

Experimentelle Untersuchung der Entladung elektrostatisch aufgeladener Kunststoffe

Dipl.-Ing. Lutz Müller, Prof. Dr.-Ing. Kurt Feser
Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik, Universität Stuttgart
Dr.-Ing. Reinhard Pfendtner, Robert Bosch GmbH, Stuttgart
Dipl.-Ing. Edwin Fauser, Robert Bosch GmbH, Stuttgart

1 Einleitung

Durch den zunehmenden Einsatz von Kunststoffen bzw. kunststoffbeschichteten Stoffen können verschiedene Probleme, die durch Auf- und Entladung entstehen, beobachtet werden. Durch Reibung, strömende Flüssigkeiten oder elektrische Felder können isolierte Oberflächen schnell beträchtlich aufgeladen werden. Aus diesem Grund können Entladungen zwischen der aufgeladenen Oberfläche und in der Nähe befindlichen geerdeten Objekten stattfinden. Diese impulsförmigen Entladungen entladen die isolierten Oberflächen in einem begrenzten Flächenbereich, deren Größe von verschiedenen Parametern abhängt. Die Größe der entladenen Fläche beeinflusst die Größe der transportierten Ladung und somit die umgesetzte Energie im Entladungskanal.

In den letzten Jahrzehnten wurden solche Büschelentladungen bezüglich der Entflammung von Luft-Gasgemischen schon gut untersucht, z.B. von Heidelberg [1], [2], Lövsstrand [3] oder Gibson und Lloyd [4]. Andererseits haben z.B. Lichtenberg [5] oder Toepler [6] gezeigt, daß unter bestimmten Bedingungen Gleitentladungen auf Isolierstoff-Oberflächen entstehen können. Bei dieser Entladungsform wird eine wesentlich größere Fläche entladen. Dies ist mit einer sehr großen transportierten Ladungsmenge verbunden, die eine entsprechend große Energiemenge im Entladungskanal umsetzt.

Ein einfaches Modell für die Auf- und Entladung von Isolierstoff-Oberflächen könnte die ESD-gerechte Dimensionierung von Geräten und Systemen verbessern. Dazu sind einerseits die Bedingungen zu untersuchen, die die Größe der sich entladenden Fläche beeinflussen, andererseits ist ein Modell nötig, mit dem man die umgesetzte Leistung bzw. Energie im Entladungskanal bestimmen kann.

2 Messaufbau

Die Auf- und Entladung von Isolierstoff-Oberflächen ist abhängig von den klimatischen Umgebungsbedingungen, wie relativer Feuchte und Temperatur. Deshalb ist der gesamte Messaufbau in einer Klimakammer für Konstantklima untergebracht. Alle Messungen wurden bei einer relativen Feuchte von 25%-30% und einer Temperatur von 21°C durchgeführt. Die Einzelheiten des Messaufbaus sind in Bild 1 zu sehen und wurden in [7] vorgestellt.

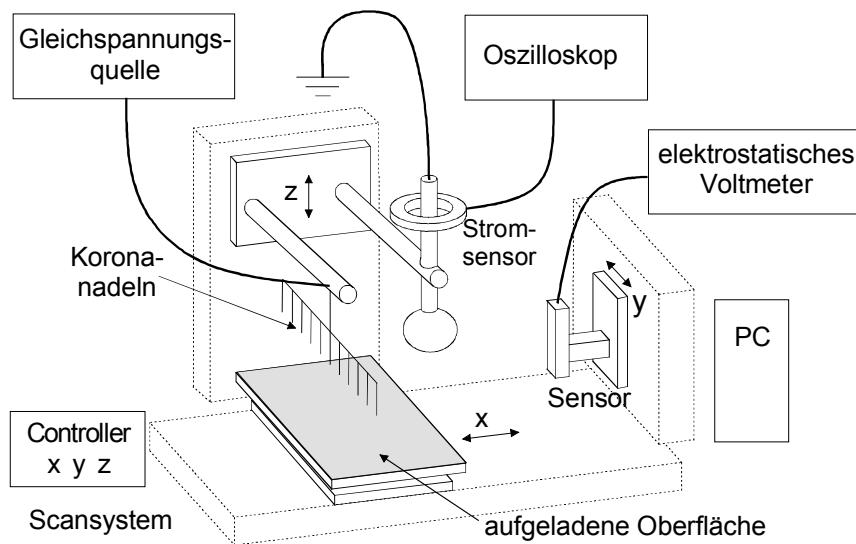


Bild 1: Prinzip des Messaufbaus

Die theoretisch maximale Aufladung von einseitig aufgeladenen Isolierstoffen beträgt $2,7 \text{ nAs/cm}^2$ [z.B. 4]. Sobald eine rückseitige Massefläche vorhanden ist, können sich Isolierstoffe durch die Bildung von Ladungsdoppel-Schichten wesentlich höher aufladen. Bei den vorgestellten Messungen werden nur solche Isolierstoff-Proben (PVC-Folien) untersucht, weil bei diesen durch die höhere mögliche Aufladung auch eine höhere Gefährdung möglich ist. Bisher wurden dazu nur negative Aufladungen betrachtet.

3 Bündel- und Gleitentladungen

3.1 Übersicht

Abhängig von der Ladungsdichte auf dem Prüfling können zwei Arten von Entladungen auftreten. Dies sind bei kleineren Ladungsdichten Bündelentladungen, bei denen sich ein begrenzter naher Bereich um den Entladungspunkt entladen kann. Die Oberflächenladungsverteilung nach einer solchen Bündelentladung und der erste Entladestromimpuls sind in Bild 2 am Beispiel einer 1 mm dicken PVC-Platte zu sehen. Die Ladungsdichte vor der Entladung betrug 50 nAs/cm^2 .

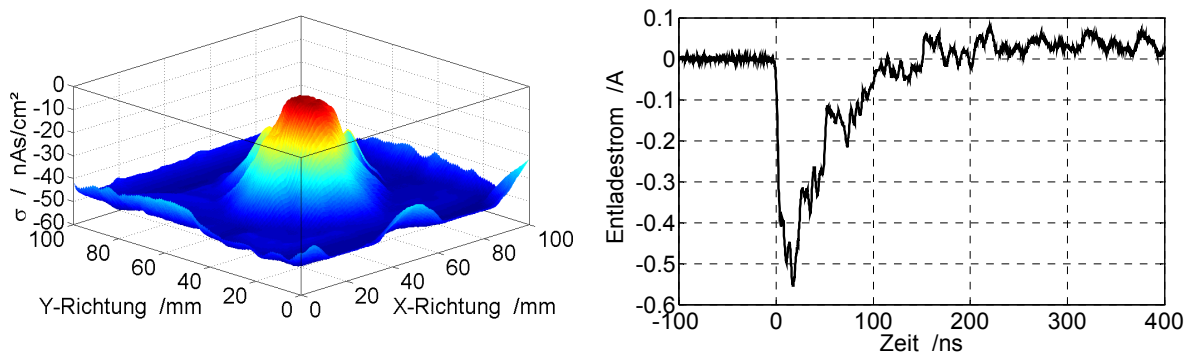


Bild 2: Oberflächenladungsverteilung nach einer Bündelentladung und zugehöriger erster Entladestromimpuls

Typischerweise treten bei einer schrittweisen langsamen Annäherung der als Masselektrode benutzten Kugel drei bis vier Einzelentladungen auf. Es ist aber auch möglich, dass nur eine größere Büschelentladung entsteht, wenn die Kugel schneller angenähert wird. Grund dafür ist das nicht sofort vorhandene Startelektron zur Einleitung der Entladung. Der Entladestromimpuls hat stets eine ähnliche Form: recht schnelle Anstiegszeit von einigen ns und eine Abfallzeit von ca. 100 ns. Die transportierte Ladung eines Impulses im Falle von mehreren Einzelentladungen ist relativ gering und liegt typischerweise im Bereich von 0,03 μAs bis 0,1 μAs . Tritt nur eine Entladung auf dann liegt die transportierte Ladung im Bereich von 0,2 μAs bis 0,6 μAs . Diese Werte sind abhängig von einigen Parameter (Dicke; ϵ_r ; Ladungsdichte) und beziehen sich auf ähnliche Anordnungen, wie im obigen Beispiel.

Bei dünneren Proben, z.B. bei Folien, kann die Ladungsdichte wesentlich größer sein. In solchen Fällen besteht die Möglichkeit, dass Gleitentladungen entstehen. Bei diesen kann sich ein beträchtlich größerer Flächenbereich fast vollständig entladen. Die Oberflächenladungsverteilung vor (unten) und nach (oben) einer solchen Gleitentladung und der Entladestromimpuls sind in Bild 3 zu sehen, wobei die Foliedicke 0,18 mm und die Ladungsdichte vor der Entladung ca. 250 nAs/cm² betrug.

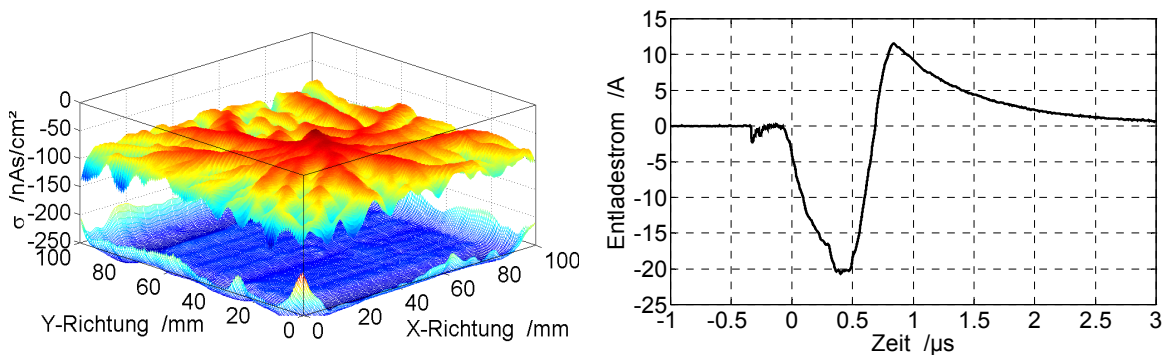


Bild 3: Oberflächenladungsverteilung vor und nach einer Gleitentladung und der zugehörige Entladestromimpuls

Bei Annäherung der Massekugel erfolgt zuerst eine Büschelentladung. Diese schließt die Oberfläche über den Entladungskanal punktuell zur Masse kurz. Durch die umliegenden sehr hohen Ladungsdichten entsteht somit eine große tangentielle elektrische Feldstärke, die wiederum die Bildung von Gleitentladungskanälen auf der Oberfläche Schritt für Schritt ermöglicht. Dies erfolgt statistisch verteilt und leicht zeitlich versetzt, sodass man sich eine Vielzahl von kleineren Entladungen vorstellen kann, die aufsummiert den gemessenen Gesamtstrom ergeben. Es können Stromamplituden von einigen 10 A auftreten. Die dabei transportierte Ladung liegt in unserem Beispiel bei 20 μAs und damit um Größenordnungen über der bei Büschelentladungen.

3.2 Übergang von Büschel- zu Gleitentladungen

Als erste wichtige Charakterisierung ist der Übergang von Büschel- zu Gleitentladung zu sehen. Mit Kenntniss der Grenzladungsdichte kann man abschätzen bzw. beeinflussen, ob bei der entsprechenden Anwendung die ein wesentlich höheres Gefährdungspotential beinhaltende Gleitentladung auftreten kann oder nicht.

Zur Illustration dieser Grenze wurden einige Folien (120 mm x 120 mm; drei Dicken) mit einer variierenden Oberflächenladungsdichte gleichmäßig aufgeladen. Die nachfolgende Entladung und Ermittlung der Oberflächenladungsdichte erlaubt die Zuordnung zu Büschel- oder Gleitentladung (siehe Bild 4). Der grau unterlegte Bereich stellt den Übergang der Entladungsformen dar. Für eine genauere Aussage bzw. statistische Auswertung sind weitergehende Untersuchungen nötig, die auch weitere Parameter wie unterschiedliche Materialien einbeziehen müssen.

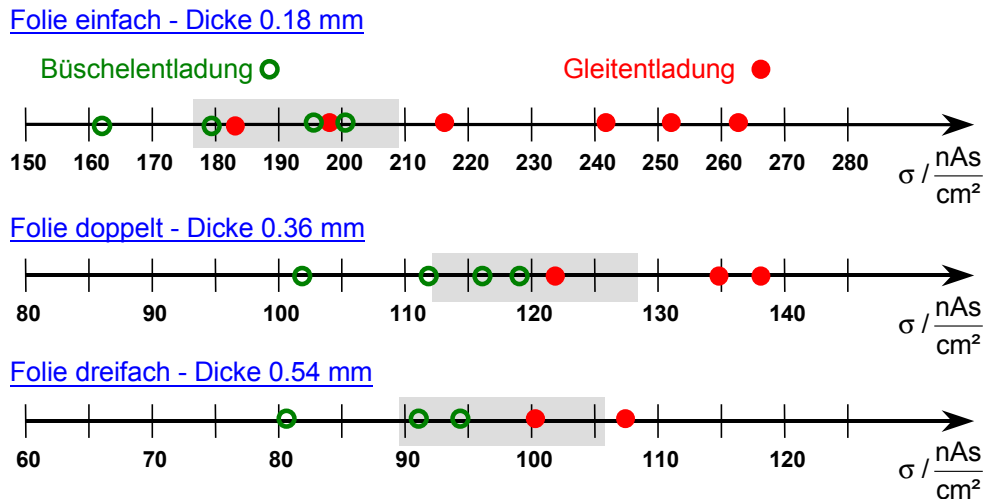


Bild 4 Darstellung des Überganges von Büschel- zu Gleitentladung in Abhängigkeit von der Oberflächenladungsdichte σ für drei Foliendicken

Es ist interessant festzustellen, dass Gleitentladungen bei dickeren Folien schon bei erheblich niedrigeren Ladungsdichten entstehen können. Der Grund dafür ist, dass die für Gleitentladungen nötige tangentielle Feldstärke nach Kurzschluss der Oberfläche durch die einleitende Büschelentladung eher erreicht wird.

4 Einzelkanal-Betrachtungen bei Gleitentladungen

Mit dem in [7] vorgestellten einfachen Modell kann für Büschelentladungen die umgesetzte Leistung bzw. Energie gut ermittelt werden. Die Erweiterung des Modells für Gleitentladungen und die Bestimmung von Parametern dafür erfordert die genauere Untersuchung und Charakterisierung der Gleitentladungskanäle, wie folgend dargestellt.

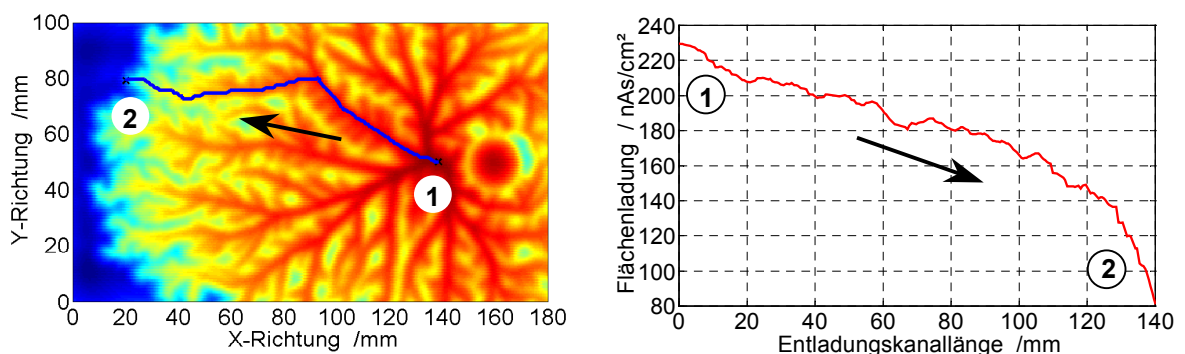


Bild 5: Ermittlung der Oberflächen-Ladungswerte entlang eines Entladungskanals

4.1 Bestimmung der Werte der Oberflächenladung entlang eines Kanals

Als Hilfsmittel dafür wurde ein Algorithmus entwickelt, der aus einer gemessenen Oberflächenverteilung entlang eines Entladungskanals die Oberflächenladungswerte bestimmt (Bild 5). Dazu wird der Startpunkt am Ende des gewünschten Kanals vorgegeben und der Algorithmus läuft entlang des Grates des Entladungskanals bis zum Maximum, dem Fußpunkt der Luftentladung. Die Ladungswerte stellen den entladenen Betrag über der ermittelten Kanallänge dar. Der Fußpunkt der Luftentladung repräsentiert den Anfang des betrachteten Kanals.

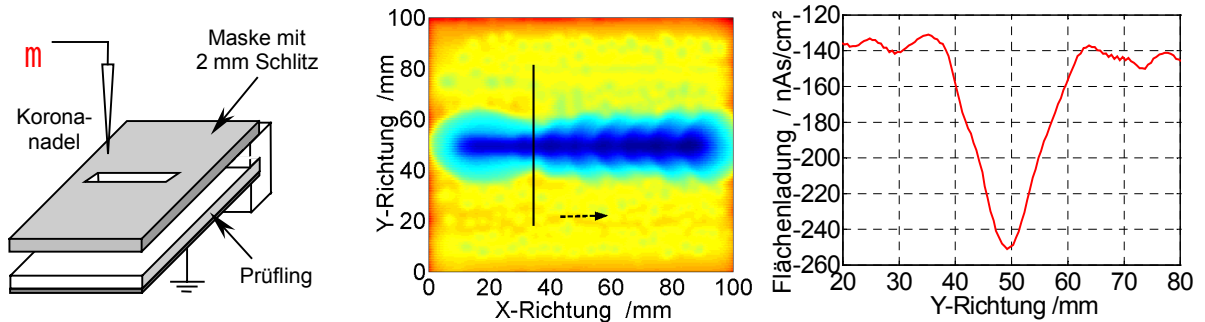


Bild 6: Aufladung einer Linie mit Maskenplatte und Schlitz von 2 mm Breite

Um sich auf einen Entladungskanal beschränken zu können erfolgt die Aufladung der Isolierstoffe nachfolgend nur entlang einer Linie. Damit diese Linie möglichst schmal bleibt wird zwischen Probenoberfläche und Koronanadeln mit geringem Abstand eine Maskenplatte eingebracht, die einen Schlitz mit Breite 2 mm besitzt. Die Elektronen können jetzt nur noch durch den Schlitz zur Isolierstoff-Probe gelangen (Bild 6). Die gesamte Platte wurde zuvor mit einer geringen Flächenladung von ca. 140 nAs/cm² aufgeladen, was aber keinen Einfluss auf die Gleitentladungsentwicklung hat.

4.2 Kanalbetrachtung bei Variation der Länge des Kanals

Die Annäherung der Kugelelektrode erfolgt am Ende der aufgeladenen Linie, sodass sich der Gleitentladungskanal entlang dieser entwickeln kann. In Bild 7 ist beispielhaft ein solcher Entladungskanal zu sehen, wobei die Differenz der Oberflächen-Ladungsverteilung vor und nach der Entladung abgebildet wurde. Parallel wird der Entladestromimpuls aufgezeichnet.

Als erstes wird die Abhängigkeit von der Kanallänge untersucht. Dazu wurden Entladungen mit aufgeladenen Linien der Längen 40 mm, 60 mm, 80 mm und 170 mm durchgeführt. Im Bild 8 ist die Oberflächenladung entlang des Kanals für jeweils ein Beispiel pro Länge zu sehen. Die oben dargestellten Kurven zeigen den Betrag der Aufladung vor der Entladung entlang des Kanals. Es ist deutlich die unterschiedliche Länge der Aufladung zu erkennen. Die Aufladung entlang der Linie wurde konstant

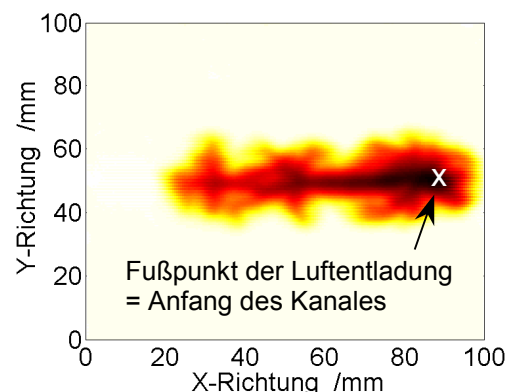


Bild 7: Gleitentladung entlang der Linie (Differenzbildung)

Die oben dargestellten Kurven zeigen den Betrag der Aufladung vor der Entladung entlang des Kanals. Es ist deutlich die unterschiedliche Länge der Aufladung zu erkennen. Die Aufladung entlang der Linie wurde konstant

zu ungefähr 250 nAs/cm^2 gewählt. Die darunter liegenden Kurven zeigen den Betrag der entladenen Ladungsmenge entlang des Kanals. Im Bild 8 rechts ist die Linearisierung der Messkurven zu finden.

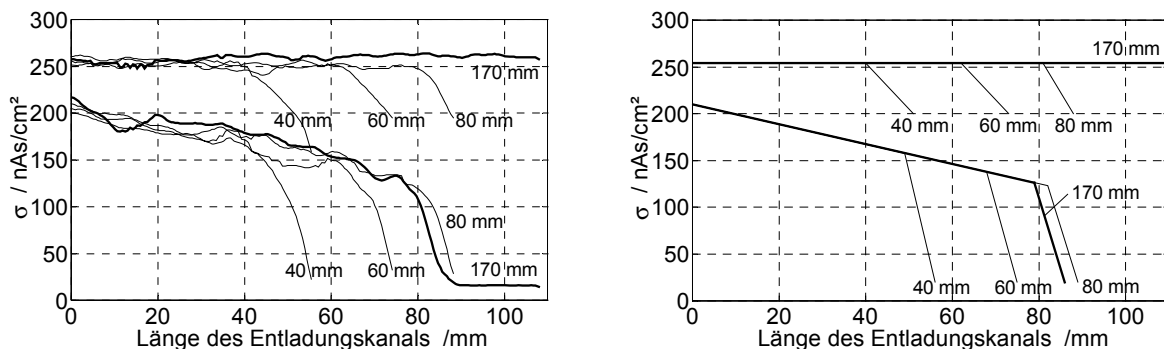


Bild 8: Entladungskanallänge bei Variation der Länge der aufgeladenen Linie

Es ist gut zu erkennen, dass die Gleitentladungskanäle bei Aufladungslängen bis 80 mm nahezu die gesamte Länge überbrücken. Bei der wesentlich längeren aufgeladenen Linie (170 mm) überbrückt der Kanal aber nur ca. 80 mm. Dies zeigt, dass es für den Gleitentladungskanal unabhängig von der Ausdehnung der Aufladung eine begrenzende Länge gibt.

Weiterhin ist ein nahezu linearer flacher Abfall der Ladungsmenge entlang des Kanals zu beobachten, unabhängig von der Länge der Aufladung. Dieser kann mit einem Potentialabfall entlang des Entladungskanals interpretiert werden. Am Ende des Kanals in eine steile Abnahme zu sehen, die den Ladungsausgleich um den Kanalendpunkt darstellt, ähnlich wie die Abnahme der Ladung bei Büschelentladungen um den Mittelpunkt der Entladung.

4.3 Kanalbetrachtung bei Variation der mittleren Aufladung

Für die nächste Betrachtung wird die Länge der Aufladung konstant mit 170 mm gewählt. Der Betrag der Aufladung entlang der Linie wurde zwischen 250 nAs/cm^2 und knapp 300 nAs/cm^2 variiert. Die im Bild 9 gezeigte Kurvenschar gibt den Betrag der entladenen Ladungsmenge entlang der Kanäle wieder, wobei der Betrag der Aufladung vor der Entladung als Parameter zu sehen ist. Im Bild rechts ist wieder die Linearisierung der Messkurven von links zusehen. Das grundsätzliche Aussehen der Kurven ist wie im Kapitel zuvor.

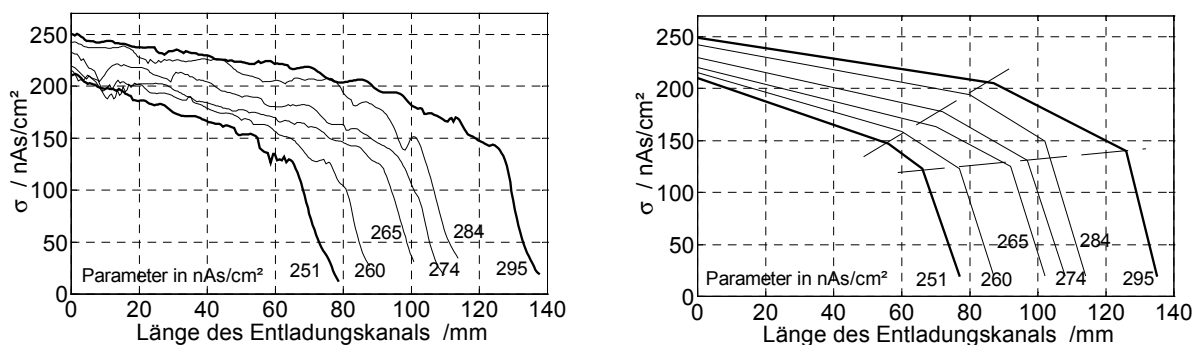


Bild 9: Kanallänge bei Variation des Ladungsbetrages der aufgeladenen Linie

Bei höherer Aufladung ist ein Anwachsen der Länge des Entladungskanals zu beobachten. Wie in Bild 10 zu sehen ist dieser Zusammenhang näherungsweise linear. Wird nicht nur eine Linie aufgeladen sondern die gesamte Fläche, so kann die Länge des Entladungskanals auch als Radius der entladbaren Fläche angesehen werden. Man beachte hierzu auch das nächste Kapitel. Der Abfall der Ladungsmenge entlang des Kanals wird mit höherer Aufladung geringfügig flacher, die entladene Ladungsmenge hingegen wird größer. Die Differenz aus Aufladung und entladener Ladungsmenge, die Restladung, ist im Anfangsbereich des Kanals nahezu unabhängig vom Aufladungsbetrag. Im weiteren Verlauf des Kanals steigt der Restladungsbetrag dann mit höherer Aufladung weniger stark an, korrespondierend mit dem flacheren Abfall der entladenen Ladungsmenge. Die Tendenz der Kanalentwicklung ist in Bild 9 rechts gut zu sehen. Der flache Abfall geht in einen steilen Abfall über, wobei durch die Knickpunkte näherungsweise eine Gerade gezogen werden kann.

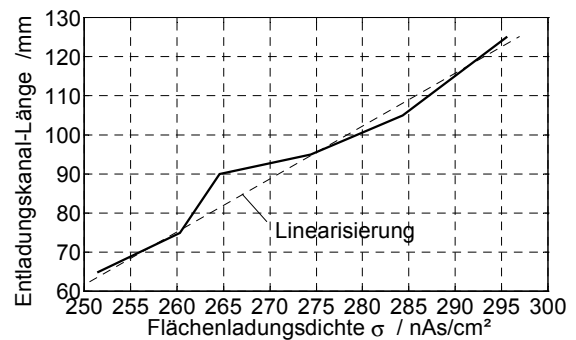


Bild 10: Länge des Entladungskanals in Abhängigkeit von σ

4.4 Kanalbetrachtung bei Variation des Profils der Aufladung

Bei einer weiteren Betrachtung wird die Länge der Aufladung konstant mit 170 mm, sowie der Betrag der Aufladung entlang der Linie konstant mit ungefähr 250 nAs/cm² gewählt. Der Parameter der jetzt untersucht wird, ist das Profil der Ladung entlang der aufgeladenen Linie. Die unterschiedlichen Aufladungsprofile Bild 11 links entstehen durch unterschiedliche Aufladungsarten. Die erste Art ist wie bisher die Aufladung mit Maskenplatte, wodurch ein sehr schmales Profil entsteht. Ein etwas breiteres Profil entsteht bei Aufladung mit nur einer Koronanadel und ohne Maske. Bei der dritten Art wird ein Steifen in einem breiteren Bereich (mehrere Nadeln) flächenhaft aufgeladen. Bild 11 rechts zeigt für diese 3 Fälle oben den Betrag der Aufladung vor der Entladung und darunter korrespondierend den Betrag der entladenen Ladungsmenge entlang des Kanals.

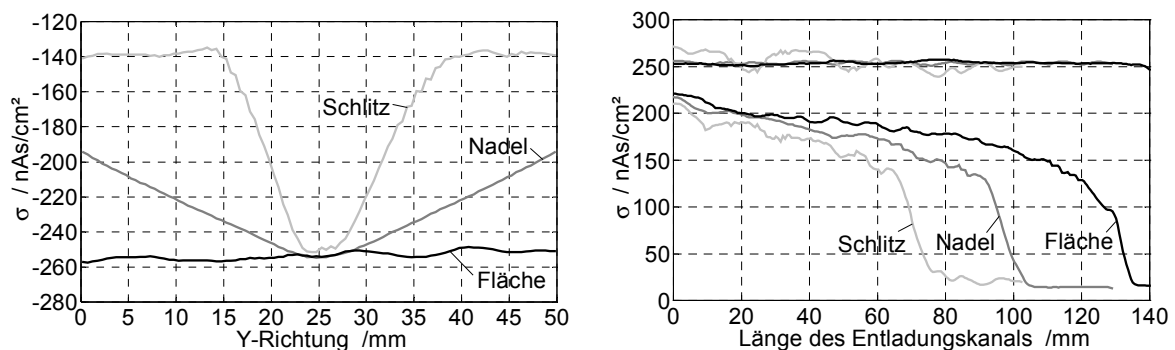


Bild 11: a) Ladungsprofile, b) Kanallänge bei Variation des Ladungsprofils der aufgeladenen Linie

Bei der Betrachtung der Kurven kann man feststellen, dass die Entladungskanäle bei größerer Breite des Aufladungsprofils länger werden. Der Abfall der Ladungsmenge entlang des Kanals wird im selben Maße flacher. Dies läßt die Schlussfolgerung zu, dass der richtige Parameter, der die Entwicklung des Gleitentladungskanals bestimmt, nicht nur der Ladungsbetrag ist, sondern eine Kombination aus Ladungsbetrag und Breite der Aufladung. Um dies zu zeigen sind in Bild 12 für zwei Beispiele Messungen mit Linien- und Flächenaufladung gegenübergestellt, bei denen der Entladungskanal gleiche Länge hat. Als Parameter ist der mittlere Aufladungsbetrag hinter jeder Kurve zu finden. Der Betrag der Aufladung bei dem Linienprofil ist größer als bei flächiger Aufladung. Die Breite der Aufladung des Linienprofils ist allerdings kleiner. Das heißt eine schmale, hochaufgeladene Linie entlädt sich gleich weit wie eine breitere, aber schwächer aufgeladene Linie.

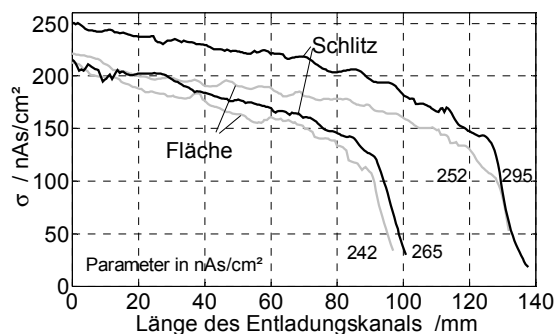


Bild 12: Vergleich der Entladung von Linien- und Flächenaufladung

Als Parameter ist der mittlere Aufladungsbetrag hinter jeder Kurve zu finden. Der Betrag der Aufladung bei dem Linienprofil ist größer als bei flächiger Aufladung. Die Breite der Aufladung des Linienprofils ist allerdings kleiner. Das heißt eine schmale, hochaufgeladene Linie entlädt sich gleich weit wie eine breitere, aber schwächer aufgeladene Linie.

5 Zusammenfassung

Der für die Beurteilung von Büschel- und Gleitentladungen wichtige Übergangsbereich von der einen zur anderen Entladungsform wurde anhand von PVC-Folien mit drei unterschiedlichen Dicken beispielhaft ermittelt.

Das in [7] vorgestellte einfache Modell für Büschelentladungen zur Bestimmung der umgesetzten Leistung bzw. Energie im Entladungskanal soll für Gleitentladungen erweitert werden. Die nötige genauere Untersuchung der Gleitentladungskanäle wurde anhand von PVC-Folien vorgestellt. In Zukunft werden weitere Messungen durchgeführt werden, auch mit anderen Materialien, um die Parameter für das gesuchte Modell bestimmen zu können.

6 Literaturverzeichnis

- [1] E. Heidelberg, "Entladungen an elektrostatisch aufgeladenen, nichtleitfähigen Metallbeschichtungen", *PTB-Mitteilungen*, vol. 6, pp. 440-444, 1970.
- [2] E. Heidelberg, "Generation of igniting brush discharges by charged layers on earthed conductors", in *static electrification*, pp. 147-155, Inst. Phys. Conf. Ser. No. 4, 1967.
- [3] K. G. Lövstrand, "The ignition power of brush discharges - experimental work on the critical charge density", *Journal of Electrostatics*, vol. 10, pp. 161-168, 1981.
- [4] N. Gibson, F. C. Lloyd, "Incendivity of discharges from electrostatically charged plastics", *Brit. J. Appl. Phys.*, vol. 16, pp. 1619-1631, 1965.
- [5] G. C. Lichtenberg, "Nova Methodo Naturam AC Motum Fluidi Electrici Investigandi", *Comment. Soc. Göttingen* vol. 8, Dec., pp. 65-79, 1778.
- [6] M. Toepler, "Über die physikalischen Grundgesetze der in der Isolatorentechnik auftretenden elektrischen Gleiterscheinungen", *Archiv für Elektrotechnik*, vol. 10, pp. 157-185, 1921.
- [7] L. Müller, K.Feser, R. Pfendtner, E.Fauser, "Experimental investigation of discharges for charged plastic or plastic-coated materials", *CEIDP 2001*, Kitchener, Canada.