

1 Einführung

1.1 Barrierentladung und Mikroentladung

Eine dielektrische Barrierentladung (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 1.1 zeigt das Schema der in dieser Arbeit verwendeten ebenen Doppelbarrierenanordnung, in welcher zwei Elektroden, zwei Barrierschichten und ein Entladungsbereich (Gasspalt) in einer elektrischen Reihenschaltung existieren.

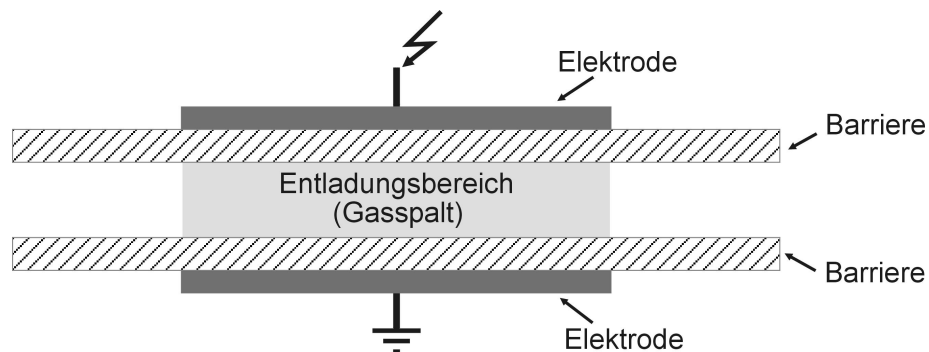


Bild 1.1 Schema der ebenen Doppelbarrierenanordnung

Abhängig von der Anwendung kann die Breite des Gasspalt es 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 Barrierschichten werden Glas, Quarz, Keramik und auch dünne Plastiksichten 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 Barrierentladung 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 Barrierentladung 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 Barrierentladung versuchsweise eingesetzt [Chang]. Eine weitere aktuelle Anwendung ist die Nutzung der Barrierentladung als Excimerquelle [Müller 88, Müller 91, Stockwald 95]. Im Stadium von Entwicklungsarbeiten ist darüber hinaus der Einsatz von Barrierentladungen zur Behandlung von Wolle, Textilien und Schüttgütern [Thode 03, Thomas 02, Ermel 03, Mori 95].

In der Praxis gebräuchliche Barrierentladungen 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 Barrierentladung ist wohl die heute am meisten genutzte Plasmaart im Bereich von Atmosphärendruck [Softal]. In dieser Form besteht die Barrierentladung aus vielen kurzzeitigen filamentartigen Streamern. Typische gemessene Spannungs- und Stromverläufe bei einer filamentierten Barrierentladung 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 Amplituden. Diese Stromspitzen sind kennzeichnend für die kurzzeitigen Entladungsfilamente.

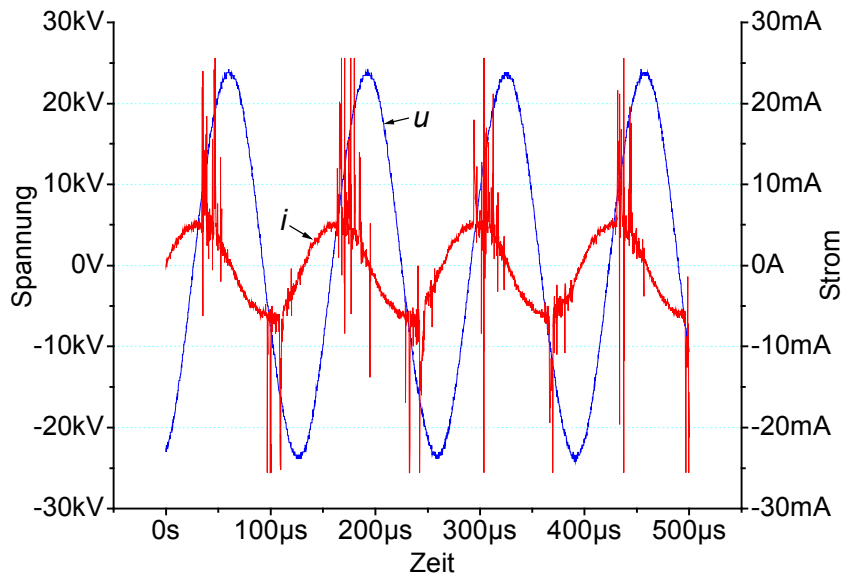


Bild 1.2 Spannungs- und Stromkurve bei einer typischen filamentierten DBD

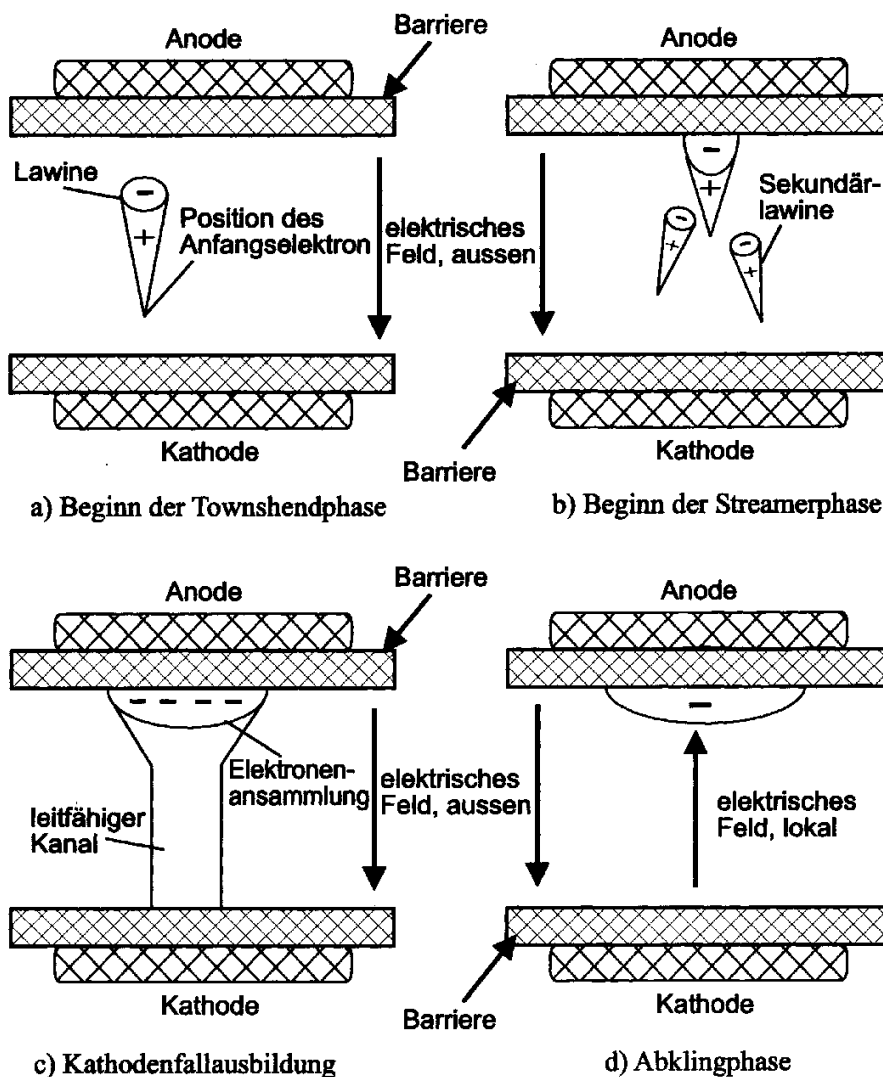


Bild 1.3 Entwicklung filamentierter Barrierenentladungen nach [Gibalov92, Braun 92, Tepper 02], schematisch

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 einer Ansammlung von Ladungsträgern vor der Anodenbarriere und zu einer Elektronensammlung 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.

Streamerphase: 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. 10^8 cm^{-3} erreicht und das elektrische Ausgangsfeld hierdurch verzerrt wird.

Kathodenfallausbildung: 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.

Abklingphase: 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 Barrierschichten. 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, und die Energie auf μJ (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 tangentielle Felder längs der Barrierenoberflächen, als deren Folge eine tangentielle 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 niedriger 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