

Die Untersuchung der Entladung elektrostatisch aufgeladener Kunststoffe

Dipl.-Ing. Lutz Müller

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Kurt Feser

Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik, Universität Stuttgart

1 Einleitung

Durch die Zunahme empfindlicher Elektroniken in Geräten und Sensoren ist die Überprüfung der EMV bezüglich elektrostatischer Entladungen (ESD) von besonderer Bedeutung. Infolge des zunehmenden Einsatzes von Kunststoffkomponenten wird hier die Störquelle "Entladung aufgeladener Kunststoffe" als ein Aspekt der ESD näher betrachtet. Von dieser Störquelle können schnelle transiente elektromagnetische Felder oder direkt Ströme in die Elektronik eingekoppelt werden. Eine weitere Gefahr ist die mögliche Zündung bzw. Verpuffung von Gasgemischen, hervorgerufen durch den Entladungsfunken. Für die Beurteilung der Gefährdung ist die transportierte Ladung, die entladene Fläche und der Energieinhalt von besonderer Bedeutung.

In den letzten Jahrzehnten wurden solche Büschelentladungen bezüglich der Entflammung von Luft-Gasgemischen schon gut untersucht, z.B. von Heidelberg [1], [2], Lövstrand [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 wurden in [7] vorgestellt.

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 untersucht, weil bei diesen durch die höhere mögliche Aufladung auch eine höhere Gefährdung möglich ist. Außerdem wurden nur negative Aufladungen betrachtet, weil diese nach [8] zu längeren Gleitentladungskanälen führen, und somit ebenfalls ein höheres Gefährdungspotential besitzen.

3 Übersicht zu den Messungen

In diesem Beitrag soll eine Übersicht über die durchgeführten experimentellen Untersuchungen der Entladung aufgeladener Kunststoffplatten vorgestellt werden. Die Prüflinge werden mit Hilfe der Koronaentladung möglichst gleichmäßig aufgeladen. Im Anschluss wird die entstehende Ladungsverteilung auf der Oberfläche mit Hilfe eines X-Y-Scansystems erfasst. Danach wird eine geerdete Elektrode der aufgeladenen Fläche angenähert, bis Entladungsvorgänge auftreten. Die veränderte Ladungsverteilung wird noch einmal ermittelt. Zusätzlich wird unter Benutzung eines Shunts der Entladungs-Stromimpuls gemessen (siehe auch [7]).

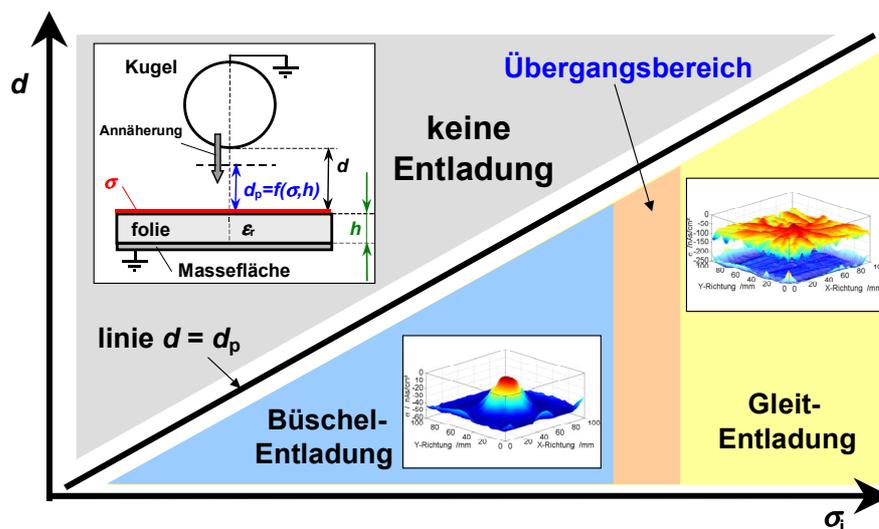


Bild 1: Einteilung der Entladungsarten

Die wichtigsten untersuchten Parameter sind die Oberflächenladungsdichte bzw. das Oberflächenpotential, der Entladungsabstand und das verwendete Material sowie dessen Dicke. Abhängig von diesen Ausgangsgrößen können zwei Entladungsarten auftreten: die Büschelentladung und die Gleitentladung. Bei der Büschelentladung wird nur ein begrenzter Teil der Oberfläche um den Fußpunkt der Entladung herum entladen. Die Gleitentladung hingegen kann sich über wesentlich größere Bereiche erstrecken [10].

Mit den vor und nach der Entladung ermittelten Ladungsverteilungen auf der Oberfläche kann die transportierte Ladung und die sich entladende Fläche bestimmt

werden [12]. Dabei ergibt sich eine Darstellung, die die räumliche Entladung beschreibt, bei Bündelentladungen eine Art Kegel. Die transportierte Ladung kann zusätzlich über die gemessenen Stromimpulse berechnet werden.

Eine Einteilung der Entladungsarten in Verbindung mit den Parametern Ausgangsoberflächenladung σ_i (bzw. das entsprechende Ausgangsoberflächenpotential U_i) und Entladungsabstand d ist in Bild 1 zusehen. Der Paschenabstand d_p ist der Abstand, bei dem erstmalig eine Entladung möglich ist, weshalb für $d > d_p$ keine Entladung auftreten kann. Für geringe Aufladungswerte σ_i (oder U_i) entstehen Bündelentladungen. Wird der Wert von σ_i größer so können Gleitentladungen entstehen. Die Auswertung kann demzufolge in drei Teilaspekte aufgeteilt werden: die Betrachtung der Bündelentladung, die Betrachtung der Gleitentladung und die Betrachtung des Übergangsbereiches.

4 Bündelentladungen

Ausgehend von dem geometrischen Aufbau und den durchgeführten Messungen werden für den Bereich der Bündelentladungen Funktionen approximiert (siehe Bild 2). Diese Funktionen beschreiben den Entladungskegel $\sigma(r)$ und den Entladungsstrom $i(t)$ als Funktion der Ausgangsparameter ($h, d/d_p, \epsilon_r, U_i$). Aus diesen Funktionen kann die transportierte Ladung, entladene Fläche und umgesetzte Energie abgeleitet werden. Mit diesem System von approximierten Funktionen ist eine Abschätzung des Gefährdungspotentials ohne Messung möglich. Parallel hierzu wird mit Hilfe der Messungen ein Pspice-Modell entwickelt werden, welches ebenfalls die Bestimmung der umgesetzten Leistung bzw. Energie während der Entladung ermöglicht.

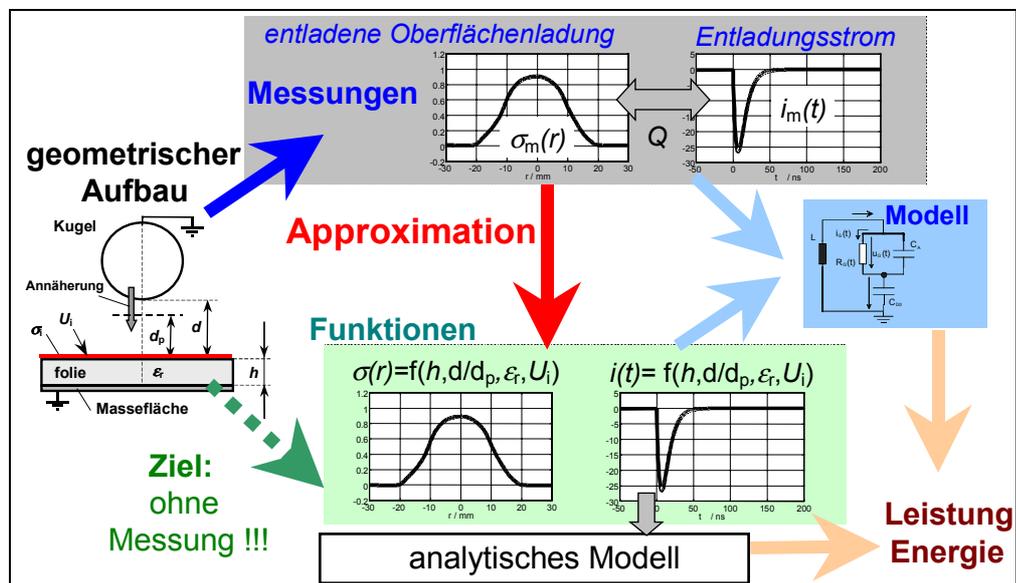


Bild 2: Vorgehensweise bei der Approximation der Bündelentladung

Das "analytische Modell" in Bild 2 benutzt $i(t)$ und das Funkengesetz (Rompe/Weizel) zur Ermittlung der umgesetzten Energie (1), wobei a die Funkenkonstante ist.

$$R_f(t) = \frac{d}{\sqrt{2a \cdot \int i(t)^2 dt}} \quad \Leftrightarrow \quad p(t) = R_f(t) \cdot i(t)^2 \quad \Leftrightarrow \quad e(t) = \int_0^t p(t) dt \quad (1)$$

Die Messungen beinhalten Variationen der vier Parameter in folgenden Bereichen:

Dicke der Folie h	0,1 mm – 2,0 mm
dielektrische Materialkonstante ε_r	2,0 – 3,7
normierter Entladeabstand d/d_p	0,1 – <1,0
Oberflächenpotential U_i	ca. 5 – 16 kV

In [12] wurden die Approximationsfunktionen für die entladene Oberflächenladung $\sigma(r)$ (2) und die Stromkurve $i(t)$ (3) bereits vorgestellt:

$$\sigma(r) = \sigma_i \cdot p_1 \cdot \left(1 - \frac{r^2}{p_2^2}\right)^2 \quad (2)$$

$$i(t) = i_1 \cdot \left(e^{-\frac{t}{t_2}} - e^{-\frac{t}{t_1}}\right) \quad \text{mit} \quad i_1 = f(i_0, t_1, t_2) \quad (3)$$

Die in diesen beiden Gleichungen vorhandenen Fit-Parameter p_1 und p_2 werden jetzt mit Hilfe der Messkurven approximiert. Für die entladene Oberflächenladung ergeben sich für p_1 und p_2 die Gleichungen (4) und (5). Damit ist $\sigma(r)$ durch die Ausgangsparameter beschreibbar ($h, d/d_p, \varepsilon_r, U_i$). Parameter p_1 ist ein Faktor und einheitenlos, p_2 hingegen stellt die untere Breite des Kegels dar und hat die Einheit mm.

$$p_1 = 1 - 0,2 \cdot (d/d_p)^{3,5} \quad (4)$$

$$p_2 = \left(29,4 - 22,6 \cdot d/d_p + 2,65 \varepsilon_r (d/d_p - 1) + 0,58 \frac{1}{\text{kV}} \cdot U_i - 3,9 \cdot 0,04^{\left(\frac{h}{\text{mm}} - 0,2\right)}\right) \cdot \text{mm} \quad (5)$$

Für die Stromkurve wurden zur Beschreibung die Parameter Anstiegszeitkonstante t_1 , maximale Stromamplitude i_0 und transportierte Ladung Q_t gewählt. Aus letzterem ist die Abfallzeitkonstante t_2 ermittelbar. Für Q_t sind in Bild 3 beispielhaft die Abhängigkeiten von den Ausgangsparametern ($h, d/d_p, \varepsilon_r, U_i$) zu sehen. Wegen der Vielzahl von Kombinationen der Ausgangsparameter im gesamten vierdimensionalen Parameterraum konnten nicht alle Möglichkeiten untersucht werden. Deshalb wurden die Messungen der unterschiedlichen Abhängigkeiten so durchgeführt, dass immer nur ein Parameter variiert wurde.

Fügt man die Einzelabhängigkeiten zusammen, so ergeben sich für die Parameter Q_t, t_1 und i_0 die Gleichungen (6), (7) und (8). Bei dem Zusammenfügen der Einzelabhängigkeiten wurde die Annahme gemacht, dass sich die untersuchten Einzelabhängigkeiten im gesamten Parameterbereich ähnlich verhalten. Dies wurde teilweise durch Stichprobenversuche bestätigt. Q_t (6) und i_0 (8) sind dabei wegen der Komplexität in 3 Teilen dargestellt. Damit ist $i(t)$ durch die Ausgangsparameter ($h, d/d_p, \varepsilon_r, U_i$) beschreibbar und mit Gleichung (1) kann nun die umgesetzte Energie abgeschätzt werden.

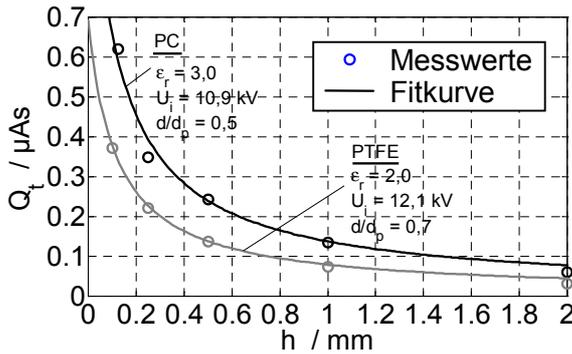
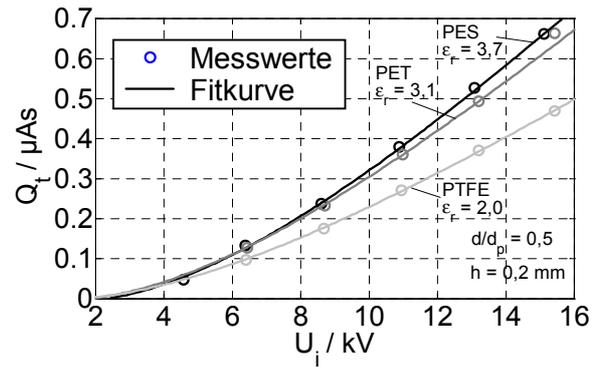
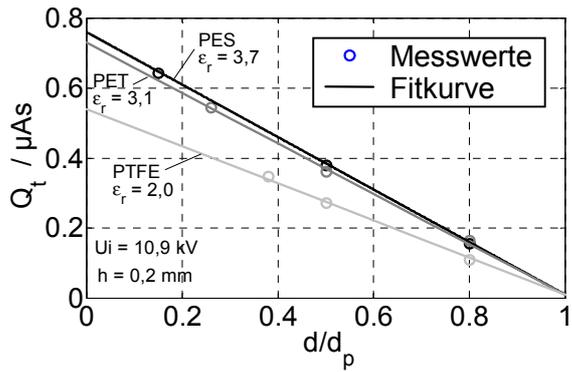


Bild 3: Parameter Q_t (entladene Ladungsmenge) in Abhängigkeit von d/d_p (oben links), U_i (oben rechts) und h (unten) jeweils für einige Materialien ϵ_r

$$\left. \begin{aligned} Q_{t1} &= (0,135\epsilon_r + 0,1) \cdot e^{\frac{U_i}{6,25\text{kV}}} - 0,135\epsilon_r - 0,1 + 0,065 \cdot (\epsilon_r - 1,5)^{0,28} \cdot \frac{U_i}{\text{kV}} \\ Q_{t2} &= Q_{t1} - (2 \cdot Q_{t1} - 8 \cdot 10^{-5} \cdot e^{\frac{U_i}{2\text{kV}}}) \cdot (d/d_p - 0,5) \\ Q_t &= \frac{Q_{t2}}{0,43} \cdot \frac{1 + 0,08 \cdot h/\text{mm}}{0,89 + 7,5 \cdot h/\text{mm}} \cdot \mu\text{As} \end{aligned} \right\} (6)$$

$$t_1 = 0,5\text{ns} + \epsilon_r \cdot \text{ns} + 6,4\text{ns} \cdot (d/d_p - 0,5) + 4\text{ns} \cdot e^{-5 \cdot \frac{h}{\text{mm}}} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} i_{01} &= (6\epsilon_r + 4,3) \cdot e^{\frac{U_i}{8\text{kV}}} - 6\epsilon_r - 4,3 + (0,58\epsilon_r + 0,59) \cdot \frac{U_i}{\text{kV}} \\ i_{02} &= \frac{i_{01}}{10,1} \cdot (17 \cdot e^{2,94 \cdot (d/d_p - 1)} - 17 - 46,5 \cdot (d/d_p - 1)) \\ i_0 &= \frac{i_{02}}{13,5} \cdot \frac{3 - 0,12 \cdot h/\text{mm}}{0,02 + h/\text{mm}} \cdot \text{A} \end{aligned} \right\} (8)$$

Die Gleichungen sind so aufgestellt worden, dass sich für die Parameter folgende Einheiten ergeben: für die transportierte Ladung Q_t μAs , für die Anstiegszeitkonstante t_1 ns und für die maximale Stromamplitude i_0 A.

5 Übergang von Büschel- zu Gleitentladungen

Eine wichtige Größe für den Wechsel der Entladungsform ist der Wert des Oberflächenpotentials, bei dem die Büschel- in die Gleitentladungen übergeht. Mit Kenntnis dieses Grenzaufladungspotentials U_g kann man abschätzen bzw. beeinflussen, ob bei der entsprechenden Anwendung eine Gleitentladung mit wesentlich höherem Gefährdungspotential auftreten kann oder nicht.

Die Voraussetzung für das Entstehen von Gleitentladungs-Kanälen ist ein kritischer Wert der tangentialen elektrischen Feldstärke E_t auf der Oberfläche des Prüflings. Durch eine vorherige Büschelentladung, die einen lokalen Bereich der Oberfläche entlädt, entsteht beispielsweise zwischen dem schon entladenen Bereich und dem noch aufgeladenen Bereich eine Potentialdifferenz und somit eine tangentielle Feldstärke. In [11] wurde dieser Aspekt näher untersucht. Dazu wurde bei Büschelentladungen in Abhängigkeit von dem Oberflächenpotential U_i sowie in Abhängigkeit von d/d_p E_t ermittelt. Für steigendes U_i steigt auch E_t . Für fallenden normierten Entladeabstand d/d_p wird E_t etwas kleiner. Verfolgt man die Tendenz von E_t bis zum Übergang, so kann man eine kritische tangentielle Feldstärke E_{tmax} ermitteln. Für PVC wurde E_{tmax} von ca. 15 kV gefunden.

Zur Ermittlung einer worst case Formel für das Grenzaufladungs-Potentials U_g wurden Messungen mit Folien mit verschiedenem ϵ_r und einigen Dicken h sowie unterschiedlichen Feuchten h_r durchgeführt. Dazu wurden die Folien schrittweise stärker aufgeladen (Schrittweite 0.5 kV) und im Anschluss entladen. Als Kriterium für den Beginn einer Gleitentladung wurde das Aufladungspotential gewählt, bei dem erstmals sichtbare Gleitentladungskanäle länger als 10 mm auftraten.

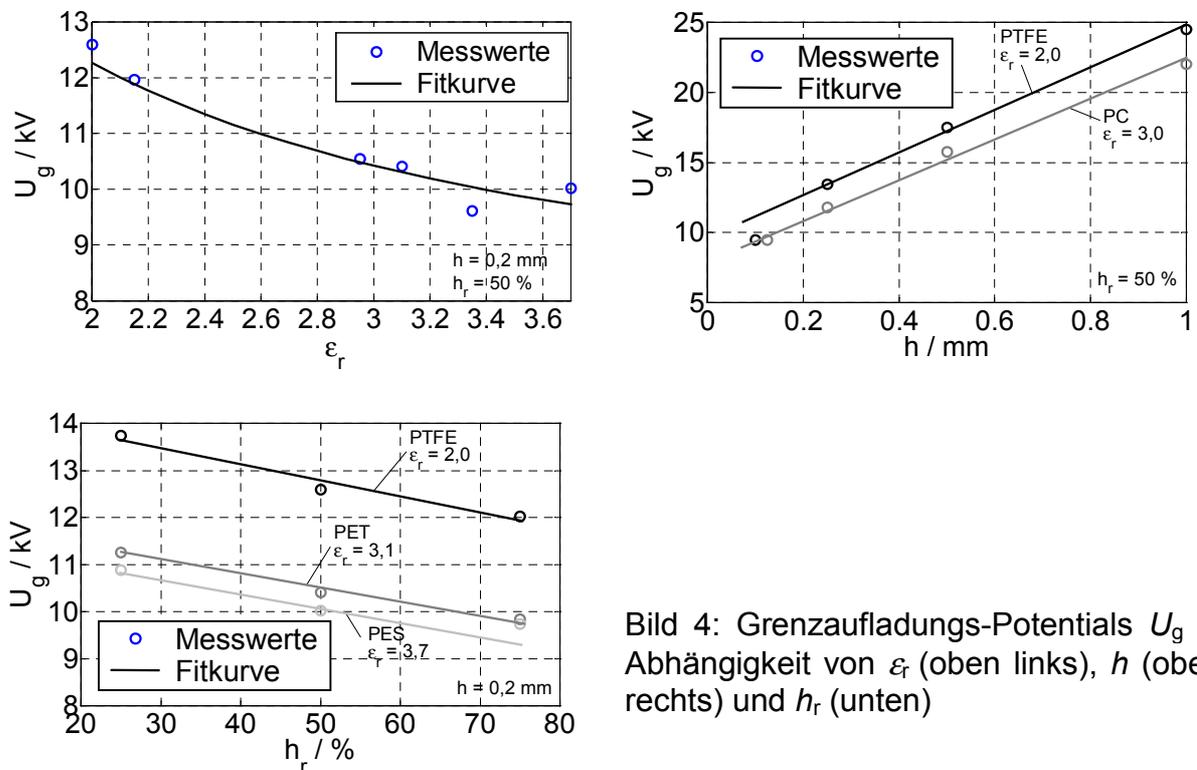


Bild 4: Grenzaufladungs-Potentials U_g in Abhängigkeit von ϵ_r (oben links), h (oben rechts) und h_r (unten)

In Bild 4 ist die Grenzaufladung U_g für die 3 Parameter ϵ_r , h und h_r dargestellt. Dabei stellen die durchgezogenen Linien eine Approximation der Messwerte dar. Fügt man alle Fitfunktion zusammen ergibt sich folgende Näherungsformel für die Grenzaufladung U_g :

$$U_g = 5,1\text{kV} + \frac{11\text{kV}}{\epsilon_r} - 2,5\text{kV} \cdot \frac{h_r}{100} + 15\text{kV} \cdot \frac{h}{\text{mm}} \quad (9)$$

Diese Formel beschreibt die Grenzaufladung U_g in kV in Abhängigkeit von den Parametern relative Dielektrizitätskonstante ϵ_r der Dicke h in mm und der relativen Feuchte h_r in %.

6 Gleitentladung

Zum besseren Verständnis wurden in [9] als erstes einzelne Entladungskanäle untersucht. Die Ergebnisse zeigten folgendes:

- unabhängig von der Länge der Aufladung gibt es eine begrenzende Länge für die Ausdehnung von Gleitentladungskanälen
- ein größerer Wert der Aufladung führt zu längeren Entladungskanälen (nahezu lineare Vergrößerung) sowie eine größere Breite des Aufladungsprofils führt ebenfalls zu längeren Entladungskanälen
- eine Kombination der Breite des Aufladungsprofils und des Betrages der Aufladung bestimmen somit die Länge des Entladungskanals
- die Feldstärke E_t ist Kriterium für die Ausbreitung von Gleitentladungskanälen

Die Untersuchung der zeitlichen Entwicklung der Gleitentladungskanäle zeigte, daß die einzelnen Entladungskanäle zueinander zu verschiedenen Zeitpunkten starten. Die Zeitdifferenz kann einige ns bis über hundert ns groß sein. Schaut man sich die zeitliche Entwicklung von einem Kanal [10] an, so bewegt sich dieser näherungsweise gleichmäßig vom Entladungspunkt weg. Der Kanal kann sich aber auch verzweigen, wobei diese Zweige im Vergleich zum Hauptkanal kurz sind. Diese Abzweigung kann auch zwischen Entladungspunkt und Kopf der Hauptkanals stattfinden nachdem der Kopf des Hauptkanal bereits weiter fortgeschritten ist.

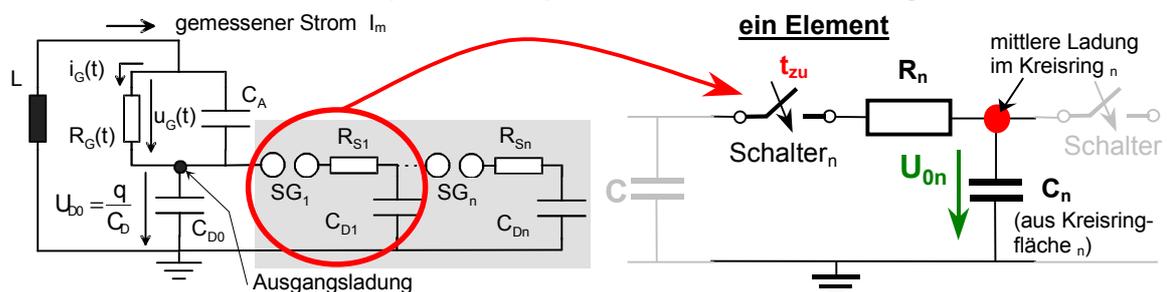


Bild 5: Modell für die Gleitentladung

Wie in unter Punkt 5 beschrieben, erfolgt ab einer kritischen tangentialen Feldstärke E_{tmax} die Bildung von Gleitentladungskanälen auf der Oberfläche. Dies erfolgt

statistisch verteilt und leicht zeitlich versetzt, sodass man sich eine Vielzahl von kleineren Entladungen vorstellen kann, die aufsummiert den gemessenen Gesamtstrom ergeben [10]. Da eine direkte Beschreibung dieses statistischen Vorganges zu komplex ist, wurde die Beschreibung über die entladene mittlere Oberflächenladung innerhalb eines Kreisringes um den Entladungspunkt eingeführt [10]. Das daraus entstehende Modell ist in Bild 5 zu sehen. Ein Einzel-Element stellt einen Kreisring dar.

7 Zusammenfassung

Die für die Büschelentladung vorgestellten Formeln ermöglichen jetzt, ohne weitere Messung, die Abschätzung der entladenen Oberflächenladung sowie des Entladestromes in Abhängigkeit von den geometrischen Ausgangsparametern. Die Formeln wurden durch die Approximation von Messungen ermittelt.

Gleitentladungen können ab einem bestimmten Grenzaufladungs-Potential auftreten. Die Formel, welche dies beschreibt, wurde hier präsentiert. Für die Entladungsform der Gleitentladung wurden die bisher untersuchten Teilaspekte zusammengestellt. Diese beinhalten die Charakterisierung der Gleitentladung, die Betrachtung einzelner Entladungskanäle, die Untersuchung der zeitlichen Entwicklung der Gleitentladungskanäle, die Betrachtung der tangentialen Feldstärke sowie eine Näherung, solch eine Gleitentladung zu modellieren.

8 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.
- [8] E. Heidelberg, "Proceedings of the 1st International Conference on Static Electricity", Vienna 1970, p. 351
- [9] L. Müller, K. Feser, R. Pfendtner, E. Fauser, "Experimentelle Untersuchung der Entladung elektrostatisch aufgeladener Kunststoffe", *EMV 2002*, Düsseldorf, 2002
- [10] L. Müller, K. Feser "Experimental investigation and modeling of surface discharges for charged dielectric materials", *EMC 2002*, Sorrento, Italy, 2002
- [11] L. Müller, K. Feser "Experimental and theoretical investigation of surface discharges for charged dielectric materials", *CEIDP 2002*, Cancun, Mexico, 2002
- [12] L. Müller, K. Feser, E. Fauser, "Experimental investigation and modeling of brush discharges for charged dielectric materials", *EMC Zurich' 03*, Zurich, 2003