mit entsprechenden PSpice-Simulationen konnte gezeigt werden, dass die stromstarke und kurzzeitige Typ-1-Entladung aus der vorher bereits gezündeten Typ-2-Entladung heraus entsteht. Es fällt auf, dass die kombinierte Typ-2/Typ-1-Entladung bei den Kontaktierungen mit den niedrigsten Werten des Übergangswiderstands (gemessen gegen Metall) auftrat. Eine schlüssige Erklärung für den starken Einfluss der Kontaktierungen konnte jedoch noch nicht gefunden werden. Die bisherige Hypothese beruhte auf der Vermutung, dass durch den flächig verteilten Widerstandsbelag bei beginnender lokaler Inhomogenität der Entladung ein örtlicher resistiver Spannungsabfall entsteht, welcher der Kontraktion des Entladungsstromes entgegenwirkt. Bei Messungen gegen Metall liegen die Widerstände aller Varianten mit Kontakt-Zwischenschichten unterhalb 1 Ω bis herab zu 0,04 Ω . Hingegen beträgt die Impedanz einer damit in Reihe geschalteten Barriere bei 1 MHz einige k Ω , bei 100 MHz immer noch einige zehn Ω , und ist damit viel höher. Es wäre denkbar, dass bei der Kontaktierung der Isolierstoffbarrieren viel höhere Widerstände wirksam sind, jedoch sind sie der Messung kaum zugänglich. Hier könnten u.U. FDM-
Simulationen der Wirkung resistiver Schichten unter Annahme verschiedener Widerstandswerte Aufschluss geben, die im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden konnten.

 Das 50 Hz-Verhalten von Barrierenanordnungen mit Kontaktierungs-Schichten bei Luft und Stickstoff als Arbeitsgas ist nahezu identisch und schließt in diesem Bereich die Rolle von Stickstoff-Metastabilen für die Vorionisation, wie sie im kHz-Bereich nach Literaturerkenntnissen vorherrscht, aus.

b) Existenzbereiche im kHz-Bereich

- Im Bereich von kHz (untersucht wurden zumeist 7 kHz) treten neben filamentierten Entladungen als homogene Entladungen nahezu ausschließlich Typ-2-Entladungen auf, und zwar nur in Stickstoff. Bereits geringe Mengen von Luftsauerstoff führen, im Gegensatz zu Typ 2 bzw. Typ 2/Typ 1 bei 50 Hz, zur Filamentierung. Die Typ-2-Entladungen lassen sich, wie auch in Simulationen gezeigt, in erster Näherung phänomenologisch durch ein einfaches Koronamodell beschreiben. Wenn die Spannung am Entladungsspalt die Einsetzspannung überschreitet, setzt die Entladung im Spalt ein, deren Strom der Differenz zwischen momentaner Spaltspannung und Einsetzspannung proportional ist. Bei Unterschreiten der Einsetzspannung "und "Koronaleitwert" charakterisieren.
- Während bei geringen Spaltweiten, z.B. 0,5 mm, in einem weitem Spannungsbereich homogene Typ-2-Entladungen existieren, engt sich mit zunehmender Spaltweite deren Spannungs-Existenzbereich ein, bis bei Überschreiten einer Grenz-Spaltweite nur noch filamentierte Entladungen auftreten. Dieser Spaltweitenexistenzbereich wurde mit zahlreichen Barrierenmaterialien, entweder als massive Platten oder als zweischichtige Kombinationen mit unterschiedlichen Permittivitäten der dem Entladungsraum zugewandten Seite (Oberflächenpermittivität), untersucht. Als wichtiges neues Ergebnis wurde es gewonnen, dass der Existenzbereich nicht, wie man erwarten könnte, von der resultierenden Barrierenkapazität, sondern ausschließlich von der Oberflächenpermittivität der Barrieren abhängt. Er ist deutlich größer für niedrigere Oberflächenpermittivität, selbst wenn die Oberflächenschicht nur 5 µm dick ist. Diese Tendenzen ergaben sich sowohl bei 7 als auch bei 16 kHz.

- Bei den vorstehenden Untersuchungen wurde keine deutliche Abhängigkeit der Koronaparameter von der Oberflächenpermittivität gefunden, was eine Erklärung durch unterschiedliche, mit der Permittivität einhergehende physikalische Mechanismen, insbesondere Ladungsträgergenerierung, nicht unterstützt. Der bisherige, durch 3D-Simulationen unterstützte Erklärungsansatz nimmt an, dass beim Übergang zur in Nanosekunden ablaufenden Filamentierung die in eine beginnende Inhomogenität über die Barriere in den Entladungsfußpunkt eingekoppelte Leistung eine Rolle spielt. Sowohl ihre Höhe als auch ihre Dauer hängen deutlich von der Permittivität in unmittelbarer Fußpunktumgebung ab. wobei Permittivität eine geringere geringere Leistungseinkopplung bewirkt.
- Im Gegensatz zu 50 Hz konnte kein deutlicher Einfluss einer direkten Kontaktierung (Leitsilber) oder von Kontaktierungs-Zwischenschichten auf die Homogenitätsbereiche festgestellt werden.

c) Leistungsanalyse homogener Entladungen

 Bei den bei 50 Hz auftretenden Typ-1- bzw. kombinierten Typ-2/Typ-1-Entladungen liegt die Leistung mit Kontaktschichten höher im Vergleich zu bloßen Barrieren. Bei der im kHz-Bereich auftretenden Typ-2-Entladung entwickelt sich die Entladungsleistung nahezu proportional mit der Spannungsdifferenz zwischen der Versorgungsspannung und der Anfangsspannung der Entladung. Zur Spaltweite besteht ebenfalls Proportionalität. Darüber hinaus nimmt die Leistung sowohl mit der Barrieren-Gesamtkapazität als auch mit der Oberflächenpermittivität zu.

d) Stromverteilung der homogenen Entladungen

 Die lokale Stromverteilung wurde bei beiden Entladungsformen durch eine geteilte Erdelektrode erfasst. Außer der Hauptfläche wurde in der Mitte 1/280 der Fläche ringförmig isoliert und der Strom getrennt gemessen. Die Verteilung des Entladungsstromes bei einer homogenen Typ-2-Entladung (kHz-Bereich) besitzt ziemlich genau das Verhältnis wie die Flächen, was auf eine recht homogene Verteilung über der Fläche schließen lässt. Bei der Typ-1-Entladungsform wurde im mittleren Bereich etwa die 1,75-fache Stromdichte des Mittelwertes beobachtet.

e) Side-On-Hochgeschwindigkeitsaufnahmen

 Optische "Side-On"-Aufnahmen zeigen deutliche Unterschiede zwischen den Typ-1-Entladungen bei 50 Hz und den Typ-2-Entladungen bei 7 kHz. Während bei ersteren die Leuchterscheinung den Spalt zwischen Anode und Kathode gleichmäßig ausfüllt und keine Bevorzugung eines der Elektrodengebiete aufweist, ist bei letzteren die Leuchterscheinung vor der Anode eindeutig stärker ausgeprägt und fällt zur Kathode hin stark ab.

f) Emissionsspektroskopie

 Die Aufnahme des Emissionsspektrums bei der Typ-2-Entladung im kHz-Bereich in Stickstoff mit verschiedenem Gasfluss sowie in Luft weist auf den Einfluss der Sauerstoffspezies (Quench der Stickstoff-Metastabilen) auf die Entladungshomogenität hin.

g) Simulationen

• Zur Ergänzung und Deutung der Versuchsergebnisse wurden Simulationen durchgeführt, deren Aussagen bereits in den vorstehenden Punkten enthalten sind.

Literaturverzeichnis

Alexeff 02	I. Alexeff, M. Laroussi. The Uniform, Steady-State Atmospheric		
	Pressure Dc Plasma. IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 30,		
	No. 1, February 2002		
Bartnikas 68	R. Bartnikas, Brit. J. Appl. Phys. (J. Phys. D.) Ser. 2, 1 (1968) 659-661		
Bartnikas 71	R. Bartnikas, IEEE Trans. Electr. Insul. 6 (1971) 63-75		
Braun 02	Braun, D., Gibalov, V.I., Pietsch, G.J., Two-Dimensional Modelling of		
	the Dielectric Barrier Discharge in Air. Plasma Sources Sci. Technol.,		
	1, 166 (1992)		
Chang	Chang, J.S. Proc. II Intern. Symp. High Pressure Low Temp. Plasma		
	Chem., S. 103		
Donohoe 76	K.G. Donohoe, PhD Thesis, California Institute of Technology,		
	Pasadena, CA (1976)		
Ermel 03	V. Ermel. Untersuchung der Verteilung und Intensität filamentierter		
	Barrierenplasmen für die Behandlung von Oberflächen.		
	Vakuum in Forschung und Praxis15 (2003), S. 128-132.		
Gherardi 00	Gherardi, N., Massines, F. Study of the transition from a Townsend to a		
	streamer breakdown in a nitrogen silent discharge. XIIIth Int. Conf. On		
	Gas Discharges and their Applications, Glasgow 2000, S. 287-290		
Gherardi 98	N. Gherardi et al, "About mechanisms leading to a silent discharge in		
	nitrogen at atmospheric pressure. HAKONE VI, Cork/Ireland 1998.		
Gibalov 00	Gibalov, V.I., Pietsch, G.J., The development of dielectric barrier		
	discharges in gas gaps and on surfaces. J. Phys. D: Appl. Phys. 33		
	(2000)		
Gibalov 92	Gibalov, V.I., Pietsch, G.J, Surface Discharge Phenomena in Barriere		
	Discharges with Dielectric Anode. Proc. Int. Conf. On Gas Discharges		
	and their Applications, Swansea, 09.1992		
Golubovski 02	Golubovski, Y.B., et al. Influence of interaction between charged		
	particles and dielectric surface over a homogeneous barrier discharge in		
	nitrogen. J. Phys. D: Appl. Phys. 35 (2002).		

IST	Atmosphärendruck-Plasmaverfahren.		
	Website des Fraunhofer-Instituts für Schicht- und Oberflächentechnik.		
	http://www.ist.fraunhofer.de/kompetenz/atmos/druck/druck.html		
Kang 02	Kang, W.S., et al. Numerical Modelling on Recurrence of		
	Microdischarges in Dielectric Barrier Discharge. HAKONE 8, 2002		
Kogelschatz 01	Kogelschatz, U. Filamentary and Diffuse Barrier Discharges. Proc.		
	AppSpring Meeting, Bad Honnef, April 2001		
Kogelschatz 02	Kogelschatz, U. Filamentary, Patterned, and Diffuse Barrier		
	Discharges. IEEE Transaction on Plasma Science, Vol. 30, No. 4, Aug. 2002		
Kogelschatz 97	U. Kogelschatz et al, "Dielectric barrier discharges – principle and		
	applications". XXIII th Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases,		
	Toulouse 1997.		
Kogoma 94	Kogoma, M., Okazaki, S. Raising of ozone formation efficiency in a		
	homogeneous glow discharge plasma at atmospheric pressure. J. Phys.		
	D: Appl. Phys 27 (1994) S. 1985-1987		
Lautz 69	G. Lautz: Elektromagnetische Felder, Teubner Studienbücher, B.G.		
	Teubner, Stuttgart 1969.		
Lindmayer 99	M. Lindmayer: 3D Simulation of Fusing Characteristics Including the		
	"M-Effect". 6 th International Conference on Electric Fuses and their		
	Applications, Turin 1999.		
Massines 00	Massines, F., Gouda, G., Gherardi, N. Croquesel, E., Study of Glow		
	Dielektric Barrier Discharge in Various Atmospheres. Proc. HAKONE		
	VII Conference, Greifswald 2000.		
Massines 01	Massines, F., Ségur, P., Diagnostics of Non-Equilibrium High Pressure		
	Plasmas, APP Spring Meeting, Bad Honnef (2001).		
Massines 92	Massines, F., Mayoux, C., Messaoudi, R., Rebihi, A., Ségur, P.,		
	Experimental Study of an Atmospheric Pressure Glow Discharge-		
	Application to Polymers Surface Treatment. Proc. 10 th Int. Conf. On		
	Gas Discharges and their Applications, Swansea 1992.		
Massines 98	Massines, F., et al. Experimental and theoretical study of a glow		
	discharge at atmospheric pressure controlled by dielectric barrier.		
	J. Appl. Phys. 83 (1998), p.2950-2957		

Miralai 00	Miralai, S.F, et al. Electrical and Optical Diagnostics of Dielectric
	Barrier Discharge (DBD) in He and N ₂ , HAKONE VII, Greifswald
	2000
Mori 95	Mori, T., et al. Deposition of Silica Thin Film on the Surface of Powder
	by PCVD under Atmospheric Pressure, ISPC, Minneapolis 1995
Müller 88	Müller, H., Neiger, M. Modelling of Silent Discharges with Excimer
	Gas Filling, 41 st Annual Gaseous Electronics Conference, Minneapolis 1988.
Müller 91	Müller, H. Modellierung von Excimer-Gasentladungen zur Erzeugung
	spektralselektiver Strahlung. Dissertation Uni Kalsruhe 1991.
NIST	NIST Atomic Spectra Database Lines Form. http://physics.nist.gov
Okazaki 93	Okazaki, S., et al. Appearance of Stable Glow Discharge in Air, Argon,
	Oxygen and Nitrogen at Atmospheric Pressure using a 50 Hz Source.
	Appl. Physics 26, (1993)
Philippow 68	Philippow, E. Taschenbuch Elektrotechnik. VEB Verlag Technik
	Berlin, 1968.
Rabehi 92	Rabehi, A. et al. Modelling of a High-Pressure Low-Frequency
	Discharge Between Insulated Electrodes. Proc. 10 th Int. Conf. On Gas
	Discharges and their Applications, Swansea 1992.
Rabehi 97	Rabehi, A. et al. Investigation of the role of nitrogen impurities on the
	behaviour of an atmospheric-pressure glow discharge in helium.
	XXIIIth Int. Conf. On Phenomena in Ionised Gases (ICPIG), Toulouse
	1997
Roth 92	Roth, J. R., et al. Experimental generation of a steady-state glow
	discharge at atmospheric pressure. Proc. 27 th Int. Conf. Plasma Science,
	Tampa, FL, 1992
Roth 95	Roth, J. R., et al. One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma.
	United States Patent. Patent Number: 5.414.324 May 1995
Salge 98	Salge, J. Dielektrisch bihinderte Entladungen für plasmatechnische
	Anwendungen. Journal für Oberflächentechnik. 1998/5.

Ségur 00	Ségur, P., Massines, F. The role of numerical modelling to understand
	the behaviour and to predict the existence of an atomospheric pressure
	glow discharge controlled by a dielectric barrier. XIIIth Int. Conf. On
	Gas Discharges and their Applications, Glasgow 2000, S. 15-24
Softal	Report Nr. 102, Firma Softal Hamburg
Stockwald 91	Stockwald, K. Neuartige Xenon- und Xenon/Quecksilber-Lampen im
	VUV/UV Spektralbereich. Dissertation, Universität Karlsruhe 1991
Stockwald 95	Stockwald, K., Neiger, M. Some Properties of a Novel Far UV Xenon
	Excimer Barrier Discharge Light Source, Contributions to Plasma
	Physics, 35 (1995)
Tepper 00a	Tepper J., Lindmayer, M., Jüttener, B. Optical and electrical
	measurements of homogeneous barrier discharges at atmospheric
	pressure. XIIIth Int. Conf. On Gas Discharges and their application,
	Glasgow, 2000.
Tepper 00b	Tepper J., Lindmayer, M. Investigations of two different kinds of
	homogeneous barrier discharges at atmospheric pressure.
	HAKONE VII, Greifswald 2000
Tepper 02	Tepper, J. Homogene Barrierenentladungen bei Atmosphärendruck.
	Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2002
Tepper 02b	Tepper, J., Li, P., Lindmayer, M. Effects of Interface between
	Dielectric Barrier and Electrode on Homogeneous Barrier Discharges
	at Atmospheric Pressure. Proc. 14 th Int. Conf. On Gas Discharges and
	their Applications (GD2002 Liverpool) 2002.
Tepper 98	Tepper J., Lindmayer, M. Pulsed uniform barrier discharges at
	atmospheric pressure. HAKONE VI, Int. Symp. On High Pressure,
	Low Temperature Plasma Chemistry, Cok, Ireland 1998.
Thode 03	Thode, C. Coronabehandlung von Wollgewebe zur ökologischen und
	ökonomischen Optimierung der Veredlungs- und Gebrauchs-
	eigenschaften. AiF-Schlussbericht 2003
Thomas 02	Thomas, H., Lehmann, K. H., Höcker, H., Thode, C., Lindmayer, M.,
	Plasmabehandlung bei Atmosphärendruck – ein umweltschonendes
	Verfahren für die Veredlung von Wollgeweben. 75. Tagung des
	Wissenschaftlichen Rates der AiF, Nov. 2002, Magdeburg.

Lebenslauf

Zur Person:				
Name:	Peng Li			
Geburtsdatum	27.01.1973 Hunan, V.R. China			
Geburtsort:				
Familienstand:	verheiratet mit			
	Zhouying Shi			
	Tochter: Sha	nni Li		
Schulausbildung:	1978-1983	Hengyang Hongse Grundschule, Hunan		
	1983-1989	Hanging No. 8 Middle-Schule, Hunan		
Hochschulstudium:	1989-1993	Elektrotechnik an		
		der Technischen Universität Südchina Abschluss: Bachelor-Grad		
	1993-1995	Elektrotechnik an		
		der Technischen Universität Südchina		
		Abschluss: Master-Grad		
Berufstätigkeit:	1995-2000	Ingenieur an		
		Guangzhou Power Co.		
		Guangdong Provinz, V.R. China		
	2000-2001	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am		
		Institut für Elektrische Anlagen und		
		Energiewirtschaft, Rheinisch-Westfälische		
		Technische Hochschule Aachen		
	seit 2001	Wissenschaftlicher Angestellter am		
		Institut für Hochspannungstechnik		
		und Elektrische Energieanlagen,		
		Technische Universität Braunschweig		