

**Untersuchung und Modellierung
elektrostatischer Entladungen (ESD)
von elektrisch isolierenden Oberflächen**

Von der Fakultät
Informatik, Elektrotechnik und Informationstechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von
Lutz Müller
aus Bautzen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. K. Feser
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. F. M. Landstorfer

Tag der mündlichen Prüfung:
01.06.2004

Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik
der Universität Stuttgart

2004

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik der Universität Stuttgart.

Dem Leiter des Instituts, Herrn Professor Dr.-Ing. Dr. h. c. K. Feser, danke ich für die Anregung zu dieser Arbeit und sein stetiges Interesse an deren Fortgang.

Herrn Professor Dr.-Ing. habil. F. M. Landstorfer danke ich für sein Interesse an dieser Arbeit und die Übernahme des Mitberichts.

Den Herren E. Fauser, Dr. M. Sinner-Hettenbach und Dr. K. Wyrwa (Firma Bosch), sowie allen weiteren Mitarbeitern in der Abteilung FV/FLO danke ich für ihr wissenschaftliches Interesse an dem Thema dieser Arbeit.

Meinen Kollegen Ekard Großmann, Jochen Christian und Martin Lenz gilt mein besonderer Dank für Ihre Hilfsbereitschaft und Diskussionsfreudigkeit. Insbesondere möchte ich meinem Zimmerkollegen Christoph Keller danken, mit dem ich so manche Diskussion geführt habe, die weit über das eigentliche Thema der Arbeit hinausging. Ein besonderer Dank gilt auch dem Werkstattpersonal, dessen Mithilfe bei mechanischen Arbeiten zum Gelingen zahlreicher Laboraufbauten beigetragen hat. Allen nicht namentlich genannten Mitarbeitern möchte ich ebenfalls für ihre Einsatzbereitschaft und das angenehme Betriebsklima danken.

Stuttgart, den 22.01.2004

A handwritten signature in dark ink, appearing to read "Dirk Hütle". The signature is written in a cursive, slightly slanted style.

"Jede Ursache hat ihre Wirkung; jede Wirkung ihre Ursache; alles geschieht gesetzmäßig, Zufall ist nur ein Name für ein unbekanntes Gesetz. Es gibt viele Ebenen der Ursächlichkeit, aber nichts entgeht dem Gesetz."

"Kybalion"

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen, Formelzeichen	VII
Zusammenfassung.....	XI
Abstract.....	XIII
1 Einführung und Ziel der Arbeit.....	1
1.1 Übersicht	1
1.2 Stand der Technik	3
1.3 Ziel der Arbeit	6
2 Grundlagen	8
2.1 Entladungsformen	8
2.1.1 Funkenentladung.....	8
2.1.2 Büschelentladung.....	8
2.1.3 Koronaentladung	9
2.1.4 Gleitstielbüschel-Entladung	9
2.2 Zündfähigkeit.....	10
2.2.1 Zündfähigkeit von Funkenentladungen.....	11
2.2.2 Zündfähigkeit von Büschelentladungen.....	11
2.2.3 Zündfähigkeit von Koronaentladungen.....	12
2.2.4 Zündfähigkeit von Gleitstielbüschel-Entladungen.....	12
2.3 Entladung unter den Bedingungen der ESD.....	12
2.3.1 Entladungsanordnungen und Ausnutzungsfaktor nach Schwaiger.....	13
2.3.2 Phasen der Entladungsentwicklung.....	14
2.3.3 Funkengesetze	15
2.3.4 Paschenkurve und Paschengesetz	16
2.4 Aufladung von isolierten Oberflächen.....	17
2.4.1 Influenz.....	18
2.4.2 Einfach-Ladungsschicht	18
2.4.3 Doppel-Ladungsschicht.....	19
2.4.4 Flächenladungsdichte.....	19

2.5	Entladungsabstand	20
2.5.1	Annäherung der Elektrode	20
2.5.2	Berechnung von d_p	21
2.5.3	Vergleich und Verifizierung mit Messungen von d_p	23
2.5.4	Einteilung der Entladungsarten	24
2.6	Ladungsbestimmung	25
2.7	Energiebestimmung	25
3	Versuchstechnik	27
3.1	Messaufbau	27
3.1.1	Gesamtaufbau der Messtechnik	27
3.1.2	Prüflinge	31
3.1.3	Aufladung	32
3.1.4	Ermittlung der Potentialverteilung	33
3.1.5	Strommessung	34
3.2	Messablauf	36
3.3	Voruntersuchungen zur Aufladung	37
3.3.1	Gleichmäßigkeit der Aufladung	37
3.3.2	Reproduzierbarkeit der Aufladung	38
3.3.3	Zeitliche Änderung der Aufladung	38
4	Büschelentladung	40
4.1	Charakterisierung der Versuchsergebnisse	41
4.1.1	Entladene Flächenladungsdichte-Verteilung	41
4.1.2	Einfluss der Art der Annäherung	42
4.1.3	Einfluss des normierten Entladungsabstandes d/d_p	43
4.1.4	Einfluss bei Schichtung der Folien	45
4.2	Auswertung der Versuchsergebnisse	46
4.2.1	Approximation der Flächenladungsdichte-Verteilung	46
4.2.2	Approximation des Entladungsstrom-Impulses	47
4.2.3	Parameterstudien	50
4.2.4	Formeln zur Beschreibung der Funktionsparameter	54
4.3	Modell	57

4.3.1	Herleitung des Ersatzschaltbildes	57
4.3.2	Vereinfachungen des Ersatzschaltbildes	58
4.4	Vergleich von Modell und Messung anhand der umgesetzten Energie	61
5	Gleitentladung	65
5.1	Charakterisierung der Versuchsergebnisse	65
5.1.1	Initiierung einer Gleitentladung	66
5.1.2	Zeit zwischen Büschel- und Gleitentladung	66
5.1.3	Form des Entladungsstromes der Gleitentladung	67
5.1.4	Einfluss des normierten Entladungsabstandes d/d_p	68
5.1.5	Gegenüberstellung der gemessenen Flächenladungsdichte und fotografierter Lichterscheinung	69
5.2	Übergang von Büschel- zu Gleitentladung	70
5.2.1	Einfluss des normierten Entladungsabstandes d/d_p	70
5.2.2	Tangentiale Feldstärke	71
5.2.3	Grenzaufladung	74
5.3	Betrachtung eines einzelnen Gleitentladungs-Kanales	75
5.3.1	Vorbetrachtungen	76
5.3.2	Kanalbetrachtung bei Variation der Länge des Kanals	77
5.3.3	Kanalbetrachtung bei Variation der Flächenladungsdichte σ_l	78
5.3.4	Kanalbetrachtung bei Variation des Profils der Flächenladungsdichte	79
5.4	Zeitlicher Ablauf der Gleitentladung	80
5.4.1	Entladungsentwicklung entlang eines Entladungskanales	81
5.4.2	Entladungsentwicklung der Kanäle zueinander	83
5.5	Kenngrößen der Gleitentladung	86
5.5.1	Mittlere entladene Flächenladungsdichte	86
5.5.2	Approximation der mittleren entladenen Flächenladungsdichte $\sigma_{e,m}$..	87
5.5.3	Mittlerer Radius der entladenen Fläche	88
5.5.4	Gesamte entladene Ladungsmenge	89
5.6	Modell	90
5.6.1	Radiale Kanalentwicklung	91
5.6.2	Unterschiedliche Startzeiten der einzelnen Kanäle	93
5.6.3	Kombination der zwei Modelle	97

5.7 Vergleich von Modell und Messung anhand der umgesetzten Energie	97
6 Ausblick.....	100
7 Anhang	102
8 Literatur	115

Abkürzungen, Formelzeichen

Allgemeine mathematische Bezeichnungen und Schreibweisen:

Δ	Abweichung
$\ln()$	Logarithmus zur Basiszahl e

Formelzeichen:

A	Fläche
a	Funkenkonstante nach Rompe/Weizel (Einheit: $\text{cm}^2/\text{V}^2\text{s}$)
A_e	entladene Fläche
A_{KR}	Fläche eines Kreisringes
C	Kapazität
C_D, C_L	Kapazität im Dielektrikum, Luftkapazität
$C_{D,e}$	Kapazität, die mit der entladenen Ladungsmenge Q_e aufgeladen ist
d	Abstand der Kugel von der Oberfläche während der Entladung
D	Abstand vom Mittelpunkt der Entladungselektrode zur Oberfläche
d/d_p	auf d_p normierter Entladungsabstand
d_p	Abstand der Kugel von der Oberfläche, für welchen nach dem Paschengesetz erstmalig die Entladungsbedingung erfüllt ist
E	elektrische Feldstärke
E_d	elektrische Durchbruch-Feldstärke nach Paschen
E_{hom}	elektrische Feldstärke im homogenen Feld
E_{iso}	elektrische Feldstärke im Isolator
E_s	elektrische Feldstärke am Kugelscheitel
E_t	tangentiale elektrische Feldstärke
f	Frequenz
f_g	Grenzfrequenz
h	Dicke der isolierenden Schicht (Foliedicke)
i_0	Spitzenwert des Stromimpulses
i_1	Faktor für die Größe des Maximums des doppelt exponentiellen Impulses
$i_e(t)$	Entladungsstrom
$i_m(t)$	gemessener Entladungsstrom

$i_t(t)$	typischer Entladungstrom-Impuls
L	Induktivität
n_{KR}, n_{Kanal}	Anzahl Kreisringelemente, Anzahl Entladungskanäle
p	Druck
p_1, p_2	Parameter zur Aproximation des Entladungskegels der Büschelentladung (Maximum des Kegels, Breite des Kegels)
$p_u(t)$	umgesetzte Leistung im Funkenkanal
Q	Ladung
Q_e	entladene Ladungsmenge
$Q_{e,\sigma}$	entladene Flächenladungsdichte aus σ bestimmt
$Q_{e,i}$	entladene Flächenladungsdichte aus Entladungsstrom bestimmt
$Q_{e,mess}$	entladene Flächenladungsdichte aus Messung bestimmt
$Q_{e,t}$	entladene Flächenladungsdichte im Teilbereich
r	Radius
r_0	Radius bei dem die entladene Flächenladungsdichte Null wird
r_e	Radius der entladenen Kreisfläche
R_F	Funkenwiderstand
r_k	Radius, bei dem der Knickpunkt der beiden Approximationsgeraden liegt, welche die entladene Flächenladungsdichte beschreiben
r_{kug}	Radius der Entladungselektrode
R_L	Längswiderstand
R_S	Serien-Widerstand
t	Zeit
t_1, t_2	Parameter zur Aproximation des Entladungsstrom-Impulses, Konstanten für Anstieg und Abfall des doppelt exponentiellen Impulses
t_L, t_F, t_S	Lawinenaufbauzeit, Funkenaufbauzeit, statistische Streuzeit
t_{max}	Zeitpunkt zu dem der Spitzenwert des doppelt exponentiellen Impulses erreicht ist
$t_{\ddot{u}}$	Übergangszeit des Schalters in PSpice vom hohen zum niedrigen Widerstandswert
t_{zu}	Zuschaltzeit der Schalter im PSpice-Modell
U	Spannung
U_d	Durchschlagsspannung
U_e	Oberflächenpotential nach der Entladung

U_g	Grenzoberflächenpotential, ab welchem Gleitentladungen möglich sind
U_i	Oberflächenpotential vor der Entladung
W_u	umgesetzte Energie im Funkenkanal
W_z	Zündenergie (Kenngröße von Gasen)
x, y, z	Ortskoordinaten
Δt_{Start}	Differenz der Startzeiten der einzelnen Entladungskanäle
ε_r	relative Dielektrizitätszahl
γ	Rückwirkungskoeffizient
η	Ausnutzungsfaktor nach Schwaiger
$\lambda(r)$	räumliche Impulsantwort
$\sigma'_{e,m}$	approximierte mittlere entladene Flächenladungsdichte
$\sigma_{e,m}$	mittlere entladene Flächenladungsdichte
$\sigma(r)$	Flächenladungsdichte
$\sigma_e(r)$	entladene Flächenladungsdichte
$\sigma_{e,n}$	auf das Maximum normierte entladene Flächenladungsdichte
$\sigma_i(r), \sigma_a(r)$	Flächenladungsdichte vor, nach der Entladung
$\sigma_m(r)$	gemessene Flächenladungsdichte

Konstanten:

e	Eulersche Zahl ($\approx 2,7182818$)
ε_0	absolute Dielektrizitätskonstante ($\approx 8,85418782 \cdot 10^{-12}$ As/Vm)
π	Kreiszahl ($\approx 3,141592654\dots$)

Abkürzungen:

μC	Mikrocontroller
ASA	Angabe der Filmempfindlichkeit (engl. American Standards Association)
A/D	Analog-Digital-Umsetzer
ASA, ISO	Angabe der Empfindlichkeit von Fotomaterial
dB	Dezibel, Verhältniseinheit
DIN	Deutsches Institut für Normung
EMV	elektromagnetische Verträglichkeit
EN	Europäische Norm
ESD	elektrostatische Entladung (engl. electro static discharge)

ESV	elektrostatisches Voltmeter
ETFE	Ethylen-Tetrafluorethylen
FlexPDE	Simulationsprogramm auf Basis der finiten Elemente
GS/s	Einheit für Abtastfrequenz ($=10^6$ Abtastwerte pro Sekunde)
IEC	Internationale Organisation für Standardisierung im Bereich der Elektrotechnik (engl. International Electrotechnical Commission)
IEC-Bus	Von der IEC genormtes Bus zur Gerätesteuerung und Datenübertragung
Lab Windows	Softwarepaket zur Programmierung in C
PC	Polycarbonat
PC	Personal Computer
PES	Polyethersulfon
PET	Polyethylenterephthalat
PP	Polypropylen
PSpice	Programm zur Schaltungs-Simulation
PTFE	Polytetrafluorethylen
PVC	Polyvinylchlorid
RS232	serielle Schnittstelle am Personal Computer
Shunt	hochgenauer Widerstand zur Strommessung
UPVC	unplastifiziertes Polyvinylchlorid
UV	ultraviolett

Zusammenfassung

Durch den zunehmenden Einsatz von Kunststoffen beziehungsweise kunststoffbeschichteten Materialien treten in der Praxis verschiedene Probleme durch die Auf- und Entladung dieser Isolierstoffe auf. Zwischen der aufgeladenen Oberfläche und geerdeten Objekten, die sich in der Nähe befinden oder angenähert werden, können elektrostatischen Entladungen (ESD) stattfinden. Diese führen einerseits zu einer ungewollten Beeinflussung empfindlicher Elektronik in Geräten und Sensoren und zum anderen stellen diese impulsförmigen Entladungen eine Gefahr der Entzündung von Gasgemischen dar.

Die Auf- und Entladung von Isolierstoff-Oberflächen ist abhängig von den klimatischen Umgebungsbedingungen, wie relativer Luftfeuchtigkeit und Temperatur. Deshalb wurde der gesamte entworfene Messaufbau in einer Klimakammer untergebracht. Die untersuchten Ausgangsparameter sind die Flächenladungsdichte bzw. das Oberflächenpotential, der Entladungsabstand und das verwendete Material sowie dessen Dicke. Es wurde von einer ebenen und sauberen Anordnung der aufgeladenen Fläche ausgegangen. Auf der Rückseite stehen die Isolierstoffe in direktem Kontakt mit einer geerdeten leitfähigen Platte, wodurch um Größenordnungen höhere Flächenladungsdichten möglich sind.

Abhängig von den Ausgangsparametern können zwei Entladungsarten auftreten, die Büschel- und die Gleitstielbüschel-Entladung. Mit den vor und nach der Entladung gemessenen Flächenladungsdichte-Verteilungen auf der Oberfläche kann die sich entladende Fläche und die entladene Ladungsmenge bestimmt werden. Bei der Büschelentladung wird nur ein begrenzter Teil der Oberfläche entladen. Die entladene Ladungsmenge in einer dreidimensionalen Darstellung bildet die Form eines Kegels, mit dem Fußpunkt der Entladung im Zentrum. Die Büschelentladung kann bei höherem Aufladungspotential eine Gleitstielbüschel-Entladung einleiten, bei der viele Entladungskanäle auf der Oberfläche entstehen, die sich radial vom Entladungspunkt fortbewegen, verzweigen und somit eine große Fläche entladen. Diese Darstellung wird auch als Lichtenbergfigur bezeichnet. Durch die wesentlich größere entladene Fläche als bei der Büschelentladung, ist die entladene Ladungsmenge und damit die im Funkenkanal umgesetzte Energie bei der Gleitstielbüschel-Entladung um Größenordnungen größer. Die entladene Ladungsmenge sowie die umgesetzte Energie können mit dem gemessenen Entladungsstrom-Impuls berechnet werden.

Ein für die Praxis wichtiger Wert ist der Betrag des Oberflächenpotentials, bei dem die Büschel- in die Gleitstielbüschel-Entladung übergeht. Dieser wurde in Abhängigkeit von dem Material und dessen Dicke ermittelt und durch eine Funktion approximiert. Mit Kenntnis dieses Grenzaufladungs-Potentials kann man abschätzen, ob eine Gleitstielbüschel-Entladung, die ein wesentlich höheres Gefährdungspotential als die Büschelentladung aufweist, auftreten kann oder nicht.

Für den Bereich der Büschelentladungen wurden, ausgehend von den durchgeführten Messungen, Funktionen approximiert, welche den Entladungskegel und den Entladungsstrom-Impuls als Funktion der Ausgangsparameter beschreiben. Auch wenn aus einer Reihe von Messbeispielen, die zu den angegebenen Beschreibungsformeln führten, keine Allgemeingültigkeit abgeleitet werden kann, so sind die Approximationsformeln in der Praxis doch ein gutes Mittel, um schnell und ohne Messung die sich entladende Fläche, die dazugehörige entladene Ladungsmenge und die zu erwartende umgesetzte Energie im Funkenkanal abzuschätzen. Parallel hierzu wurde ein PSpice-Modell entwickelt, welches ebenfalls die Bestimmung der umgesetzten Leistung bzw. Energie während der Entladung ermöglicht.

Im Gegensatz zu den Untersuchungen bei Büschelentladungen, bei denen Parameterstudien für einige Parameter durchgeführt wurden, ist bei der Gleitstielbüschel-Entladung das prinzipielle Verhalten am Beispielmateriale PVC in Abhängigkeit vom Parameter Flächenladungsdichte untersucht worden. Anhand von Messungen an einem Kanal und der Betrachtung der zeitlichen Ausbreitung der Entladungskanäle wurden Kenngrößen für die Gleitentladung abgeleitet. Diese sind die mittlere entladene Flächenladungsdichte, der mittlere Radius der entladenen Fläche und die gesamte entladene Ladungsmenge. Die Abhängigkeit dieser Größen vom Parameter Flächenladungsdichte wurde ermittelt und mit approximierten Funktionen angegeben. Mit diesen Vorkenntnissen wurde ein einfaches Modell abgeleitet, welches die Bestimmung des Entladungsstromes und damit die Abschätzung der im Funkenkanal umgesetzten Energie ermöglicht. Die radiale Entwicklung der Entladungskanäle und die Startzeiten der einzelnen Kanäle sind statistisch auftretende Größen, die die Form des Stromimpulses erheblich beeinflussen. Die Voraussage der genauen Form des Stromimpulses und damit der umgesetzten Energie einer speziellen Messung ist deshalb nicht möglich. Für eine Abschätzung der maximal möglichen umgesetzten Energie ist das Modell jedoch gut geeignet.

Abstract

Due to the increasing use of plastics or plastic-coated materials different kinds of problems, like charging and discharging, can occur. Insulating surfaces are considerably charged by material separation, flowing liquids or electrical fields. For this reason discharges can develop between the charged surface and a near grounded conductive object. These transient gas discharges discharge the insulating surface in a locally limited surface area. The value of the area of the discharged surface is dependent on some physical parameters. This value define the value of the transported charge and consequently the value of the dissipated power and energy in the discharge channel.

On the one hand, this electrostatic discharges (ESD) can influence sensitive devices and systems. On the other hand, these discharges represent a risk to generate an ignition of gas-air mixtures.

In this work, the specific aspect of the ESD, *the discharge of charged insulating surfaces* is investigated in detail. Two kinds of discharges can appear depending on the value of the surface charge density, the brush discharge and the surface discharge. For the investigation of these discharges, a measurement set-up was designed. With this measurement set-up, the surface charge density before and after the discharge and the discharge current can be acquired. The measured discharged charge density and the measured discharge current are analyzed for several physical parameters. For the evaluation of the ESD danger potential an easy model and an estimation of the discharge phenomena of insulating materials are derived. A criterion of the evaluation of the danger potential is the dissipated power or the energy during the discharge, respectively.

Measurement setup

The charging and discharging of insulating materials depend on the climatic conditions, like the relative humidity and the temperature. Therefore, the experimental arrangement is set up in a climatic chamber for constant climatic conditions. The conditions for all measurements are 25 % to 30 % of relative humidity and 21 °C of temperature.

All components are controlled by a PC using a program written in the computer language C. The test object and the probes are moved by a scanning system,

consisting of three linear guides, driven by three stepping motors. The test object is situated on the x-axis and the probe of the electrostatic voltmeter is situated on the y-axis. With this arrangement a two-dimensional recording of the charge distribution is possible. The x-y-coordinates are determined by the pulses of the stepping motor.

The test objects, plates and foils, can be charged using the corona discharge. Therefore, high voltage, provided by a DC-high-voltage-generator, is connected to a line of corona needles. These needles are shifted over the complete surface in a distance of 5 mm, producing an uniform distribution of the surface charge.

The surface charge density distribution is calculated from the potential on the test surface, which can be measured using an electrostatic voltmeter. When the scan is completed, a grounded electrode is moved step by step or continuously in z-direction to the charged surface until a discharge occurs. The pulse of the discharge current is measured by a shunt using a 1 GHz digital oscilloscope. Then, the new charge distribution is acquired.

Finally, the measured data are analyzed. With the acquired charge distribution values before and after the discharge the transported charge and the area of the discharged surface can be calculated. Additionally, the transported charge can be determined from the current pulse.

The theoretical maximum value of the surface charge density is 2.7 nC/cm^2 for an one-sided charged layer. Due to a conductive layer on the back side the surface charge density can be much higher, because an electric double layer arises. Due to the higher charge density a higher danger potential is possible. Therefore, only this configuration is investigated. Furthermore, only negative surface charge density have been studied, because this charging has a higher danger potential.

Characterization of the brush discharge

Between a charged insulating surface and a near grounded conductive object with a radius of curvature of some millimeter a brush discharge can occur. Brush discharges depend on some physical parameters and occur especially for a lower value of the surface charge density. Here, a limited area around the discharge point is discharged. The difference between the measured charge density before and after the discharge is the *discharged charge density*. In a three-dimensional

view, this charge density has got the shape of a cone. The discharge point corresponds to the peak of the cone.

Parameter studies and approximation of the brush discharge

For this discharge pattern, the measured discharged charge density and the measured discharge current were investigated by parameter studies for the basic parameters *initial charge density*, *dielectric constant*, *thickness of charged foil* and *discharge gap length*.

In a first step, the discharged surface charge density and the discharge current were approximated. These functions depend on especially defined parameters. In the case of the discharged surface charge density these parameters are the *width* and the *maximum height* of the cone. For the discharge current, the parameters are the *maximum value of the pulse*, the *time constant of rise time* and the value of *the transported charge*.

In a second step, measurements were carried out in order to describe the especially defined parameters as a function of the basic parameters *initial charge density*, *dielectric constant*, *thickness of charged foil* and *discharge gap length*. Thus, the discharged surface charge density and the discharge current are described by the basic parameters.

By using the discharge current and the spark law of Rompe and Weizel, the dissipated power and the energy during the discharge can be calculated. Therefore, the estimation of the dissipated power and energy depending on the basic parameters and the evaluation of the danger potential is possible, without carrying out a measurement.

Modeling of the brush discharge

Parallel to the approximation of the brush discharge an easy PSpice model for the discharge phenomenon of insulating materials was developed. The basis therefore is the geometrical setup and the parameter studies on the discharged charge density and the measured discharge current. The setup consists of the insulating surface with a groundplane on the back side and a sphere, that is also connected to the ground potential. The insulating foil is represented by a capacitance. For the simulation, this capacitance is divided into several capacitances, which represent the different areas of the insulating surface. The spark gap is realized with a

switch. This element can be interpreted as a time varying resistance. The cable between the sphere and the back side of the insulating surface is taken into consideration by an inductance.

The values of these elements are determined using the already mentioned parameter studies with the discharged charge density and the measured discharge current. The results are equations, which described the values of the elements depending on the basic parameters. With this model the estimation of the dissipated power and energy depending on the basic parameter is possible.

Transition from the brush discharge to the surface discharge

For a higher surface charge density, the discharge pattern changes from the brush discharge to the surface discharge. The start condition for a surface discharge can be a brush discharge. In the case of a brush discharge, a limited area around the discharge point is discharged. This discharge shorts the charged surface to the ground plane. At the boundary between the discharged and the still charged area a high tangential electric field strength on the surface arises. If the electric field strength is higher than a critical value a surface discharge can follow.

The decisive parameter for the development of surface discharges is the tangential electric field strength. Therefore, the tangential electric field strength along the surface was investigated as a function of the *initial surface charge density*, the *foil tickness* and the *discharge length*. For the material PVC, a *critical value* of the tangential electric field strength in the range of 16 kV/cm to 20 kV/cm was determined.

Another important point is to find the value of the surface charge density or the surface potential, which defines the transition from the brush discharge to the surface discharge. For the determination of the *transition value*, measurements were carried out depending on the *tickness* and the *dielectric constant* of the foil. The initial surface potential was increased step by step until at least one small surface discharge channel occurred. The result is a function, which describes the transition value of the initial surface potential depending on the parameters.

Characterization of the surface discharge

When the tangential electric field strength reaches a critical value a surface discharge can follow a brush discharge. This is possible for values of the surface

charge density that are higher than the transition value. The surface discharge discharges a much larger surface area than the brush discharge. Also, the value of the transported charge and consequently, the value of the dissipated power and energy in the spark gap is much higher.

The surface discharge channels start near the discharge point and move star-shaped radial outwards. With increasing distance from the discharge point the channels can branch themselves. Furthermore, the main channels can branch at points between the discharge point and the head of the main channels. These branches are rather short compared to the main channels. The paths of propagation on the surface are statistically distributed. In the past, this arising figure was referred to as a *lichtenberg figure*.

The discharge phenomena are investigated by the example of the material PVC. The comparison of the discharge current pulse for some measurements shows, that even with constant initial conditions the shape and the rise time of the current pulse *can be different*. The reason therefore is that the surface discharge channels start at different times. When the scattering of the inception time of the channels is low the rising pulse edge is smooth and steep. For high scattering of the inception time the rising edge is stepped and less steep. Therefore, the shape is defined through the statistical distribution of the inception time of the several discharge channels.

Therefore, it is very difficult and not necessary to simulate each single discharge channel. A simplification of the complex and statistical surface charge distribution is needed.

Characteristic quantity of the surface discharge

One possibility for a simplified approach to this problem is the use of the *average discharged surface charge density in an annulus* around the discharge point. To determine this density, the difference of the measured surface charge density before and after the discharge is calculated. The result is the discharged surface charge density. From this density the average value within the area of the annulus is calculated. For the simulation, the so determined values of the average discharged surface charge density as a function of the radius of the annulus was approximated by functions.

Another characteristic quantity of the surface discharge are the transported charge and the average radius of the discharged surface area. These quantities can be derived from the average discharged surface charge density and were described by functions.

Modeling of the surface discharge

Two possible simulation models were investigated. In the case of the first model, the different inception time of the discharge channels was neglected and only *the radial propagation* of the discharge channels was considered. For the modeling of the surface discharge the model for the brush discharge was extended. The base for the simulation is the value of the average discharged surface charge density in an annulus. The rather slow and approximately linear rising edge of the surface discharge current can be explained by a continuous addition of surface elements, whereas one element represents one annulus. One element consists of a spark gap, a resistance and a capacitance. The selected step size for the annulus and the radius of the discharged surface area defines the necessary number of elements for the simulation. The parameters of the elements are defined using the geometrical setup and the average discharged surface charge density in an annulus.

For the second model, the radial propagation of the discharge channels was neglected and the *different inception time of the discharge channels* was considered. The base for this simulation was a typical discharge current of one discharge channel. This current was measured with a specific setup, which divided the surface in sectors. For this kind of model, the additional part consists of several elements which are connected in parallel. One element represents one discharge channel. Again, one element consists of a spark gap, a resistance and a capacitance. Here, the parameters of the elements were defined using the geometrical setup and the typical discharge current.

To verify these models two measurements with different current pulse shapes were simulated. The comparison of the simulated and the measured discharge current pulses show a good agreement. In the first case, the different pulse shapes are achieved by varying the start time of the elements of the annulus. In the second case, the start time of the channels was varied.

This simulation shows that the discharge current of the surface discharge can be reproduced with both models. But in practice a worst case consideration is interesting. Therefore, no specific values for the start time of the elements of the annulus and the start time of the channels are used, but worst case conditions. In this configuration the estimation of the dissipated power and energy and the evaluation of the danger potential is possible.

Conclusion

In this work, the specific aspect of the electrostatic discharge (ESD), *the discharge of charged insulating surfaces* was considered. Therefore, the two kinds of discharges, the brush discharge and the surface discharge, were investigated in detail.

By using the approximated functions of the brush discharge the discharged surface charge density and the discharge current can be calculated depending on the basic parameters. The estimation of the dissipated power and energy and the evaluation of the danger potential is possible without carrying out a measurement. With the derived PSpice model for the brush discharge it is possible, too.

The value of the surface potential where the discharge pattern changes from the brush discharge to the surface discharge was determined. A function, that depends on some parameters, describes this transition value.

In the case of the surface discharge, the discharge phenomena are investigated by the example of the material PVC. Here, with both developed models the estimation of the dissipated power and energy and the evaluation of the danger potential is possible.

1 Einführung und Ziel der Arbeit

Durch den zunehmenden Einsatz von Kunststoffen beziehungsweise 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 isolierte Oberfläche in einem begrenzten Flächenbereich, deren Größe von verschiedenen Parametern abhängt. Die Größe der entladenen Fläche beeinflusst die entladene Ladungsmenge und somit die umgesetzte Energie im Entladungskanal.

Diese elektrostatischen Entladungen (ESD) führen einerseits zu einer ungewollten Beeinflussung empfindlicher Elektronik in Geräten und Sensoren und zum anderen stellen sie eine Gefahr der Entzündung von Gasgemischen dar.

In der vorliegenden Arbeit wird der spezielle Aspekt der ESD, die Entladung aufgeladener nichtleitfähiger Oberflächen, näher betrachtet. Die durchgeführten Messungen und Parameterstudien werden diskutiert, wie auch die Approximation und Modellbildung zur Ermittlung von Kenngrößen, welche das Gefährdungspotential der Entladungen beschreiben. Die zur Untersuchung nötige Messtechnik wird ebenfalls betrachtet.

1.1 Übersicht

Zum Einstieg in die Thematik, wird eine kleine Übersicht über die in der Arbeit vorkommenden Entladungsarten gegeben. Der Ausgangspunkt aller Untersuchungen ist eine gleichmäßig aufgeladene isolierte Oberfläche, die eine rückseitige Massefläche aufweist. Diese Massefläche ermöglicht, dass die Oberflächen wesentlich höher aufgeladen werden können. Bei Annäherung einer geerdeten Metallelektrode an diese Oberfläche kann es zu einer Entladung der aufgeladenen Fläche kommen. Abhängig von der Ladungsdichte, vom Material und der Dicke der nichtleitfähigen Schicht können zwei Arten von Entladungen auftreten.

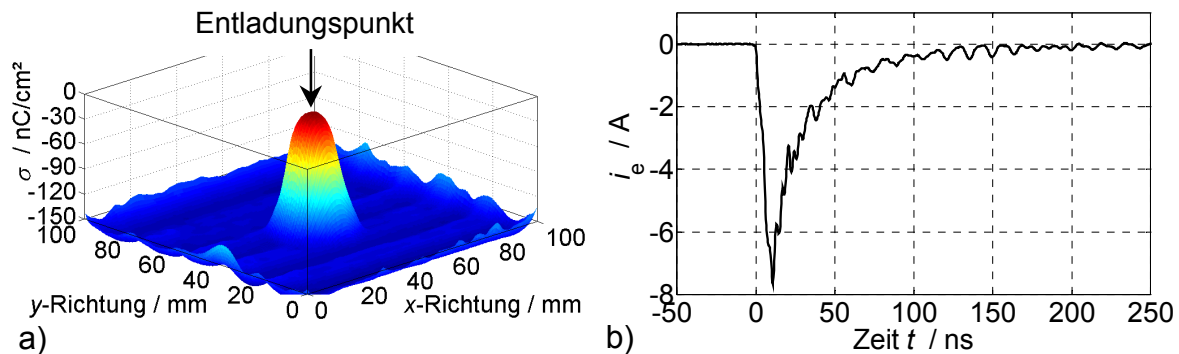


Bild 1.1 Büschelentladung für PVC mit $\epsilon_r = 2,95$; Foliendicke $h=0,18$ mm und Ausgangsladung $\sigma_i = 150$ nC/cm²

- a) Flächenladungsdichte-Verteilung nach der Entladung
b) zugehöriger Entladungsstrom-Impuls

Die eine ist die Büschelentladung, bei der sich ein begrenzter naher Bereich um den Entladungspunkt herum entlädt. Die Flächenladungsdichte-Verteilung nach einer solchen Büschelentladung und der Entladungsstrom-Impuls sind in Bild 1.1 am Beispiel einer 0,18 mm dicken PVC-Platte zu sehen. Die Flächenladungsdichte vor der Entladung betrug -150 nC/cm². Der in Bild 1.1a zu sehende Kegel stellt die entladene Ladungsmenge dar. Der Entladungsstrom-Impuls (Bild 1.1b) hat stets eine ähnliche Form, eine Anstiegszeit von einigen Nanosekunden und die Dauer von 100 bis 250 ns, wobei die maximale Amplitude in Abhängigkeit von den Ausgangsparametern von einigen Milliampere bis einige 10 Ampere betragen kann.

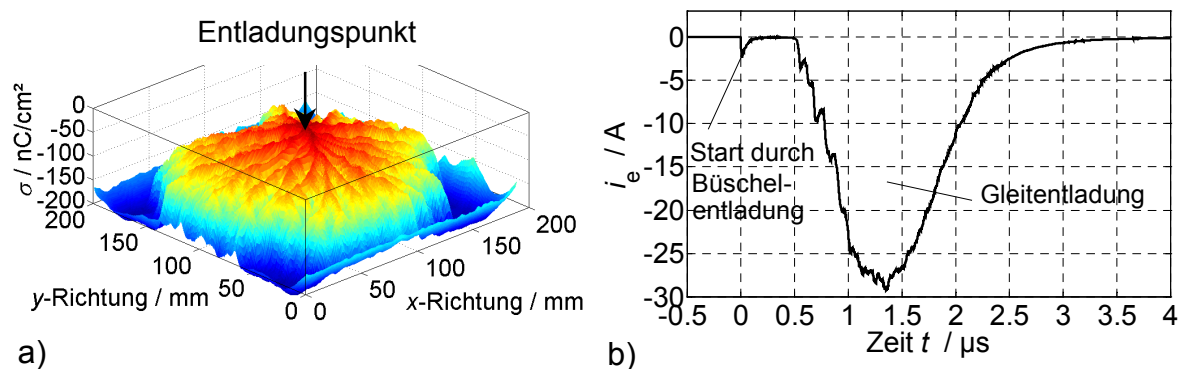


Bild 1.2 Gleitstielbüschel-Entladung für PVC mit $\epsilon_r = 2,95$; Foliendicke $h=0,18$ mm und Ausgangsladung $\sigma_i = 250$ nC/cm²

- a) Flächenladungsdichte-Verteilung nach der Entladung
b) zugehöriger Entladungsstrom-Impuls

Bei dünneren Proben und einer damit möglichen wesentlich höheren Aufladung kann, ausgelöst durch eine Büschelentladung, eine Gleitstielbüschel-Entladungen entstehen, die im Weiteren auch als Gleitentladung bezeichnet wird. Durch die Gleitentladungs-Kanäle auf der Oberfläche kann sich ein beträchtlich größerer Flächenbereich entladen. In Bild 1.2a ist die Flächenladungsdichte-Verteilung vor (untere Fläche) und nach (obere Fläche) einer solchen Gleitentladung und der Entladungsstrom-Impuls am Beispiel einer PVC-Folie mit 0,18 mm Dicke zu sehen. Die Ladungsdichte vor der Entladung betrug ca. -250 nC/cm^2 . Es ist zu sehen, wie die Entladungskanäle fast die gesamte Oberfläche überdecken.

Der Entladungsstrom-Impuls Bild 1.2b zeigt, daß zuerst eine Büschelentladung erfolgt. 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 Gleitentladungs-Kanälen auf der Oberfläche ermöglicht. Dies erfolgt statistisch verteilt und leicht zeitlich versetzt, sodass man sich eine Vielzahl von kleineren Entladungen vorstellen kann, die in der Summe den gemessenen Gesamtstrom ergeben. Es können Stromamplituden von einigen 10 Ampere auftreten. Die dabei entladene Ladungsmenge ist um Größenordnungen größer als bei der Büschelentladung.

1.2 Stand der Technik

Bei der Sicherstellung der EMV geht es zum einen um die Begrenzung ungewollter Emission elektromagnetischer Energie, zum anderen um die Störfestigkeit gegenüber von außen einwirkender elektromagnetischer Beeinflussung. Die ESD-Betrachtung ist ein wichtiger Bestandteil der Störfestigkeits-Prüfung, der wegen der möglichen großen Gefahren eine entscheidende Bedeutung zukommt.

Es ist bekannt, daß die elektrostatische Entladung von den beteiligten Körpern und den Feldverhältnissen abhängig ist. Der Entladungsstrom-Impuls hat eine Anstiegszeit im Subnanosekunden-Bereich [Mößler, 1994]. Die Störung kann sowohl direkt durch den Stromimpuls als auch durch das abgestrahlte elektromagnetische Feld verursacht werden. Die ESD-Entladung bei Annäherung zweier definierter Körper über die Luft wurde bereits eingehend untersucht und

konnte mit den Funkengesetzen von Toepler bzw. Rompe und Weizel sehr gut beschrieben werden [Pommerenke, 1995]. Die Amplitude sowie die Änderung der Form des Entladungsstromes sind wichtige Parameter für die Beurteilung der Störbeeinflussung. Diese wiederum sind stark abhängig von der Annäherungsgeschwindigkeit der Körper bzw. von der tatsächlichen Lichtbogenlänge, wie Pommerenke zeigte.

Die für ESD-Prüfungen [IEC 61000-4-2, 1995] wichtigen Parameter einer ESD und ihre Nachbildung sind Gegenstand vieler Untersuchungen. Dazu zählen zum Beispiel die Modellierung und Nachbildung des Entladungsstrom-Impulses des Menschen [Pommerenke, 1996] [Hyatt, 1992] [Greason, 1998], die Betrachtung der Annäherungsgeschwindigkeit [Pommerenke, 1993] [Greason, 2002] oder die Betrachtung der Störwirkung auf Halbleiterschaltungen [Frei, 1996]. Auch die Erfassung und statistische Auswertung von ESD-Ereignissen in realen Umgebungen ist bereits näher betrachtet worden [Frei, 1999].

Bei der Entladung elektrostatischer Energie lassen sich je nach geometrischer Anordnung der aufgeladenen Objekte einige Entladungsformen unterscheiden, die unterschiedlichen Einfluss auf die Entflammung von Gas-Luft-Gemischen haben [Lüttgens, 1988]. Die elektrostatische Entladung ESD kann dabei grundsätzlich als Lichtbogenentladung (Funkenentladung) [Grünberg, 1965] [Kalghatgi, 1989] oder als Vorentladung auftreten. Bei der Vorentladung unterscheidet man Büschel- und Koronaentladungen, wenn es sich um Entladungen im Gasraum handelt und spricht von Gleitstielbüschel-Entladungen, wenn es sich um eine Oberflächenentladung handelt.

Die Parameter und Einflussgrößen für das Auftreten von Büschel- und Koronaentladungen sind auch schon bekannt [Heidelberg, 1970-2] [Gibson, 1965] [Glor, 1981] [Fredholm, 1972], unter anderem der Einfluss des Krümmungsradius der Elektroden, die nötige Mindestaufladung, die Dicke der Isolierung oder die entladene Ladung. Auch einige Betrachtungen des Entladungsstromes und dessen Modellierung wurden schon durchgeführt [Norberg, 1989] [Norberg, 1992] [Norberg, 1992] [Norberg-2, 1992].

Auf die örtliche Verteilung der Flächenladungsdichte wird hingegen seltener eingegangen. Landers hat die Flächenladungen auf einer Linie betrachtet [Landers, 1985]. Eine flächenhafte Erfassung der Flächenladungsdichte und die Betrachtung des Energieinhaltes der sich entladenden Fläche sowie der Vergleich

der verschiedenen Entladungsformen sind weniger bekannt. Die Betrachtung und Ermittlung der beidseitigen Ladungsansammlung auf dickeren Platten und deren Wirkung auf die Durchschlagspannung von Elektrodenanordnungen wurde in [Winter, 2001] [Winter, 2002] [Winter, 2003] vorgenommen.

Lichtenberg [Lichtenberg, 1778] oder Toepler [Toepler, 1906] [Toepler, 1917] [Toepler, 1921] [Merrill, 1939] [Claußnitzer, 1969] hingegen haben gezeigt, unter welchen Bedingungen Gleitentladungen auf Isolierstoff-Oberflächen entstehen können. Bei dieser Entladungsform wird eine wesentlich größere Fläche als bei Büschel- und Koronaentladungen entladen. Dies ist mit einer sehr großen entladenen Ladungsmenge verbunden, die eine entsprechend große Energiemenge im Entladungskanal umsetzt.

Weiterhin ist bekannt, dass die Zündgefahr von Gasen über die Mindestzündenergie beschrieben wird, die jedoch für die Entladungsformen unterschiedlich ist [Lüttgens, 1988] [Dietlen, 1976] [Berthold, 1987] [Steen, 2000]. Bei der Funkenentladung wird die im Feld gespeicherte Energie im Lichtbogen umgesetzt [Ballal, 1975], während bei den Vorentladungen nur ein Teil der gespeicherten Energie in der Vorentladung umgesetzt wird. Bei Vorentladungen wird die Äquivalentenergie angegeben. Die Äquivalentenergie ist der Energiebetrag, der bei Umsetzung in einer elektrischen Funkenentladung unter definierten Bedingungen gleiche Zündfähigkeit besitzt, wie die Zündquelle der Vorentladung. Ihr Wert muss für jede einzelne Zündquellenart gesondert, ermittelt werden [Müller, 1977] [Lüttgens, 1988] [Berthold, 1987] [Stehen, 2000]. Die Mindestzündenergie und die Äquivalentenergie wurden für unterschiedliche Gase ermittelt und angegeben [Lewis, 1961] [Nabert, 1968] [Heidelberg, 1970] [Gibson, 1965] [Glor, 1981]. Weiterhin beschäftigen sich einige Veröffentlichungen mit den Einflussgrößen der einzelnen Entladungsformen und deren Auswirkung auf die Zündfähigkeit bzw. die Äquivalentenergie [Heidelberg, 1958] [Heidelberg, 1960] [Heidelberg, 1967] [Heidelberg, 1970] [Lövstrand, 1981] [Steen, 2000].

Wie sich in den letzten Jahren gezeigt hat [Pidoll, 2002], gibt es für die Beurteilung der Zündgefahr von Gasen einen weiteren Ansatz, der nur die entladene Ladung während der Entladung betrachtet. Nach Pidoll ist die entladene Ladung besser geeignet, weil sie weniger von der Spannung und dem Elektrodenabstand abhängig und einfacher zu ermitteln ist. Außerdem kann sie in die Mindestzündenergie umgerechnet werden.

Die Betrachtung und Beurteilung der Zündgefahr in der Praxis für gefährdete Bereiche wird in [EN 50014, 2000] [EN 13463-1, 2002] beschrieben, wogegen die Normen [EN 61340-5-1, 2001] und [EN 61340-5-2, 2001] den Schutz von elektronischen Bauelementen vor elektrostatischen Phänomenen beinhalten.

1.3 Ziel der Arbeit

Die Überprüfung der EMV bezüglich elektrostatischer Entladungen (ESD) ist durch die Zunahme empfindlicher Elektroniken in Geräten und Sensoren von besonderer Bedeutung, wie zum Beispiel bei der triboelektrischen Aufladung von Materialtransportbändern aus Kunststoff. Neben der Störung von Sensoren und Leittechnik durch schnelle transiente elektromagnetische Felder und direkte Stromeinkopplungen geht von der ESD auch die Gefahr der Entzündung von Gasgemischen aus. Für diese Art von Gefährdung ist der Energieinhalt der ESD von entscheidender Bedeutung.

Ein bis jetzt noch wenig untersuchter Aspekt der elektrostatischen Entladung ist die Entladung aufgeladener isolierender nichtleitfähiger Oberflächen. Zur Verbesserung der Beurteilung des Gefährdungspotentials dieser impulsförmigen Entladungen wurde im Rahmen dieser Arbeit das Ziel gesetzt, ein besseres Verständnis solcher Entladungen zu erarbeiten. Dies soll in der Modellierung, der Ermittlung des Energieinhaltes und der Bestimmung weiterer Kenngrößen solcher Entladungen münden. Im einzelnen sollen folgende Aufgaben bearbeitet werden:

- Ein Messsystem zum experimentellen Untersuchen der Entladung von aufgeladenen isolierenden nichtleitfähigen Oberflächen ist aufzubauen. Dieses soll über Möglichkeiten zum Aufbringen und Ableiten von Ladungen verfügen und die Ermittlung der Verteilung von Flächenladungen ermöglichen. Alle Aufbauten sind wegen der Abhängigkeit der Aufladung von Feuchte und Temperatur in einem Klimaschrank unterzubringen, sodass reproduzierbare Bedingungen herrschen.
- Die Aufladung von Kunststoffoberflächen, zum Beispiel durch Ausnutzung der Koronaentladung, ist näher zu betrachten, um definierte Ausgangsbedingungen für die Entladungsvorgänge zu erhalten.
- Die Größe der sich entladenden Oberfläche und der Entladungsstrom-Impuls als Funktion verschiedener Parameter sind zu ermitteln.

- Die eingehende Untersuchung der Abläufe auf der Oberfläche soll zu einer Beschreibung und Modellierung der Entladung aufgeladener isolierter Oberflächen führen. Die wesentlichen Parameter und Kenngrößen sollen herausgearbeitet und modelliert werden.
- Mit Hilfe des Modells soll es möglich sein, die umgesetzte Leistung und Energie während einer Entladung abzuschätzen.

Die Arbeit ist so aufgebaut, dass in Kapitel 2 die Grundlagen, die für das Verständnis der Arbeit nötig sind, dargestellt werden. Mit Kapitel 3 schließt sich die Beschreibung der Versuchstechnik mit Messaufbau, Messablauf und Voruntersuchungen zur Aufladung an. Kapitel 4 beinhaltet die gesamten Betrachtungen zu Büschelentladungen, eine Charakterisierung der Entladungsform, die Approximation der Ladungsverteilung und des Entladungsstrom-Impulses in Abhängigkeit der Ausgangsparameter, die Modellbildung sowie eine Energiebetrachtung und Verifikation des Modells. Kapitel 5 befasst sich mit der Gleitentladung. Enthalten sind eine Charakterisierung, die Beschreibung des Überganges zur Gleitentladung, die Betrachtung eines einzelnen Entladungskanals, der zeitliche Ablauf der Gleitentladung, die Modellbildung sowie die Energiebetrachtung und Verifikation des Modells. Am Ende wird die Thematik mit einem Ausblick abgerundet.

2 Grundlagen

2.1 Entladungsformen

Bei der Entladung elektrostatischer Energie lassen sich je nach geometrischer Anordnung der aufgeladenen Objekte einige Entladungsformen unterscheiden. Eine Betrachtung dieser Formen ist nötig, weil sie unterschiedlichen Einfluss auf die Entflammung von Gas-Luft-Gemischen haben. Die vier grundlegenden Entladungsformen, die im weiteren genauer betrachtet werden, sind die Funken-Entladung, die Koronaentladung, die Büschelentladung und die Gleitstielbüschel-Entladung. Zusätzlich können bei der Behandlung von Stäuben gewitterblitzartige Entladungen oder Schüttkegel-Entladungen auftreten [Lüttgens, 1988].

2.1.1 Funkenentladung

Funkenentladungen sind Entladungen zwischen zwei leitfähigen Elektroden, die sich auf unterschiedlichem Potential befinden. Hierbei überbrückt der Funke den kompletten Raum zwischen den Elektroden in Form eines diskreten Ionisationskanals. Die Entladung wird durch Erreichen der Durchbruch-Feldstärke an einer beliebigen Stelle zwischen den Elektroden eingeleitet. Zusätzlich muss die Feldstärke im übrigen Zwischenraum genügend hoch sein, damit sich eine durchgehende Entladung ausbilden kann [Grünberg, 1965] [Lüttgens, 1988] [Steen, 2000].

2.1.2 Büschelentladung

Büschelentladungen sind Einelektroden-Entladungen. Wird eine leitfähige, geerdete Elektrode mit einem Krümmungsradius größer einige Millimeter in ein elektrisches Feld nahe der Durchbruch-Feldstärke gebracht, so kann durch die Feldverzerrung an der Elektrodenoberfläche lokal die Durchbruch-Feldstärke erreicht werden. Es entsteht eine Gasentladung, die von dem Ort der höchsten Feldstärke an der Elektrodenoberfläche ausgeht und in Folge des abnehmenden Feldes irgendwo im Raum endet. Unter „Raum“ kann auch eine Isolatoroberfläche verstanden werden, aber keine zweite Elektrode. Ausgehend von der Oberfläche

der Elektrode bildet sich ein Entladungskanal der sich nach einigen Millimetern fein verästelt [Gibson, 1965] [Fredholm, 1972] [Lüttgens, 1988] [Steen, 2000].

Eine häufig vorkommende Anordnung ist eine hoch aufgeladene Isolatoroberfläche, der sich eine leitfähige auf Masse liegende Elektrode nähert (siehe hierzu auch Kapitel 2.4.1).

2.1.3 Koronaentladung

Koronaentladungen, auch als Spitzenentladungen bezeichnet, sind ein Spezialfall der Büschelentladungen. Der Unterschied besteht in dem sehr kleinen Krümmungsradius der geerdeten Elektrode, von kleiner 1 mm. Wird eine solche Elektrode in ein elektrisches Feld gebracht, so wird das Feld nur in unmittelbarer Umgebung der Spitze verzerrt. Dadurch kann eine schwache auf die unmittelbare Umgebung beschränkte Entladung stattfinden. Sie besteht, abhängig von der Menge der Nachlieferung der felderzeugenden Ladungsträger, über einen längeren Zeitraum. Es ist möglich, dass ein nahezu konstanter Entladungsstrom fließt [Lüttgens, 1988] [Toedter, 1998] [Steen, 2000].

2.1.4 Gleitstielbüschel-Entladung

Gleitstielbüschel-Entladungen, auch als Gleitentladungen bezeichnet, sind Entladungen, die auf Isolatoroberflächen mit sehr hohen Flächenladungsdichten ($>25 \text{ nC/cm}^2$) auftreten können [Heidelberg, 1970]. Den optischen Unterschied zu den Büschelentladungen bilden die leuchtstarken Entladungskanäle auf der Oberfläche.

Da die maximale Flächen-Ladungsdichte einer Grenzfläche gegenüber Luft den theoretischen Wert von $2,7 \text{ nC/cm}^2$ nicht überschreiten kann [Gibson, 1965], kommen für höhere Flächen-Ladungsdichten nur Ladungs-Doppelschichten in Frage. Ladungs-Doppelschicht bedeutet, dass sich auf jeder Seite der Isolatorfolie Ladungen mit jeweils entgegengesetztem Vorzeichen befinden (Kapitel 2.4.3). Man kann hierzu Isolatorfolien auf leitfähiger Unterlage oder freitragende Isolatorfolien unterscheiden, wobei ersteres der praxisrelevantere Fall ist.

Weitere Bedingungen für die Ausbildung von Gleitentladungen sind das Vorhandensein eines Isolators mit hoher Durchschlagsfestigkeit und einer

Isolatordicke kleinergleich 8 mm [Heidelberg, 1970] [Heidelberg, 1970-2]. Außerdem gibt es eine minimale Potentialdifferenz in Abhängigkeit von der Foliendicke, die zwischen den Isolator-Oberflächenseiten anliegen muss [Maurer, 1987].

Die Gleitentladungen werden allgemein eingeleitet durch einen Kurzschluss der Oberflächen an einer Stelle [Lüttgens, 1988]. Der so entstehende große Potentialunterschied auf der Oberfläche führt zu leuchtstarken Entladungskanälen, die sich sternförmig nach außen hin fein verästelt ausbreiten. Die entstehenden Formen werden als Lichtenbergfiguren bezeichnet [Lichtenberg, 1778] [Toepler, 1906].

2.2 Zündfähigkeit

Von elektrostatischen Entladungen geht unter anderem die Gefahr der Entzündung von Gasgemischen aus. Für diese Art von Gefährdung ist der Energieinhalt des Funkens beziehungsweise die entladene Ladungsmenge von entscheidender Bedeutung. Deshalb ist im folgenden die Zündfähigkeit der einzelnen Entladungsformen dargestellt. Die für die Arbeit wichtigen Begriffe bezüglich der Zündung werden im Anhang A erläutert.

Die Zündempfindlichkeit von explosionsfähigen Gemischen wird durch Angabe der Mindestzündenergie quantifiziert. Deshalb ist es naheliegend, die Zündfähigkeit einer Gasentladung auch durch eine Energieangabe zu charakterisieren, wenn diese stellvertretend für die Leistungsdichte im Entladungskanal angesehen werden kann. Diese Voraussetzung ist aber nur zum Teil bei Funkenentladungen erfüllt. Deshalb ist es fragwürdig, auch bei den anderen Entladungsformen aus der Energie auf die Zündfähigkeit zu schließen. Der gewählte Ausweg in der Praxis besteht in der Bestimmung von Äquivalentenergien für die jeweilige Entladungsform [Gibson, 1965] [Lüttgens, 1988].

Ein neuerer Ansatz [Pidoll, 2002] der auch schon als Anhang in die Norm [EN 13463-1, 2002] aufgenommen wurde, besteht darin, aus der entladenen Ladungsmenge auf die Zündfähigkeit zu schließen. Die entladene Ladungsmenge ist weniger abhängig von dem Potential und dem Entladungsabstand. Pidoll fand heraus, dass die gefundenen Werte der Zündfähigkeit für die Funkenentladung und die Büschelentladung übereinstimmen.

Damit eine Zündung einsetzen kann, müssen neben der Zündquelle, hier ist dies die Entladung, viele weitere Bedingungen erfüllt sein, wie zum Beispiel das Vorhandensein eines zündfähigen Luft-Gas-Gemisches. Wird im weiteren von Zündfähigkeit gesprochen, so wird davon ausgegangen, dass optimale Bedingungen vorliegen, das heißt alle weiteren Bedingungen erfüllt sind.

2.2.1 Zündfähigkeit von Funkenentladungen

Bei den Funkenentladungen ist bekannt, dass die Zündenergie W_z über die in der Kapazität C der Anordnung gespeicherte Energie, sowie mit der Spannung U zwischen den Elektroden ermittelt wird (Gleichung (2.1)). Dies ist aber nur eine Näherung für den Fall, dass die gesamte Energie bei der Entladung umgesetzt wird. Eine Diskussion hierzu ist in [Dietlen, 1976] zu finden.

$$W_z = \frac{1}{2} C \cdot U^2 \quad (2.1)$$

Die Mindestzündenergie üblicher Kraftstoffe beträgt ungefähr 0,2 mJ. Werte der Mindestzündenergie von weiteren Gemischen sind in den folgenden Quellen zu finden [Lewis, 1961] [Nabert, 1968] [Steen, 2000].

Wird die entladene Ladungsmenge zur Beurteilung der Zündenergie herangezogen, so ist der Entladungsstrom zu ermitteln und zu integrieren. Die sich ergebende entladene Ladungsmenge, die zur Zündung von Kraftstoff führt, beträgt 63 nC. Weitere Werte und ein solcher Testablauf sind in [Pidoll, 2002] beschrieben.

2.2.2 Zündfähigkeit von Büschelentladungen

Bei der Büschelentladung ist es durch den speziellen räumlichen Verlauf der Entladung nicht sinnvoll einen Vergleich des Energiebetrages mit Mindestzündenergiewerten von explosionsfähigen Gemischen durchzuführen. Für diese Entladungsform werden stattdessen Äquivalentenergien bestimmt. Die in der Literatur angegebenen Werte für die Äquivalentenergie, bei der eine Zündung erfolgt, liegt bei wenigen mJ, [Heidelberg, 1970] und [Gibson, 1965] sprechen von 1 mJ, [Glor, 1981] von 3 bis 4 mJ. Die Einflussgrößen und Abhängigkeiten sind im folgenden kurz aufgelistet:

- Krümmungsradius der Elektrode [Heidelberg, 1967] [Heidelberg, 1970]
- negative Aufladung von Isolatorflächen hat sich als viel zündfähiger erwiesen wie die positive Aufladung [Heidelberg, 1967] [Lövstrand, 1981]
- Abhängigkeit von unterschiedlich großen Flächen des Isolators [Gibson, 1965]
- es gibt in Abhängigkeit von der Art des Gasgemisches eine untere Grenzschichtdicke, ab der Büschelentladungen zündfähig sind [Heidelberg, 1970]
- die Zündfähigkeit ist abhängig vom Ladungstransfer [Gibson, 1965]

2.2.3 Zündfähigkeit von Koronaentladungen

Nach [Lüttgens, 1988] können Koronaentladungen übliche Gas-Luft-Gemische mit einer Mindestzündenergie größer als 0,025 mJ nicht entzünden. Lediglich bei sehr empfindlichen Stoffen kann unter besonders günstigen Bedingungen eine Zündung eingeleitet werden. Der kontinuierliche Entladungsstrom bei einer Koronaentladung, der für eine zeitliche Verteilung der Leistungsdichte sorgt, könnte hierfür der Grund sein.

2.2.4 Zündfähigkeit von Gleitstielbüschel-Entladungen

Infolge des speziellen Entladungs-Mechanismus der Gleitstielbüschel-Entladung kann der größte Teil der Ladungen auf der Oberfläche in einer einzigen Entladung abfließen [Steen, 2000]. Somit ist die Energie der Gleitstielbüschel-Entladung sehr hoch, weshalb mit einer Zündung von explosionsfähigen Gemischen zu rechnen ist.

Vielfach werden nur positive Gleitstielbüschel untersucht, weil diese sich über größere Flächen erstrecken und deshalb als zündfähiger angesehen werden [Heidelberg, 1970]. Von positivem Gleitstielbüschel wird gesprochen, wenn die Isolatorfläche negativ aufgeladen ist.

2.3 Entladung unter den Bedingungen der ESD

Eine Vielzahl von physikalischen Vorgängen können am Gasdurchschlag beteiligt sein. Da es keine geschlossene Erklärung gibt, ist eine möglichst genaue Eingrenzung der Vorgänge nötig. Pommerenke hat den Luftdurchschlag der ESD

in [Pommerenke, 1995] eingegrenzt. Der in dieser Arbeit untersuchte Aspekt der ESD, die Entladung von aufgeladenen isolierten Oberflächen, wird durch folgende ähnliche Bedingungen eingegrenzt:

- Entladung in Raumluft unter Normaldruck
- Ströme bis maximal 100 A
- Entladungsabstand zwischen 0,5 mm und 6 mm
- Oberflächenpotential des Prüflings bezüglich rückseitiger Masse 5 kV bis 20 kV
- Elektrode nähert sich an
- Größe der aufgeladenen Fläche von 100 cm² bis 400 cm²
- entladene Ladungsmenge von wenigen μC

Beim elektrischen Durchschlag in Gasen werden freie Elektronen, die in der Luft enthalten sind, durch das elektrische Feld beschleunigt und erreichen Energien, die zur Neubildung von Ladungsträgern durch Ionisationsprozesse ausreichen. Ausgehend von einem solchen Ereignis kann sich je nach Feldverlauf eine Elektronen- und Ionen-Lawine bilden, die den Gesetzen der Plasmaphysik folgend [Raizer, 1991] die Entladung verursacht [Lüttgers, 1988].

Die Mechanismen, durch welche die Erzeugung freier Ladungsträger beeinflusst wird, sind die Ionisation, die Emission und die Anlagerung. Diese Hauptmechanismen lassen sich noch unterteilen, je nach Wirkung. Bei der Ionisation gibt es die thermische Ionisation, die Photo- und die Stoß-Ionisation und bei der Emission die Feld-, die Thermo- und Photo-Emission. Diese sind zum Beispiel in [Beyer, 1986] [Pommerenke, 1995] näher beschrieben.

Entladungen treten immer dann auf, wenn die Durchbruch-Feldstärke erreicht wird. Dieser Wert ist abhängig von der Gasart, dem Druck und der Anordnung und stellt genau die Feldstärke dar, ab der die oben beschriebene Vermehrung der Ladungsträger, die Lawinenbildung, zur Entladung führt.

2.3.1 Entladungsanordnungen und Ausnutzungsfaktor nach Schwaiger

Die Entladungsanordnung bestimmt das sich ausbildende elektrische Feld. Je nach Feldverteilung spricht man von einer homogenen, einer quasi homogenen oder einer inhomogenen Anordnung. Der Ausnutzungsfaktor η nach Schwaiger, der nur von der Geometrie der Anordnung, dem Entladungsabstand d und dem

Kugelradius r_{kug} abhängig ist, beschreibt das Maß der Inhomogenität [Schwaiger, 1925] [Beyer, 1986]. Er kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Für homogene Fälle, wie bei einer Platte-Platte-Anordnung, ist $\eta = 1$. Je kleiner η wird, um so inhomogener wird die Anordnung. Für inhomogene Anordnungen, mit Werten von η kleiner 0,3 bis 0,4, wie bei einer Spitze-Platte-Anordnung, können Vorentladungen auftreten. Die Kugel-Platte-Anordnung liegt dazwischen und wird als quasi homogen bezeichnet (Bild 2.1a).

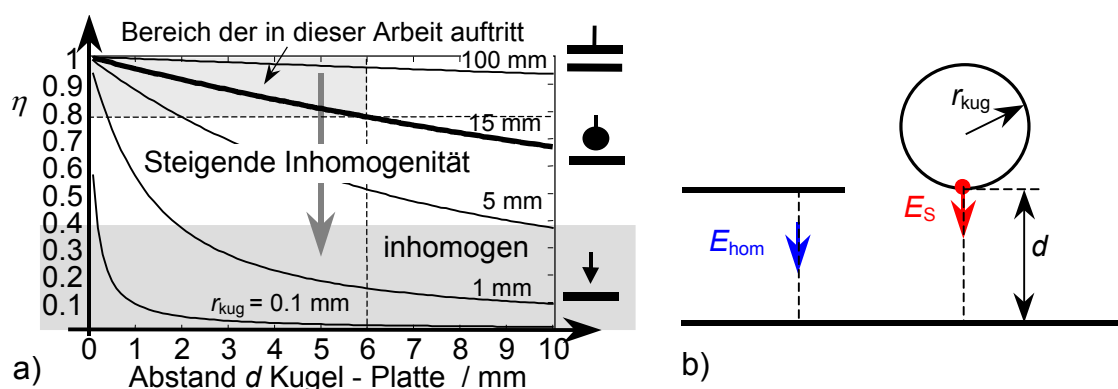


Bild 2.1 Homogenitätsgrad η

- a) über dem Kugel-Platte Abstand d mit dem Kugelradius r_{kug} als Parameter
 b) Beziehung zwischen homogener und quasi homogener Anordnung

Mit Hilfe von η kann eine Beziehung zwischen der Feldstärke im homogenen Feld E_{hom} und der maximalen Feldstärke E_s einer quasi homogenen Kugel-Platte-Anordnungen angegeben werden, solange keine Vorentladungen auftreten (siehe Bild 2.1b und Gleichung (2.2)) [Schwaiger, 1925] [Beyer, 1986].

$$E_s = \frac{E_{\text{hom}}}{\eta} \quad (2.2)$$

Für Werte von d kleiner als ungefähr $2r_{\text{kug}}$ können keine Vorentladungen auftreten, wie aus Bild 2.1 zu entnehmen ist [Beyer, 1986]. Bei der in dieser Arbeit verwendeten Entladungselektrode mit einem Radius von 15 mm und den kleinen Entladeabständen kann man immer von quasi homogenen Verhältnissen ausgehen.

2.3.2 Phasen der Entladungsentwicklung

Die zeitliche Entwicklung der Entladung kann in drei wichtige Phasen unterteilt werden. Diese sind die statistische Streuzzeit, die Kanalaufbauzeit und die resistive

Phase, wobei die Kanalaufbauzeit in die Lawinen- und die Funkenaufbauzeit unterteilt werden kann [Pommerenke, 1995].

Die *statistische Streuzeit* t_s ist diejenige Zeit, die zwischen dem Überschreiten der kritischen Feldstärke und dem Beginn der Lawinenbildung vergeht. Es fließt noch kein Strom. Gerade im für ESD relevanten Bereich kleiner Elektrodenabstände, erhöht sich die statistische Streuzeit und kann Mikrosekunden bis einige Sekunden betragen. Da während der Streuzeit eine weitere Annäherung der Elektroden erfolgen kann, kann sich auch der Entladungsabstand erheblich verkürzen. Die Entstehung eines freien Startelektrons im Entladungsgebiet bestimmt demzufolge nicht nur die Streuzeit, sondern auch maßgeblich den Entladungsabstand. Der Entladungsabstand wird in Kapitel 2.5 näher diskutiert.

Die *Kanalaufbauzeit* ist diejenige Zeit, die zwischen dem Beginn der Lawinenbildung und dem Entstehen eines schwach leitenden Kanales vergeht. Sie teilt sich auf in die *Lawinenaufbauzeit* t_L und die *Funkenaufbauzeit* t_F . Die Funkenaufbauzeit ist dabei von den Parametern des Entladungsstromkreises abhängig [Pfeiffer, 1976]. Zahlenwerte für die Lawinenaufbauzeit bei homogener Feldanordnung und bei Abständen im mm Bereich liegen bei 100 bis 200 ns. Die Funkenaufbauzeit ist mit etwa 30 ns vernachlässigbar klein. Die Modelle für den Kanalaufbau unterscheiden zwischen einem Aufbau nach dem Townsendschen Prinzip und nach dem Streamerprinzip. Für sehr kleine Abstände und damit sehr große Feldstärken gewinnen die Prozesse des Vakuumdurchschlags an Bedeutung. Für weitere Details sei auf [Pommerenke, 1995], [Meek, 1978] oder [Küchler, 1996] verwiesen.

Während der *resistiven Phase* nimmt die Leitfähigkeit des Entladungskanals stark zu und die anliegende Spannung bricht zusammen. Diese Phase bestimmt die Anstiegszeit des Entladungsstromes und wird durch die Funkengesetze beschrieben.

2.3.3 Funkengesetze

Die Funkenentwicklung im Gasraum kann, nachdem der Streamer die Schlagweite überbrückt hat, mit verschiedenen Funkengesetzen beschrieben werden. Von besonderer Bedeutung sind dabei das Funkengesetz von Toepler [Toepler, 1906] [Toepler, 1927], das Funkengesetz von Rompe und Weizel [Weizel, 1947]

[Weizel, 1953] und das Funkengesetz von Braginskii [Braginskii, 1958]. Diese Gesetze beschreiben alle den Zusammenhang zwischen dem zeitlichen Verlauf des Entladungsstromes und dem elektrischen Widerstand des Funkenkanals. Weitere Details und Diskussionen sind in [Pommerenke, 1995] [Möller, 1971] oder [Junker, 1995] zu finden. Für die Beschreibung des Entladungsstromes von aufgeladenen isolierten Oberflächen findet in dieser Arbeit das Gesetz von Rompe und Weizel Verwendung, welches im folgenden kurz vorgestellt wird. Weil die Ströme bei der Entladung von aufgeladenen isolierten Oberflächen klein sind im Verhältnis zu den Entladungsströmen bei reinen Funkenentladungen, wurde dieses Gesetz gewählt, welches auch für kleine Stöme gültig ist [Junker, 1995].

Das von *Rompe und Weizel* ermittelte Gesetz, wie in Gleichung (2.3) dargestellt, basiert auf einem physikalischem Modell, welches von der Energiebilanz des Funkens ausgeht. Aus der inneren Energie des Funkens wird der Funkenwiderstand bestimmt, wobei unter anderem die Annahme getroffen wird, dass sich der Radius des Funkenkanals nicht ändert. Die Ableitung ist zum Beispiel in [Pommerenke, 1995] und [Junker, 1995] zu finden.

$$R_F(t) = \frac{d}{\sqrt{2a \cdot \int_0^t i(t)^2 d\tau}} \quad (2.3)$$

In Gleichung (2.3) ist d der Entladungsabstand und a die Funkenkonstante, welche in $\text{cm}^2/\text{V}^2\text{s}$ angegeben wird. Für den ESD relevanten Bereich (siehe auch Pommerenke, 1995) gibt Mesyats [Mesyats, 1968], einen Wert von 0,5 bis 1,0 $\text{cm}^2/\text{V}^2\text{s}$ an. Möllers [Möller, 1971] ermittelte Werte für die Funkenkonstante bei kleineren Zündfeldstärken (12 bis 32 kV/cm) und die vorherigen Werte ergänzen sich gut.

2.3.4 Paschenkurve und Paschengesetz

Paschen [Paschen, 1889] hat experimentell gezeigt, daß die Durchschlagspannung im *homogenen Feld* nur vom Produkt aus Umgebungsdruck und Entladungsabstand $p \cdot d$ abhängig ist (Paschenkurve Bild 2.2). Mit Hilfe der Townsendschen Zündbedingung, der Näherungsgleichung für den Townsend'schen Ionisationskoeffizienten und der Annahme einer homogenen Feldverteilung kann für die Durchschlagspannung U_d eine geschlossene analytische Näherungs-

gleichung aufgestellt werden [Küchler, 1996]. Diese wird als das Paschengesetz bezeichnet.

$$U_d = \frac{B \cdot pd}{\ln \left[\frac{A \cdot pd}{\ln(1 + 1/\gamma)} \right]} \quad (2.4)$$

In der Gleichung (2.4) sind d der Entladungsabstand, p der Umgebungsdruck, A und B sind gasspezifische Konstanten und γ ist der Rückwirkungskoeffizient ([Beyer, 1986] oder [Küchler, 1996]). Durch geeignete Wahl der Konstanten A , B und γ kann die Kurve den experimentell ermittelten Werten angenähert werden. Die Paschenkurve weist, wie auch die analytische Form, ein Minimum $U_{d,\min}$ auf, das in Luft bei einem Wert von $p \cdot d \approx 9 \text{ bar} \cdot \mu\text{m}$ liegt. Der Bereich unterhalb wird als Nah- und der Bereich oberhalb als Weit-Durchschlag bezeichnet. Für sehr kleine Abstände gewinnen die Prozesse des Vakuumdurchschlags an Bedeutung.

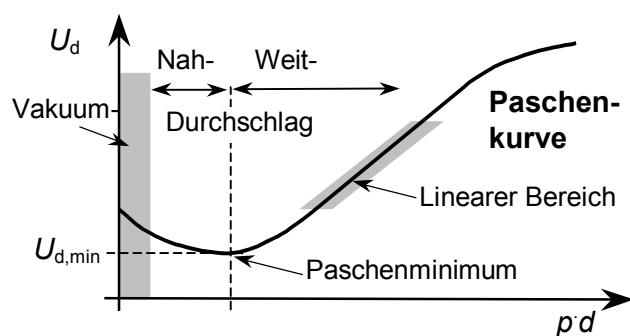


Bild 2.2

Paschenkurve, Darstellung der Durchbruch-Spannung U_d in Abhängigkeit vom Produkt aus Entladungsabstand d und Umgebungsdruck p

Die von Paschen gefundene Gesetzmäßigkeit wurde in Teilbereichen von vielen nachgemessen und bestätigt. Alle diese Werte hat Dakin [Dakin, 1971] zusammengekommen und eine aktualisierte Kurve ermittelt. Diese Werte werden in der vorliegenden Arbeit verwendet. Im homogenen Feld kann aus U_d die Durchbruchfeldstärke E_d mit Gleichung (2.5) abgeleitet werden.

$$E_d = \frac{U_d}{d} \quad (2.5)$$

2.4 Aufladung von isolierten Oberflächen

Die Aufladung erfolgt durch Ladungstrennung, wie zum Beispiel durch Reibung oder beim Strömen von Flüssigkeiten. Dem liegt die unterschiedliche Elektronen-

austrittsarbeit der verschiedenen Stoffe zu Grunde. Treten zwei Körper in engen Kontakt, mit einem Abstand kleiner 10^{-9} mm, so bildet sich eine Helmholtz-Doppelschicht zwischen den Körpern. Werden die Körper getrennt, so kann sich die Ladung, je nach Leitfähigkeit der Körper, nur bedingt wieder ausgleichen und bleibt mit unterschiedlichem Vorzeichen auf den beiden Körpern erhalten. Für detailliertere Betrachtungen ist [Lüttgens, 1988] zu empfehlen. Im folgenden sollen weitere Punkte, die zum Verständnis der Arbeit wichtig sind, kurz erläutert werden.

2.4.1 Influenz

Influenz tritt dann auf, wenn sich ein elektrischer Leiter in einem elektrischen Feld befindet. Infolge der guten Beweglichkeit der Elektronen im Leiter, werden jegliche Potentialunterschiede auf Leiteroberflächen sofort ausgeglichen, weshalb Leiteroberflächen Äquipotentialflächen darstellen. Wird ein Leiter in ein elektrisches Feld gebracht, dann wird dieses so verändert, dass die Äquipotentialflächen wieder mit der Leiteroberfläche zusammenfallen. Dies geschieht durch Ladungsverschiebung längs der Oberfläche und wird als Influenz bezeichnet [Lüttgens, 1988].

Bei der in dieser Arbeit verwendeten Anordnung tritt diese Problematik auf. Einer hoch aufgeladenen Isolatoroberfläche, nähert sich eine leitfähige auf Masse liegende Elektrode. Durch das Feld der aufgeladenen Isolatoroberfläche entstehen Influenzladungen an der Elektrodenoberfläche. Die zu den Influenzladungen komplementären Ladungen können über die Masseverbindung abfließen. Bei weiterer Annäherung der Elektrode wird das Feld an der Oberfläche der Elektrode immer stärker, bis eine Entladung von der Elektrode ausgehend startet. Die in der Gasentladung gebildeten Ladungsträger (Ionen und Elektronen) wandern entlang der Feldlinien und neutralisieren so die influenzierten Ladungen auf der Elektrode und der Isolatoroberfläche [Lüttgens, 1988].

2.4.2 Einfach-Ladungsschicht

Befinden sich auf einer isolierten Oberfläche nur Ladungen eines Vorzeichens, so wird dies als Einfach-Ladungsschicht bezeichnet (Bild 2.3a). Die Flächenladungsdichte σ an einer Grenzfläche gegenüber Luft kann nicht beliebig anwachsen, weil es zu Entladungen kommt, wenn das entstehende elektrische Feld die Durchbruch-Feldstärke erreicht. Der maximale Wert der Flächenladungsdichte σ_{\max}

beträgt $2,7 \text{ nC/cm}^2$ [Gibson, 1965] [Lüttgens, 1988]. Für die Berechnung wurde die Durchbruch-Feldstärke von Luft in einem homogenen Feld mit 30 kV/cm zugrunde gelegt. In der Praxis maximal erreichte Werte liegen im Bereich von $1,1$ bis $2,3 \text{ nC/cm}^2$ [Gibson, 1965] [Heidelberg, 1960].

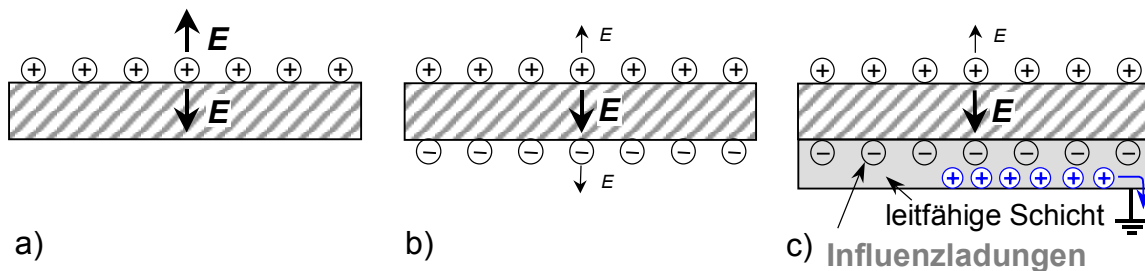


Bild 2.3 Möglichkeiten des Auftretens von Ladungen an Isolierstoffen

- a) Einfach-Ladungsschicht
- b) Doppel-Ladungsschicht
- c) Doppel-Ladungsschicht bei Anwesenheit einer leitfähigen geerdeten Schicht auf der Rückseite

2.4.3 Doppel-Ladungsschicht

Durch Aufbringen von Ladungen entgegengesetzten Vorzeichens auf der Rückseite des Isolators entsteht eine Doppelschicht wie in Bild 2.3b zu sehen. Der Großteil des elektrischen Feldes befindet sich dann innerhalb des Isolators. Weil der Isolator eine höhere Durchschlagsfestigkeit besitzt ist eine größere Feldstärke im Innern möglich. Die Feldstärke an der Grenzfläche zur Luft wird klein und es kann sehr viel mehr Ladung gespeichert werden. Der Maximalwert der gespeicherten Ladung ist durch die Durchbruch-Feldstärke des Isolatormaterials begrenzt.

Der in der Praxis häufig auftretende Fall ist in Bild 2.3c dargestellt, wobei sich eine leitfähige auf Masse liegende Schicht an einer Seite der Isolatoroberfläche befindet. In dieser leitfähigen Schicht erfolgt eine Ladungsverschiebung. Die Influenzladungen tragen zur Doppelschicht bei, wogegen die komplementären Ladungen nach Masse abfließen können.

2.4.4 Flächenladungsdichte

Die Beurteilung elektrisch isolierender Oberflächen setzt die Kenntnis der Flächenladungsdichte-Verteilung auf der Oberfläche voraus. Mit dem bei diesen Untersuchungen benutztem elektrostatischen Voltmeter (Kapitel 3.1.4) kann das

Potential U auf der Oberfläche an den festgelegten Rasterpunkten gemessen werden, womit die Potentialverteilung bekannt ist.

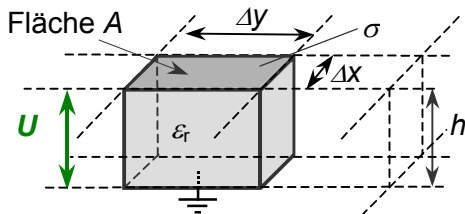


Bild 2.4

Bestimmung der Flächenladungsdichte σ über eine kleine Kapazität mit der Fläche $A = \Delta x \cdot \Delta y$

Betrachtet man die isolierte Schicht für jeden Rasterpunkt und damit für jedes Flächenelement $A = \Delta x \cdot \Delta y$ als eine kleine Kapazität, so lässt sich eine einfache Beziehung zwischen Potential U und Flächenladungsdichte σ ableiten.

$$\sigma = \frac{Q}{A} = \frac{C \cdot U}{A} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r \cdot U}{h} \quad (2.6)$$

Die Flächenladungsdichte σ ist dabei von der Dielektrizitätskonstanten ϵ_r und der Dicke h des Materials abhängig.

2.5 Entladungsabstand

Zur Betrachtung des Entladungsabstandes ist die grundsätzliche geometrische Anordnung, die in dieser Arbeit verwendet wird, in Bild 2.5 dargestellt. Eine Kugel wird einer aufgeladenen ebenen isolierten Schicht mit rückseitiger Massefläche angenähert. Der Kugelradius r_{kug} beträgt dabei 15 mm.

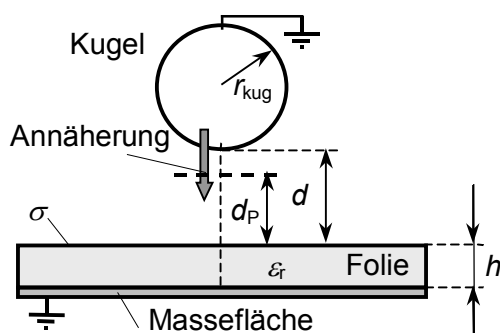


Bild 2.5

Geometrischer Aufbau (Kugel, isolierende Schicht, und Massefläche), mit dem größten möglichen Entladungsabstand d_p und den Ausgangsparametern Entladungsabstand d , Folie mit ϵ_r und Dicke h sowie Aufladung σ

2.5.1 Annäherung der Elektrode

Wie in Kapitel 2.3 bereits erläutert, ist die Startbedingung für das Einsetzen einer Entladung, neben dem Erreichen der Durchbruch-Feldstärke, das Vorhandensein

eines Startelektrons. Nähert sich die Kugel der Oberfläche bis zu einem Abstand d_p an, so ist nach dem Paschengesetz die Durchbruch-Feldstärke erreicht und es könnte eine Entladung einsetzen. Der Abstand d_p ist demzufolge der größte mögliche Entladungsabstand und somit eine charakteristische Größe. Ist jedoch nicht sofort ein Startelektron verfügbar so kann sich die Kugelelektrode weiter annähern, bis die Entladung einsetzt. In diesem Fall ergibt sich ein Wert von d kleiner d_p . Die Feldstärke ist wesentlich größer und somit die Entladung um so intensiver. Testmessungen mit UV-Licht-Bestrahlung des Entladungsgebietes haben dies bestätigt. Die Entladung hat bei diesen Tests immer nahe dem Abstand d_p stattgefunden, weil das UV-Licht die Entstehung von freien Elektronen begünstigt, und diese sofort nach Erreichen der Durchbruch-Feldstärke zur Verfügung standen.

Für einen Vergleich von Messungen mit unterschiedlichen Ausgangs-Parametern ist es sinnvoll den tatsächlichen Entladungsabstand so anzugeben, dass man erkennt um welchen Faktor dieser kleiner ist als der charakteristische statische Abstand d_p . Deshalb wird der Entladungsabstand mit dem entsprechendem d_p normiert, und man erhält für d/d_p einen Wert zwischen 0 und 1. Für die Auswertung der Messwerte ist es deshalb nötig d_p für die unterschiedlichen Einflussparameter zu ermitteln.

2.5.2 Berechnung von d_p

Das Erreichen einer kritischen elektrischen Feldstärke, in Abhängigkeit von der Entladungsanordnung, bestimmt, ab wann eine Entladung möglich ist. Die höchste auftretende Feldstärke E_S bei der Kugel-Platte-Anordnung entsteht am Kugelscheitel, dem Punkt der Kugel, welcher der Platte am nächsten ist (Bild 2.1b). Es wird angenommen, dass bei der quasi-homogenen Kugel-Platte-Anordnung genau dann die Durchbruch-Feldstärke erreicht ist, wenn nach Gleichung (2.2) die Feldstärke E_S den Wert der Durchbruch-Feldstärke E_d im homogenen Feld geteilt durch η erreicht. Für den homogenen Fall ist die Durchbruch-Spannung U_d beziehungsweise die Durchbruch-Feldstärke E_d (Gleichung (2.5)) über die Paschenkurve (Kapitel 2.3.4) gegeben.

Trägt man die Feldstärke E_S zusammen mit der oben beschriebenen Durchbruch-Feldstärke E_d/η in Abhängigkeit vom Abstand d auf (Bild 2.6), so erhält man im Schnittpunkt der beiden Geraden den Abstand d_p , bei dem erstmalig eine Ent-

ladung möglich ist, das heißt solange E_S kleiner E_d/η ist, erfolgt keine Entladung. Im Schnittpunkt der Geraden ist erstmals die Durchbruchbedingung erfüllt.

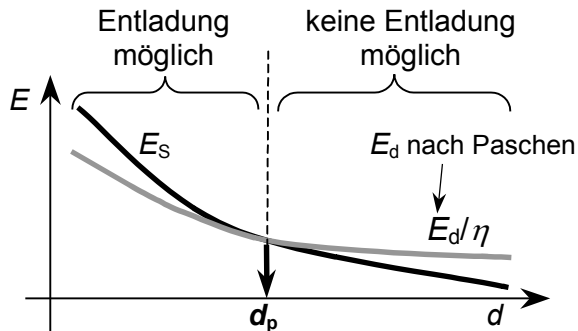


Bild 2.6

Ermittlung von d_p , dem größten möglichen Entladungsabstand, aus dem Vergleich der Feldstärkewerte E_S am Kugelspitze und der Durchbruchfeldstärke E_d/η

Mit E_S und E_d/η nach Bild 2.6 kann d_p ermittelt werden. Dazu muss die Feldstärke E_S am Kugelspitze in Abhängigkeit von d bekannt sein. Die Feldstärke E_S hängt dabei neben der geometrischen Anordnung auch vom Material der isolierenden Schicht ϵ_r und deren Dicke h sowie der Flächenladungsdichte σ_i ab. Im folgenden werden zwei Möglichkeiten der näherungsweisen Ermittlung von E_S vorgestellt.

Berechnung von E_S mit Platte-Platte-Näherung

Aus der in Bild 2.7 dargestellten Platte-Platte-Näherung, für die quasi homogene Anordnung, kann Gleichung (2.7) abgeleitet werden, mit welcher die Feldstärke $E_{S,\text{hom}}$ in Luft aber auch die Feldstärke E_{iso} im Isolator berechnet werden kann.

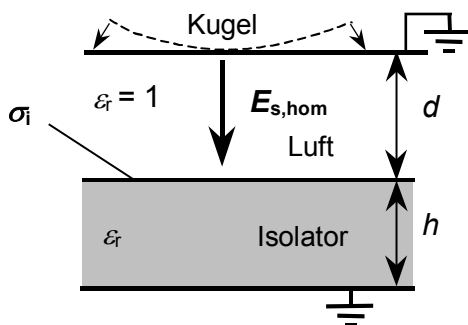


Bild 2.7

Bestimmung der Feldstärke E_S am Kugelspitze mit der Näherung der Platte-Platte Anordnung; durch die Näherung geht E_S in $E_{S,\text{hom}}$ über

Durch diese Näherung geht die Feldstärke E_S am Kugelspitze in die Feldstärke $E_{S,\text{hom}}$ für den homogenen Fall über, weshalb bei der Bestimmung von d_p , die Feldstärke $E_{S,\text{hom}}$ direkt mit E_d zu vergleichen ist. Die Herleitung ist in Anhang B zu finden.

$$E_{S,\text{hom}} = \frac{-\sigma_i \cdot h}{\epsilon_0 \cdot (\epsilon_r \cdot d + h)} \quad (2.7)$$

Ermittlung von E_S über die Simulation einer Kugel-Platte-Anordnung

Die zweite und aufwendigere Möglichkeit E_S zu ermitteln, besteht in einer Simulation mit einem Finite-Elemente-Programm, wie z.B. FlexPDE. Dazu wird die in Bild 2.5 gezeigte Anordnung zusammen mit den Parametern ϵ_r , h und σ_i in ein zweidimensionales Modell umgesetzt. Für jeden Parameter und jeden Entladungsabstand d ist diese Simulation zu wiederholen.

2.5.3 Vergleich und Verifizierung mit Messungen von d_p

Zur Verifizierung der beschriebenen Berechnung der Feldstärke E_S wurde für einige Beispiele der Entladungsabstand d_p gemessen. Um so nah wie möglich an den Wert von d_p heranzukommen, muß man entweder sehr lange warten oder dafür sorgen, dass möglichst sofort Startelektronen vorhanden sind. Bestrahlt man das Entladungsgebiet mit einer UV-Licht-Quelle, so wird die Entstehung von freien Elektronen begünstigt. Mit dieser Variante und einer schrittweisen sehr langsamen Annäherung wurde d_p als der maximal auftretende Entladungsabstand messtechnisch ermittelt.

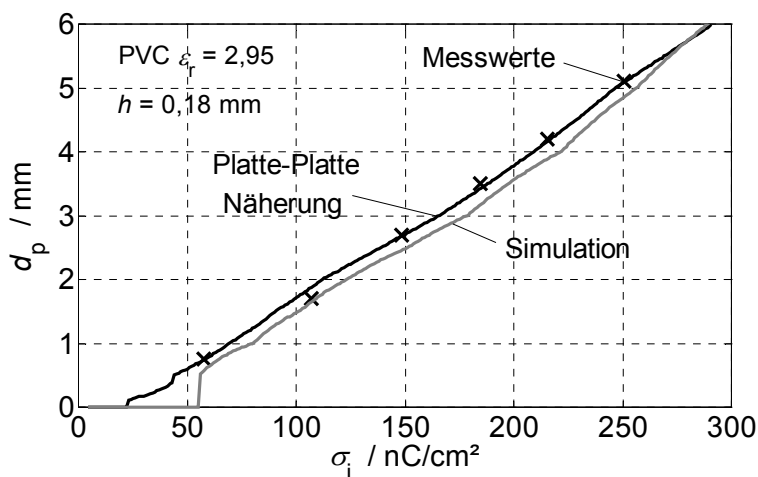


Bild 2.8

Vergleich von gemessenen Werten von d_p mit Werten, die einerseits mit der Feldstärke E_S aus der Platte-Platte-Näherung und andererseits mit E_S aus der Simulation ermittelt wurden, in Abhängigkeit von σ_i für PVC mit einer Dicke von $h = 0,18$ mm

Bild 2.8 zeigt den Vergleich von gemessenen Werten von d_p , in Abhängigkeit von der Flächenladungsdichte σ_i , mit Werten, die einerseits mit der Feldstärke E_S aus der Platte-Platte-Näherung und andererseits mit der Feldstärke E_S aus der Simulation ermittelt wurden. Der Vergleich wurde am Beispiel von PVC mit einer Dicke $h = 0,18$ mm durchgeführt. Die einfache Rechnung mit der Platte-Platte-Näherung zeigt eine bessere Übereinstimmung mit den Messwerten als die Simulation.

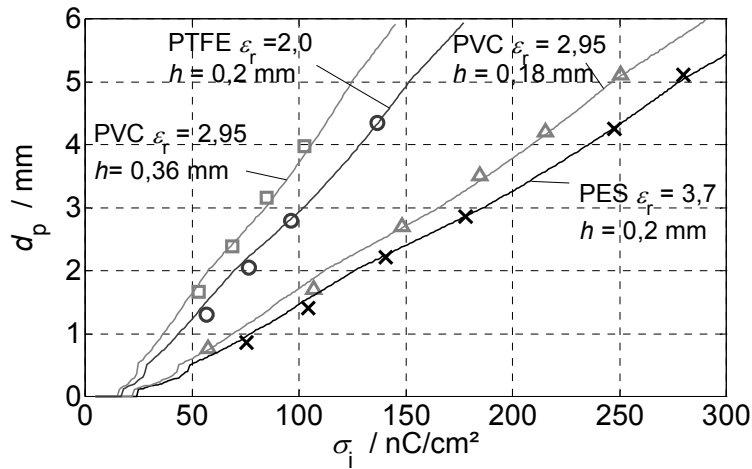


Bild 2.9

Vergleich von gemessenen Werten von $d_p(x, \sigma, \dots)$ mit Werten, die mit E_S aus der Platte-Platte-Näherung ermittelt wurden (durchgezogene Linie), in Abhängigkeit von σ_i für einige Materialien und Dicken

In Bild 2.9 ist ein Vergleich der berechneten und gemessenen Werte in Abhängigkeit von σ_i für unterschiedliche Materialien (Kapitel 3.1.2) dargestellt: für PVC ($\epsilon_r = 2,95$; $h = 0,18$ mm und $h = 0,36$ mm), für PTFE ($\epsilon_r = 2,0$; $h = 0,2$ mm) und für PES ($\epsilon_r = 3,7$; $h = 0,2$ mm). Es ist eine gute Übereinstimmung zu erkennen, wobei die Werte von d_p bei kleiner Flächenladungsdichte und somit kleineren Abständen bei der Messung etwas kleiner sind. Aus diesen Untersuchungen kann abgeleitet werden, dass für die Abschätzung der Größe von d_p , die Ermittlung von E_S über die Platte-Platte-Anordnung geeignet ist.

2.5.4 Einteilung der Entladungsarten

Mit Kenntniss von d_p wird eine Einteilung der Entladungsarten in Verbindung mit den Parametern Oberflächenpotential U_i und Entladungsabstand d vorgenommen (Bild 2.10). Der Paschenabstand d_p ist der Abstand, bei dem erstmalig eine Entladung möglich ist, weshalb für $d > d_p$ keine Entladung auftreten kann. Im Bereich $d < d_p$ und geringe Aufladungswerte U_i entstehen Büschelentladungen. Wird der Wert von U_i größer so können Gleitentladungen entstehen.

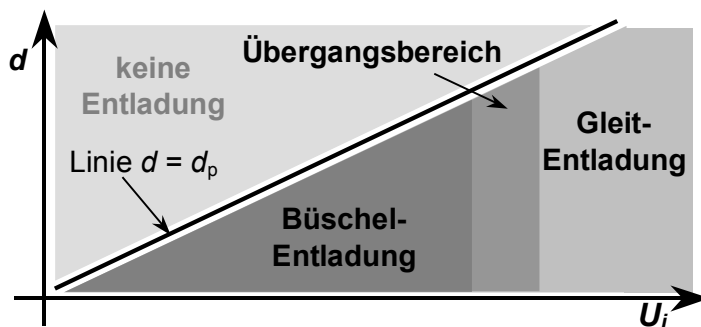


Bild 2.10

Einteilung der Entladungsarten

2.6 Ladungsbestimmung

Es gibt zwei Möglichkeiten die entladene Ladungsmenge zu bestimmen. Zum Einen kann die entladene Ladungsmenge $Q_{e,\sigma}$ aus der Differenz der vor und nach der Entladung ermittelten Flächenladungsdichte-Verteilung $\sigma_e(r)$ ermittelt werden, indem das Flächenintegral zur Berechnung des Volumens unter der Flächenladungsdichte-Verteilung gebildet wird.

$$Q_{e,\sigma} = \iint \sigma_e(x, y) dx dy \quad (2.8)$$

Zum Anderen ist die entladene Ladungsmenge $Q_{e,i}$ über den gemessenen Entladungsstrom-Impuls $i_e(t)$ ermittelbar, indem das Integral über die Zeit gebildet wird.

$$Q_{e,i} = \int i_e(t) dt \quad (2.9)$$

2.7 Energiebestimmung

Die Basis für die Bestimmung der umgesetzten Energie im Funkenkanal ist der Entladungsstrom-Impuls. Ist dieser bekannt, entweder durch Messung oder Simulation, so kann die Energie auf einfache Weise berechnet werden.

Dazu wird in einem ersten Schritt aus dem Strom und dem Funkenwiderstand die umgesetzte Leistung berechnet, siehe Gleichung (2.10). Zur Beschreibung des Funkenwiderstandes wird das Gesetz von Rompe und Weizel benutzt. Der Wert der Funkenkonstante a wird für diese Berechnung der Literatur entnommen, wie in Kapitel 2.3.3 beschrieben. Er liegt in dem für ESD relevanten Bereich [Pommerenke, 1995], [Mesyats, 1968], im Bereich von 0,5 bis 1,0 cm²/V²s. Als zusätzlicher Wert muss der Entladungsabstand d bekannt sein. Steht dieser nicht zu Verfügung, so kann für worst case Betrachtungen der maximal mögliche Entladungsabstand d_p angenommen werden.

$$p_u(t) = R_F(t) \cdot i_e(t)^2 = \frac{d \cdot i_e(t)^2}{\sqrt{2a \cdot \int_0^t i_e(t)^2 d\tau}} \quad (2.10)$$

Aus der zeitabhängigen Leistung, Gleichung (2.10), kann anschließend durch Integration über die Zeit die umgesetzte Energie W_u im Funkenkanal ermittelt werden.

$$W_u = \int_0^t p_u(\tau) d\tau \quad (2.11)$$

Wie aus Gleichung (2.10) und (2.11) zu entnehmen, ist die umgesetzte Energie W_u maßgeblich vom Entladungsstrom i_e und dessen Form abhängig. Deshalb wird dieser Einfluss anhand eines Beispiel näher betrachtet. Dazu wurden zwei Ströme angenommen, welche unterschiedliche Amplituden und Anstiegszeiten aber gleiche Ladung besitzen (Bild 2.11a). Für diese Ströme wurde die umgesetzte Energie W_u in Abhängigkeit der Zeit t ausgewertet und in Bild 2.11b in Prozent, bezogen auf das Maximum $W_{u,max}$, dargestellt.

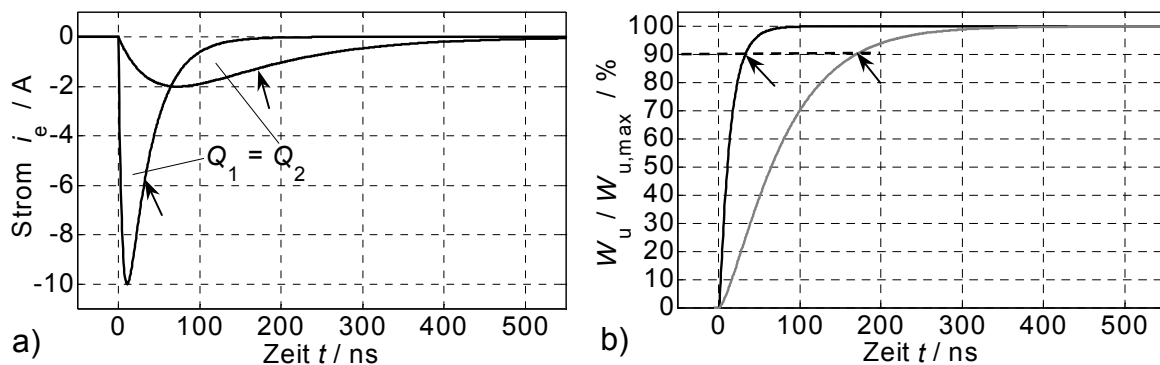


Bild 2.11 Einfluss des Entladungsstromes i_e auf die umgesetzte Energie W_u
 a) zwei Ströme i_e mit unterschiedlicher Form (verschiedene Amplitude und Anstiegszeit, aber gleiche Ladungsmenge)
 b) Energie W_u in Abhängigkeit der Zeit, aufgetragen für die beiden Ströme i_e von Bild 2.11a

Daraus kann abgelesen werden, dass der größte Energiebetrag durch den Anstieg des Stromes erzeugt wird. Die physikalische Erklärung dafür ist, dass einerseits in einem größeren Funkenwiderstand mehr Energie umgesetzt werden kann, wie in Gleichung (2.3) zu sehen und andererseits dieser Funkenwiderstand erst mit größer werdendem Stromes i_e kleiner wird. Der Zeitpunkt bei dem 90 Prozent der Energie umgesetzt wurden, ist in Bild 2.11a und b durch Pfeile angedeutet. Für die Bestimmung der Energie ist demzufolge der Entladungsstrom i_e vom Beginn bis etwa zu dem Zeitpunkt interessant, bei dem i_e auf die Hälfte des Spitzenwertes abgesunken ist. Im weiteren Verlauf führt der Strom nicht mehr zu nennenswerten Energiebeträgen, durch den nunmehr sehr kleinen Funkenwiderstand.

3 Versuchstechnik

Einen Hauptpunkt bei der Untersuchung der Entladung aufgeladener isolierender Oberflächen, stellt die Messtechnik dar. Der speziell dafür entwickelte Messaufbau wird im Folgenden beschrieben. Ergänzt wird dieses Kapitel durch die Erläuterung eines typischen Messablaufes und die Beschreibung von durchgeführten Voruntersuchungen zur Aufladung von nichtleitfähigen Oberflächen.

3.1 Messaufbau

3.1.1 Gesamtaufbau der Messtechnik

Die Auf- und Entladung von Isolierstoff-Oberflächen ist abhängig von den klimatischen Umgebungsbedingungen, wie relativer Luftfeuchtigkeit und Temperatur. Deshalb ist der gesamte Messaufbau in einer Klimakammer untergebracht. Bei geringer relativer Luftfeuchtigkeit ist eine größere Aufladung möglich. Oberhalb einer relativen Feuchte von 20 bis 30 % ist diese Abhängigkeit näherungsweise linear. Unterhalb verringert sich die Abhängigkeit sehr schnell und ist kaum noch vorhanden [Gibson, 1965]. Für die Untersuchung hoher Aufladung wurde deshalb für alle Messungen eine relative Feuchte von 25 % gewählt, die etwa im Knickpunkt der Abhängigkeit liegt. Zusätzlich wurde eine konstante Temperatur von 21°C gewählt.

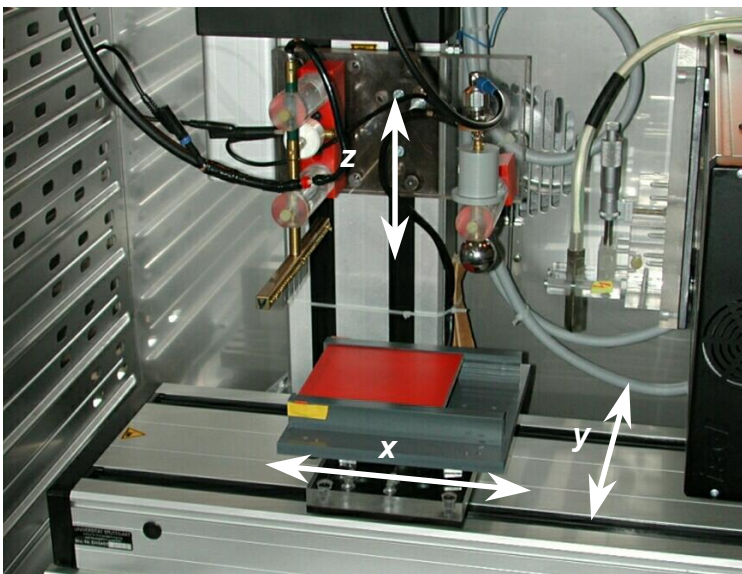


Bild 3.1

Messaufbau im Klimaschrank mit Darstellung der drei Bewegungsachsen x, y, z

Alle Komponenten des Messaufbaus (Bild 3.1) sind entweder über IEC-Bus oder optische serielle Schnittstelle (RS232) mit dem PC verbunden und werden von einem Programm gesteuert. Die in Lab Windows geschriebene Software beinhaltet die Ansteuerung der Geräte sowie das Auslesen, Speichern und Anzeigen der Messwerte.

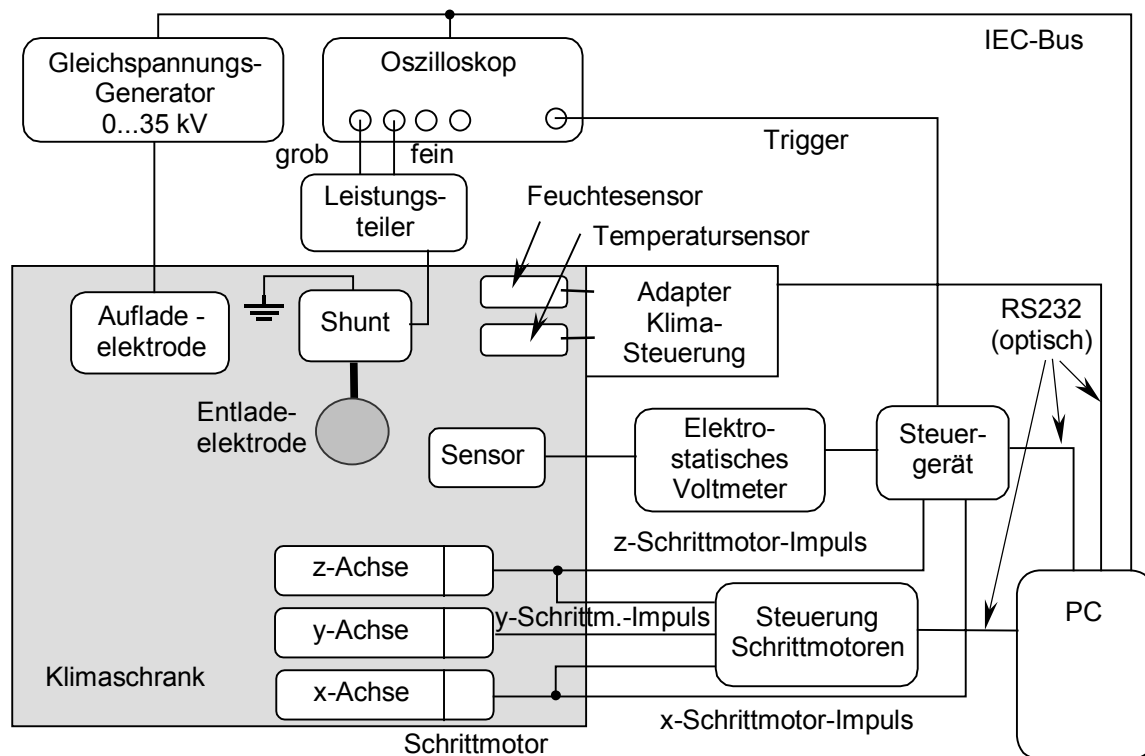


Bild 3.2 Blockschaltbild der Geräte und Komponenten des Messaufbaus

Bewegungssystem

Der Prüfling, die Elektroden und der Sensor des elektrostatischen Voltmeters werden mit Hilfe eines *Bewegungssystems* verfahren. Dieses System besteht aus drei Linearführungen, die in x-, y- und z-Richtung angeordnet sind. Die Linearführungen werden durch jeweils einen Schrittmotor angetrieben. Die Schrittmotoren werden über die Motorsteuerung angesteuert, die mit dem PC kommunizieren kann (Bild 3.2). Die Achsen haben entsprechend ihrer Aufgabe eine unterschiedliche örtliche Auflösung, welche durch die bewegte Strecke bei einem Schrittmotorimpuls definiert ist. Die x-Achse, für große Strecken, hat eine Auflösung von 0,025 mm/Impuls, die y-Achse eine von 0,0125 mm/Impuls und die z-Achse, für kleine Strecken, eine von 0,00625 mm/Impuls.

Einheit zur Aufladung

Die *Aufladung* des Prüflings erfolgt durch Ausnutzung von Koronaentladungen. Dazu wird Hochspannung von einem Gleichspannungs-Generator (35 kV, 4 mA) an die Auflade-Elektrode angelegt. Diese ist an der z-Achse befestigt (Bild 3.1), damit der Abstand zwischen Elektrode und Prüflingsoberfläche eingestellt werden kann.

Einheit zur Ermittlung der Potentialverteilung

Der Prüfling, die isolierende Materialprobe, ist mit einer Halterung auf dem Schlitten der x-Achse befestigt, wogegen der Sensor des elektrostatischen Voltmeters an der y-Achse angebracht ist. Dieser Aufbau ermöglicht eine zweidimensionale *Erfassung des Oberflächenpotentials*. Die gemessenen Werte erhalten im Steuergerät die örtliche Zuordnung, unter Ausnutzung der Schrittmotorimpulse, und werden dann zum PC übertragen. Die Flächenladungsdichte wird aus dem Oberflächenpotential bestimmt, welches mit dem Sensor des elektrostatischen Voltmeters aufgezeichnet wurde (Kapitel 3.1.4).

Einheit zum Entladen

Die Kugel-Elektrode zum *Entladen* der aufgeladenen Oberfläche ist ebenfalls an der z-Achse befestigt, jedoch örtlich versetzt, sodass sich die Auf- und Entladung nicht behindern. Der Kugelradius mit 15 mm wurde so gewählt, dass durch die beschriebene Abhängigkeit des Krümmungsradius [Gibson, 1965] [Heidelberg, 1967], ein möglichst großer Ladungstransfer stattfindet. Über die z-Achse kann der Abstand zur Prüflingsoberfläche eingestellt werden. Der Entladungsstrom-Impuls wird mit Hilfe eines Messwiderstandes (Shunt) von $0,1 \Omega$ und einem Digital-Speicher-Oszilloskop mit 1 GHz analoger Bandbreite gemessen und zur weiteren Auswertung im PC gespeichert (Bild 3.2).

Steuergerät

Die Hauptaufgabe des entwickelten Steuergerätes (Bild 3.3) ist die Erfassung und Aufbereitung der analog am Monitorausgang des elektrostatischen Voltmeters (ESV) anliegenden Messwerte. Zusätzlich ermöglicht das Steuergerät die Erfassung des Abstandes während der Entladung.

Am Monitorausgang des elektrostatischen Voltmeters, welches in einem Bereich von ± 20 kV arbeitet, liegen die gemessenen Potentialwerte im Verhältnis 1:1000 an, so dass der sich ergebende Messbereich von ± 20 V auf den Eingangsbereich des A/D-Umsetzer angepasst werden muß. Als Trigger des A/D-Umsetzers werden die Schrittmotorimpulse der x-Achse benutzt, die somit die örtliche Zuordnung der Messwerte ermöglichen. Diese werden vom Mikrocontroller (μ C) aufbereitet und über eine optische serielle Schnittstelle zum PC übertragen. Das Rauschen des Systems wird mit ± 15 V ($< 0,1\%$) ermittelt. Dies bestätigt die Angaben im Datenblatt des Gerätes [Trek, 2000].

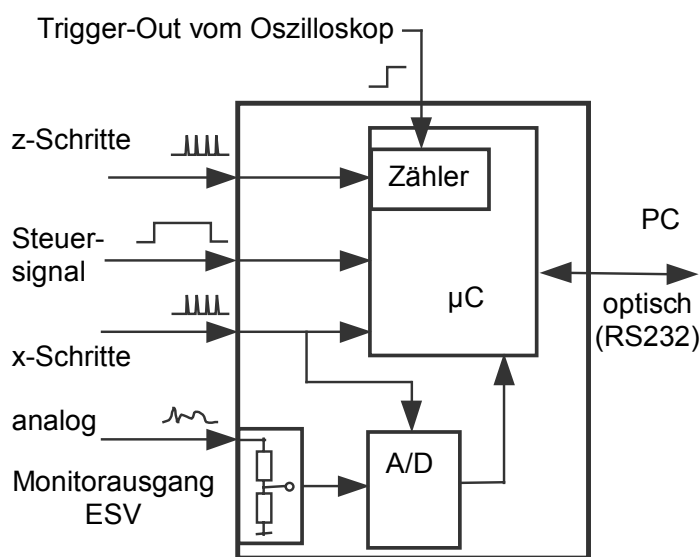


Bild 3.3

*Aufbau des Steuergerätes
mit den Ein- und Ausgangs-
signalen*

Nach der Initialisierung der Nullpunkthöhe auf der Prüflingsoberfläche, wird der Abstand zu der Oberfläche über die Anzahl an Schrittmotorimpulsen in z-Richtung gesteuert. Wenn sich die Elektrode bis zum vorgegebenen Abstand annähert und dann die Entladung stattfindet, ist der Abstand bekannt. Tritt die Entladung aber bereits bei der Annäherung auf, so werden die Schrittmotorimpulse gezählt (Zähler), welche die Elektrode nach der Entladung noch zurücklegt. Mit diesem Wert kann der tatsächliche Abstand bei der Entladung berechnet werden. Die Zählung der Schrittmotorimpulse wird mit dem vom Oszilloskop generierten „Trigger-Out“-Signal gestartet. Dieses Signal hat eine Verzögerung von 40 ns, sodass bei einer Schrittdauer von $62,5 \mu\text{s}$ im ungünstigsten Fall ein Schritt verpasst wird. Der Abstandsfehler ist somit kleiner als 0,01 mm. Dagegen erfolgt die Initialisierung des Nullpunktes mit einer Genauigkeit von 0,05 mm.

3.1.2 Prüflinge

Als Prüflinge wurden Folien bzw. Platten isolierender Materialien mit unterschiedlichen relativen Dielektrizitätskonstanten ϵ_r verwendet. Um ein möglichst breites Spektrum an ϵ_r Werten abzudecken, wurden die Folien so ausgewählt, dass Werte von 2,0 bis 3,7 untersucht werden konnten (Tabelle 3.1). Da die Werteangaben der Hersteller für ϵ_r teilweise sehr streuen, wurden die Werte nachgemessen. Ein weiteres Kriterium für die Materialauswahl sind der Oberflächen- bzw. der spezifische Volumenwiderstand. Diese Werte müssen genügend hoch sein, damit während der Ermittlung des Oberflächenpotentials keine Veränderungen an der Ladungsverteilung auftreten (siehe Kap. 3.3.3).

Für Flächengrößen von größergleich 225 cm² ergibt sich nach [Gibson, 1965] eine maximale entladene Ladungsmenge. Die in dieser Arbeit untersuchten Flächen orientieren sich an dieser Größe. Die Prüflingshalter wurden so aufgebaut, dass quadratische Flächen von 12 cm, 17cm und 22 cm Kantenlänge untersucht werden können. Randeffekte, wie Absprühen durch Feldüberhöhungen an der Kante oder Vorentladungen hin zur rückseitigen Masse bedingen eine Verringerung der Flächenladungsdichte am Rand des Prüflings. Um diesen Effekt zu verringern ist die rückseitige Masse 10 mm von den Außenkanten zurückgezogen und durch nichtleitendes Material ersetzt. Es ergibt sich somit eine effektive Fläche von 100 cm² bis 400 cm². Der Randbereich von 10 mm an jeder Seite wird demnach bei der Auswertung vernachlässigt. Die Dicke der untersuchten Folien variierte von 0,1 mm bis 2 mm.

Material	Abkürzung	ϵ_r	spez. Oberflächenwiderstand in Ω/\square	spez. Volumenwiderstand in Ωcm
Polytetrafluorethylen	PTFE	2,00	10^{17}	$10^{18} - 10^{19}$
Polypropylen	PP	2,20	10^{13}	$10^{16} - 10^{18}$
Ethylen-Tetrafluorethylen	ETFE	2,55	$> 10^{14}$	10^{16}
Polycarbonat	PC	2,93	10^{15}	$(10^{14}) - 10^{16}$
Polyvinylchlorid	PVC	2,95	10^{15}	$5 \cdot 10^{16}$
Polyethylenterephthalat	PET	3,10	$> 5 \cdot 10^{14}$	10^{18}
unplastifiziertes Polyvinylchlorid	UPVC	3,35	10^{15}	10^{16}
Polyethersulfon	PES	3,70	$> 10^{15}$	10^{17}

Tabelle 3.1 Gegenüberstellung der Materialdaten; ϵ_r aus eigener Messung, restliche Daten vom Hersteller [Goodfellow, 2003]

Die theoretisch maximale Aufladung von einseitig aufgeladenen Isolierstoffen beträgt $2,7 \text{ nC/cm}^2$ [Gibson, 1965]. Sobald eine rückseitige Massefläche vorhanden ist, können sich Isolierstoffe durch die Bildung von Ladungsdoppelschichten wesentlich höher aufladen. Aus diesem Grund werden nur Isolierstoffproben mit rückseitiger Massefläche untersucht, weil bei diesen durch die höhere mögliche Flächenladungsdichte σ auch eine höhere Gefährdung möglich ist.

3.1.3 Aufladung

Zur Aufladung des Prüflings wird die Koronaentladung benutzt. Die Auflade-Elektrode, an die Hochspannung angelegt wird, besteht aus vielen spitzen Nadeln, die in Form eines Kammes angeordnet sind (Bild 3.4). An den Spitzen der Nadeln entsteht eine starke Feldüberhöhung, die ein Absprühen von Ladungen zur Folge hat. Die Nadeln sind im Abstand von 5 mm entlang einer Linie angeordnet. Die Länge der Anordnung entspricht etwa der Breite des Prüflings. Ein Abstand von 5 mm zwischen Nadeln und der Prüflingsoberfläche hat sich als praktisch erwiesen. Eine gleichmäßige Ladungsverteilung auf der Oberfläche wird erreicht, indem die Prüflingsoberfläche unter dem Nadelkamm entlang bewegt wird. Im Rahmen dieser Arbeit wurden nur negative Aufladungen untersucht, weil sich diese als zündfähiger erwiesen haben (Kapitel 2.2.2)

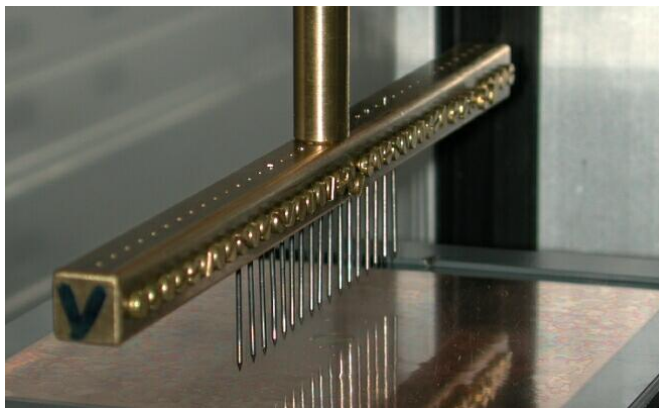


Bild 3.4

*Auflade-Elektrode,
bestehend aus spitzen
Nadeln, die im Abstand von
5 mm auf einer Linie ange-
ordnet sind*

Die schon beschriebenen Randeffekte werden auch bei der Aufladung berücksichtigt, indem nur der innere Bereich, die effektive Fläche, mit dem Nadelkamm abgedeckt wird. Bei einem Prüfling von $12 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}$ (Innenbereich $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$) besteht der Nadelkamm, der in y -Richtung ausgerichtet ist, je nach Aufladespannung aus 17 oder 19 Nadeln. Die Bewegung der Prüflingsoberfläche in x -Richtung wird ebenfalls begrenzt, sodass die Nadeln in der äußersten Position einen Abstand von 10 mm bis 15 mm zum Rand haben.

3.1.4 Ermittlung der Potentialverteilung

Das Oberflächenpotential wird mit dem elektrostatischen Voltmeter (ESV) ermittelt. Der Sensor des ESV arbeitet nach dem Kompensationsprinzip. Das vom Sensor erfasste elektrische Feld der Oberflächenladungen wird zu Null kompensiert, indem die am Sensorgehäuse angelegte Spannung variiert wird. Die angelegte Spannung am Sensor entspricht dem Potential auf der Oberfläche und wird über den Monitorausgang ausgegeben. Dieses analoge Signal wird im Steuergerät analog-digital umgesetzt und zum PC weitergegeben.

Der Sensor kann Spannungen von ± 20 kV messen mit einer Einregelzeit kleiner als $200 \mu\text{s}$ für einen 1 kV Sprung. Dieser Punkt bestimmt die Geschwindigkeit mit welcher der Sensor bewegt werden kann. Mit einer Geschwindigkeit von 100 mm/s und einem Messpunkt Abstand von $0,5 \text{ mm}$ hat der Sensor 5 ms pro Wert zur Verfügung. Demzufolge kann der Sensor einer Oberflächenpotential-Änderung von 5 kV auf $0,1 \text{ mm}$ folgen. Die Genauigkeit ist dabei besser als $0,1\%$ bei Vollausschlag bzw. besser als 20 V [Trek, 2000].

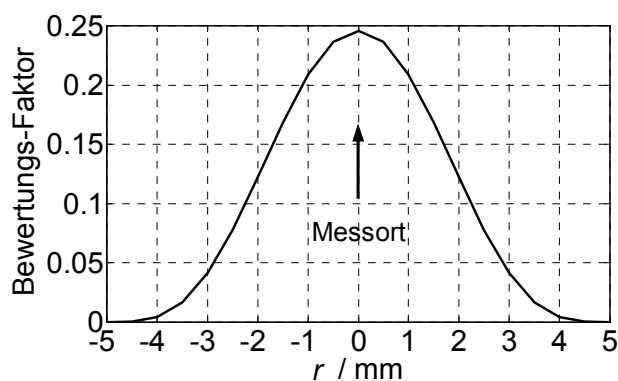


Bild 3.5

Räumliche Impulsantwort des Sensors, wobei der Bewertungs-Faktor in Abhängigkeit vom Abstand r vom Messort aufgetragen ist

Eine größere Ungenauigkeit ergibt sich dadurch, dass der Sensor je nach Abstand von der Oberfläche sein Ergebnis über eine Kreisfläche ermittelt. Für den minimal möglichen Abstand zwischen Oberfläche und Sensor von 2 mm wurde die Bewertungsfunktion untersucht, die in Bild 3.5 dargestellt ist (Anhang C). Integriert man die dargestellte Kurve so erhält man den Wert Eins. Die Bewertungsfunktion wird als räumliche Impulsantwort des Sensors bezeichnet, die angibt mit welchem Faktor ein Potentialwert im Abstand r vom Messort in das Ergebnis einght. Mathematisch ausgedrückt faltet der Sensor die zu messende Oberflächenpotential-Verteilung mit der räumlichen Impulsantwort des Sensors. Mit einem akzeptierten Fehler von 5% ergibt sich aus der Kurve eine Kreisfläche mit Radius $\approx 3 \text{ mm}$, die der Sensor zur Ermittlung des Messwertes benutzt.

Eine Betrachtung von Faltung und Rückfaltung zeigt, dass die Ermittlung der ursprünglichen Potentialverteilung vor der Faltung theoretisch möglich ist, praktisch aber nicht genutzt werden kann. Der Grund hierfür ist die Eigenschaft der Rückfaltung bei sehr kleinen Abweichungen sehr große Fehler zu erzeugen.

Zusammenfassend kann man festhalten, wenn die Form der gemessenen Verteilung gleich oder breiter der räumlichen Impulsantwort des Sensors (≈ 8 mm) ist, so entstehen keine großen Fehler. Bei kleineren Abmessungen erfolgt eine Mittelung bzw. Glättung der Messwerte in Abhängigkeit von den Ortskoordinaten.

3.1.5 Strommessung

Die Entladungsströme sind sehr schnelle Vorgänge im Nanosekunden-Bereich. Aus diesem Grund wird zum Erfassen dieser Vorgänge ein schnelles digitales Speicheroszilloskop mit einer analogen Bandbreite von 1GHz benutzt. Die Messgröße wird hierzu an einem in den Messkreis eingebrachten Messwiderstand abgegriffen. Damit dieser nur eine geringe Rückwirkung auf die Entladungsentwicklung hat, wird ein Widerstandswert von $0,1 \Omega$ (gemessen $0,0994 \Omega$) gewählt [Pommerenke, 1995].



Bild 3.6

*Messwiderstand, koaxial
aus 10 parallelen 1Ω
Widerständen aufgebaut*

Wegen seiner Hochfrequenz-Eigenschaft bis in den GHz-Bereich, ist der Messwiderstand koaxial aus 10 parallelen 1Ω Widerständen, mit einer Toleranz von 1 %, aufgebaut (Bild 3.6). Zusätzlich wurden möglichst kleine Abmessungen realisiert. Die Ermittlung des Hochfrequenzverhaltens erfolgte mit einem Netzwerkanalysator. Dazu wurde ein Sensoraufbau ohne Widerstände zur Einspeisung benutzt. Dies entspricht nahezu einer Stromeinprägung, mit einer 50Ω Quell- und einer $0,1 \Omega$ Lastimpedanz. Im Bild 3.7 ist der Frequenzgang in Form der Abweichung vom berechneten Idealwert dargestellt. Diese liegt im Bereich von $\pm 0,5$ dB. Der Messwiderstand ist damit gut zur Erfassung des Entladungsstromes geeignet.

Zur weiteren Verbesserung der Messauflösung wird das Signal über einen Leistungsteiler an zwei Eingänge des Oszilloskops mit unterschiedlicher Amplitudenauflösung angeschlossen. Kleine Signale werden dadurch besser wiedergegeben. Mit der Annahme, dass mit dem Oszilloskop bei 20 mV Vollausschlag eine ausreichende Genauigkeit erreicht wird, kann mit dem Sensor ein Bereich von 100 mA bis 100 A gemessen werden. Bei größeren Strömen können zusätzlich Dämpfungsglieder benutzt werden.

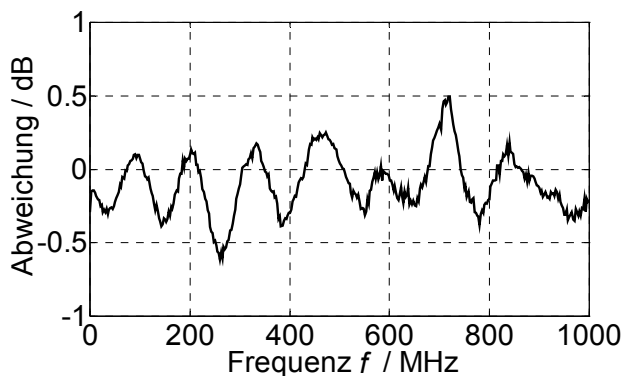


Bild 3.7

Dargestellt ist die Abweichung des Frequenzganges des Messwiderstandes vom Idealwert

Testmessungen zeigten, dass für eine korrekte Erfassung des Entladungsstromes über einen sehr langen Zeitraum von ca. 100 μs gemessen werden muss. Der Grund sind die sich sehr langsam bewegenden Ionen während der Entladung. Der Anstieg des Entladungsstromes ist sehr kurz, weshalb auch mit einer sehr hohen Zeitauflösung gemessen werden muss. Eine lange Aufzeichnungsdauer und eine hohe Zeitauflösung erfordern eine sehr große Speichertiefe des Oszilloskopes, was bei der Auswertung zu einer höheren Rechenzeit führt. Mit einer Abtastrate von 4 GS/s ergeben sich für eine Messzeit von 100 μs schon 400 000 Punkte.

Wie in Kapitel 2.6 dargestellt, ist für die Bestimmung der umgesetzten Energie nur der Anstieg und der erste Teil des Rückens des Stromverlaufes von Bedeutung. Die sehr langsamen Vorgänge tragen kaum zum Energiebetrag bei, sodass man für Büschelentladungen mit einer Messzeit von 0,5 μs bis 1 μs auskommt. Dabei ist zu beachten, dass für diesen Fall die entladene Ladungsmenge, die durch Integration des Entladungsstromes bestimmt wird, etwas kleiner ist, als die Ladungsmenge, die aus der räumlichen Verteilung der Flächenladungsdichte ermittelt wird. Bei Gleitentladungen ist eine Messzeit von 5 μs bis 10 μs nötig, weil die Vorgänge bei dieser Entladung langsamer ablaufen.

3.2 Messablauf

Die zwei wichtigsten Messgrößen bei der Untersuchung der Entladung aufgeladener isolierter Oberflächen sind die örtliche Flächenladungsdichte-Verteilung vor und nach der Entladung und der Entladungsstrom. Wie ein typischer Messablauf zur Erfassung dieser Größen aussieht, wird im folgenden beschrieben [Müller, 2001].

Als erstes wird die Prüflingsoberfläche gleichmäßig aufgeladen. Dazu wird an die Kammelektrode eine Spannung, im weiteren als Sprühspannung bezeichnet, angelegt. Nach Annäherung der Elektrode, bewegt sich der Prüfling langsam in x-Richtung unter dieser Elektrode hinweg, sodass eine möglichst gleichmäßige flächige Aufladung entsteht. Erst nachdem die Elektrode wieder in ihre Ausgangsposition gebracht wurde, wird die Sprühspannung abgeschaltet. Der Grund dafür ist, dass so keine vorzeitige Entladung über die Koronanadeln erfolgen kann.

In einem zweiten Schritt wird die Ausgangs-Ladungsverteilung erfasst. Der Prüfling, in x-Richtung, und der Sensor des elektrostatischen Voltmeters, in y-Richtung, werden zur Startposition bewegt. Diese befindet sich in einer Ecke des Prüflings. Der Abstand zwischen Oberfläche und Sensor beträgt 2 mm. Die Werte des Oberflächenpotentials, entlang der ersten Linie, werden erfasst, indem der Prüfling unter dem Sensor bis zum anderen Ende der Oberfläche bewegt wird. Im Anschluss wird der Sensor um die Rasterweite (typisch 0,5 mm) in y-Richtung weiter bewegt. Mit der Rückwärtsbewegung der Prüflingsoberfläche wird die zweite Datenlinie erfasst. Dieser mäanderförmige Ablauf wird wiederholt, bis das Potential der gesamten Oberfläche ermittelt ist. Die Dauer eines solchen Ablaufes für einen Prüfling mit einer Kantenlänge von 120 mm und einem Rasterabstand von 0,5 mm dauert ca. 5 Minuten.

Als nächstes wird die an Masse liegende Kugelelektrode Schritt für Schritt oder kontinuierlich an die Oberfläche angenähert, bis eine Entladung auftritt. Der Entladungsstrom-Impuls wird gemessen. Die Potentialverteilung nach der Entladung wird genau so, wie die Verteilung vor der Entladung, ermittelt. Eine weitere Annäherung der Kugel kann vorgenommen werden, um mögliche weitere Entladungen messen zu können. Am Ende stehen die gespeicherten Daten für weitere Auswertungen im PC zur Verfügung.

Um gleiche Messbedingungen bei wiederholten Messungen zu schaffen, werden die Prüflinge mit hochreinem Isopropanol entladen und gereinigt.

3.3 Voruntersuchungen zur Aufladung

Bevor die Entladungen untersucht werden können, sind die Fragen nach der Gleichmäßigkeit und Reproduzierbarkeit der Aufladung zu beantworten und der Einfluss der zeitlichen Änderung der Aufladung zu untersuchen.

3.3.1 Gleichmäßigkeit der Aufladung

Zur Sicherstellung einer gleichmäßigen Flächenladungsdichte auf der Oberfläche wurden mehrere Auflade-Elektrodenformen untersucht. Die besten Ergebnisse wurden mit der Nadelkamm-Elektrodenanordnung erreicht, wie in Kapitel 3.1.3 beschrieben.

Als Kenngröße für die Aufladung wird im Weiteren die *mittlere Flächenladungsdichte* σ_i benutzt, die den Mittelwert der Messwerte im Bereich ohne Rand darstellt. Für eine PVC-Folie mit $h = 0,18 \text{ mm}$ und $\sigma_i = 120 \text{ nC/cm}^2$ wird zur Beurteilung der Gleichmäßigkeit die Abweichung Δ der gemessenen Flächenladungsdichte von σ_i in Bild 3.8a dargestellt. Im Bild 3.8b ist die dazugehörige Häufigkeits-Verteilungskurve der Messwerte für die effektive Fläche abgebildet.

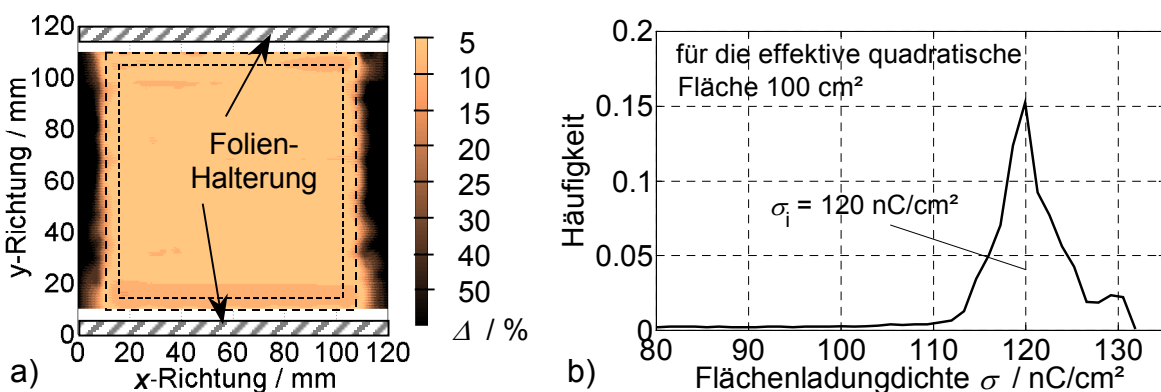


Bild 3.8 Beurteilung der Gleichmäßigkeit der Abweichung Δ der gemessenen Flächenladungsdichte von σ_i

- a) Verteilung der Abweichung Δ auf der Oberfläche
- b) Häufigkeitsverteilung der Werte der Flächenladungsdichte innerhalb der effektiven Fläche

Betrachtet man die effektive Fläche von 10 cm x 10 cm so ergibt sich eine Standardabweichung der gemessenen Werte $\sigma_m(r)$ von σ_i von kleiner als 5 %. Dabei liegen mehr als 95 % aller Messpunkte im Intervall von ± 10 %. Reduziert man den Randeffect noch etwas mehr und betrachtet eine Fläche von 9,5 cm x 9,5 cm, so ist die Standardabweichung kleiner als 3 % und nahezu alle Messwerte liegen im Intervall von ± 10 %.

3.3.2 Reproduzierbarkeit der Aufladung

Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit wurden mehrere Messreihen mit mehr als jeweils 10 Einzelmessungen untersucht. Diese Messungen wurden zeitlich voneinander getrennt und mit unterschiedlichen Prüflingen durchgeführt, um möglichst reale Ergebnisse zu erreichen. Dabei war die Abweichung von der Kenngröße σ_i , der mittleren Flächenladungsdichte maximal $\pm 1,5$ %, in den meisten Fällen jedoch kleiner. Für die empfindlichen Prozesse der Aufladung ist dies eine gute Reproduzierbarkeit.

3.3.3 Zeitliche Änderung der Aufladung

Der gesamte Messablauf mit der Erfassung des Oberflächenpotentials vor und nach der Entladung benötigt bei einem Prüfling mit 10 cm Kantenlänge 10 bis 12 min. Dies erfordert, dass sich in dieser Zeit die Potentialverteilung möglichst wenig ändert. Aus diesem Grund ist dieses Messsystem auf Materialien mit einem hohen Oberflächen- und Volumenwiderstand angewiesen. Aber auch für solche Materialien nimmt die Aufladung über der Zeit ab.

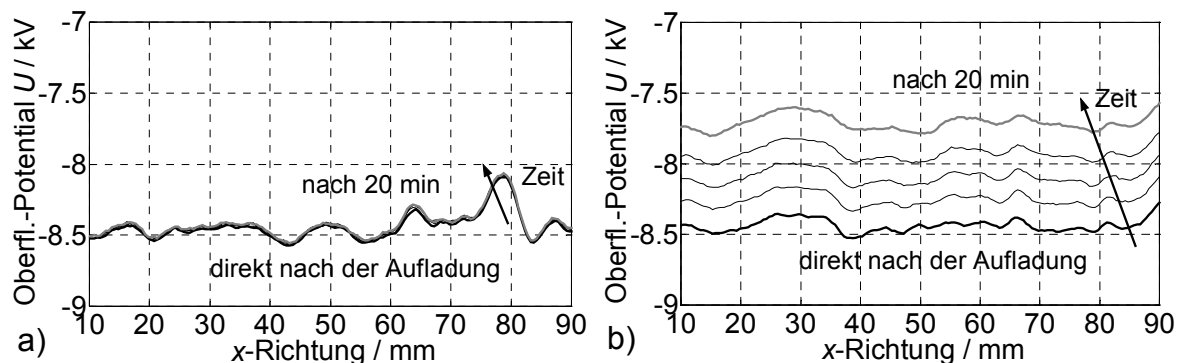


Bild 3.9 Änderung des Oberflächenpotentials entlang einer Linie über der Zeit für

- a) das Material PTFE \Leftrightarrow keine Abhängigkeit von der Zeit zu erkennen
- b) das Material PVC \Leftrightarrow Abhängigkeit von der Zeit ist deutlich zu erkennen

Zur Untersuchung dieses Effektes wird der Prüfling gleichmäßig aufgeladen. Entlang einer Linie wird nach 0, 2, 5, 10 und 20 min das Oberflächenpotential gemessen. Eine solche Studie ist exemplarisch für PTFE und PVC in Bild 3.9 dargestellt. Bei PTFE ist kaum eine Änderung zu sehen, hingegen zeigt PVC schon einen deutlichen Abfall des Oberflächenpotentials. Bildet man den prozentualen Abfall des Oberflächenpotentials zum Beispiel nach 10 min, was der typischen Dauer einer Messung entspricht, so erhält man eine Aussage über die Verwendbarkeit des Materials für diesen Messaufbau (Tabelle 3.2). Über die Entladezeitkonstante korreliert dieser Wert mit dem spezifischen Volumenwiderstand der in Tabelle 3.1 angegeben wurde. Nimmt man an, dass ein Abfall des Aufladungspotentials nach 10 min bis zu 10 % akzeptabel ist, so ergibt sich für den spezifischen Volumenwiderstand ein Wert $>10^{16} \Omega\text{cm}$.

Material	PTFE	PP	ETFE	PVC	PC	PET	UPVC	PES	POM
Abfall nach 10 min in %	0,21	0,33	0,2	6,1	0,26	0,85	3,1	3,6	> 50 nicht geeignet

Tabelle 3.2 Prozentualer Abfall des Aufladepotentials nach 10 min bezogen auf den Wert des Aufladepotentials direkt nach der Aufladung für einige Materialien

Alle betrachteten Materialien außer POM sind geeignet mit dem aufgebauten Messsystem untersucht zu werden. Das Material PVC ist gerade noch geeignet, woraus man allgemein ableiten kann, dass Materialien mit einem spezifischen Volumenwiderstandswert kleiner $10^{16} \Omega\text{cm}$ nicht mehr mit diesem Aufbau untersucht werden können.

Ist der prozentuale Fehler, der durch das vorzeitige Abfließen von Ladungen entsteht, etwas größer aber im Bereich kleiner 10 %, wie zum Beispiel bei PVC, so ist es möglich diesen Fehler näherungsweise zu korrigieren. Dazu werden die Messwerte mit einem Korrekturfaktor multipliziert, der bezüglich der Werte in Tabelle 3.2 gewählt wird.

4 Büschelentladung

In diesem Kapitel wird die Büschelentladung ausführlich behandelt. Im Bild 4.1 ist die Motivation und die Vorgehensweise der Untersuchungen in einer Übersicht zu sehen. Ausgangspunkt ist der geometrische Aufbau. Für die zu variierenden Ausgangsparameter, wie Art und Dicke des Materials, Aufladungspotential und Entladungsabstand, werden Messungen durchgeführt, wobei jeweils die Flächenladungsdichte vor und nach der Entladung und der Entladungsstrom-Impuls aufgezeichnet werden. Die ausgewerteten Parameterstudien sind die Grundlage für die Approximation der entladenen Flächenladungsdichte und des Entladungsstromes in Abhängigkeit von den untersuchten Parametern. Damit ist die Beschreibung der Büschelentladung allein anhand der Ausgangsparameter möglich, ohne eine Messung durchführen zu müssen. Mit Hilfe eines analytischen Modells, welches auf den Funkengesetzen beruht, ist die umgesetzte Leistung und Energie im Entladungskanal näherungsweise berechenbar. Parallel dazu wird aus den Parameterstudien ein PSpice-Modell abgeleitet, mit dem ebenfalls die umgesetzte Leistung und Energie berechnet werden kann. Zum Schluss des Kapitels folgt eine Verifizierung der Modelle.

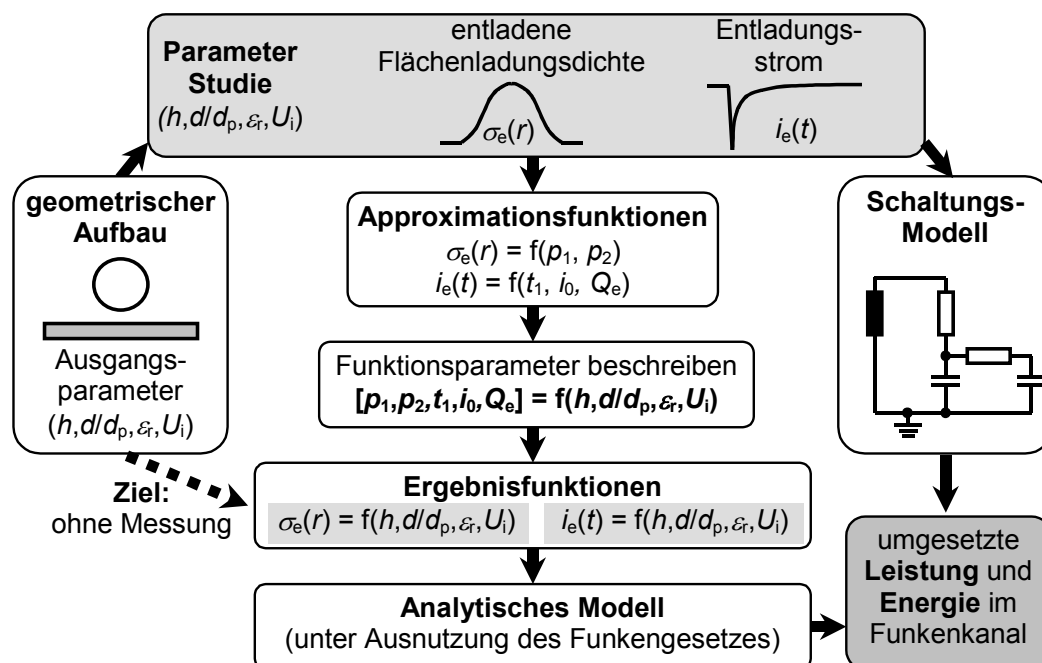


Bild 4.1 Überblick über die Vorgehensweise und Motivation bei der Untersuchung der Büschelentladung

Der Wert der umgesetzten Energie bei der Büschelentladung liegt in einem Bereich, der für die Entzündung von Gas-Luft-Gemischen ausreicht. Deshalb ist für eine diesbezügliche Sicherheitsbetrachtung die genaue Untersuchung der Büschelentladung in Abhängigkeit von den Ausgangsparametern interessant, weil diese darüber bestimmen, ob die umgesetzte Energie W_u die Werte der Zündenergie W_z der Gas-Luft-Gemische überschreitet oder nicht.

4.1 Charakterisierung der Versuchsergebnisse

Vor der Betrachtung der Messungen und Parameterstudien, werden in diesem Kapitel einige wichtige charakteristische Eigenschaften dieser Entladungsart zusammengestellt. Die Büschelentladungen wurden allgemein bereits in Kapitel 2.1.2 und 2.4.1 kurz vorgestellt. Sobald sich eine Elektrode mit größerem Krümmungsradius einer aufgeladenen isolierten Fläche nähert und die Durchbruchbedingung erreicht ist, kommt es zu einer Büschelentladung. Die folgenden Unterkapitel beschreiben weitere Merkmale dieser Entladungsart am Beispiel von PVC-Folien mit $\epsilon_r = 2,95$ und einer Dicke $h = 0,18$ mm.

4.1.1 Entladene Flächenladungsdichte-Verteilung

Die Büschelentladung ist eine sehr lichtschwache Entladung und entlädt nur einen begrenzten Bereich um den Entladungspunkt herum, wie in Bild 4.2 zu sehen. Die über der Fläche aufgetragene entladene Flächenladungsdichte bildet in einer dreidimensionalen Darstellung die Form eines abgerundeten Kegels. Die Flächenladungsdichte wird vor (σ_i) und nach (σ_a) der Entladung ermittelt. Bildet man die Differenz dieser beiden Messungen, so ergibt sich die *entladene Flächenladungsdichte* σ_e (Bild 4.3b). Wegen der näherungsweise Rotationssymmetrie der Verteilung der Flächenladungsdichte wird diese im weiteren entlang einer Schnittlinie durch das Entladungsgebiet betrachtet.

Die Ladungsverteilung variiert mit Änderung des Parameters σ_i , der anfänglichen Flächenladungsdichte. Für eine spätere bessere Vergleichbarkeit unterschiedlicher Messungen wird die Ladungsdichte mit σ_i normiert (Bild 4.3c). Zusätzlich wird die Flächenladungsdichte-Verteilung örtlich verschoben bzw. zentriert, sodass der Entladungspunkt den Wert $r = 0$ mm erhält. Das Gleiche kann mit Gleichung 2.6 für die Potentialverteilung durchgeführt werden.

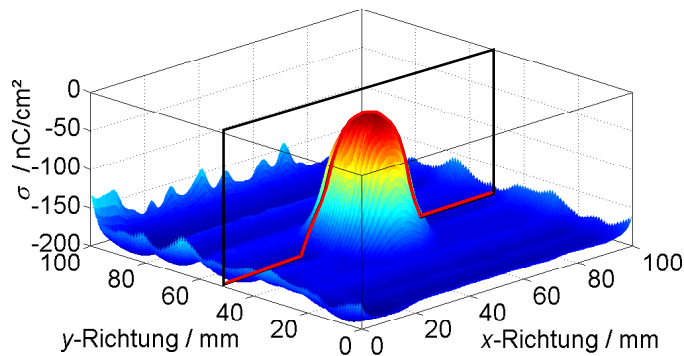


Bild 4.2

Flächenladungsdichte σ_a einer Büschelentladung mit eingezeichneter Schnittlinie

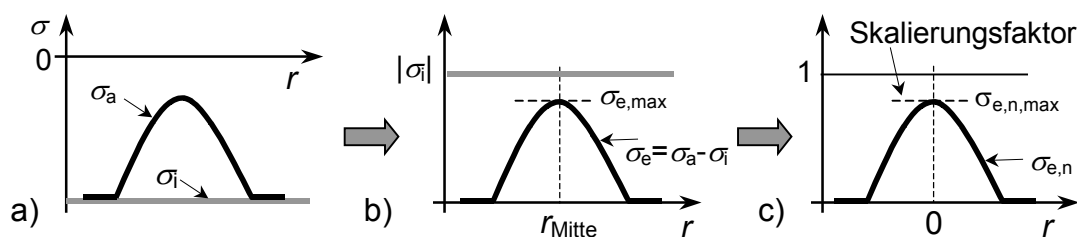


Bild 4.3 Ermittlung der entladenen Flächenladungsdichte aus den Messwerten vor und nach der Entladung und die Normierung mit σ_i ; Schnitt durch:

- gemessene Flächenladungsdichte vor (σ_i) und nach (σ_a) der Entladung
- entladene Flächenladungsdichte σ_e mit Maximum $\sigma_{e,max}$
- normierte und zentriert entladene Flächenladungsdichte $\sigma_{e,n}$ mit Maximum $\sigma_{e,n,max}$

4.1.2 Einfluss der Art der Annäherung

Der Entladungsabstand d wurde bereits in Kapitel 2.5 beschrieben. Ab dem Paschenabstand d_p ist eine Entladung möglich. Bei nicht sofortigem Vorhandensein eines Startelektrons ist jedoch eine Annäherung auf d kleiner d_p möglich.

Nähert sich die Entladungselektrode (Kugel) *sehr langsam* und mit kleinen Schrittweiten der Oberfläche, so erfolgt für d nahe d_p eine Büschelentladung. Setzt man die Annäherung nach der Entladung fort, so sind weitere Büschelentladungen möglich. Typischerweise treten 2 bis 4 Entladungen auf. Die Verteilung der Flächenladungsdichte vor der Entladung und nach den einzelnen Entladungen ist entlang einer Schnittlinie durch das Entladungsgebiet in Bild 4.4a zu sehen. Die Entladungsströme haben eine ähnliche Form und unterscheiden sich nur in der maximalen Amplitude (Bild 4.4c), die in den meisten Fällen bei der ersten Entladung am größten ist.

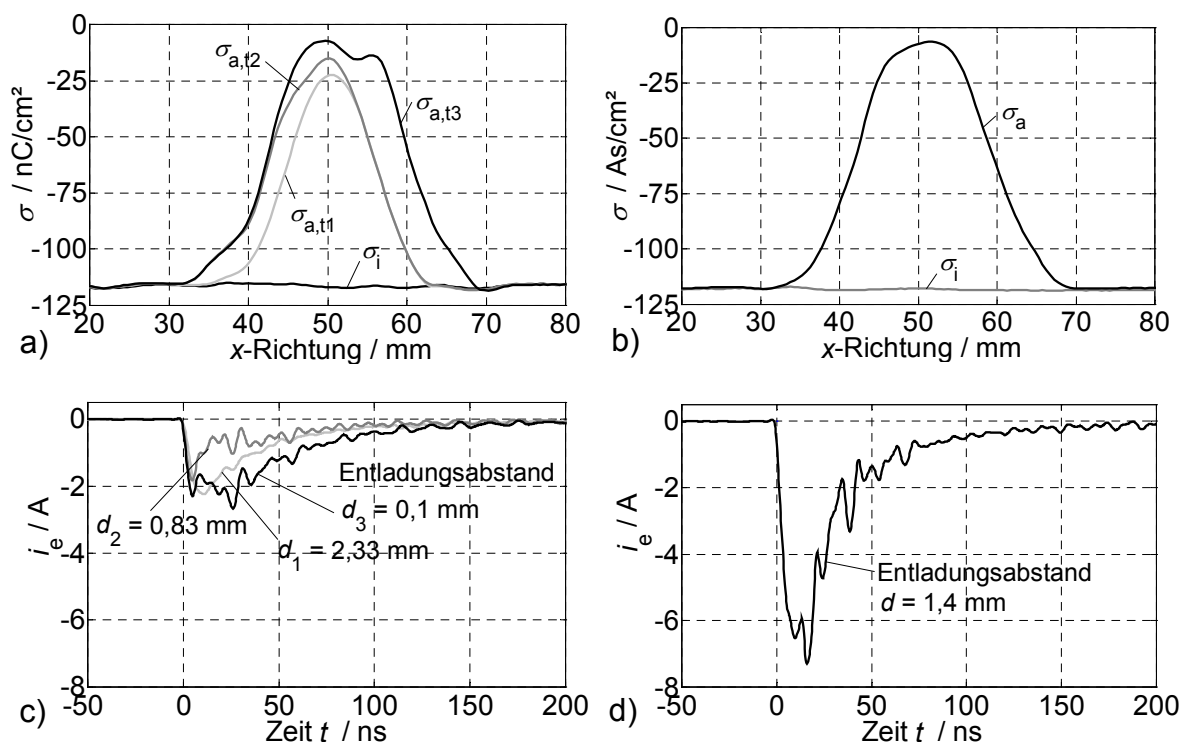


Bild 4.4 Betrachtung der Büschelentladung in Abhängigkeit von der Annäherungsart

- Flächenladungsdichte vor (σ_i) und nach ($\sigma_{a,t,x}$) den drei Entladungen
- Flächenladungsdichte vor (σ_i) und nach (σ_a) nur einer Entladung
- Entladungsstrom-Impulse $i_{e,t,x}$ der drei Entladungen
- Entladungsstrom-Impuls i_e bei nur einer Entladung

Erfolgt eine *schnellere* Annäherung, so ist es möglich, dass die Entladung erst bei Werten von d sehr viel kleiner d_p eintritt. Bei Fortsetzung der Annäherung erfolgt aber keine weitere Entladung (Bild 4.4b und d). Bei dieser Annäherungsart ist die entladene Fläche und die maximale Amplitude des Entladungsstromes größer als bei einer Entladung im anderen Fall. Vergleicht man die Summe der entladenen Ladungsmenge für beide Fälle, so ist zu erkennen, dass diese näherungsweise gleich groß ist (vergleiche Bild 4.4a und c). Bei den weiteren Untersuchungen wird immer nur die erste Entladung betrachtet.

4.1.3 Einfluss des normierten Entladungsabstandes d/d_p

Eng mit der Art der Annäherung ist auch der normierte Entladungsabstand d/d_p verbunden. Grundlage für die weitere Betrachtung ist die verwendete Kugel-Platten-Anordnung. Ist d/d_p in der Nähe von eins, d.h. der Entladungsabstand d ist ungefähr der Paschenabstand d_p (Kapitel 2.5), so gibt es nur einen sehr kleinen Bereich im Gas, in dem die Durchbruchbedingung für das Einsetzen einer

Entladung erfüllt ist. In diesem Bereich kann sich der Entladungskanal ausbilden (Bild 4.5 links). Ist d jedoch deutlich kleiner als d_p (Bild 4.5 rechts), so existiert ein wesentlich größerer Volumenbereich im Gas, in dem die Durchbruchbedingung erfüllt ist und eine Entladung stattfinden kann. Es besteht deshalb die Möglichkeit, dass mehrere parallele Entladungskanäle auftreten.

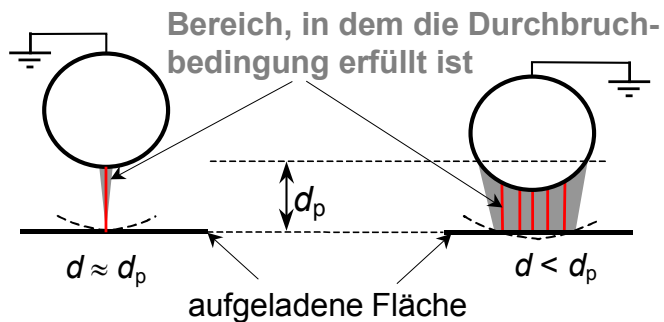
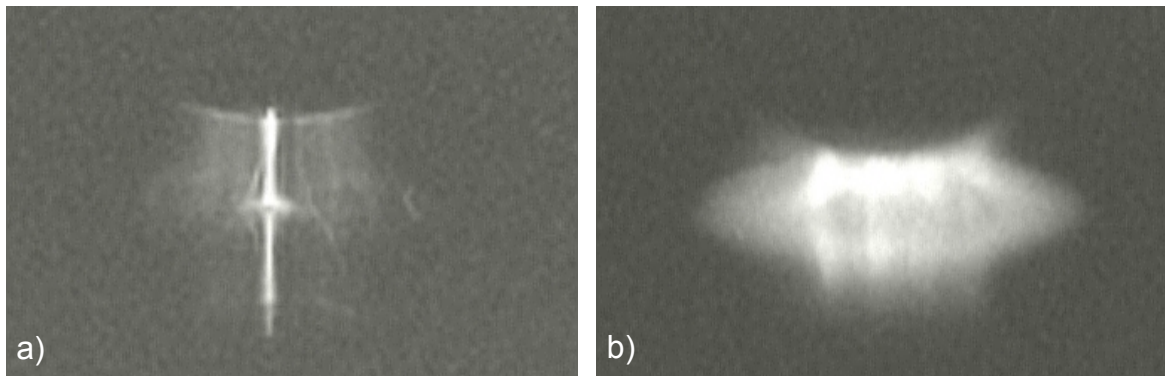


Bild 4.5

Betrachtung des Bereichs, in dem die Durchbruchbedingung für die Entstehung eines Entladungskanals erfüllt ist für eine Kugel-Platte-Anordnung in Abhängigkeit vom Entladungsabstand d

Dies wurde mit Hilfe von extrem empfindlichen Fotomaterial (ASA 3200) näher untersucht. Es konnten Fotos von Büschelentladungen aufgenommen werden, bei denen der Entladungsabstand variiert wurde.

Bild 4.6 Fotoaufnahmen von Büschelentladungen bei variierendem d/d_p

- a) $d = 3,6 \text{ mm} \approx 0,95 \cdot d_p \rightarrow$ nur ein Entladungskanal
 b) $d = 2,0 \text{ mm} \approx 0,53 \cdot d_p \rightarrow$ einige Entladungskanäle

In Bild 4.6 sind die Fotos von zwei Beispielmessungen gegenübergestellt. Für einen Wert von d nahe bei d_p ist im Bild 4.6a nur ein Kanal zu erkennen, wogegen Bild 4.6b für einen deutlich kleineren Wert von d mehrere Kanäle zeigt. Damit bestätigt sich die Aussage, dass bei kleinen Werten von d/d_p mehrere parallele Entladungskanäle im Gasraum auftreten können. Der im Kapitel zuvor betrachtete Kegel der entladenen Flächenladungsdichte ist für kleine Werte von d/d_p entsprechend breiter.

Der Entladungsstrom-Impuls zeigt auch eine Abhängigkeit von d/d_p . Dazu sind in Bild 4.7a Beispiele für den Entladungsstrom-Impuls mit variierendem d/d_p dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit sind die Ströme auf den Spitzenwert normiert. Daraus ist ersichtlich, dass sich die Dauer des Entladungsstrom-Impulses mit kleinerem d/d_p verkürzt und der Anstieg etwas steiler wird.

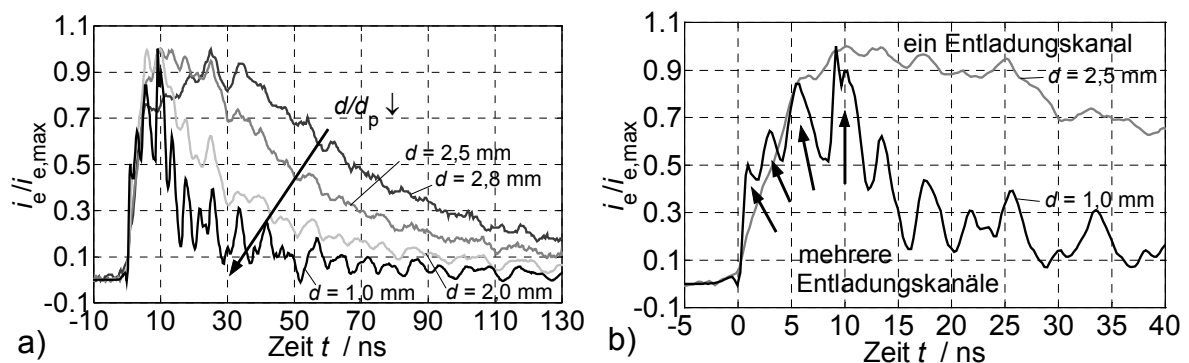


Bild 4.7 Entladungsstrom-Impulse von Büschelentladungen bei variierendem d/d_p

- a) Tendenz der Form des Impulses
- b) vergrößerte Darstellung des Anstiegsbereiches für zwei unterschiedliche Beispiele, ein glatter Anstieg der nur für einen Entladungskanal steht und ein gestufter Anstieg, der mehrere Entladungskanäle repräsentiert

In Bild 4.7b ist der Anstiegsbereich für die zwei typischen Fälle vergrößert dargestellt. Für ein großes d/d_p ist die Anstiegsflanke glatt. Dies weist darauf hin, dass es bei dieser Entladung nur einen Entladungskanal gibt. Die zweite Kurve hingegen für ein kleines d/d_p zeigt einen schwingenden Anstieg. Dies kann als Überlagerung mehrerer Teilströme interpretiert werden, woraus die Schlussfolgerung gezogen werden kann, dass bei dieser Entladung mehrere parallele Entladungskanäle beteiligt waren. Dies stimmt mit den vorher gezeigten Fotos überein.

4.1.4 Einfluss bei Schichtung der Folien

Nicht alle zur Untersuchung benötigten Foliendicken konnten beschafft werden. Aus diesem Grund wurden Messungen mit z.B. zwei übereinanderliegenden Folien durchgeführt. Im Idealfall ändern sich dadurch die Bedingungen und damit die Entladung nicht. In der Praxis ist dies jedoch nur annähernd so, weil durch Einflüsse, wie Rauigkeiten und Steifigkeiten der Materialien oder durch winzige Staubpartikel zwischen den Folien, die Homogenität des zusammengesetzten Materials gestört wird.

Diese Einflüsse führen bei Verwendung von mehreren Schichten zu einer Verringerung der entladenen Ladungsmenge bzw. des Entladungsstromes. Um dies zu verifizieren wurden an zwei Materialien, bei denen unterschiedliche Foliendicken zur Verfügung standen, Vergleichsmessungen durchgeführt, wobei für gleiche Foliendicke einmal mit *einer* und das andere Mal mit *zwei* Folienschichten gearbeitet wurde. Dabei ergaben sich bei zwei Schichten ca. 10 % kleinere Werte bei der Ladungsmenge und dem Spitzenwert des Stromimpulses. Diese Werte können von Material zu Material etwas unterschiedlich sein. Bei allen weiteren Untersuchungen, wo mit zwei Folienschichten gearbeitet wurde, wird deshalb die Verringerung entsprechend korrigiert.

4.2 Auswertung der Versuchsergebnisse

In diesem Kapitel wird für Büschelentladungen die Nachbildung der entladenen Flächenladungsdichte-Verteilung $\sigma_e(r)$ und des Entladungsstromes $i_e(t)$ beschrieben [Müller, 2003] [Müller, 2004]. Die wichtigsten untersuchten Parameter sind die Flächenladungsdichte bzw. das Oberflächenpotential vor der Entladung, der Entladungsabstand und das verwendete Material sowie dessen Dicke.

Als erstes werden im folgenden die Approximationsfunktionen für die Flächenladungsdichte-Verteilung und den Entladungsstrom-Impuls ermittelt. Die in diesen Funktionen auftauchenden Funktionsparameter müssen im Weiteren in Abhängigkeit der untersuchten Ausgangsparameter (d/d_p , U_i , ε_r , h) diskutiert werden. Das Ergebnis sind Formeln, welche die Funktionsparameter in Abhängigkeit der Ausgangsparameter beschreiben. Werden diese in die Approximationsfunktionen eingesetzt, so erhält man die Approximationsfunktionen für $\sigma_e(r)$ und $i_e(t)$ in Abhängigkeit der Ausgangsparameter (d/d_p , U_i , ε_r , h).

4.2.1 Approximation der Flächenladungsdichte-Verteilung

Die Grundlage für die Approximation der entladenen Flächenladungsdichte-Verteilung σ_e ist die normierte und zentrierte Darstellung der Messwerte, wie sie in Kapitel 4.1.1 beschrieben wurde.

$$\sigma_e(r) = \sigma_i \cdot p_1 \cdot \left(1 - \frac{r^2}{p_2^2}\right)^2 \quad (4.1)$$

Für verschiedene Messungen wurden einige Approximationsfunktionen getestet und verglichen. Die besten Ergebnisse wurden mit Gleichung (4.1) erreicht. Diese Funktion ist abgeleitet von der Funktion der Strahlungscharakteristik der Kreisapertur einer Antenne. In dieser Gleichung stellt r den Abstand vom Entladungspunkt dar. Der Parameter p_1 charakterisiert die auf σ_i normierte maximale Amplitude und der Parameter p_2 die Breite der Form der entladenen Flächenladungsdichte. Für zwei unterschiedliche Messbeispiele sind in Bild 4.8 die gemessenen normierten und zentrierten Flächenladungsdichte-Verteilungen und die approximierten Kurven zum Vergleich dargestellt. Es ist eine gute Übereinstimmung von Messung und Approximation festzustellen.

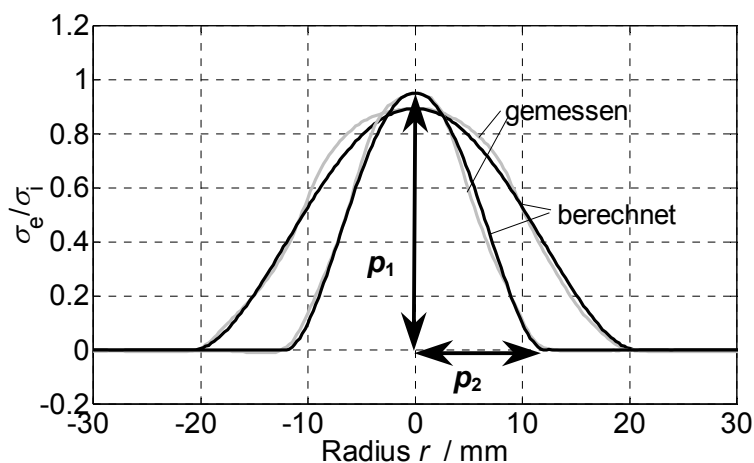


Bild 4.8

Gemessene normierte und zentrierte Flächenladungsdichte-Verteilungen $\sigma_{e,n}/\sigma_i$ im Vergleich mit den approximierten Kurven für zwei Beispiele

Mit Hilfe dieser Approximationsfunktion kann auch der Wert der entladenen Ladungsmenge $Q_{e,\sigma}$ durch Integration von $\sigma_e(r)$ abgeleitet werden.

$$Q_{e,\sigma} = \sigma_i \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{p_2} p_1 \cdot \left(1 - \frac{r^2}{p_2^2}\right)^2 r dr d\varphi = \frac{\pi}{3} \cdot \sigma_i \cdot p_1 \cdot p_2^2 \quad (4.2)$$

Das Ergebnis der Integration, ist eine einfache Funktion, die nur von den Parametern p_1 , p_2 und der Flächenladungsdichte vor der Entladung σ_i abhängig ist.

4.2.2 Approximation des Entladungsstrom-Impulses

Bevor die Approximation beschrieben werden kann ist die Betrachtung des in Kapitel 4.1.3 diskutierten Auftretens von *mehreren* Entladungskanälen bei kleineren Werten des normierten Entladungsabstandes d/d_p erforderlich. Hier müsste zur genaueren Beschreibung eine Aufsummierung der entstehenden Teilströme erfolgen, was bei der Vielfalt der statistisch auftretenden einzelnen

Kanäle nicht möglich ist. Deshalb wird für die Approximation angenommen, dass auch in diesen Fällen nur ein Entladungskanal aufgetreten ist. Dazu durchläuft das Messsignal vor der Approximation ein Tiefpass-Filter mit 200 MHz Grenzfrequenz und wird dadurch geglättet (Bild 4.9a). Der Entladungsstrom-Impuls, bei dem nur *ein* Entladungskanal auftritt, wird durch die Tiefpass-Filterung kaum verändert (Bild 4.9b).

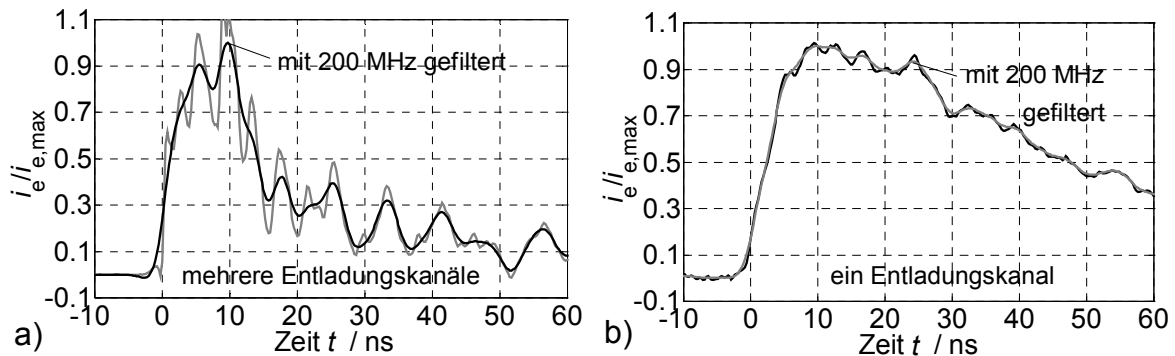


Bild 4.9 Gemessene und mit der 3dB-Grenzfrequenz f_g von 200 MHz gefilterte Entladungsstrom-Impulse

- a) mehrere Entladungskanäle \rightarrow Anstieg glatter
 b) ein Entladungskanal \rightarrow Filterung hat kaum Einfluss

Es gibt mehrere Möglichkeiten die Beschreibungsfunktion für den Entladungsstrom-Impuls zu formulieren. Ein Kriterium zur Auswahl ist die Anzahl der Funktions-Parameter, weil diese im nächsten Schritt in Abhängigkeit der Ausgangsparameter (d/d_p , U_i , ε_r , h) beschrieben werden müssen. Zusätzlich sollte die Funktion nicht zu komplex sein. Zur Beschreibung bietet sich deshalb ein doppelt exponentieller Impuls Gleichung (4.3) an, welcher nur 3 Parameter besitzt. Die Parameter t_1 und t_2 definieren die Zeitkonstanten für die Anstiegs- und Abfallzeit. Der Parameter i_1 repräsentiert einen Faktor für die Größe der Amplitude des Impulses, stellt jedoch nicht den Spitzenwert des Impulses dar.

$$i(t) = i_1 \cdot (e^{-t/t_1} - e^{-t/t_2}) \quad (4.3)$$

Für die Approximation des Entladungsstromes ist es daher sinnvoll, den Parameter i_0 einzuführen, der direkt den Spitzenwert des Impulses angibt. Dieser kann durch kurze Rechnung gefunden werden, sodass i_1 in Gleichung (4.3) durch (4.4) ersetzt werden kann. Das Ergebnis ist eine Funktion mit den drei unabhängigen Parametern t_1 , t_2 und i_0 . Die dabei entstehende Variable t_{max} definiert den Zeitpunkt des Impulsmaximums und ist durch die Parameter t_1 und t_2 berechenbar.

$$i_1 = i_0 / (e^{-t_{\max}/t_1} - e^{-t_{\max}/t_2}) \quad \text{mit} \quad t_{\max} = \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \cdot \frac{t_1 \cdot t_2}{t_2 - t_1} \quad (4.4)$$

Auch aus dem approximierten Entladungsstrom kann die entladene Ladungsmenge $Q_{e,i}$ abgeleitet werden, wie in Gleichung (2.9). Das Ergebnis der Integration, Gleichung (4.5) ist eine Funktion der Parameter t_1 , t_2 und i_0 .

$$Q_{e,i} = \frac{i_0}{(e^{-t_{\max}/t_1} - e^{-t_{\max}/t_2})} \cdot (t_2 - t_1) \quad (4.5)$$

Grundsätzlich sei an dieser Stelle erwähnt, dass eine Beschreibung mit einer komplexeren Funktionen, wie z.B. mit Hilfe von *zwei* doppelt exponentiellen Impulsen, die Form des gemessenen Entladungsstrom-Impulses etwas besser wiedergegeben werden kann. Hierzu sind aber schon 6 anstatt 3 Parameter nötig.

Die 3 Parameter t_1 , t_2 und i_0 des doppelt exponentiellen Impulses stellen drei Freiheitsgrade bei der Approximation der Messkurven dar. Ziel dieser Approximation ist die spätere Bestimmung der entladenen Ladungsmenge Q_e und die Ermittlung der umgesetzten Energie W_u , die beide aus dem Strom abgeleitet werden (Kapitel 2.6 und 2.7). Betrachtet man Gleichung 4.5 so ist zu erkennen, dass die entladene Ladungsmenge Q_e , welche nur von t_1 , t_2 und i_0 abhängt, einen dieser 3 Funktionsparameter ersetzen kann. Diese Möglichkeit wird benutzt, indem Q_e anstelle von t_2 ermittelt wird. Ist Q_e , t_1 und i_0 bekannt, so kann damit auch t_2 bestimmt werden. Zusätzlich erhält man dadurch bei der im Kapitel 4.2.4 beschriebenen Bestimmung der Funktionsparameter in Abhängigkeit der Ausgangsparameter (d/d_p , U_i , ε_r , h) eine direkte Beschreibung der entladenen Ladungsmenge Q_e in Abhängigkeit der Ausgangsparameter. Folgende Bedingungen werden deshalb für die Approximation festgelegt:

- gute Anpassung der Anstiegsflankensteilheit di/dt des Impulses durch t_1
- die entladene Ladungsmenge $Q_{e,i}$ abgeleitet aus der Approximation stimmt mit der aus der gemessenen Stromkurve ermittelten Ladungsmenge überein
- Variation von i_0 , sodass die umgesetzte Energie W_u mit der Approximation bestimmt mit der aus der gemessenen Stromkurve ermittelten Energie übereinstimmt

Für die zwei in Bild 4.9 schon dargestellten Messungen, sind in Bild 4.10 der gemessene und der mit Gleichung (4.3) und den vorher festgelegten Bedingungen

approximierte Entladungsstrom normiert abgebildet. Die Übereinstimmung für den Anstiegsbereich ist gut. Durch die Bedingung, dass Q_e und W_u mit den gemessenen Werten übereinstimmen sollen und durch die Beschränkung der Approximationsfunktion auf einen doppelt exponentiellen Impuls, weicht der approximierte Verlauf im Rücken des Impulses etwas ab. Diese Abweichung ist aber für die Betrachtung der Energie (siehe Kapitel 2.7) unrelevant.

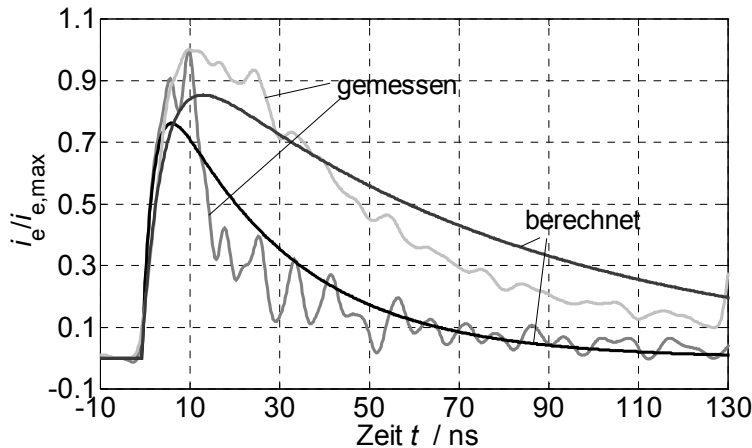


Bild 4.10

Gemessene und berechnete Entladungsstrom-Impulse für zwei Beispiele, normiert auf den Spitzenwert $i_{e,max}$ der gemessenen Impulse

4.2.3 Parameterstudien

Die Flächenladungsdichte-Verteilung und der Entladungsstrom-Impuls der Büschelentladung, wurden in Abhängigkeit der vier Ausgangsparameter untersucht. Diese sind der normierte Entladungsabstand d/d_p , das Oberflächenpotential U_i vor der Entladung und das Material mit der Dielektrizitätskonstanten ϵ_r sowie die Dicke h des Prüflings. Die Flächenladungsdichte σ_i vor der Entladung korrespondiert mit dem Oberflächenpotential U_i , wie in Gleichung (2.6). Für die Approximation wird U_i verwendet, weil dies in der Praxis die gemessene Größe ist.

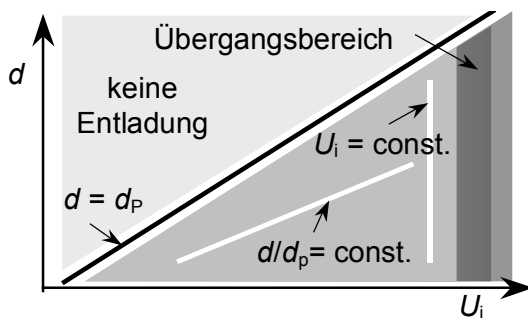


Bild 4.11

Einordnung der untersuchten Parameter, normierter Entladungsabstand d/d_p und Oberflächenpotential U_i , im Bereich in dem Büschelentladungen auftreten

Messreihen mit verschiedenen Materialien und Materialdicken wurden durchgeführt, die in diesem Kapitel kurz vorgestellt werden. Die Parameter d/d_p und U_i

wurden so gewählt, dass immer nur ein Parameter pro Studie verändert wird, wie in Bild 4.11 angedeutet ist.

Variation des normierten Entladungsabstandes d/d_p

Die Variation des Entladungsabstandes d für Werte kleiner d_p ist möglich, wie im Kapitel 2.5.1 beschrieben. Die Größe des Entladungskegels und auch der Entladungsstrom werden beeinflusst. Um dies zu verdeutlichen wird in Bild 4.12 anhand von PVC-Folien ($\epsilon_r = 2,95$, $h = 0,36$ mm) und konstantem Oberflächenpotential $U_i = 11,9$ kV die Abhängigkeit von dem normierten Entladungsabstand d/d_p gezeigt. In Bild 4.12a ist die normierte Flächenladungsdichte entlang einer Schnittlinie durch das Entladungsgebiet, wie in Kapitel 4.1.1 beschrieben, abgebildet. Der auf das Maximum normierte Entladungsstrom-Impuls ist in Bild 4.12b zu finden.

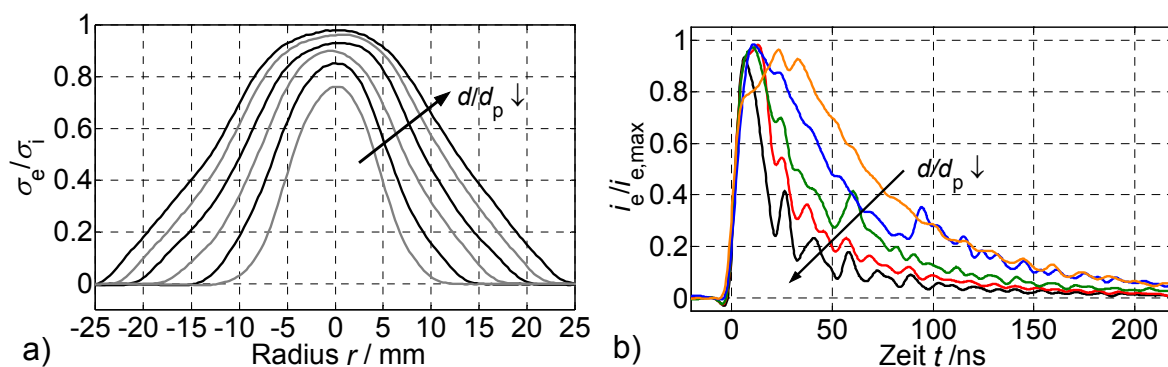


Bild 4.12 Variation des normierten Entladungsabstandes d/d_p für PVC ($\epsilon_r = 2,95$; $h = 0,36$ mm; $U_i = 11,9$ kV)

- a) normierte Flächenladungsdichte σ_e/σ_i
 b) normierter Entladungsstrom $i_e/i_{e,max}$

Für kleinere Werte von d/d_p verbreitert und vergrößert sich die Form der entladenen Flächenladungsdichte. Betrachtet man den normierten Entladungsstrom-Impuls (vergleiche Kapitel 4.1.3) für abnehmende Werte von d/d_p , so erkennt man, dass sich die Dauer des Impulses verkürzt. Zusätzlich sei erwähnt, dass sich die Anstiegssteilheit kaum verändert. Für kleinere Werte von d/d_p wird der absolute Spitzenwert größer. Dies ist durch die Normierung nicht im Bild 4.12b zu sehen.

Variation des Oberflächenpotentials U_i

Weiterhin wurde die Abhängigkeit der Flächenladungsdichte-Verteilung und des Entladungsstrom-Impulses von dem Oberflächenpotential U_i vor der Entladung bei

konstantem Wert von $d/d_p = 0,5$ untersucht. Für diese Abhängigkeit sind die Veränderungen der Flächenladungsdichte im Entladungsgebiet sowie die Veränderung des Stromes im Bild 4.13 zu sehen. Bei der Darstellung wurden Messungen von PES-Folien mit $\epsilon_r = 3,7$ und einer Dicke von $h = 0,2$ mm verwendet.

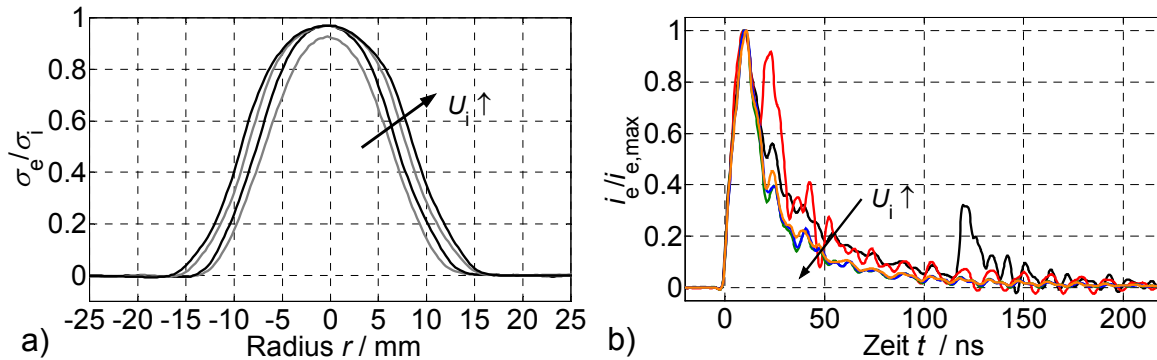


Bild 4.13 Variation des Oberflächenpotential U_i für PES ($\epsilon_r = 3,7$; $h = 0,2$ mm; $d/d_p = 0,5$)

- a) normierte Flächenladungsdichte σ_e/σ_i
 b) normierter Entladungsstrom $i_e/i_{e,max}$

Für größere Werte von U_i wird die Form der entladenen Flächenladungsdichte breiter, die Amplitude bleibt jedoch näherungsweise konstant. Die Form des Entladungsstrom-Impulses und die Anstiegssteilheit sind näherungsweise konstant. Der absolute Spitzenwert des Stromes wird größer für größere Werte von U_i .

Variation des Materials mit der Dielektrizitätskonstanten ϵ_r

Für die Berücksichtigung der Abhängigkeit von der Dielektrizitätskonstante ϵ_r erfolgten Messungen mit verschiedenen Materialien. Dazu wurden die zuvor beschriebenen Messreihen für die jeweiligen Materialien wiederholt. Zur Darstellung der Abhängigkeit von ϵ_r sind in Bild 4.14 die Form der entladenen Flächenladungsdichte und der Entladungsstrom für konstantes $U_i = 10,9$ kV, für konstanten Wert von $d/d_p = 0,5$ und für eine konstante Dicke $h = 0,2$ mm abgebildet.

Die Breite der Form der entladenen Flächenladungsdichte wird minimal schmaler für größere Werte von ϵ_r und die Amplitude bleibt näherungsweise gleich. Auch bei Betrachtung des Stromimpulses ist kaum eine Variation im Bild zu erkennen. Die Anstiegssteilheit wird allerdings kleiner und der absolute Spitzenwert größer für wachsende Werte von ϵ_r .

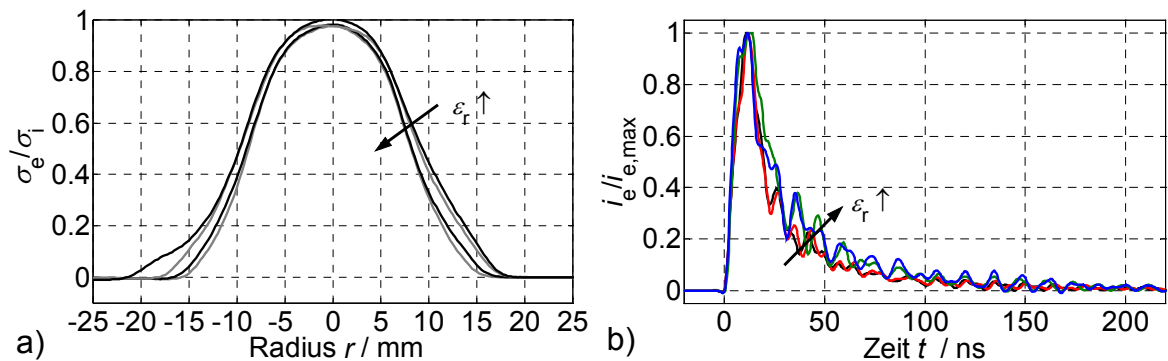


Bild 4.14 Variation der Dielektrizitätskonstanten ϵ_r ($d/d_p = 0,5$; $h = 0,2$ mm; $U_i = 10,9$ kV)

- a) normierte Flächenladungsdichte σ_e/σ_i
 b) normierter Entladungsstrom $i_e/i_{e,max}$

Variation der Materialdicke h

Zur Untersuchung der Dicke wurden für einige Materialien Messungen mit unterschiedlicher Dicke durchgeführt. Für das Material PC mit $\epsilon_r = 3,0$ ist für konstantes Oberflächenpotential $U_i = 10,9$ kV und für konstanten Wert von $d/d_p = 0,5$ die Abhängigkeit vom Parameter h in Bild 4.15 zu sehen.

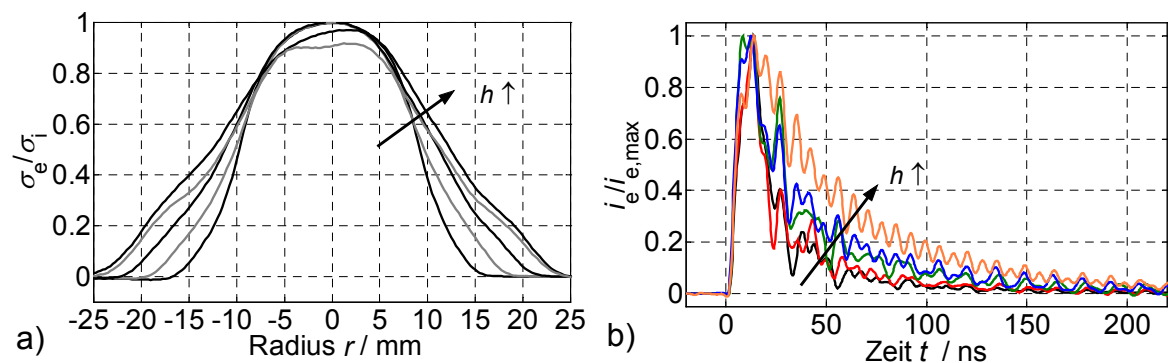


Bild 4.15 Variation der Materialdicke h für PC ($\epsilon_r = 2,93$; $U_i = 10,9$ kV; $d/d_p = 0,5$)

- a) normierte Flächenladungsdichte σ_e/σ_i
 b) normierter Entladungsstrom $i_e/i_{e,max}$

In Bild 4.15a erkennt man eine Verbreiterung der Form der entladenen Flächenladungsdichte für größere Dicken, die Amplitude ändert sich dagegen kaum. Die Dauer des Entladungsstrom-Impulses wird größer für größere Werte von h . Die Anstiegssteilheit ist nahezu unabhängig von der Dicke und das absolute Maximum des Impulses wird kleiner für zunehmende Dicke h .

4.2.4 Formeln zur Beschreibung der Funktionsparameter

Die entladene Flächenladungsdichte $\sigma_e(r)$ und den Entladungsstrom-Impuls $i(t)$, der durchgeführten Messungen für alle Ausgangsparameter (d/d_p , U_i , ε_r , h) werden mit den in Kapitel 4.2.1 und 4.2.2 beschriebenen Approximationsfunktionen angenähert, und die in den Approximationsfunktionen enthaltenen Funktionsparameter bestimmt. Ziel dieses Kapitels ist die Ermittlung von Formeln, welche die Funktionsparameter (p_1 , p_2 , t_1 , Q_e , i_0) in Abhängigkeit der Ausgangsparameter (d/d_p , U_i , ε_r , h) beschreiben. Mit Gleichung (4.2) und (4.3) ist damit der Entladungskegel $\sigma_e(r)$ und der Entladungsstrom $i_e(t)$ in Abhängigkeit der Ausgangsparameter (h , d/d_p , ε_r , U_i) beschrieben und die Abschätzung des Gefährdungspotentials ohne Messung möglich.

Der Gültigkeitsbereich der folgend ermittelten Formeln richtet sich nach dem Bereich, in dem für die vier Parameter Messungen durchgeführt wurden. Die Ausgangsparameter wurden in folgenden Bereichen variiert:

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

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.

Für den Parameter Q_e sind in Bild 4.16 beispielhaft die aus den Messungen abgeleiteten Werte in Abhängigkeit von den Ausgangsparametern (d/d_p , U_i , h) dargestellt. Für alle anderen Parameter sind diese Kurven im Anhang D zu finden. Zur Veranschaulichung der Tendenz sind die Parameter p_1 , p_2 , t_1 , i_0 und Q_e in Bild 4.17 schematisch in Abhängigkeit von den Ausgangsparametern (d/d_p , U_i , ε_r , h) aufgetragen.

Im nächsten Schritt sind die ermittelten Einzelabhängigkeiten zusammenzufassen. Bei dem Zusammenfügen erfolgte die Annahme, dass sich die untersuchten Einzelabhängigkeiten im gesamten Parameterbereich ähnlich verhalten. Dies wurde durch Stichprobenversuche bestätigt. Die sich ergebenden zusammen-

gefassten Gleichungen sind als *eine mögliche* Beschreibung anzusehen. Durch die Komplexität des vierdimensionalen Parameterraumes gibt es auch andere Approximationsfunktionen, die eine gleichwertige Beschreibung liefern. Grundsätzlich wurde versucht jede Abhängigkeit mit möglichst einfachen Funktionen zu beschreiben, auch wenn dadurch die Genauigkeit geringfügig reduziert wird.

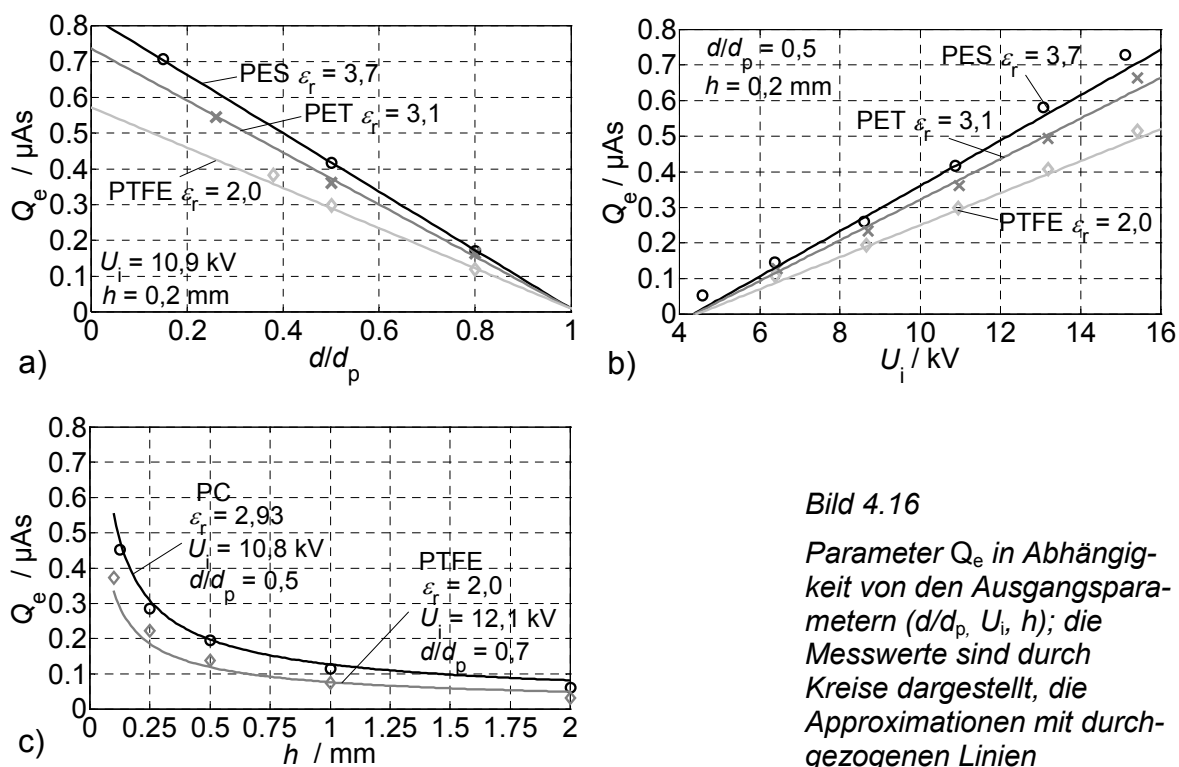


Bild 4.16

Parameter Q_e in Abhängigkeit von den Ausgangsparametern (d/d_p , U_i , h); die Messwerte sind durch Kreise dargestellt, die Approximationen mit durchgezogenen Linien

Für die entladene Flächenladungsverteilung $\sigma_e(r)$ ergeben sich für p_1 und p_2 die Gleichungen (4.6) und (4.7). Damit ist $\sigma_e(r)$ durch die Ausgangsparameter (d/d_p , U_i , ϵ_r , h) beschreibbar. Parameter p_1 ist ein Faktor und einheitenlos, p_2 hingegen stellt die untere Breite des Entladungskegels dar und besitzt die Einheit mm. Die Formeln wurden so aufgestellt, dass die Ausgangsparameter U_i in kV und h in mm angegeben werden. Die Parameter d/d_p und ϵ_r sind einheitenlos.

$$p_1 = 1 - 0,2 \cdot (d/d_p)^{3,5} \quad (4.6)$$

$$p_{2,0} = 31 - 23,7 \cdot d/d_p + 2,8 \epsilon_r (d/d_p - 1) \quad (4.7)$$

$$p_2 / \text{mm} = p_{2,0} + 0,61 \cdot |U_i| / \text{kV} - 4,1 \cdot 0,04^{(h/\text{mm} - 0,2)}$$

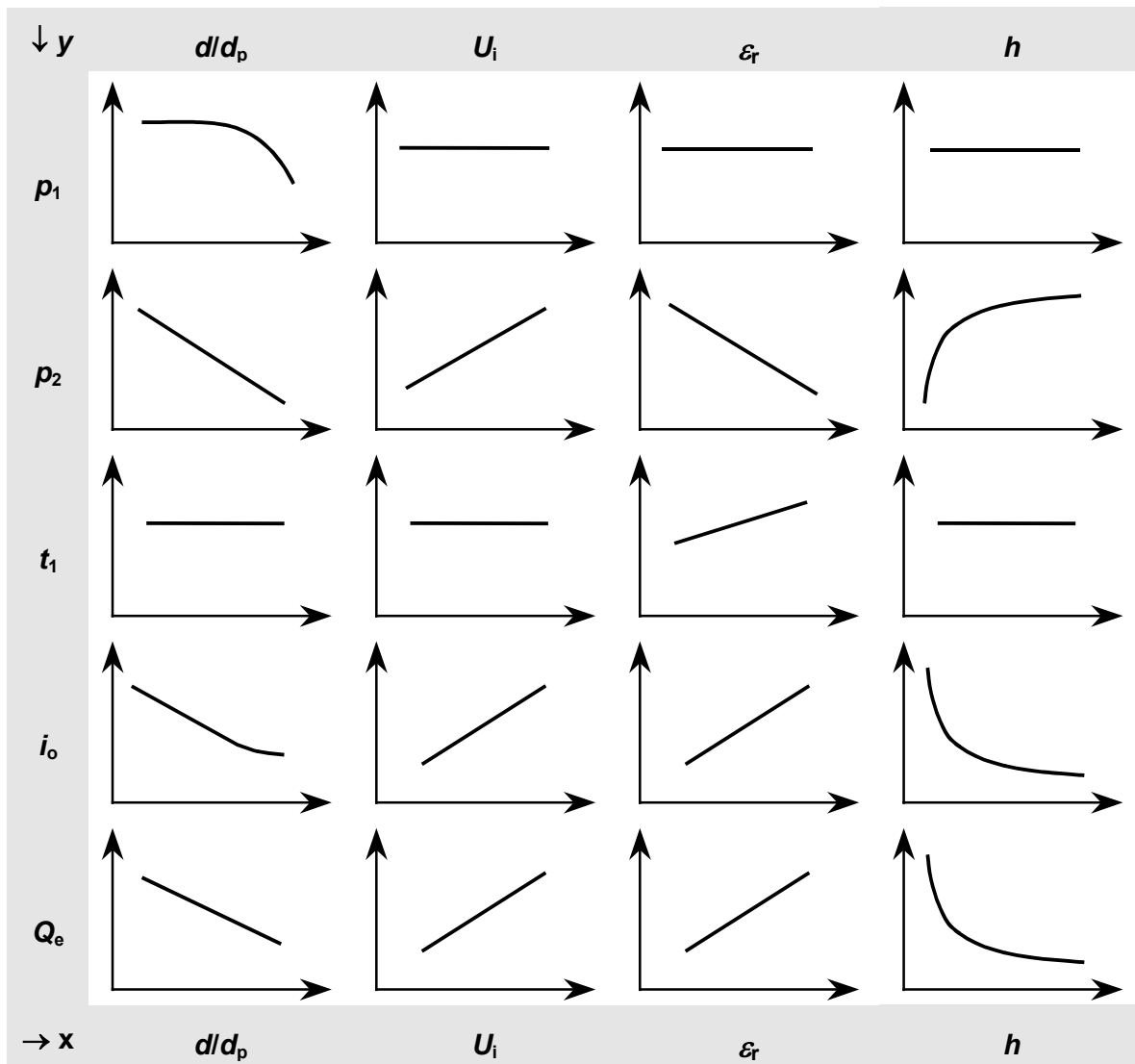


Bild 4.17 Abhängigkeiten der Parameter der Approximationsfunktionen (p_1 , p_2 , t_1 , i_0 , Q_e) von den Ausgangsparametern (d/d_p , U_i , ε_r , h), die x -Achse wird durch die Spalten repräsentiert, die y -Achse durch die Zeilen

Fügt man die Einzelabhängigkeiten für den Entladungsstrom zusammen, so ergeben sich für die Parameter t_1 , i_0 und Q_e die Gleichungen (4.8) bis (4.10). Q_e und i_0 sind dabei wegen der Komplexität in drei Teilen dargestellt. Damit ist auch $i(t)$ durch die Ausgangsparameter (h , d/d_p , ε_r , U_i) beschreibbar.

$$Q_{e1} = (0,01\varepsilon_r + 0,023) \cdot |U_i|/\text{kV} - 0,045\varepsilon_r - 0,11$$

$$Q_{e2} = Q_{e1} - (2 \cdot Q_{e1} - 0,01 \cdot (|U_i|/\text{kV} - 4,5)) \cdot (d/d_p - 0,5) \quad (4.8)$$

$$Q_e/\mu\text{As} = \frac{Q_{e2}}{0,336} \cdot 0,12 \cdot (h/\text{mm})^{-0,64}$$

$$t_1 / \text{ns} = \varepsilon_r + 1.3 \quad (4.9)$$

$$i_{01} = (0,3 \cdot \varepsilon_r + 0,68) \cdot |U_i| / \text{kV} - 1,3 \cdot \varepsilon_r - 3,4$$

$$i_{02} = \left[17 \cdot e^{2 \cdot (d/d_p - 1)} - 37,1 \cdot (d/d_p - 1) - 17 \right] \cdot i_{01} \quad (4.10)$$

$$i_0 / \text{A} = \frac{i_{02}}{69} \cdot 2,25 \cdot (h/\text{mm})^{-0,85}$$

Mit den vorher schon erwähnten Einheiten für die Ausgangsparameter sind die Gleichungen so aufgestellt worden, dass sich für die entladene Ladungsmenge Q_e die Einheit μAs , für die Anstiegszeitkonstante t_1 die Einheit ns und für die maximale Stromamplitude i_0 die Einheit A ergeben.

4.3 Modell

Parallel zur Approximation der entladenen Flächenladungsdichte-Verteilung und des Entladungsstromes wurde ein Modell entwickelt, welches hier vorgestellt wird. Die Grundlage für das Modell bilden einerseits der geometrische Aufbau und zum anderen die Messungen der Parameterstudie (Kapitel 4.2.3), welche in Abhängigkeit von den vier Ausgangsparametern (h , d/d_p , ε_r , U_i) durchgeführt wurden. Dazu ist als erstes das Ersatzschaltbild aus dem geometrischen Aufbau abzuleiten und zu diskutieren. Im Anschluss ist dieses Modell für die Beschreibung speziellen Bedingungen anzupassen.

4.3.1 Herleitung des Ersatzschaltbildes

Der Übergang vom geometrischen Aufbau zum Ersatzschaltbild ist in Bild 4.18 dargestellt. Die allgemeine Beschreibung der einzelnen Elemente wird hier vorgestellt, die Vereinfachungen und Parametrisierung im nächsten Teilkapitel.

Der Funkenkanal der Entladung zwischen Kugel und Folienoberfläche wird durch den zeitveränderlichen Funkenwiderstand R_F mit dem Gesetz von Rompe und Weizel (Gleichung (2.3)) beschrieben, welcher als Parameter die Funkenkonstante a und den Entladungsabstand d enthält. Die Kapazität $C_{D,x}$ repräsentiert die Kapazität der Folie für die entsprechende Fläche, wogegen die Kapazität $C_{L,x}$ die Luftkapazität zwischen geerdeter Kugel und entsprechender Folienoberfläche

darstellt. Die Induktivität des Massekabels wird durch die Induktivität L berücksichtigt und für den verwendeten Aufbau mit ca. $0,7 \mu\text{H}$ abgeschätzt. Der Widerstand R_S über den $C_{D,x}$ entladen wird, berücksichtigt im Mittel das Nachfließen der Ladung von Bereichen die weiter entfernt vom Entladungspunkt liegen.

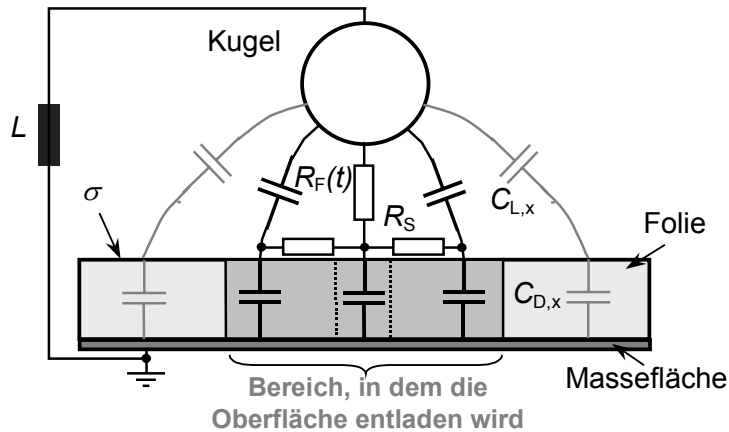


Bild 4.18

Übergang vom geometrischen Aufbau zum Ersatzschaltbild des Modells

4.3.2 Vereinfachungen des Ersatzschaltbildes

Durch eine Büschelentladung wird nur ein Teil der Oberfläche entladen und dieser Teil auch nicht gleichmäßig, wie durch die gemessene Flächenladungsdichte vor und nach der Entladung ermittelt wurde. Vor der Entladung ist auf der gesamten Fläche eine gleichmäßige Aufladung (σ_i) vorhanden. In allen Teilkapazitäten $C_{D,x}$ ist damit die gleiche Ladungsmenge gespeichert. Durch die Büschelentladung werden die Teilkapazitäten abhängig vom Abstand zum Fußpunkt der Entladung teilweise oder sogar gar nicht entladen. Für das Modell sind nur die Kapazitäten $C_{D,x}$ berücksichtigt, die auch tatsächlich entladen werden.

Zur Vereinfachung wird deshalb die dreidimensionale Kegelform der entladenen Flächenladungsdichte $\sigma_e(r)$ durch einen äquivalenten Zylinder $\sigma_{e,z}(r)$ nachgebildet (Bild 4.19), wobei beide Formen das gleiche Volumen und das gleiche Maximum $\sigma_{e,max}$ haben, sodass die entladene Ladungsmenge Q_e in beiden Fällen gleich groß ist. Das Ergebnis ist eine gleichmäßige Aufladung mit $\sigma_{e,max}$ auf einer äquivalenten Kreisfläche A_e . Daraus kann die Gleichung (4.11) für die Kapazität $C_{D,e}$ abgeleitet werden, in der nur noch die tatsächlich entladene Ladungsmenge Q_e gespeichert ist (Anhang E). Bei der Simulation wird die in einer Kapazität gespeicherte Ladung durch die an dieser Kapazität anliegenden Spannung festgelegt. Für die Kapazität $C_{D,e}$ ist diese Spannung direkt aus Gleichung (4.11)

ablesbar und hat den Wert von p_1 multipliziert mit U_i . p_1 repräsentiert die auf σ_i normierte maximale Amplitude der entladenen Flächenladungsdichte (Kapitel 4.2.1).

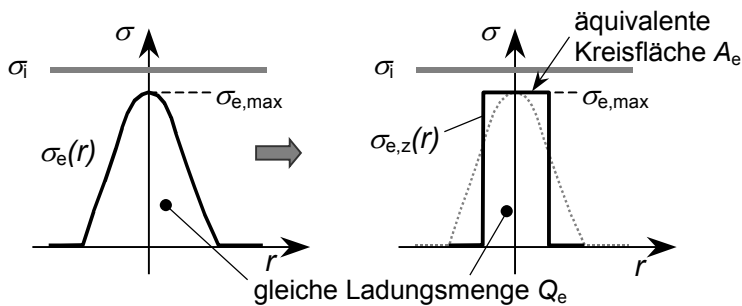


Bild 4.19

Approximation der gemessenen entladenen Flächenladungsdichte σ_e durch einen Zylinder $\sigma_{e,z}$ mit gleicher Ladungsmenge und einer äquivalenten Kreisfläche A_e bei gleichem Maximum $\sigma_{e,max}$

Aus dem Ersatzschaltbild geht hervor, dass bei einer Entladung die Luftkapazität C_L neben der Kapazität C_D ebenfalls entladen wird. Dies bedeutet, dass die gesamte entladene Ladungsmenge sich aus dem Anteil der Ladung aus C_L und C_D zusammensetzt. Die gesamte entladene Ladungsmenge Q_e müsste deshalb entsprechend der Größen von C_L und C_D aufgeteilt werden. Im Interesse eines einfachen Ersatzschaltbildes wird die Luftkapazität C_L aus der Schaltung entfernt und der darauf gespeicherte Ladungswert in C_D mitberücksichtigt, sodass die gesamte entladene Ladungsmenge Q_e in $C_D = C_{D,e}$ gespeichert ist. Wegen $C_L \ll C_D$ treten dadurch keine wesentlichen Abweichungen auf.

$$C_{D,e} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r \cdot Q_e}{h \cdot \sigma_i \cdot p_1} = \frac{Q_e}{|U_i| \cdot p_1} \quad (4.11)$$

Das angepasste Ersatzschaltbild ist in Bild 4.20 abgebildet. Dabei wurde die Kapazität $C_{D,e}$ in zwei Kapazitäten $C_{D,e1}$ und $C_{D,e2}$ aufgeteilt, wobei $C_{D,e1}$ die Kapazität darstellt, die im ersten Moment direkt mit dem Funkenkanal verbunden ist und sofort entladen werden kann. Nimmt man für die Größe der Fläche, die der Entladungskanal im ersten Moment entladen kann 1 bis 2 mm² an, so ergibt sich für die Aufteilung der Kapazitäten $C_{D,e1}$ und $C_{D,e2}$ ein Verhältnis von ca. 1:100.

$$C_{D,e1} = 0,01 \cdot C_{D,e} \quad C_{D,e2} = 0,99 \cdot C_{D,e} \quad (4.12)$$

Der Widerstand R_S , über den $C_{D,e2}$ entladen wird, berücksichtigt neben dem schon beschriebenen Nachfließen der Ladung von Bereichen die weiter entfernt vom Entladungspunkt liegen, auch die Mittelung, welche durch die Vereinfachung der Potentialverteilung mittels Zylinder (Bild 4.19) entsteht. Der Widerstand R_S hängt von den Ausgangsparametern (d/d_p , U_i , ε_r , h) ab. Deshalb wurden die in der Parameterstudie (Kapitel 4.2.3) gemessenen Entladungsströme mit dem Modell

nachgebildet, und die Größe für R_S in Abhängigkeit von den Ausgangsparametern ermittelt (Anhang F) und mit Formeln beschrieben. Die so entstandenen Einzel-Abhängigkeiten wurden in einem zweiten Schritt zur Gleichung (4.13) zusammengefügt.

$$R_1 / \text{k}\Omega = -0,81 + 23,2 \cdot (|U_i| / \text{kV})^{-1,53} + 9,2 \cdot (d/d_p)^{5,5} \quad (4.13)$$

$$R_S / \text{k}\Omega = R_1 + \left(\frac{-1 + 51 \cdot h/\text{mm}}{13 + 10 \cdot h/\text{mm}} \right)$$

Für den Funkenwiderstand $R_F(t)$ wurde die in Kapitel 2.3.3 beschriebene Gleichung ins Modell umgesetzt [Junker, 1995], die als Parameter die Funkenkonstante a und den Entladungsabstand d benötigt. Für eine maximale Abschätzung der Energie muss nach Gleichung (2.10) der Funkenwiderstand groß und die Funkenkonstante a klein sein. Aus diesem Grund wird für die Funkenkonstante im weiteren der kleinste in der Literatur angegebene Wert von $a = 0,5 \text{ cm}^2/\text{V}^2\text{s}$ benutzt.

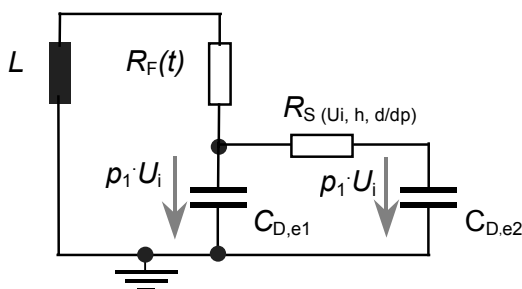


Bild 4.20

Vereinfachtes Ersatzschaltbild des Modells zur Beschreibung der Büschelentladung

Bisher wurde die im Kapitel 4.1.3 beschriebene Möglichkeit des Auftretens von mehreren Entladungskanälen bei kleineren Werten des normierten Entladungsabstandes d/d_p nicht berücksichtigt. Wegen der Vielfalt der statistisch auftretenden einzelnen Kanäle wird, wie auch schon in Kapitel 4.2.2, vereinfacht angenommen, dass auch in diesen Fällen nur ein Entladungskanal vorhanden ist. Diese Mittelung wird durch den Widerstand R_S berücksichtigt.

Mit diesem vereinfachtem Modell ist es ebenfalls möglich, die umgesetzte Energie im Funkenkanal zu bestimmen. Der Vergleich von Modell, Messung und Approximation wird im nächsten Kapitel durchgeführt.

4.4 Vergleich von Modell und Messung anhand der umgesetzten Energie

Die bisherigen Ausführungen haben gezeigt, dass der Entladungsstrom in Abhängigkeit der Ausgangsparameter (d/d_p , U_i , ε_r , h) beschreibbar ist. Wie gut dadurch die umgesetzte Energie im Funkenkanal wiedergegeben wird, ist in diesem Kapitel beschrieben. Dies erfolgt durch den Vergleich der Energiewerte die einerseits aus der approximierten Funktion und dem Modell zum anderen aus dem gemessenen Entladungsstrom abgeleitet werden. Die Berechnung der Energie erfolgt wie in Kapitel 2.7 beschrieben, aus dem Entladungsstrom-Impuls, egal ob dieser gemessen, berechnet oder simuliert wurde.

Vor dem Vergleich wird jedoch in Bild 4.21 in schematischer Form die sich aus den Messreihen ergebende Tendenz der umgesetzten Energie in Abhängigkeit der einzelnen Ausgangsparameter (d/d_p , U_i , ε_r , h) dargestellt.

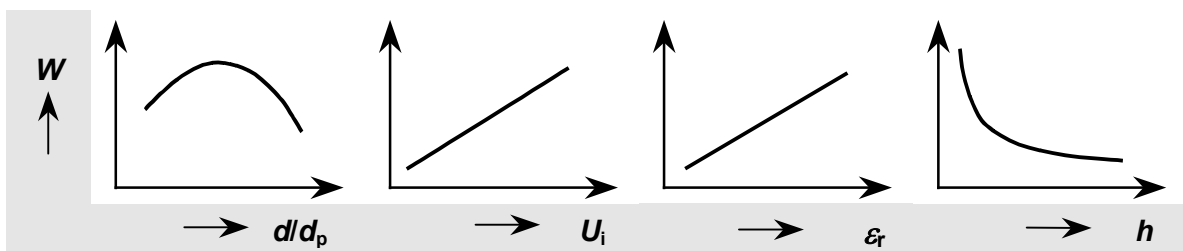


Bild 4.21 Abhängigkeiten der Energie W_U von den Ausgangsparametern (d/d_p , U_i , ε_r , h)

In Abhängigkeit von d/d_p ergibt sich ein Maximum der Energie im Bereich von d/d_p zwischen 0,35 und 0,55. Bei steigendem Oberflächenpotential nimmt die Energie nichtlinear zu. Die Abhängigkeit von ε_r ist näherungsweise linear, wogegen für die zunehmende Materialdicke ein nichtlinearer Abfall zu erkennen ist.

In Folge der Vielzahl von Ausgangsparametern kann nicht jede mögliche Kombination verglichen werden. Deshalb wird der Vergleich zwischen den Energiewerten aus der approximierten Funktion, dem Modell und aus der Messung für jeden Ausgangsparameter an einem Beispiel gezeigt. Die aus der Messung ermittelten Energiewerte sind mit Kreuzen dargestellt, die aus dem PSpice-Modell ermittelten mit Kreisen und die approximierten Energiewerte mit durchgezogenen dicken Linien. Zur besseren Beurteilung wurden zusätzlich die Kurven für $\pm 10\%$ Abweichung bezüglich der Approximation eingezeichnet (dünne Linien).

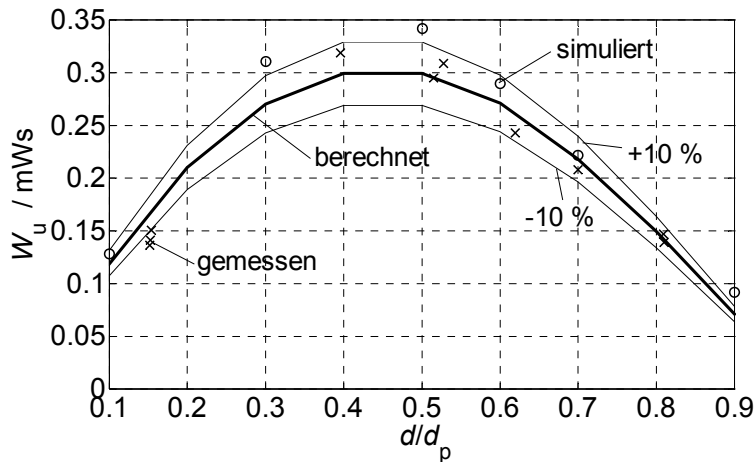


Bild 4.22

Vergleich der Energiewerte, welche aus der Messung (x), der Approximation (Linie) und aus dem Modell (o) ermittelt wurden, in Abhängigkeit von d/d_p für PTFE-Folien ($\epsilon_r = 2,0$) mit einer Dicke $h = 0,2$ mm und einem Aufladungspotential von $U_i = 10,9$ kV

Für den normierten Entladungsabstand d/d_p wird der Vergleich am Beispiel von PTFE-Folien ($\epsilon_r = 2,0$) mit einer Dicke $h = 0,2$ mm und einem Aufladungspotential von $U_i = 10,9$ kV durchgeführt (Bild 4.22). Das zuvor beschriebene Maximum bei mittleren Werten von d/d_p ist gut zu erkennen. Die aus der Messung ermittelten Energiewerte liegen überwiegend in dem $\pm 10\%$ Toleranzbereich. Die Ergebnisse, die sich für das Modell ergeben, haben im mittleren Bereich von d/d_p eine etwas größere positive Abweichung.

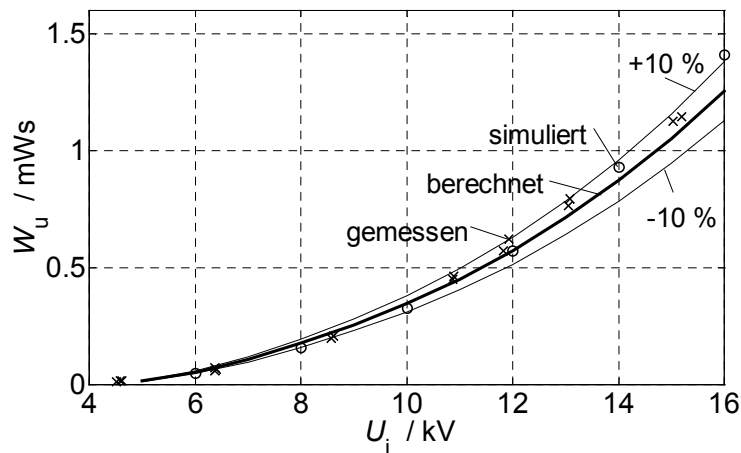


Bild 4.23

Vergleich der Energiewerte, welche aus der Messung (x), der Approximation (Linie) und aus dem Modell (o) ermittelt wurden, in Abhängigkeit von U_i für PES-Folien ($\epsilon_r = 3,7$) mit einer Dicke $h = 0,2$ mm und einem normierten Entladungsabstand $d/d_p = 0,5$

Die Abhängigkeit vom Aufladungspotential U_i wird anhand von PES-Folien ($\epsilon_r = 3,7$) mit einer Dicke $h = 0,2$ mm, und einem normierten Entladungsabstand $d/d_p = 0,5$ gezeigt (Bild 4.23). Es ergibt sich für zunehmende Werte von U_i der beschriebene Anstieg der umgesetzten Energie. Auch für dieses Beispiel liegen die aus der Messung ermittelten Energiewerte in dem $\pm 10\%$ Toleranzbereich, hier auch für die Energiewerte die mit Hilfe des Modells bestimmt wurden.

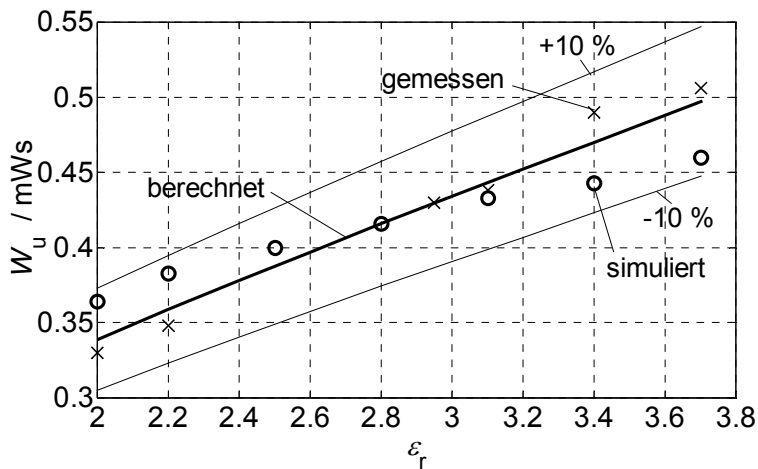


Bild 4.24

Vergleich der Energiewerte, welche aus der Messung (x), der Approximation (Linie) und aus dem Modell (o) ermittelt wurden, in Abhängigkeit von ϵ_r für eine Dicke $h = 0,2$ mm, einem norm. Entladungsabstand $d/d_p = 0,5$ und einem Aufladungspotential von $U_i = 10,9$ kV

Der Vergleich der Energiewerte für die Dielektrizitätskonstante ϵ_r wird für eine Materialdicke $h = 0,2$ mm, einen normierten Entladungsabstand $d/d_p = 0,5$ und ein Aufladungspotential von $U_i = 10,9$ kV betrachtet (Bild 4.24). Es zeigt sich, dass die aus der Messung ermittelten Energiewerte durch die Approximation sehr gut wiedergegeben werden. Für dieses Beispiel ist die Abweichung sogar deutlich kleiner als $\pm 10\%$. Die Werte, die aus dem Modell gewonnen wurden, liegen auch in diesem Bereich, wobei eine flachere Abhängigkeit von ϵ_r erkennbar ist.

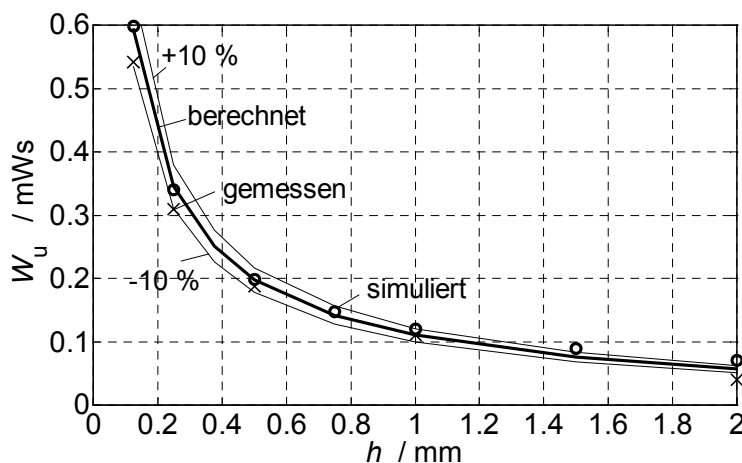


Bild 4.25

Vergleich der Energiewerte, welche aus der Messung (x), der Approximation (Linie) und aus dem Modell (o) ermittelt wurden, in Abhängigkeit von der Dicke h für PC-Folien ($\epsilon_r = 2,93$), einen norm. Entladungsabstand $d/d_p = 0,5$ und einem Aufladungspotential von $U_i = 10,8$ kV

Zuletzt werden die Energiewerte für die Abhängigkeit von der Materialdicke h verglichen. Dies geschieht am Beispiel von PC-Folien ($\epsilon_r = 2,93$), einem Aufladungspotential von $U_i = 10,8$ kV und einem normierten Entladungsabstand $d/d_p = 0,5$ (Bild 4.25). Für die Materialdicke h ergibt sich eine nichtlinear abfallende Kurve. Wegen dieser Nichtlinearität können speziell im Bereich der geringen Dicken, durch die starke Abhängigkeit kleine Abweichungen bei anderen Parametern hier deutlicher hervortreten. Für dieses Beispiel liegen die aus der Messung ermittelten

Energiewerte überwiegend in dem $\pm 10\%$ Toleranzbereich, was auch für die Energiewerte gilt, die mit dem Modell ermittelt wurden.

Für die im Rahmen dieser Arbeit gemachten Untersuchungen, kann zusammenfassend gesagt werden, dass die umgesetzte Energie W_u im Funkenkanal, ermittelt aus dem Entladungsstrom und die Werte, die aus der approximierten Funktion ermittelt wurden, eine gute Übereinstimmung zeigen. Die Abweichung ist überwiegend kleiner als $\pm 10\%$. Durch die Vorgabe möglichst einfache Approximationsformeln zu verwenden und durch die hohe Anzahl an Ausgangsparametern können aber auch größere Abweichungen auftreten. Auch die mit Hilfe des parallel entworfenen Modells bestimmten Werte der umgesetzten Energie W_u im Funkenkanal zeigen eine gute Übereinstimmung, wobei die Toleranz überwiegend kleiner als $\pm 10\%$ bis 15% ist.

Auch wenn aus einer Reihe von Messbeispielen, die zur angegebenen Beschreibungformel des Entladungsstromes führten, keine Allgemeingültigkeit abgeleitet werden kann, so ist die Approximationsformel in der Praxis doch ein gutes Mittel, um schnell und ohne Messung die zu erwartende Energie im Funkenkanal abzuschätzen. Zu beachten sind die bei der Untersuchung gemachten Einschränkungen eines ebenen und sauberen Prüflings, sodass die mit der Approximationsformel ermittelten Werte in der Praxis Vergleichswerte darstellen.

5 Gleitentladung

Nach einer Charakterisierung der Gleitentladung folgt die Betrachtung, ab wann eine Gleitentladung auftritt. Danach wird anhand von Messungen an einem Kanal und der Betrachtung der zeitlichen Ausbreitung der Entladungskanäle ein einfaches Modell abgeleitet. Zum Schluss werden anhand der umgesetzten Energie Modell und Messung diskutiert und verglichen.

Im Gegensatz zu den Untersuchungen bei den Büschelentladungen, bei denen Parameterstudien für einige Ausgangsparameter durchgeführt wurden, wird bei den Gleitentladungen das prinzipielle Verhalten anhand eines Beispielmateriales untersucht. Alle Messungen in diesem Kapitel, ausgenommen Unterkapitel 5.2, beziehen sich deshalb auf PVC-Folien ($\epsilon_r = 2,95$) mit einer Dicke $h = 0,18$ mm.

5.1 Charakterisierung der Versuchsergebnisse

Die Entladungsform der Gleitstielbüschel-Entladungen (Gleitentladungen) wurde in Kapitel 2.1.4 schon kurz vorgestellt. Gleitentladungen sind Entladungen, die nur auf Isolatoroberflächen mit sehr hohen Flächenladungsdichten (>25 nC/cm²) [Heidelberg, 1970] auftreten können. Diese können nur in Anordnungen mit Ladungs-Doppelschichten (Kapitel 2.4.3) erreicht werden.

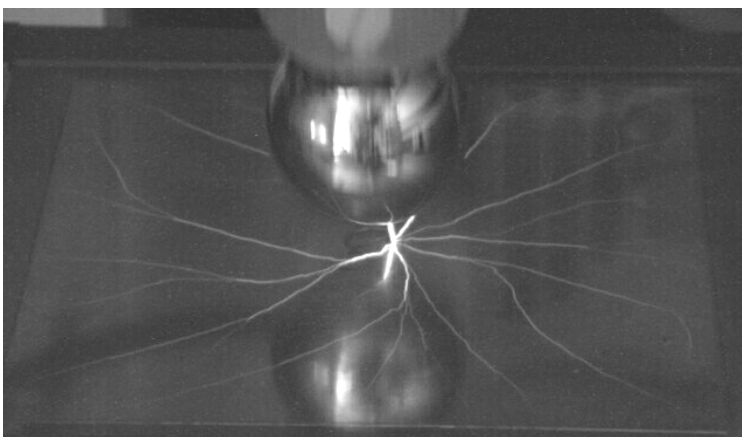


Bild 5.1

Gleitentladung mit Gleitentladungskanälen

Den optischen Unterschied zu den vorher betrachteten Büschelentladungen bilden die leuchtstarken Entladungskanäle auf der Oberfläche, die sich sternförmig nach außen hin fein verästelt ausbreiten, wie in Bild 5.1 zu sehen. Wie es zu einer solchen Gleitentladung kommen kann, beschreibt das folgende Unterkapitel.

5.1.1 Initiierung einer Gleitentladung

Die Prüflinge werden, wie in Kapitel 3.2 beschrieben, gleichmäßig aufgeladen. Danach wird eine geerdete Elektrode der aufgeladenen Fläche angenähert, bis Entladungsvorgänge auftreten. Als erstes entsteht dabei eine Büschelentladung, welche die aufgeladene Oberfläche über den Entladungskanal mit der rückseitigen Massefläche kurzschließt. Durch diese Büschelentladung, die einen lokalen Bereich der Oberfläche entlädt, entsteht zwischen dem schon entladene Bereich und dem noch aufgeladenen Bereich eine Potentialdifferenz und somit eine tangential elektrische Feldstärke E_t . In Kapitel 5.2.2 wird diese elektrische Feldstärke E_t näher betrachtet.

Die Voraussetzung für das Entstehen von Gleitentladungs-Kanälen ist das Überschreiten eines kritischen Wertes von E_t auf der Oberfläche des Prüflings. Dieser kritische Wert kann zeitlich leicht versetzt an einigen Stellen erreicht werden und startet somit die unterschiedlichen leuchtstarken Kanäle, welche sternförmig vom Startpunkt nach außen verlaufen. Auf ihren Weg nach außen verzweigen sich die einzelnen Kanäle je nach örtlich entstehender Potentialdifferenz bzw. Feldstärke. Unterschreitet die Feldstärke den erforderlichen Mindestwert so endet der Kanal.

Bei der Initiierung einer Gleitentladung durch eine Büschelentladung sind zwei Fälle zu unterscheiden. Der erste Fall wurde gerade beschrieben. Die Entladungselektrode wird angenähert, bis die Büschelentladung einsetzt, und die Gleitentladung startet nach einer Verzögerungszeit (Kapitel 5.1.2). Die zweite Möglichkeit besteht darin, dass eine Büschelentladung stattfindet, aber erst nach weiterer Annäherung der Elektrode die Gleitentladung einsetzt. Hierbei hat die tangential elektrische Feldstärke E_t nach der Büschelentladung noch nicht ganz den kritischen Wert erreicht. Durch weitere Annäherung der Elektrode wird das elektrische Feld und damit auch E_t verändert, sodass doch eine Gleitentladung möglich ist. Dabei entsteht ein neuer Entladungskanal in der Luft, der die Gleitentladungs-Kanäle mit der Entladungselektrode verbindet.

5.1.2 Zeit zwischen Büschel- und Gleitentladung

Für diese und die folgenden Betrachtungen wurden einige Messungen (im weiteren mit ① bis ④ bezeichnet) ausgewählt, bei welchen darauf geachtet wurde,

dass gleiche Ausgangsbedingungen herrschten, soweit diese beeinflussbar sind. Bild 5.2a zeigt den Anfang des Entladungsstromes dieser Messungen, die für PVC-Folien ($\epsilon_r = 2,95$) mit einer Dicke $h = 0,18$ mm, einer Aufladung $U_i = 15,5$ kV ($\sigma_i = 225$ nC/cm²) und einem Entladungsabstand $d = 3,5$ mm durchgeführt wurden.

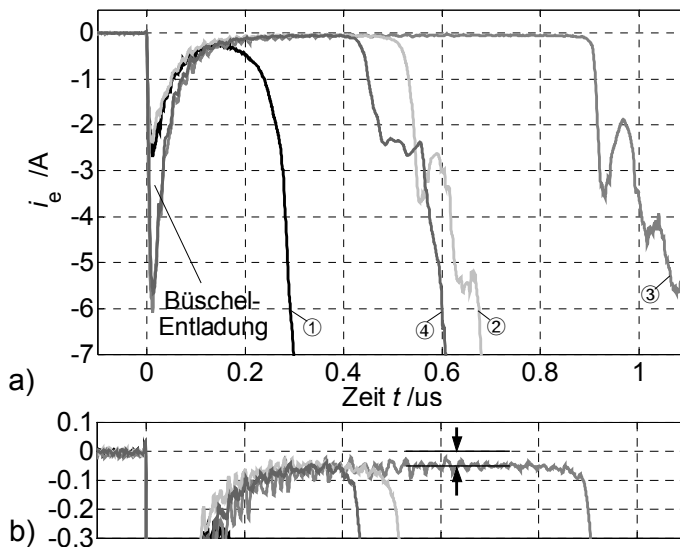


Bild 5.2

Anfang der Entladungsströme ① bis ④

- a) mit verschiedenen Verzögerungszeiten zwischen einleitender Büschelentladung und Start der Gleitentladung
- b) vergrößerte Darstellung mit der Betonung auf den kleinen Strom der während der Verzögerungszeit fließt

Zu Beginn ist der initiiierende Impuls der Büschelentladung zu sehen. Nach unterschiedlich großer Verzögerungszeit beginnt der Stromimpuls, der durch die Gleitentladungs-Kanäle hervorgerufen wird. In diesem Beispiel variiert die Verzögerungszeit im Bereich von 150 ns bis 800 ns. Der Grund für die Verzögerung kann nicht nur das Fehlen von Startelektronen sein, weil Messungen mit einem UV-Licht bestrahlten Entladungsbereich ähnliche Variationen (70 ns bis 350 ns) zeigten.

Ein weiterer charakteristischer Punkt ist der kleine Strom, der während der Verzögerungszeit fließt (Bild 5.2b). Er liegt in der Größenordnung von 10 mA. Eine mögliche Erklärung dafür ist die Bewegung der noch im Entladungskanal befindlichen langsamen Ladungsträger (Ionen). Zusätzlich können auch einige wenige Elektronen aus dem Gebiet um den Entladungspunkt durch die Potentialdifferenz auf der Oberfläche abfließen, ohne jedoch eine weitere Ionisation im Entladungskanal und damit ein Einsetzen der Gleitentladung zu bewirken (rein ohmscher Strom). Erst wenn mehr Elektronen nachfließen entsteht eine Gleitentladung.

5.1.3 Form des Entladungsstromes der Gleitentladung

Die Messungen ① bis ④ werden jetzt bezüglich der Form des Entladungsstromimpulses untersucht. Im Bild 5.3 sind die vollständigen Entladungsströme darge-

stellt, die entlang der Zeitachse so verschoben wurden, dass der Beginn der Gleitentladung an gleicher Stelle liegt ($t = 0$). Damit ist ein Vergleich der unterschiedlichen Formen des Gleitentladungsstrom-Impulses möglich.

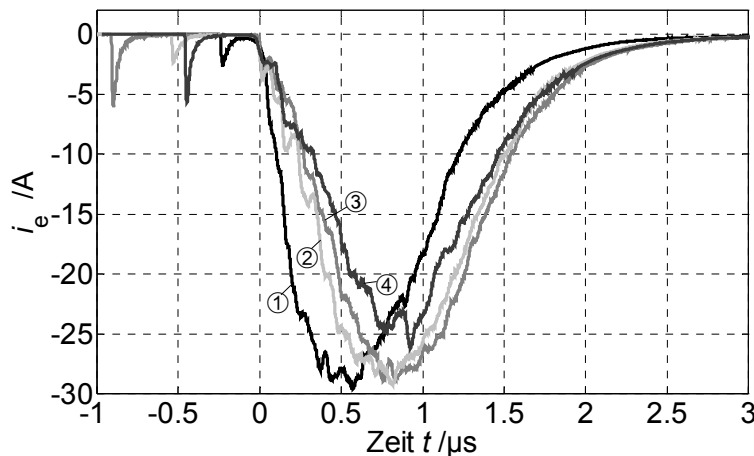


Bild 5.3

Entladungsstrom-Impulse mit verschiedener Form bei gleichen Ausgangsbedingungen ($\epsilon_r = 2,95$; $h = 0,18 \text{ mm}$; $U_i = 15,5 \text{ kV}$ und $d = 3,5 \text{ mm}$) - zeitlich so verschoben, dass der Start des Gleitentladungs-Impulses an der selben Stelle ist

Die Anstiegszeit der Impulse variiert im Bereich von $0,31 \mu\text{s}$ bis $0,65 \mu\text{s}$, woraus eine maximale Stromsteilheit von ca. $80 \text{ A}/\mu\text{s}$ abgeleitet werden kann. Der Grund dafür ist, dass die unterschiedlichen Entladungskanäle zeitlich versetzt starten (siehe auch Kapitel 5.4.2). Die Schwankung dieser Einsetzzeit oder Startzeit der Entladungskanäle ist bei Messung ① relativ klein. Beim gemessenen Entladungsstrom überlagern sich die einzelnen Kanalströme zum Gesamtstrom, weshalb bei dieser Messung ① die Anstiegsflanke glatt und steil ist. Messung ② oder ③ zeigen das Gegenteil. Bei diesen sieht man deutlich das verzögerte Auftreten der Teilströme der einzelnen Kanäle. Die Anstiegsflanke ist gestuft und somit flacher. Der Grund dafür ist die größere Schwankung der Startzeit der Entladungskanäle.

Diese Messungen zeigen, dass trotz gleicher Ausgangsbedingungen die Form des Gleitentladungsstrom-Impulses innerhalb gewisser Grenzen variieren kann. Die Form ist bestimmt durch die statistische Verteilung der Startzeit der jeweiligen Entladungskanäle.

5.1.4 Einfluss des normierten Entladungsabstandes d/d_p

Auch bei der Gleitentladung spielt der normierte Entladungsabstand d/d_p eine entscheidende Rolle. Ähnlich wie in Kapitel 4.1.3 diskutiert, verändern sich die Feldstärkeverhältnisse im Entladungsgebiet durch die Entladungselektrode bei kleineren d/d_p . Die Abhängigkeit wird anhand von Fotos verdeutlicht, welche mit

Hilfe von extrem empfindlichen Fotomaterial (ASA 3200) gemacht wurden. Dabei variierte der normierte Entladungsabstand.

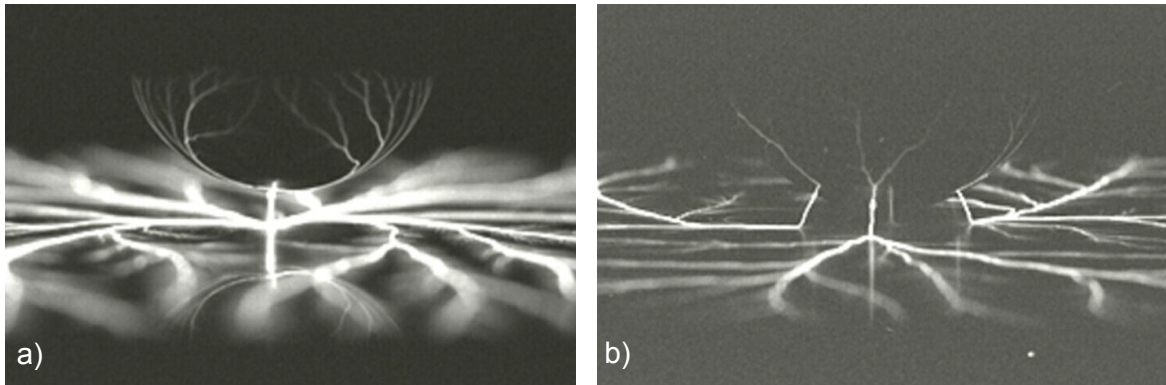


Bild 5.4 Fotoaufnahmen von Gleitentladungen bei variierendem d/d_p

- a) $d = 3,5 \text{ mm} \approx d_p \Rightarrow$ nur ein Luftkanal
- b) $d = 1,5 \text{ mm} \approx 0,4 d_p \Rightarrow$ einige Luftkanäle

Ist d/d_p in der Nähe von Eins, so entsteht nur *ein* Kanal in Luft der die Oberfläche mit der Entladungselektrode verbindet (Bild 5.4a). Ist d jedoch deutlich kleiner als d_p (Bild 5.4b) so entstehen *mehrere* Verbindungskanäle in der Luft zwischen Oberfläche und Entladungselektrode, die sich außerhalb des Zentrums befinden. Dies ist auch verständlich, weil die vorherige Büschelentladung den zentralen Bereich entladen hat, und die hohe tangentielle Feldstärke (Kapitel 5.2.2) erst einige Millimeter entfernt vom Entladungspunkt auftritt.

5.1.5 Gegenüberstellung der gemessenen Flächenladungsdichte und fotografierter Lichterscheinung

Zur Verifikation und Verdeutlichung der ermittelten Flächenladungsdichte-Verteilung nach einer Gleitentladung, wurde in Bild 5.5 die Fotografie der Lichterscheinung einer Entladung der Messung gegenüber gestellt. Dieses Foto wurde mit einer Empfindlichkeit von ASA 400 (DIN 27) aufgenommen. Es ist eine sehr gute Übereinstimmung der dargestellten Entladungskanäle und deren Verzweigungen zu erkennen. Je größer die Entfernung vom Entladungspunkt ist, desto häufiger verzweigen die Hauptkanäle infolge der größer werdenden Fläche.

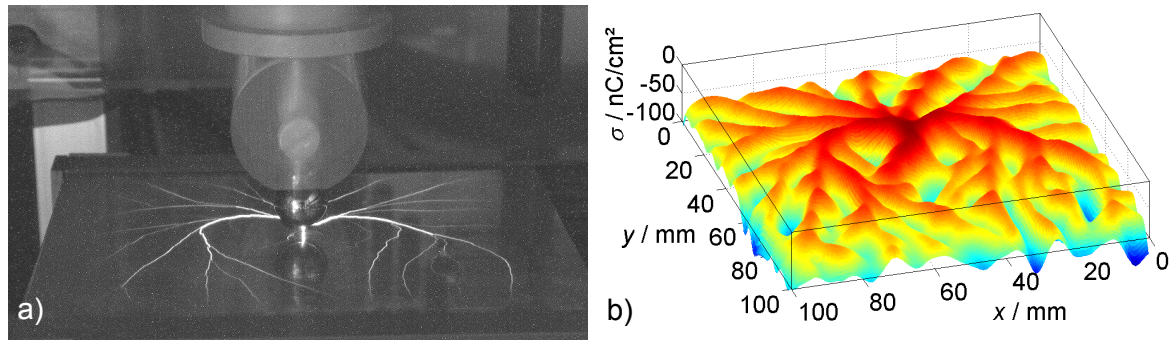


Bild 5.5 Gegenüberstellung

- a) eines Fotos von einer Gleitentladung
- b) mit der gemessenen Flächenladungsdichte der selben Gleitentladung

5.2 Übergang von Büschel- zu Gleitentladung

Die Bedingungen für das Einsetzen einer Gleitentladung wurden in Kapitel 5.1.1 grundsätzlich beschrieben. Hier wird der Wechsel der Entladungsart von einer Büschel- zur Gleitentladung genauer betrachtet und in Abhängigkeit von einigen Parametern untersucht. Ziel dabei ist, für die Praxis eine Formel anzugeben, mit der abgeschätzt werden kann, ab welchen Ausgangsbedingungen mit Gleitentladungen zu rechnen ist.



Bild 5.6

Foto des Ansatzes einer Gleitentladung

5.2.1 Einfluss des normierten Entladungsabstandes d/d_p

Für den Fall der Initiierung einer Gleitentladung direkt aus der vorangegangenen Büschelentladung ohne weitere Annäherung der Entladungselektrode wird der Einfluss von d/d_p auf das Einsetzen von Gleitentladungen im folgenden genauer betrachtet.

In Abhängigkeit des normierten Entladungsabstandes d/d_p wurde das Oberflächenpotential U_i schrittweise erhöht (Schrittweite 0,5 kV). Für jeden Wert von U_i sind einige Entladungen durchgeführt worden, bis Gleitentladungen einsetzten. Dabei wurde unterschieden, ob nur der Ansatz einer Gleitentladung entstand, einzelne kurze Leuchtfäden wie in Bild 5.6, oder eine kräftige Gleitentladung (Bild 5.5) einsetzte. An dieser Stelle sei betont, dass bei diesen ermittelten Werten mindestens einmal eine Gleiterscheinung zu sehen war, was nicht bedeutet, dass bei diesen Werten nicht auch nur eine Büschelentladung stattfinden kann.

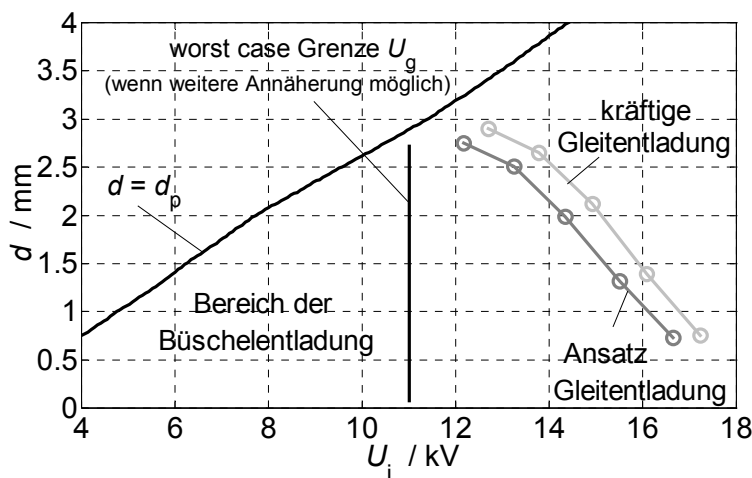


Bild 5.7

Messwerte des Grenzwertes U_g , ab dem Gleitentladungen möglich sind für PVC-Folien mit $h = 0,18$ mm und den Fall, dass die Entladung direkt aus der Büschelentladung, ohne weitere Annäherung der Entladungselektrode, entsteht

Neben der Begrenzungslinie $d = d_p$, unterhalb der Entladungen möglich sind (Kapitel 2.5), sind in Bild 5.7 die Werte von U_i dargestellt, ab denen Gleitentladungen möglich sind. Es ist zu erkennen, dass für kleinere Werte des Entladungsabstandes d und damit für kleinere Werte von d/d_p die Gleitentladung erst bei größeren Werten von U_i einsetzt. Das Grenzoberflächenpotential U_g , ab welchem Gleitentladungen möglich sind, besitzt demnach eine Abhängigkeit von d/d_p . Als Vergleich ist auch die worst case Grenze für U_g im Bild mit dargestellt, die in Kapitel 5.2.3 beschrieben wird.

5.2.2 Tangentiale Feldstärke

Die Voraussetzung für das Entstehen von Gleitentladungs-Kanälen ist das Überschreiten eines kritischen Wertes von E_t auf der Oberfläche des Prüflings, weshalb in diesem Kapitel die tangentielle Feldstärke näher betrachtet wird [Müller-3, 2002]. In Abhängigkeit von dem Oberflächenpotential U_i und d/d_p , wird dazu bei Büschelentladungen, am Beispiel von PVC-Folien mit $h = 0,18$ mm und $h = 0,36$ mm, die tangentielle elektrische Feldstärke E_t ermittelt. Ziel der Unter-

suchung ist die Angabe einer Tendenz der maximalen tangentialen Feldstärke E_{tmax} für die Abhängigkeit von U_i und d/d_p .

Die Basis für die Berechnung von E_t auf der Oberfläche ist die gemessene Ladungsverteilung nach der Entladung. Dazu wurde ein virtuelles Raster über die Oberfläche gelegt. In jedem Rasterpunkt wird die Ladungsdichte durch eine Punktladung repräsentiert. Der Effekt der Kugel wird durch influenzierte Ladungen berücksichtigt, die rückseitigen Masse durch eine zweite gleichgroße Ladungsebene versetzt um die Dicke der Folie [Heidelberg, 1970-2]. Diese Näherung, ist für $h \ll D = r_{kug} + d$ gültig. Für die hier verwendete Kugel mit einem Radius r_{kug} von 15 mm, und die dünnen Folien ist die Bedingung erfüllt.

Bei der Büschelentladung wird ein begrenzter näherungsweise rotations-symmetrischer Bereich um den Entladungspunkt herum entladen. Im Grenzbereich zum noch aufgeladenen Oberflächenbereich entsteht deshalb eine hohe tangentielle Feldstärke. Entlang einer Schnittlinie durch das entladene Gebiet wird die Feldstärke E_t berechnet (analog Bild 4.2). Die Betrachtung nur entlang einer Linie stellt trotz der näherungsweisen Rotationssymmetrie eine Näherung dar und schließt nicht aus, dass die tatsächlichen Maximalwerte E_{tmax} etwas abweichend sein können.

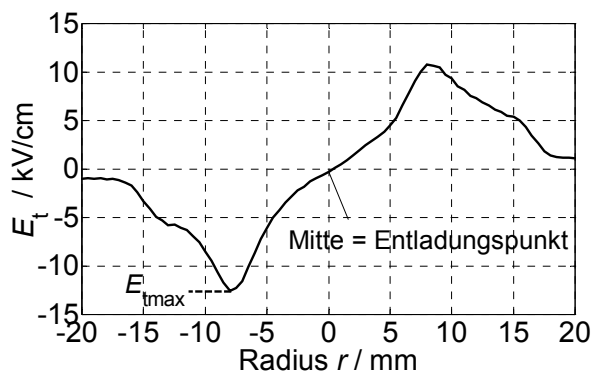


Bild 5.8

berechnete Feldstärke E_t
entlang der Schnittlinie
durch das entladene Gebiet

Ein Beispiel einer solchen Berechnung der tangentialen Feldstärke E_t ist in Bild 5.8 dargestellt. Der Entladungspunkt in dieser Grafik liegt bei 0 und korrespondiert mit der Position in der Mitte von Bild 4.2 ungefähr $x = y = 50$ mm. Die Maxima die zu jeder Seite hin entstehen, sind gut zu sehen. Hierbei interessiert nur der Betrag des Maximums, der für die jeweiligen Parameter festgehalten wird.

Wie vorher erwähnt sind die untersuchten Parameter das Oberflächenpotential U_i sowie der normierte Entladungsabstand d/d_p . Zusätzlich wurden zwei ver-

schiedene Foliendicken betrachtet. Die untersuchten Messpunkte sind in Bild 5.9 dargestellt. Für konstantes $d/d_p = 0,5$ wurde das Oberflächenpotential U_i erhöht, bis zur in Kapitel 5.2.1 ermittelten Grenze für das Einsetzen von Gleitentladungen. Darüber hinaus ist für konstantes $U_i = 11,6$ kV der normierte Entladungsabstand d/d_p variiert worden.

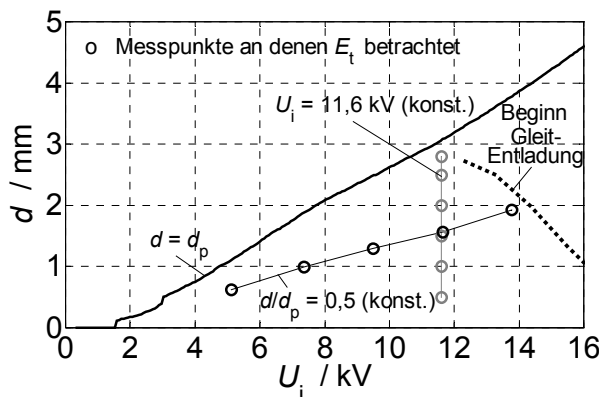
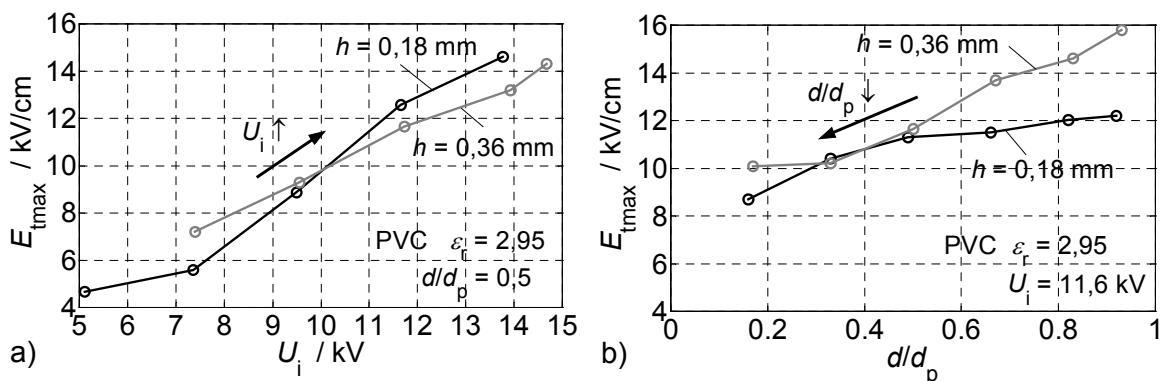


Bild 5.9:

Darstellung der Messpunkte, an denen die maximale tangentielle Feldstärke E_{tmax} ausgewertet wird

In Bild 5.10a, ist der maximale Wert der tangentialen Feldstärke E_{tmax} als Funktion des Oberflächenpotentials U_i für zwei Foliendicken dargestellt. Für größer werdendes U_i steigt der Wert der tangentialen Feldstärke E_{tmax} ebenfalls an, wobei sich die Werte von E_{tmax} für die zwei Foliendicken kaum unterscheiden.

Bild 5.10 E_{tmax} für PVC-Folie mit Dicke $h = 0,18$ mm und $h = 0,36$ mm in Abhängigkeit

- von dem Oberflächenpotentials U_i
- von dem normierten Entladungsabstandes d/d_p

Verfolgt man die Tendenz der Werte für E_{tmax} einer Büschelentladung bei der gerade noch keine Gleitentladung folgte bis in die Nähe der Grenze, ab der Gleitentladungen auftreten können, so liegen die Werte für PVC-Folien der untersuchten Dicken bei ungefähr 15 kV/cm. Berücksichtigt man die geringfügige Mittelung der Potentialwerte, die durch die Annahme der Rotationssymmetrie und

die Betrachtung auf einer Linie entsteht, welches zu verringerten Werten von E_{tmax} führt, so kann für PVC ein Bereich von 16 kV/cm bis 20 kV/cm für den Wert der kritischen tangentialen Feldstärke angegeben werden, ab dem Gleitentladungen entstehen.

Da eine Entladung für $d < d_p$ möglich ist, ergeben sich für variierendes d/d_p unterschiedliche Flächenladungsdichte-Verteilungen (Kapitel 4). Für kleineres d/d_p wird der Kegel der entladenen Ladungsmenge immer breiter. Deshalb wird auch für variierendes d/d_p der maximale Wert der tangentialen Feldstärke E_{tmax} betrachtet. Bild 5.10b zeigt diesen Zusammenhang für die zwei erwähnten Foliendicken. Hierbei zeigt sich, dass mit kleiner werdendem Entladungsabstand auch eine Verringerung der maximalen tangentialen Feldstärke E_{tmax} einhergeht. Damit lässt sich erklären, warum in Bild 5.7, für kleiner werdendes d/d_p , die Werte der Grenzaufladung U_g größer werden.

5.2.3 Grenzaufladung

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

Bei dieser Betrachtung soll nicht zwischen den beiden Fällen der Gleitentladungs-initiierung unterschieden werden, wie sie in Kapitel 5.1.1 beschrieben wurde. Für den Fall, dass die Gleitentladung ohne weitere Annäherung der Elektrode entsteht, wurde in Kapitel 5.2.1 gezeigt, dass der Wert des Grenzaufladungs-Potentials U_g größer wird, wenn der Wert des normierten Entladungsabstandes d/d_p sich verkleinert. Beim anderen Fall, der sich weiter annähernden Elektrode, kann man dies nicht sagen. Für eine worst case Betrachtung wird deshalb versucht, den kleinstmöglichen Wert des Grenzaufladungs-Potentials U_g zu ermitteln, unabhängig vom normierten Entladungsabstand d/d_p .

Zur Ermittlung einer worst case Formel für das Grenzaufladungs-Potential U_g wurden Messungen für Folien mit verschiedenem ϵ_r und einigen Dicken h durchgeführt. Dazu wurden die Folien schrittweise stärker aufgeladen (Schrittweite 0,5 kV) und jeweils im Anschluss entladen. Als Kriterium für den Beginn einer

Gleitladung wurde das Aufladungspotential gewählt, bei dem erstmals sichtbare Gleitladungs-Kanäle länger als 10 mm auftraten (Bild 5.6).

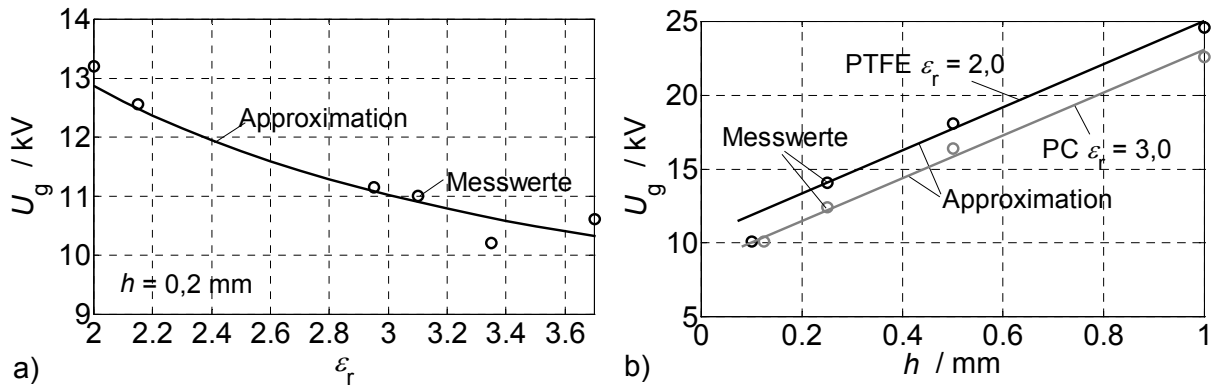


Bild 5.11 Grenzaufladungs-Potential U_g in Abhängigkeit

- a) vom Material mit ϵ_r
- b) von der Materialdicke h

In Bild 5.11 ist die Grenzaufladung U_g für die 2 Parameter ϵ_r und h dargestellt. Dabei stellen die durchgezogenen Linien eine Approximation der Messwerte dar. Fügt man die einzelnen approximierten Funktionen zusammen, ergibt sich folgende Näherungsformel für das Grenzaufladungs-Potential U_g :

$$U_g = 4,5\text{kV} + \frac{11\text{kV}}{\epsilon_r} + 15\text{kV} \cdot \frac{h}{\text{mm}} \quad (5.1)$$

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

5.3 Betrachtung eines einzelnen Gleitladungs-Kanales

Die Gleitladung besteht aus vielen einzelnen Gleitladungs-Kanälen. Zur Bestimmung eines einfachen Modells ist es nötig zu verstehen, wie sich die Entladungs Kanäle ausbreiten. Deshalb wird hier ein einzelner Entladungskanal einer Gleitladung näher betrachtet und charakterisiert [Müller, 2002].

5.3.1 Vorbetrachtungen

Zur Bestimmung der Werte der Flächenladungsdichte entlang eines Entladungskanals aus einer gemessenen Ladungsverteilung wurde ein Algorithmus entwickelt (Bild 5.12). Dieser bestimmt die Werte der Flächenladungsdichte entlang des Grates des ausgewählten Entladungskanals. Die Differenz der Werte der Flächenladungsdichte vor und nach der Entladung stellt den Wert der entladenen Flächenladungsdichte σ_e dar, wie in Bild 5.12b über der ermittelten Kanallänge zu sehen. Der Fußpunkt der Luftentladung repräsentiert den Anfang des Kanals.

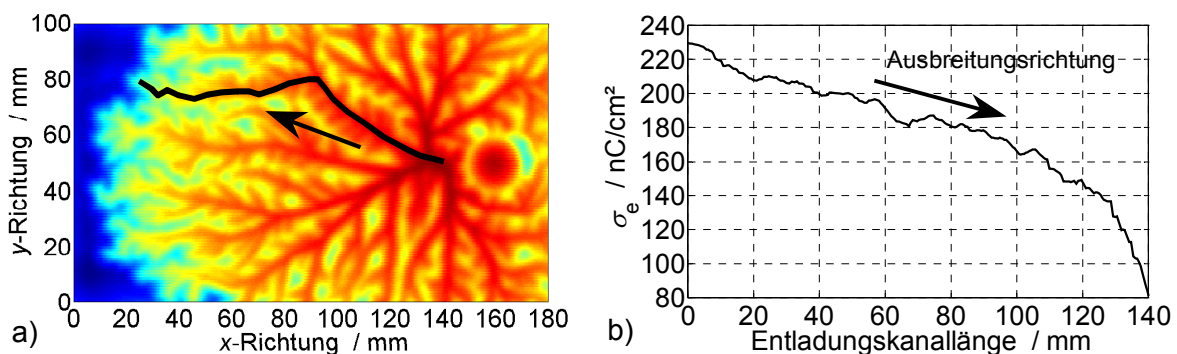


Bild 5.12 Ermittlung der Flächenladungsdichte entlang eines Entladungskanals

- a) gemessene Flächenladungsdichte mit markiertem Entladungskanal
- b) Werte der entladenen Flächenladungsdichte entlang des markierten Kanals aufgetragen über dem Abstand von Fußpunkt der Luftentladung

Um sich auf einen Entladungskanal beschränken zu können, kann die Aufladung der Isolierstoffe auch nur entlang einer Linie erfolgen. 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 und diese aufladen (Bild 5.13a). Damit an der Grenze von dieser hochaufgeladenen Linie zum restlichen ungeladenen Bereich vorab keine Entladung stattfinden kann, wurde die gesamte Fläche der Folien zuvor mit einer geringeren Flächenladungsdichte von etwa 140 nAs/cm² aufgeladen, was aber keinen Einfluss auf die Gleitentladungsentwicklung hat. In Bild 5.13b ist eine solche Ladungsdichteverteilung zu sehen. Die Ladungsdichte im Profil senkrecht zur Linienausdehnung zeigt Bild 5.13c. Bei dieser Art der Aufladung wird der maximale Wert der Flächenladungsdichte im Profil als der Wert σ_1 für die Aufladung vor der Entladung betrachtet. Die Annäherung der Kugelelektrode

erfolgt an einem Ende der aufgeladenen Linie, sodass sich der Gleitentladungs-kanal entlang dieser entwickeln kann.

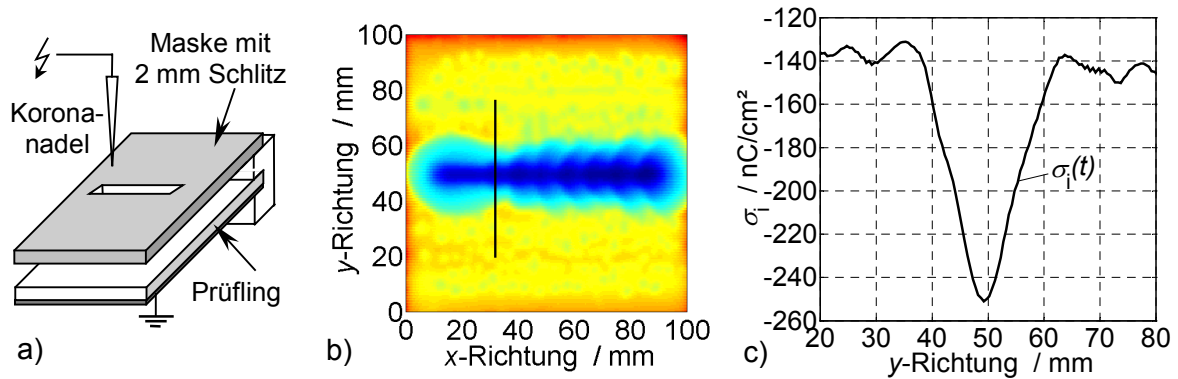


Bild 5.13: Aufladung einer Linie mit Maskenplatte und Schlitz von 2 mm Breite

- a) Anordnung
- b) Flächenladungsdichteverteilung σ_i
- c) Profil der Flächenladungsdichte quer zur aufgeladenen Linie entlang der im mittleren Bild gekennzeichneten Stelle

5.3.2 Kanalbetrachtung bei Variation der Länge des Kanals

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 5.14 ist die Flächenladungsdichte entlang des Kanals für jeweils ein Beispiel pro Länge zu sehen. Die oben dargestellten Kurven zeigen den Betrag der Flächenladungsdichte vor der Entladung σ_i entlang des Kanals. Es ist deutlich die unterschiedliche Länge der Aufladung zu erkennen. Der Wert von σ_i entlang der Linie wurde konstant zu ungefähr 240 nAs/cm^2 gewählt. Die darunter liegenden Kurven zeigen den Betrag der entladenen Flächenladungsdichte σ_e entlang des Kanals.

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

Weiterhin ist ein nahezu linearer flacher Abfall der Flächenladungsdichte 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 ist eine steilere Abnahme zu sehen, die den Ladungsausgleich um den Kanalendpunkt darstellt, ähnlich wie die Abnahme der Ladung bei Büschelentladungen um den Mittelpunkt der Entladung.

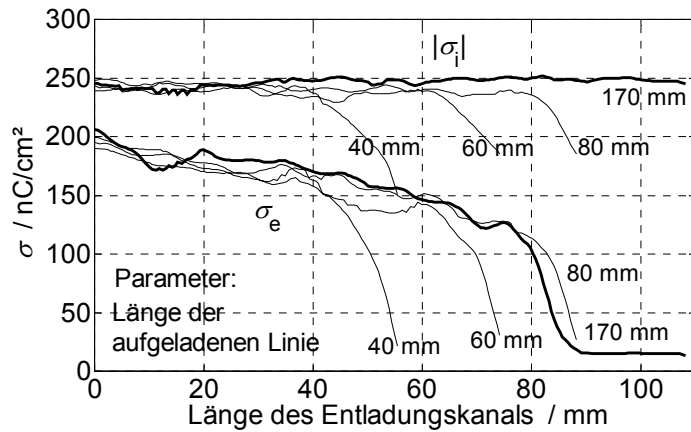


Bild 5.14

Kanallänge bei Variation der Länge der aufgeladenen Linie; Betrag der Flächenladungsdichte σ_i vor der Entladung (obere Kurven) und die entladene Flächenladungsdichte σ_e (untere Kurven)

5.3.3 Kanalbetrachtung bei Variation der Flächenladungsdichte σ_i

Für die nächste Betrachtung wird die Länge der Aufladung konstant mit 170 mm gewählt. Der Betrag der Flächenladungsdichte σ_i entlang der Linie wurde zwischen 240 nAs/cm² und 280 nAs/cm² variiert. Die im Bild 5.15 gezeigte Kurvenschar gibt den Betrag der entladenen Flächenladungsdichte σ_e entlang der Kanäle wieder, wobei σ_i als Parameter an die Kurve geschrieben wurde.

Das grundsätzliche Aussehen der Kurven ist wie im Kapitel 5.3.2. Bei größeren Werten von σ_i ist ein Anwachsen der Länge des Entladungskanals zu beobachten, wobei dieser Zusammenhang näherungsweise linear ist. Wird nicht nur eine Linie aufgeladen sondern die gesamte Fläche, so kann die Länge des Entladungskanals auch als Radius der entladbaren Fläche angesehen werden.

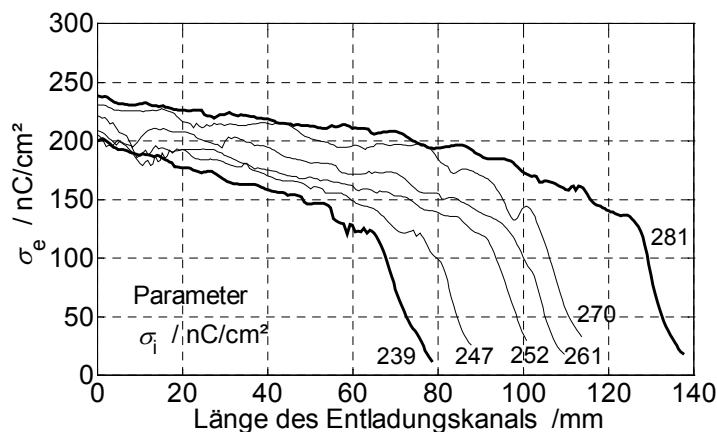


Bild 5.15

Kanallänge bei Variation der Flächenladungsdichte σ_i vor der Entladung der aufgeladenen Linie; dargestellt ist die entladene Flächenladungsdichte σ_e mit σ_i als Parameter

Für größere Werte von σ_1 wird die entladene Flächenladungsdichte größer, der Abfall entlang des Kanals aber geringfügig flacher. Die Differenz aus σ_1 und entladener Flächenladungsdichte σ_e , die verbleibende Ladungsdichte, ist im Anfangsbereich des Kanals nahezu unabhängig vom Wert σ_1 . Im weiteren Verlauf des Kanals steigt die verbleibende Ladungsdichte dann mit größerem σ_1 weniger stark an, korrespondierend mit dem flacheren Abfall der entladenen Ladungsdichte. In Bild 5.15 ist gut zu sehen, wie der flache Abfall über einen Knickpunkt in den steilen Abfall übergeht.

5.3.4 Kanalbetrachtung bei Variation des Profils der Flächenladungsdichte

Bei einer weiteren Betrachtung wird die Länge der Aufladung konstant mit 170 mm, sowie der Betrag der Flächenladungsdichte σ_1 entlang der Linie konstant mit ungefähr 240 nAs/cm^2 gewählt. Der Parameter der jetzt untersucht wird, ist das Profil der Flächenladungsdichte σ_1 senkrecht zur Ausdehnung der Linie. Die unterschiedlichen Aufladungsprofile Bild 5.16a entstehen durch unterschiedliche Aufladungsarten. Die erste Art zeigt die bisher besprochene Aufladung durch Maskenplatte mit Schlitz, 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 Streifen in einem breiteren Bereich (mehrere Nadeln) flächenhaft aufgeladen. Bild 5.16b zeigt für diese 3 Fälle oben den Wert der Flächenladungsdichte σ_1 vor der Entladung und darunter korrespondierend den Wert der entladenen Flächenladungsdichte σ_e entlang des Kanals.

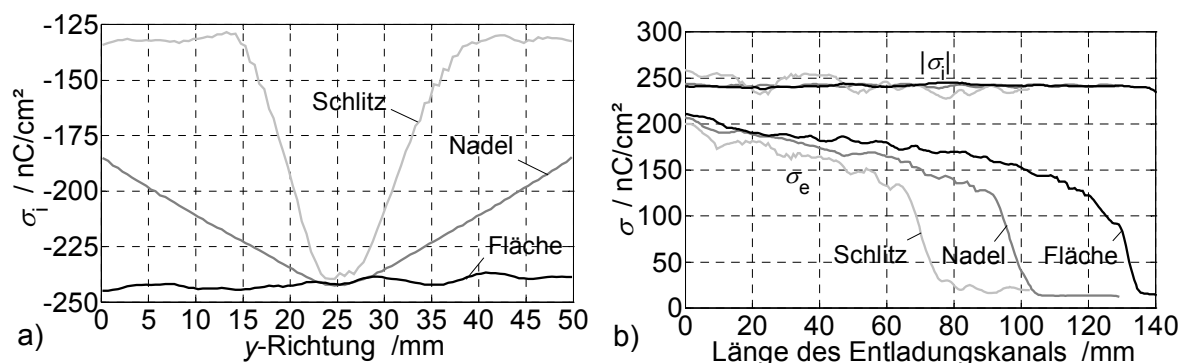


Bild 5.16 Kanallänge bei Variation des Profils der aufgeladenen Linie

- Profile der Flächenladungsdichte
- Betrag der Flächenladungsdichte σ_1 vor der Entladung (obere Kurven), entladene Flächenladungsdichte σ_e (untere Kurven)

Bei der Betrachtung der Kurven kann man feststellen, dass die Entladungskanäle länger werden bei größerer Breite des Profils. Der Abfall der Flächenladungsdichte σ_e entlang des Kanals wird im selben Maße flacher. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass der richtige Parameter, der die Entwicklung des Gleitentladungs-Kanals bestimmt, nicht nur der Wert von σ_i ist, sondern eine Kombination aus σ_i und Profilbreite der Aufladung.

Um dies zu verdeutlichen sind in Bild 5.17 für zwei Beispiele Messungen mit unterschiedlichem Profil gegenübergestellt, bei denen der Entladungskanal gleiche Länge hat. Als Parameter ist σ_i an jeder Kurve zu finden. Der Betrag der Flächenladungsdichte σ_i vor der Entladung ist beim Schlitz-Profil größer, die Breite der Aufladung allerdings kleiner. Das heißt eine schmale, hochaufgeladene Linie entlädt sich gleich weit wie eine breitere, aber schwächer aufgeladene Linie.

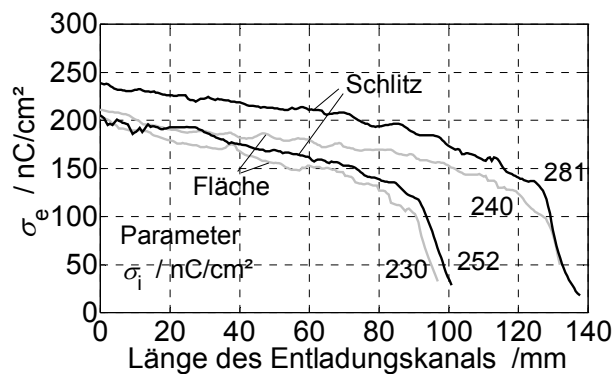


Bild 5.17

Vergleich der entladenen Flächenladungsdichte σ_e entlang des Kanals für je zwei Messungen mit unterschiedlichem Profil (Schlitz und Fläche) senkrecht zur Linienausdehnung

Zusammenfassend kann folgendes gesagt werden:

- unabhängig von der Länge der Aufladung gibt es eine begrenzende Länge für die Ausdehnung von Gleitentladungs-Kanälen
- ein größerer Wert der Aufladung führt zu längeren Entladungskanälen (nahezu lineare Vergrößerung) sowie eine größere Breite des Aufladungsprofiles führt ebenfalls zu längeren Entladungskanälen
- eine Kombination der Breite des Aufladungsprofiles und des Betrages der Aufladung bestimmen somit die Länge des Entladungskanals

5.4 Zeitlicher Ablauf der Gleitentladung

Zum besseren Verständnis des zeitlichen Ablaufs der Gleitentladung wird der Entladungsstrom näher betrachtet. Dies kann in zwei Bereiche aufgeteilt werden,

zum einen in die Untersuchung der *Entwicklung eines Gleitentladungs-Kanales* [Müller-2, 2002], und zum anderen in der Betrachtung der *zeitlichen Abfolge* der einzelnen Entladungskanäle zueinander.

5.4.1 Entladungsentwicklung entlang eines Entladungskanales

Das Ziel der Betrachtung ist die Bestimmung des Entladungsstromes bezüglich der lokalen Position des Entladungskanales. Für diese Untersuchung wird, wie im Kapitel zuvor, nur eine Linie aufgeladen. Entlang dieser Linie kann sich der Entladungskanal ausbreiten (Bild 5.18).

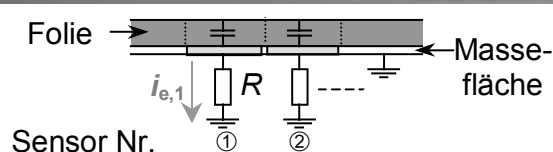
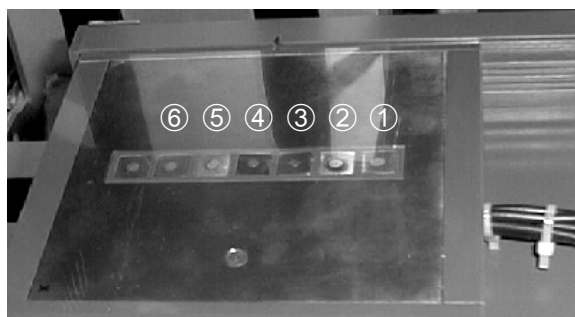


Bild 5.18

Messaufbau für die Bestimmung der lokalen Entladungsströme entlang eines Entladungskanales

Für die Messung der lokalen Entladungsströme entlang eines Entladungskanales wurde ein spezieller Messaufbau entwickelt. Die Massefläche auf der Rückseite der Folie wird entlang der späteren aufgeladenen Linie unterteilt in Teilflächen (Bild 5.18). Diese Teilflächen sind elektrisch isoliert voneinander und über einen Messwiderstand zur Teilstromerfassung mit der Masse verbunden. Damit keine Beeinflussung durch den Widerstand erfolgt wird ein kleiner Wert von $0,59 \Omega$ gewählt.

Die Spannung an den Messwiderständen, wird mit zwei Vierkanal-Digital-Oszilloskopen mit 1GHz analoger Bandbreite gemessen. Der Stromfluss durch einen Messwiderständen repräsentiert den Teilentladungsstrom $i_{e,x}$ des jeweiligen lokalen Flächenbereiches. Der Gesamt-Entladungsstrom über die Entladungselektrode wird ebenfalls erfasst. Dieser Strom wird auch als zeitliche Referenz benutzt und dazu über einen Leistungsteiler an je einen Kanal beider Oszilloskope angeschlossen. Somit können sechs Teilströme gemessen werden.

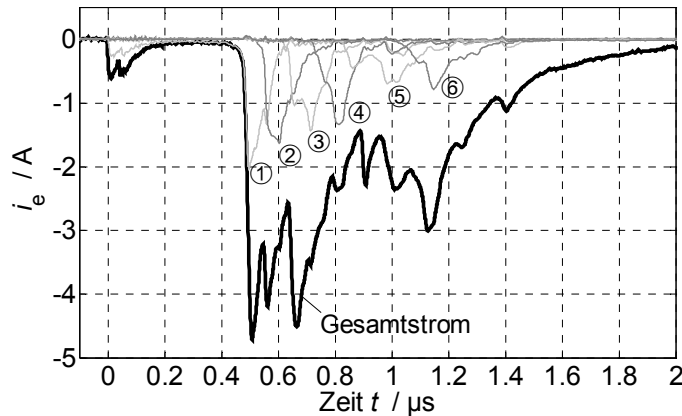


Bild 5.19

Teilströme ① - ⑥ und der Gesamtstrom eines Gleitentladungskanales nach einer Aufladung nur entlang einer Linie

Für ein Beispiel sind in Bild 5.19 diese Teilströme ① - ⑥ und der Gesamtstrom dargestellt. Bild 5.20a zeigt die korrespondierende Flächenladungsdichte-Verteilung nach der Entladung. Die Quadrate in Bild 5.20a bezeichnen die Position der zugehörigen Teilflächen. Der Entladungspunkt befindet sich in der Mitte von Teilfläche ①. Der Hauptkanal sowie einige Abzweigungen sind hervorgehoben.

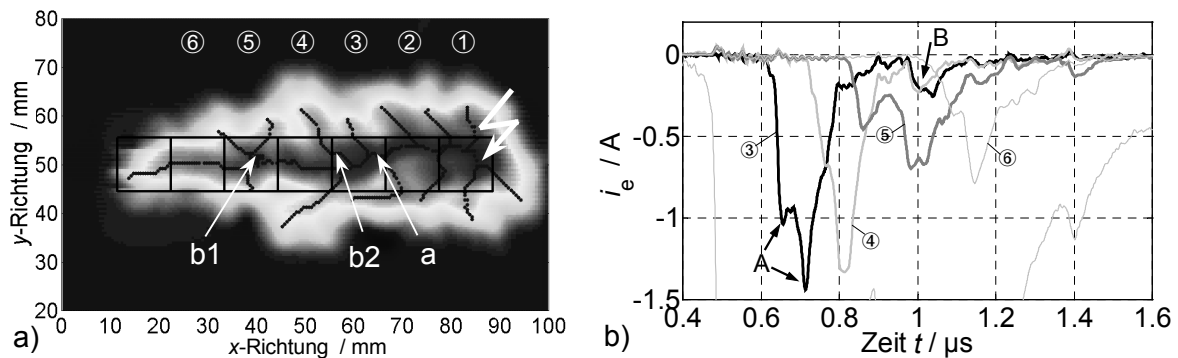


Bild 5.20 Gegenüberstellung der Flächenladungsdichte und der Teilentladungsstrom-Impulse bei einer Gleitentladung entlang einer aufgeladenen Linie

- Flächenladungsdichte-Verteilung, Teilmessflächen sowie Hervorhebungen des Hauptentladungskanals und einiger Abzweigungen
- Teilentladungsströme ③ - ⑥, Ausschnitts-Vergrößerung von Bild 5.19 mit Bezeichnung einiger Zeitpunkte

Stellt man die Flächenladungsdichte-Verteilung in Bild 5.20a und die Teilentladungsströme in Bild 5.20b gegenüber, so kann die Entwicklung des Entladungskanals nachvollzogen werden. Anhand von je einem Beispielen werden die zwei markanten Vorgänge im Folgenden beschrieben.

Der Teilentladungsstrom ③ hat zwei Maxima (bezeichnet mit 'A' in Bild 5.20b). Dies zeigt, dass der Entladungskanal sich an der Position 'a' in zwei Zweige teilt.

Zu einem späteren Zeitpunkt, bei dem der Teilstrom ⑤ ein Maximum ausweist, ist auch ein kleiner Stromimpuls 'B' an Teilfläche ③ und ④ zu erkennen. Daraus ist abzuleiten, dass sich der Kopf des Hauptkanales zu dieser Zeit an der Position 'b1' befindet. Zur gleichen Zeit entsteht aber ein abzweigender Kanal zwischen Teilfläche ③ und ④ an Position 'b2'.

Dieses Messbeispiel zeigt, dass sich der Entladungskanal nicht nur gleichmäßig und radial von dem Entladungspunkt fortbewegt, sondern sich auch teilen kann. Weiterhin können zu einem späteren Zeitpunkt Abzweigungen zwischen Entladungspunkt und Kopf des Hauptentladungskanales entstehen. Diese nachträglichen Abzweigungen sind aber eher kleiner, sodass näherungsweise von einem sich gleichmäßig radial nach außen entwickelnden Systems von Zweigen des Entladungskanales ausgegangen werden kann.

5.4.2 Entladungsentwicklung der Kanäle zueinander

Der Startzeitpunkt der einzelnen Gleitentladungskanäle wird jetzt näher betrachtet. Dazu werden die Teilströme einzelner Gleitentladungs-Kanäle aufgezeichnet. Anhand der zeitlichen Verzögerung des Einsetzens dieser Teilströme kann die Entladungsentwicklung der Gleitentladungs-Kanäle zueinander beurteilt werden. Für diese Untersuchung, ist wie im Kapitel zuvor ein spezieller Messaufbau entwickelt worden, wobei das Prinzip der Stromerfassung dasselbe ist.



Bild 5.21

Messaufbau für die Bestimmung der Entladungsströme der Entladungskanäle zueinander

Die rückseitige Massefläche wird hier nicht entlang einer Linie aufgeteilt, sondern in kreissegmentförmige Sektoren (Bild 5.21). Die Aufteilung wurde so vorgenommen, dass neben dem Zentrum (Teilfläche ①) sechs Sektoren mit je 60 Grad entstehen. Der Entladungspunkt befindet sich in der Mitte von Teilfläche ①. Die

Teilflächen sind elektrisch voneinander isoliert und über einen Messwiderstand mit der Masse verbunden.

Gemessen wird wieder mit zwei Vierkanal-Digital-Oszilloskopen. Der Teilstrom ① wird hier als zeitliche Referenz benutzt und dazu über einen Leistungsteiler an je einen Kanal beider Oszilloskope angeschlossen. Somit können sechs weitere Teilströme ② - ⑦ gemessen werden.

Damit in jedem Sektor ein Entladungskanal entsteht, müssen die Gleitentladungs-kanäle für diese Messung gelenkt werden. Nachdem die gesamte Folie mit einer geringeren Flächenladungsdichte $120 \dots 180 \text{ nC/cm}^2$ aufgeladen wurde, wird wie in Kapitel 5.3.1 schon beschrieben, eine Maskenplatte zur weiteren teilweisen Aufladung verwendet, die im Bild 5.22b zu sehen. Entlang der Schlitze kann eine zusätzliche Aufladung auf ca. 260 nC/cm^2 erfolgen. Die Flächenladungsdichte-Verteilung vor der Entladung sieht beispielsweise wie in Bild 5.22a dargestellt aus. Die Gleitentladungs-Kanäle werden sich dann entlang dieser erhöht aufgeladenen Linien ausbreiten. Bild 5.23d zeigt beispielhaft die Flächenladungsdichte-Verteilung nach einer Entladung. Die sechs vorgegebenen Richtungen sind noch recht gut zu erkennen.

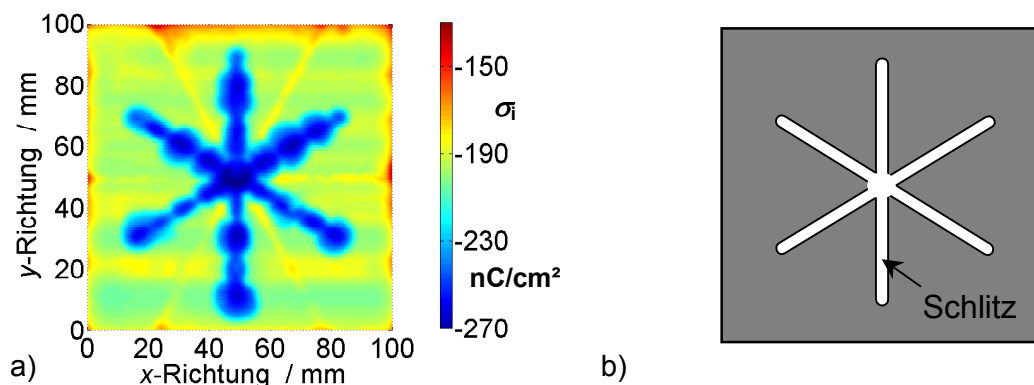


Bild 5.22 Spezielle Ladungsverteilung zur Führung der Gleitentladungs-Kanäle

- a) Ladungsverteilung vor der Entladung, hohe Aufladung entlang von Linien die sternförmig von der Mitte weg über den Teilflächen angeordnet sind
- b) Maskenplatte, welche die Ladungsverteilung links ermöglicht

Für zwei Beispielmessungen sind in Bild 5.23a und b die Teilströme ① - ⑦ dargestellt und der Gesamtstrom angedeutet. Die unterschiedlichen Startzeiten der einzelnen Entladungskanäle sind deutlich zu erkennen. Vergleicht man beide Messungen bezüglich dieser Startzeiten $\Delta t_{\text{Start,min}}$ miteinander, so ist zu sehen,

dass bei Messung B die Differenz der Startzeiten Δt_{Start} recht groß ist mit ca. 500 ns, hingegen bei Messung A mit ca. 70 ns sehr viel kleiner.

Dies spiegelt sich dann auch im Gesamtstrom wieder (Bild 5.23c). Ist die Differenz der Startzeiten Δt_{Start} der Entladungskanäle klein, so entsteht ein Gesamt-Entladungsstrom mit steiler glatter Anstiegsflanke (Messung A). Im anderen Fall (Messung B) entsteht dagegen ein Gesamtstrom dessen Anstieg flacher und gestufter ist (vergleiche auch Kapitel 5.1.3). Bei realen Messungen sind die Gesamtströme allgemein etwas gleichmäßiger, weil dann keine Einschränkungen bezüglich der Richtung und Anzahl der Entladungskanäle vorliegen, wie bei diesen Beispielen. Bei 10 verschiedenen Messungen variierte die Differenz der Startzeiten Δt_{Start} im Bereich von 70 ns bis ca. 800 ns. Die maximale Stromsteilheit wurde mit ca. 125 A/ μ s ermittelt.

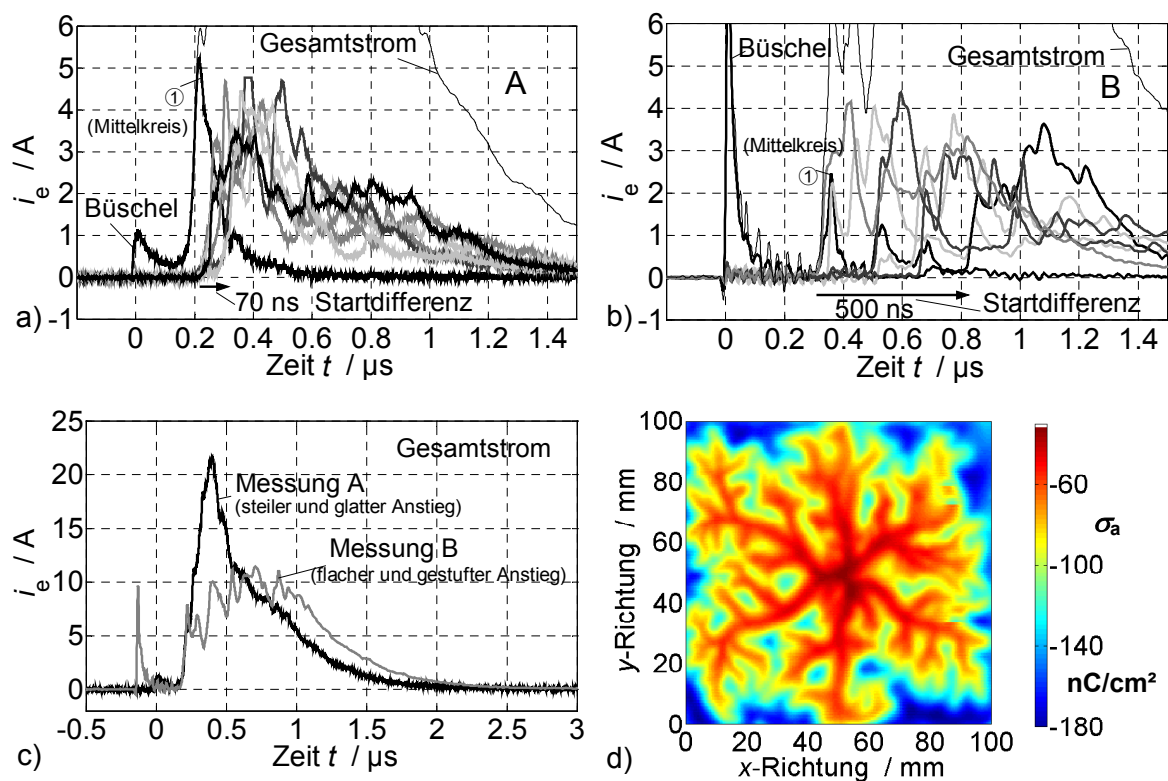


Bild 5.23 Unterschiedliche Startzeit der einzelnen Gleitentladungs-Kanäle

- Messung A der Teilströme ① - ⑦ Startdifferenz klein (70 ns)
- Messung B der Teilströme ① - ⑦ Startdifferenz groß (500 ns)
- Gegenüberstellung der Gesamtströme von Messung A und B, wobei B zeitlich verschoben ist, dass beide zur selben Zeit starten
- Beispielhaft die Flächenladungs-Verteilung σ_a von Messung B nach der Entladung

Zusammenfassend zeigt die Untersuchung der zeitlichen Entwicklung der einzelnen Gleitentladungs-Kanäle zueinander, dass diese zu verschiedenen Zeitpunkten starten. Die Startdifferenz kann einige 10 ns bis einige 100 ns groß sein und somit die Steilheit des Gesamtentladestrom-Impulses stark beeinflussen.

5.5 Kenngrößen der Gleitentladung

Auch für die Modellierung der Gleitentladung ist die Beschreibung wichtiger Größen in Abhängigkeit von den Ausgangsbedingungen nötig. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Form des Entladungsstrom-Impulses, wie auch das Entladungsbild und damit die einzelnen Entladungskanäle trotz gleicher Ausgangsbedingungen, statistischen Variationen unterworfen ist. Die für die Modellbildung nötigen Größen, wie die entladene Ladungsmenge Q_e oder der Radius der entladenen Kreisfläche r_e , können trotzdem abgeschätzt werden, wie hier beschrieben wird.

5.5.1 Mittlere entladene Flächenladungsdichte

Das Entladungsbild und damit die einzelnen Entladungskanäle sind statistische Größen, sodass für die Beschreibung nur eine mittlere entladene Flächenladungsdichte herangezogen werden kann. Da die Gleitentladung sich kreisförmig vom Entladungspunkt weg ausbreitet, ist eine Beschreibung der mittleren entladenen Flächenladungsdichte innerhalb von Kreisringen um den Entladungspunkt eine mögliche Lösung.

Durch Bildung der Differenz aus der Flächenladungsdichte vor und nach der Entladung wird die entladene Flächenladungsdichte σ_e gebildet (Bild 5.24a). Für jeden Kreisringradius wird mit σ_e die mittlere Flächenladungsdichte $\sigma_{e,m}$ berechnet. Für die Messungen ① bis ④ ist die mittlere entladene Flächenladungsdichte $\sigma_{e,m}$ in Bild 5.24b als Funktion des Kreisringradius aufgetragen. Die Schrittweite des Radius beträgt dabei 2,5 mm.

Der Entladungspunkt in den Kurven der mittleren entladenen Flächenladungsdichte in Bild 5.24b ist links. Bis zu einem Radius von ca. 70 mm sind die Werte der Messungen ① bis ④, die mit gleichen Ausgangsbedingungen durchgeführt wurden, nahezu konstant. Im weiteren Verlauf am Ende der Entladungskanäle

treten leichte Abweichungen auf. Trotzdem kann festgehalten werden, dass bei gleichen Ausgangsbedingungen näherungsweise gleiche Kurven der mittleren entladenen Flächenladungsdichte $\sigma_{e,m}$ entstehen.

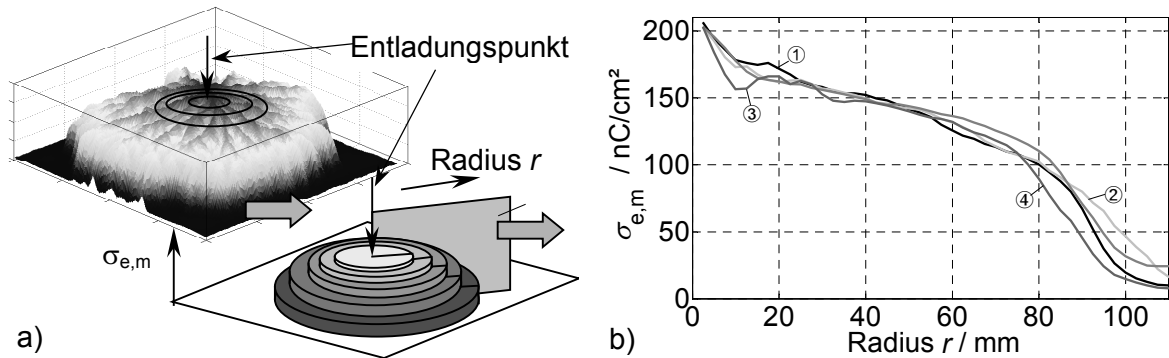


Bild 5.24 Mittlere entladene Flächenladungsdichte $\sigma_{e,m}$

- a) Herleitung von $\sigma_{e,m}$ aus einer Messung
 b) Werte von $\sigma_{e,m}$ in einem Kreisring um den Entladungspunkt als Funktion des Radius der Kreisringe für die Messungen ① bis ④

In Kapitel 5.3 wurde bereits die maximale Flächenladungsdichte σ_e entlang eines einzelnen Kanales betrachtet. Die dort ermittelten Kurven zeigten einen ähnlichen Verlauf, wie die Kurven für $\sigma_{e,m}$ in Bild 5.24b.

5.5.2 Approximation der mittleren entladenen Flächenladungsdichte $\sigma_{e,m}$

Für die Modellierung der Gleitentladung sind die Kenngrößen in Abhängigkeit von den Ausgangsbedingungen nötig. Da bei der Gleitentladung nur das prinzipielle Verhalten anhand des Materials PVC betrachtet wird, gibt es hier nur einen Parameter σ_i , die *Aufladung vor der Entladung*, der zu untersuchen ist.

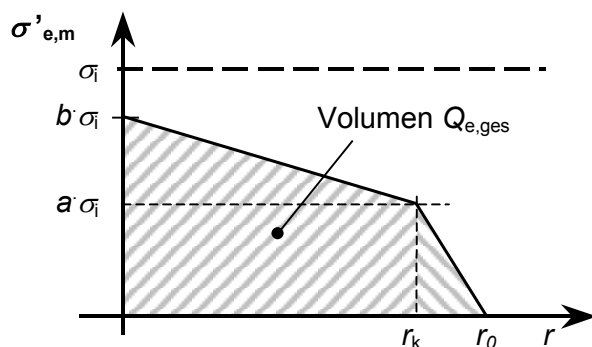


Bild 5.25

Approximation der mittleren entladenen Flächenladungsdichte $\sigma_{e,m}$ einer Gleitentladung stückweise durch Geraden $\sigma'_{e,m}$, vom Zentrum $r = 0$ bis r_k eine Gerade und von r_k bis r_0 eine zweite Gerade

Die mittlere entladene Flächenladungsdichte einer Gleitentladung, so wie sie in Kapitel 5.5.1, vorgestellt wurde, kann anhand der Skizze im Bild 5.25 approximiert werden. Als Parameter treten dabei der *Radius* r_k auf, bei dem der Knickpunkt der beiden Approximationsgeraden liegt sowie der *Radius* r_0 bei dem die entladene Flächenladungsdichte Null wird. Weiterhin kommen die Faktoren a und b hinzu, die mit σ_i multipliziert den maximalen Wert und den Wert bei r_k der entladenen Flächenladungsdichte angeben. Diese Parameter werden in Abhängigkeit von der Flächenladungsdichte vor der Entladung σ_i approximiert, wobei sich für die Radien r_k und r_0 die Gleichungen (5.2) und (5.3) ermitteln lassen. Bemerkenswert ist, dass die Faktoren a und b näherungsweise unabhängig von σ_i sind. Die sich ergebenden Werte sind $a = 0,43$ und $b = 0,81$.

$$r_k = 1,85 \text{ mm} \cdot \left(\sigma_i \middle| \frac{\text{nC}}{\text{cm}^2} \cdot 0,01 \right)^{5,0} \quad (5.2)$$

$$r_0 = 5,4 \text{ mm} \cdot \left(\sigma_i \middle| \frac{\text{nC}}{\text{cm}^2} \cdot 0,01 \right)^{4,0} \quad (5.3)$$

Die Gleichungen und Faktoren gelten im untersuchten Bereich vom Beginn der Gleitentladung bei 160 nC/cm^2 bis zu 250 nC/cm^2 und für das Material PVC mit einer Dicke von $0,18 \text{ mm}$. Bei einem Messaufbau mit größeren geometrischen Abmessungen können die Messungen für größere Aufladungswerte fortgesetzt werden, bis die maximale Aufladung der Folie erreicht ist, die durch die Durchbruch-Feldstärke des Folienmaterials begrenzt wird.

5.5.3 Mittlerer Radius der entladenen Fläche

Ein sich unmittelbar aus der approximierten mittleren entladenen Flächenladungsdichte $\sigma'_{e,m}$ ableitender Wert, ist der *mittlere Radius der entladenen Fläche* r_e . Dieser Wert korrespondiert mit dem Wert der mittleren Länge der einzelnen Gleitentladungs-Kanäle. Dazu wird definiert, dass der Radius r_e , bei dem die mittlere entladene Flächenladungsdichte $\sigma_{e,m}$ den Knick aufweist, als Radius der entladenen Fläche angesehen $r_e = r_k$ wird.

Bild 5.26 zeigt den mittleren Radius r_e der entladenen Fläche für einige Messungen in Abhängigkeit von der Flächenladungsdichte σ_i (Kreuze) sowie den mit Gleichung (5.2) approximierten Wert (durchgezogene Linie). Die Approximation zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten. Im Bereich nahe des Beginns von Gleitentladungen ist zu beachten, dass die Gleitentladung nur

einzelne Kanäle in vereinzelte Richtungen bildet und noch keine komplette Kreisfläche entlädt.

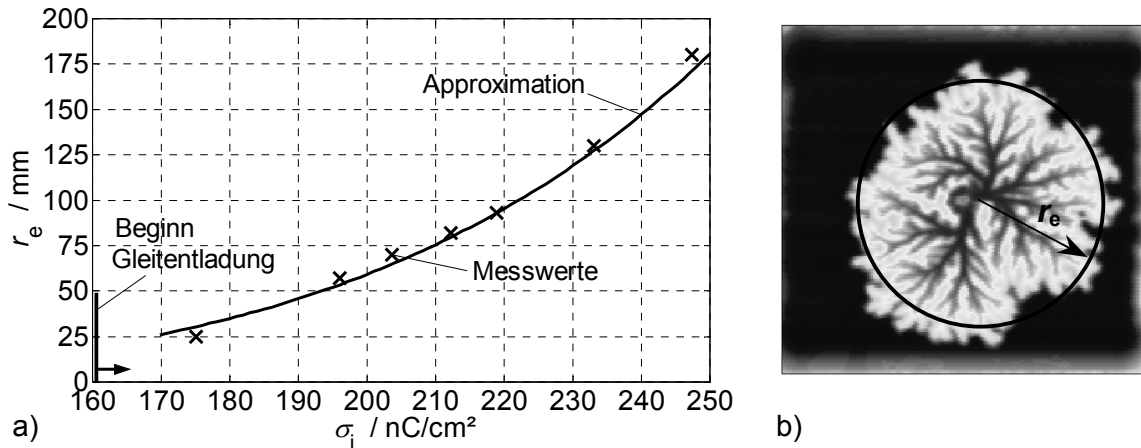


Bild 5.26 Mittlerer Radius der entladenen Fläche $r_e = r_k$

- a) für Messung und Approximation in Abhängigkeit von der Ausgangsflächenladungsdichte σ_i
 b) eingezeichnet in Flächenladungsdichte-Verteilung σ_a

5.5.4 Gesamte entladene Ladungsmenge

Ebenfalls mit Hilfe von $\sigma'_{e,m}$ kann die gesamte entladene Ladungsmenge $Q_{e,\sigma}$ abgeschätzt werden. Dazu ist das Volumen des Körpers zu berechnen, welcher durch Rotation der schraffierten Fläche (Bild 5.25) um die σ -Achse entsteht.

$$Q_{e,\sigma} = 0,556 \cdot \pi |\sigma_i| \cdot r_k^2 + 0,43 \cdot \pi |\sigma_i| \cdot (0,71 r_k + 0,29 r_0) \cdot (r_0 - r_k) \quad (5.4)$$

Die entladene Ladungsmenge kann auch aus dem Entladungsstrom berechnet werden, was zu $Q_{e,i}$ führt. Approximiert man diese Werte in Abhängigkeit von σ_i , so ergibt sich Gleichung (5.5).

$$Q_{e,i} = 0,03 \mu\text{As} \cdot \left(|\sigma_i| / \frac{\text{nC}}{\text{cm}^2} \cdot 0,01 \right)^{9,24} \quad (5.5)$$

Zum Vergleich sind in Bild 5.27 die aus der Messung, aus $\sigma'_{e,m}$ und aus dem Strom ermittelten entladenen Ladungsmengen $Q_{e,\text{mess}}$, $Q_{e,\sigma}$ und $Q_{e,i}$ dargestellt. Beide approximierten Ladungsmengen sind eine gute Abschätzung für die gemessenen Werte.

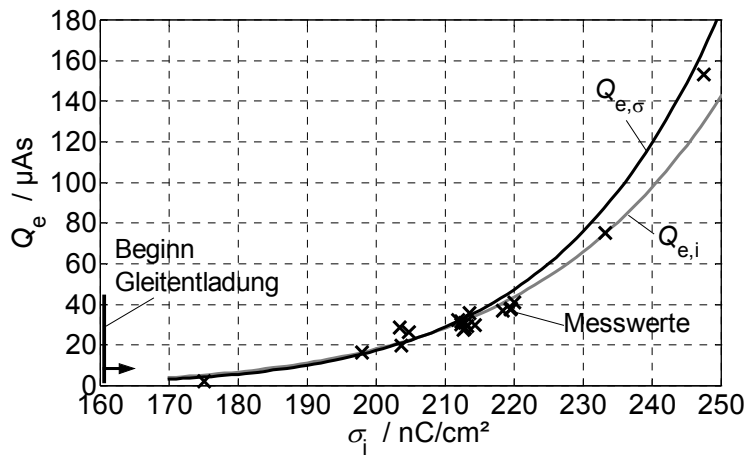


Bild 5.27

Vergleich der Ladungsmengen $Q_{e,mess}$, $Q_{e,\sigma}$ und $Q_{e,i}$, welche direkt aus der Messung abgeleitet oder nach Gleichung 5.4 bzw. 5.5 berechnet wurden

5.6 Modell

Mit Hilfe der bisher beschriebenen Voruntersuchungen kann ein Modell zur Beschreibung von Gleitentladungen abgeleitet werden. Wie Kapitel 5.1.3 schon gezeigt hat, kann die Form des Gleitentladungsstrom-Impulses trotz gleicher Ausgangsbedingungen statistisch in einem gewissen Bereich variieren. Der *Pfad des Entladungskanals* sowie die *Startzeiten der einzelnen Kanäle* sind statistisch auftretende Größen, weshalb es sehr schwierig ist, die Gleitentladung mit all ihren Einzelkanälen zu simulieren bzw. zu beschreiben. Eine Vereinfachung dieser komplexen Struktur ist nötig.

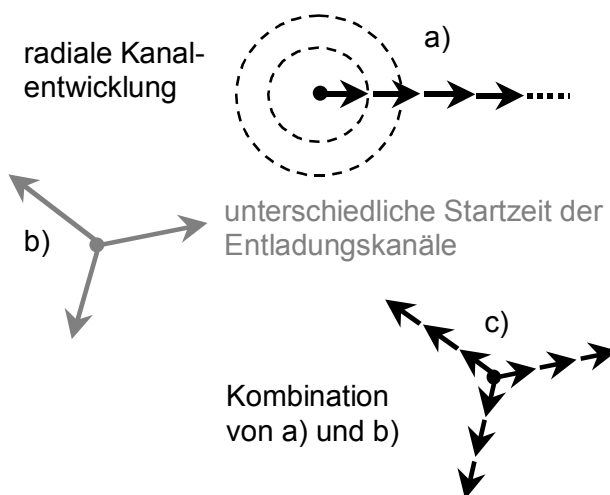


Bild 5.28

Möglichkeiten der Modellentwicklung

Die erste Möglichkeit besteht darin, die unterschiedliche Startzeit der einzelnen Entladungskanäle zu vernachlässigen und nur die radiale Kanalentwicklung zu betrachten (Bild 5.28a). Dazu wird die im Kapitel 5.5.1 beschriebene *mittlere ent-*

ladene Flächenladungsdichte in einem Kreisring um den Entladungspunkt herum benutzt. Die zweite Möglichkeit betrachtet nur die unterschiedlichen Startzeiten der einzelnen Kanäle (Bild 5.28b) und vernachlässigt dafür die radiale Kanalentwicklung. Hier wird für einen einzelnen Kanal ein typischer Stromverlauf herangezogen. Zum Schluss können beide Fälle kombiniert werden (Bild 5.28c).

5.6.1 Radiale Kanalentwicklung

Dieses Modell betrachtet die vom Entladungspunkt ausgehende kreisförmig nach außen verlaufende Kanalentwicklung, wobei die unterschiedlichen Startzeiten der einzelnen Kanäle vernachlässigt werden. Dies wird realisiert, indem die *mittlere entladene Flächenladungsdichte* $\sigma_{e,m}$ in einem Kreisring (Kapitel 5.5.1) um den Entladungspunkt herum benutzt wird, was zu einer deutlichen Vereinfachung der komplexen Struktur der Gleitentladung führt.

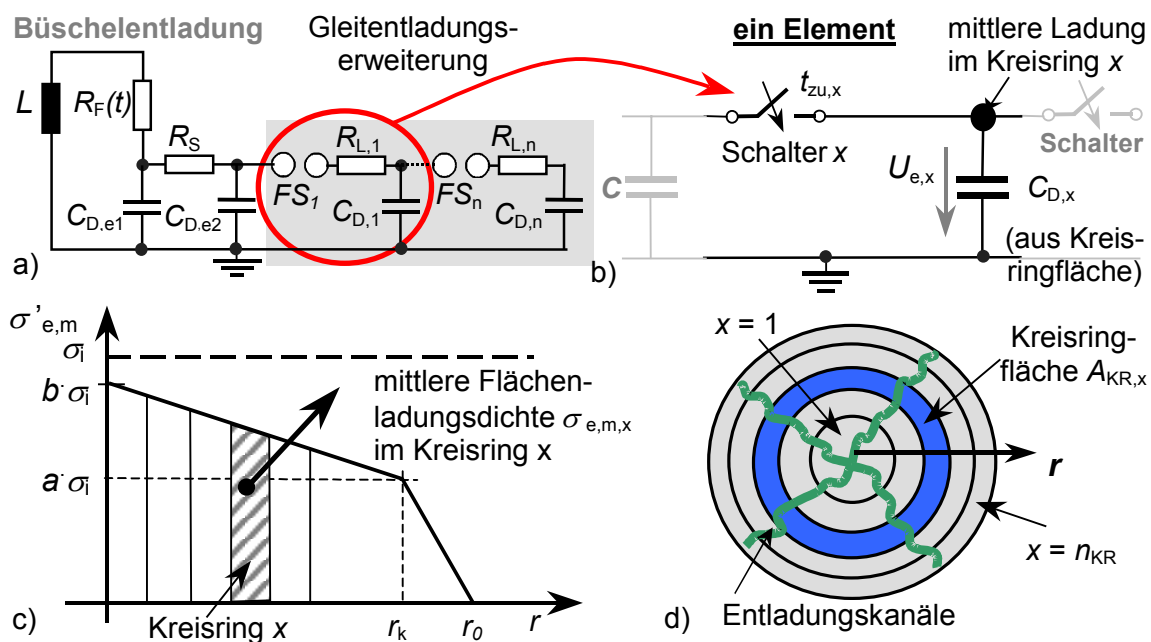


Bild 5.29 Modellerweiterung für die Gleitentladung für die radiale Kanalentwicklung

- a) erweitertes Ersatzschaltbild
- b) ein Element
- c) mittlere entladene Flächenladungsdichte
- d) Kreisringfläche

Das für Buschelentladungen in Kapitel 4 entwickelte Modell wird für die Beschreibung der Gleitentladung durch einen Teil erweitert. In Bild 5.29a ist dieses Ersatzschaltbild dargestellt, wobei der grau hinterlegte Bereich die Erweiterung für die

Gleitentladung zeigt. Die radiale Entwicklung der Gleitentladung wird repräsentiert durch ein nacheinander folgendes *Zuschalten* weiterer Teilelemente. Ein Einzel-Element stellt dabei einen Kreisring dar, wobei ein Element aus einer Funkenstrecke FS_x , einem Längswiderstand $R_{L,x}$ und einer Kapazität $C_{L,x}$ besteht. Die gewählte Schrittweite des Kreisringradius und der mittlere Radius der entladenen Fläche r_e definieren die nötige Anzahl n_{KR} an Elementen für die Simulation.

Der Schalter im Bild 5.29b, welcher die Funkenstrecke und den Längswiderstand realisiert, ist kein idealer Schalter, sondern repräsentiert ein PSpice-Element. Dieses Element hat einen Widerstand im offenen und geschlossenen Zustand und kann mit einer Übergangszeit zu einem steuerbaren Zeitpunkt geschlossen werden und stellt damit einen zeitveränderlichen Widerstand dar. Für dieses Modell werden die Parameter so gewählt, dass der Widerstandswert von $1\text{ G}\Omega$ bei offenem Schalter, während einer Übergangszeit von $t_{\bar{u}} = 900\text{ ns}$ den Widerstandswert von $1\ \Omega$ annimmt, was dem ausgebildeten Funkenkanal entspricht. Der Parameter Zuschaltzeit $t_{zu,x}$ richtet sich jetzt nach der jeweiligen radialen Entwicklung der Gleitentladung und wird nachfolgend diskutiert.

Die Kapazität $C_{D,x}$ des jeweiligen Elementes kann wie folgt berechnet werden,

$$C_{D,x} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \cdot \frac{A_{KR,x}}{h} \quad (5.6)$$

wobei h die Foliendicke und $A_{KR,x}$ die Fläche des Kreisringes (Bild 5.29d) darstellen. Die Ausgangsspannung $U_{e,x}$ an der Kapazität wird berechnet aus der mittleren entladenen Flächenladungsdichte $\sigma_{e,m}$ des jeweiligen Kreisringes und repräsentiert die Startladung der Kapazität.

$$U_{e,x} = \frac{\sigma_{e,m,x} \cdot A_{KR,x}}{C_{D,x}} = \frac{\sigma_{e,m,x} \cdot h}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \quad (5.7)$$

Zuvor wird jedoch anhand von zwei Beispielmessungen mit unterschiedlicher Form des Entladungsstrom-Impulses die Verwendbarkeit des Modells gezeigt. Hierzu wurden die Messung ① mit einer steileren und Messung ③ mit einer flacheren Anstiegsflanke benutzt (Messungen aus Bild 5.3). Für die Simulation wurden 9 Teilelemente gewählt. Dies entspricht einer Schrittweite des Radius der Kreisringe von 10 mm. Der Vergleich der gerechneten und der gemessenen Entladungsstrom-Verläufe ist in Bild 5.30 zu sehen. Die Simulation zeigt eine gute

Übereinstimmung. Die unterschiedliche Impulsform der zwei Beispiele wurde hauptsächlich durch die Variation der Zuschaltzeiten $t_{zu,x}$ erreicht.

Die diskutierten Ergebnisse zeigen, dass die Form des Entladungsstrom-Impulses trotz gleicher Ausgangsbedingungen von der statistisch verteilten *radialen Entwicklung der Entladungskanäle* beeinflusst wird. Die Beschreibung einer speziellen Entladung im voraus ist deshalb nicht möglich. Ziel dieser Arbeit ist jedoch eine Sicherheitsbetrachtung bezüglich der umgesetzten Energie, weshalb eine worst case Betrachtung nötig ist. Dafür ist der Entladungsstrom-Impuls mit dem steilsten Anstieg und mit der größten umgesetzten Energie zu bestimmen. Dies wird erreicht, wenn sich die einzelnen Entladungskanäle *kontinuierlich* und mit *maximaler Geschwindigkeit* ausbreiten. Alle Kanäle starten gleichzeitig, weil die variierenden Startzeiten bei diesem Modell von vornherein vernachlässigt wurden.

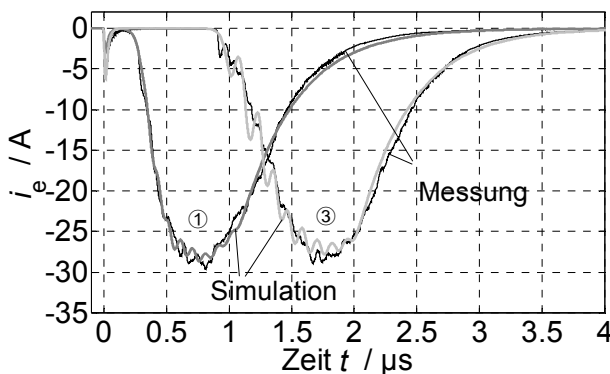


Bild 5.30

Vergleich der simulierten und gemessenen Entladungsstrom-Verläufe anhand von zwei Beispielmessungen, bei denen die Zuschaltzeiten der 9 Elemente so gewählt wurde, dass der Entladungsstrom-Impuls optimal wiedergegeben wird

In der Literatur werden für die Streamer-Entwicklungsgeschwindigkeit bei Beyer [Beyer, 1986] *einige* 10 cm/ μ s und bei Hilgarth [Hilgarth, 1992] 10 bis 100 cm/ μ s angegeben. Für die angenommene maximale Geschwindigkeit von 1 mm/ns ergibt sich für die Differenz der Zuschaltzeit $\Delta t_{zu,min} = 10$ ns für eine Kreisringradius-Schrittweite von 10 mm.

Für die gleiche Schrittweite ergaben sich bei der Simulation für die spezielle Nachbildung von durchgeführten Messungen typische Werte $\Delta t_{zu,typ}$ von 20 bis 120 ns. Dies stimmt gut mit den aus der Literatur entnommenen Werten überein.

5.6.2 Unterschiedliche Startzeiten der einzelnen Kanäle

Der Schwerpunkt bei der Modellierung wird jetzt auf die unterschiedlichen Startzeiten der Entladungskanäle gelegt. Dafür wird die radiale Kanalentwicklung ver-

nachlässigt. Mit dieser Annahme ist wiederum eine Vereinfachung der komplexen Struktur der Gleitentladung möglich, indem für einen *einzelnen Kanal ein typischer Stromverlauf* $i_t(t)$ herangezogen wird.

Dabei wird vorausgesetzt, dass alle beteiligten Entladungskanäle sich im Mittel gleich weit ausbreiten und somit im Mittel den gleichen Stromverlauf liefern. Der typische Stromverlauf wird durch Messungen, wie sie in Kapitel 5.4.2 vorgestellt wurden, gewonnen. Dazu wird der Mittelwert der Entladungsströme von möglichst vielen einzelnen Kanälen bestimmt. Dieser gemittelte Entladungsstrom für einen Kanal ist, auf den Spitzenwert normiert, in Bild 5.31 dargestellt. Die Approximation mit einem doppelt exponentiellen Impuls ist ebenfalls im Bild zu sehen.

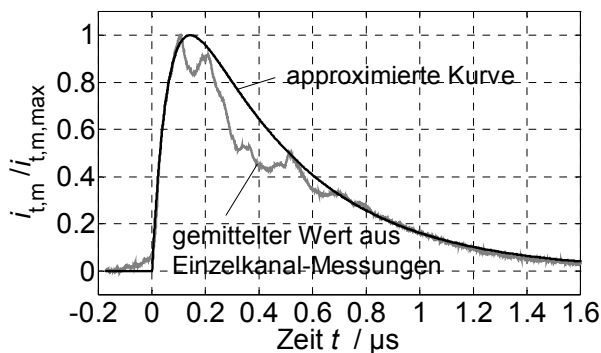


Bild 5.31

Auf das Maximum normierter gemittelter Stromverlauf von vielen Stromverläufen einzelner Kanäle und der daraus approximierte typische Stromverlauf

Dieser normierte Entladungsstrom-Impuls wird als ein typischer Stromverlauf für einen Entladungskanal angesehen. Bei Betrachtung von weiteren Ausgangsparametern sind an dieser Stelle Parameterstudien zur Beschreibung des typischen Stromverlaufes nötig.

Bezieht man sich auf Gleichung (4.4) und (4.5), so sind damit die Parameter t_1 und t_2 des typischen Teilstromes festgelegt. Für dieses Beispiel sind $t_1 = 63 \text{ ns}$ und $t_2 = 434 \text{ ns}$. Mit den in Kapitel 5.5.4 beschriebenen Beziehungen für Q_e und der Vorgabe der Anzahl der Teilentladungskanäle n_{Kanal} kann die entladene Teilladungsmenge für einen Kanal $Q_{e,t}$ bestimmt werden.

$$Q_{e,t} = Q_e / n_{\text{Kanal}} \quad (5.8)$$

Aus Gleichung 4.6 ist zu erkennen, dass die entladene Ladungsmenge zu dem Spitzenwert des Entladungsstromes i_0 proportional ist. Mit dieser Beziehung lässt sich aus der entladenen Teilladungsmenge für einen Kanal $Q_{e,t}$ der Spitzenwert $i_{0,t}$ des typischen Teilstromverlauf i_t ermitteln. Somit wird die entladene Ladungsmenge des entstehenden Gesamtentladungsstromes richtig wiedergegeben.

Nach dem der typische Entladungsstrom eines Kanales bekannt ist, kann dieser für die vorgegebene Anzahl Entladungskanäle mit beliebig gewählter Verzögerungszeit summiert werden. Ein Beispiel dazu ist in Bild 5.32a zu sehen.

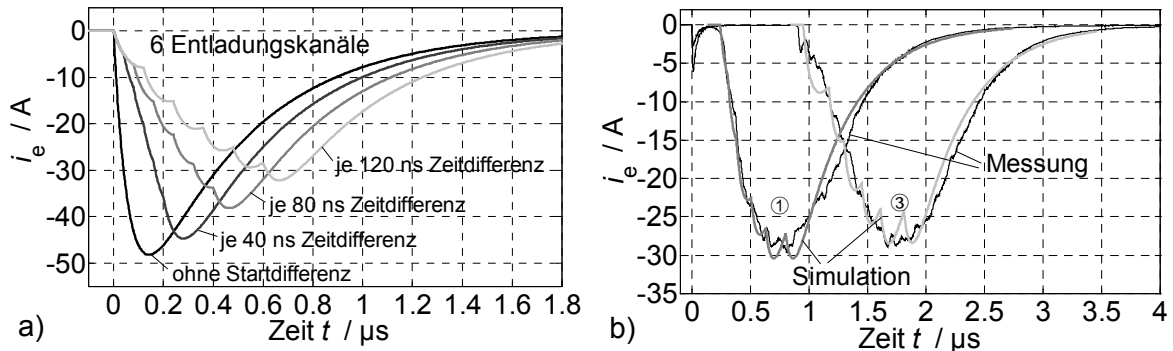


Bild 5.32 Gesamt-Entladungsstrom nach dem Modell, welches die unterschiedlichen Startzeiten betrachtet

- Darstellung des Einflusses von unterschiedlichen Startzeiten auf die Form des Stromimpulses
- Vergleich von Messung ① und ③ mit der Nachbildung dieser Messungen durch spezielle Variation der Startzeiten

Die Startzeiten der 6 Einzelkanäle wurden gleichmäßig verteilt, sodass für die gewählten Beispiele die Differenz zwischen den Startzeiten der Einzelkanäle 0 ns, 40 ns, 80 ns oder 120 ns beträgt. Die Tendenz, der sich daraus ergebenden Gesamtentladungströme, ist gut zu erkennen. Liegen die Startzeiten weit auseinander so wird die Anstiegsflanke des Gesamtstrom-Impulses flacher und der Spitzenwert kleiner. Durch spezielle Variation der Startzeiten wurden für die schon verwendeten Messbeispiele ① und ③ die Entladungsstrom-Impulse möglichst genau nachgebildet. Auch hier kann eine gute Übereinstimmung erzielt werden.

Die gerade analytisch durchgeführte Beschreibung kann, wie in Kapitel 5.6.1 in Form eines physikalischen Modells angegeben werden, welches in Bild 5.33 zusehen ist. Der grau hinterlegte Bereich repräsentiert die Gleitentladungserweiterung. Ein Element, bestehend aus Funkenstrecke FS_y , Längswiderstand $R_{L,y}$ und Kapazität $C_{D,y}$, stellt einen Entladungskanal dar, wobei hier alle Elemente parallelgeschaltet und gleich sind.

Die Kapazität $C_{D,y}$ einer Teilfläche kann über die gesamte entladene Fläche $A_{e,ges}$ und die Anzahl der angenommenen Entladungskanäle n_{kanal} bestimmt werden,

$$C_{D,y} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \cdot \frac{A_{e,ges} / n_{kanal}}{h} \quad (5.9)$$

wobei h die Foliendicke darstellt. Die Ausgangsspannung $U_{e,y}$ an der Kapazität wird aus der entladenen Teilladungsmenge $Q_{e,t}$ eines Kreissektors und der Kapazität $C_{D,y}$ berechnet.

$$U_{e,y} = \frac{Q_{e,t}}{C_{D,y}} \quad (5.10)$$

Für die Simulation wird mit dem im vorherigen Kapitel beschriebenen Schalter gearbeitet, wobei die Werte des Längswiderstandes und die Schalter-Übergangszeit $t_{\bar{u}}$ so gewählt werden, dass ein Element den typischen Stromverlauf erzeugt. Durch die Zuschaltzeit $t_{z,y}$ wird der Beginn des jeweiligen Kanales festgelegt.

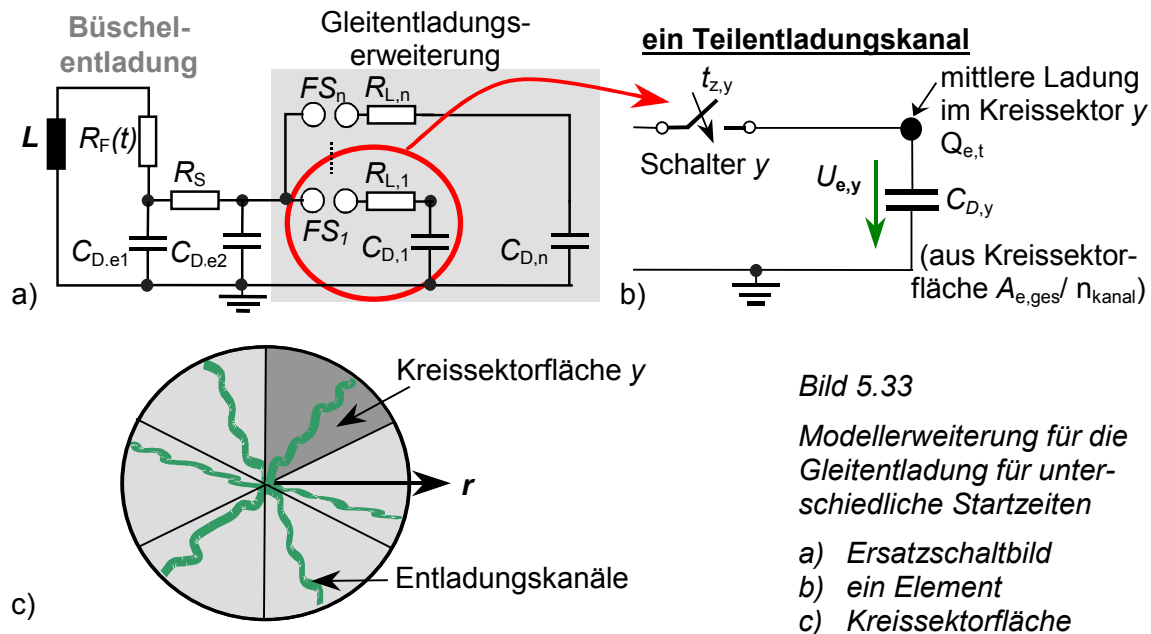


Bild 5.33

Modellerweiterung für die Gleitentladung für unterschiedliche Startzeiten

- a) Ersatzschaltbild
- b) ein Element
- c) Kreissektorfläche

Die Form des Entladungsstrom-Impulses wird von den statistisch verteilten *Startzeiten der einzelnen Kanäle* maßgeblich beeinflusst, weshalb auch hier eine Beschreibung bzw. Vorhersage einer speziellen Gleitentladung nicht möglich ist. Für eine Sicherheitsbetrachtung bezüglich der umgesetzten Energie ist dies nicht nötig. Dafür ist eine worst case Betrachtung sinnvoll. Der steilste Anstieg des Entladungsstromes ergibt sich für die *minimale Differenz der Startzeiten* $\Delta t_{\text{Start}} = 0$. Dieser Wert ist theoretisch möglich.

Für eine praktische Betrachtung kann die minimale Differenz der Startzeiten vom erstem bis zum letzten Teilentladungsstrom-Impuls $\Delta t_{\text{Start,min}}$ durch eine Vielzahl von Messungen ermittelt werden. Bei den während dieser Arbeit durchgeführten Messungen ergab sich eine minimale Differenz der Startzeiten von

$\Delta t_{\text{start,min}} \approx 70 \text{ ns}$ (Kapitel 5.4.2). Bei 6 Entladungskanälen und angenommener Gleichverteilung der Startzeiten startet somit alle 14 ns ein neuer Kanal.

5.6.3 Kombination der zwei Modelle

Die logische Schlussfolgerung der beiden Betrachtungen ist die Kombination der beiden zuvor beschriebenen Modellansätze. Damit ist die Nachbildung *einer speziellen* Gleitentladung genauer möglich, weil beide zuvor getrennt betrachteten Einflüsse, wie die Entwicklung der einzelnen Entladungskanäle und die unterschiedlichen Startzeiten der Kanäle, berücksichtigt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde als Schwerpunkt die Beschreibung bzw. Vorhersage der maximal zu erwartenden umgesetzten Energie definiert. Dies entspricht einer worst case Betrachtung und keiner genauen Nachbildung einer speziellen Gleitentladung.

Die Kombination der Modelle stellt die konsequente Weiterentwicklung dar, wird aber aus folgenden Gründen nicht weiter verfolgt:

- Die Nachbildung einer speziellen Gleitentladung ist im Rahmen dieser Arbeit nicht erforderlich und durch die statistische Variation nicht möglich.
- Die Kombination der Modelle ist durch die unweigerlich komplexer werdende Struktur aufwendiger, bietet aber keinen deutlichen Vorteil.

5.7 Vergleich von Modell und Messung anhand der umgesetzten Energie

Bevor Modell und Messung anhand der umgesetzten Energie verglichen werden können, ist die Energie zu diskutieren. Bei Energie-Betrachtungen bezüglich der Entflammung wird ermittelt, ob die zur Entflammung notwendige Energie *bezogen auf ein Volumen* im Funken erzeugt und an die Umgebung in Form von Wärme abgegeben werden kann [Dietlen, 1976]. Betrachtet man zusätzlich die Gleichungen im Kapitel 2.7, so ist zu erkennen, dass die umgesetzte Energie proportional zum Entladungsabstand d ist.

Bei der Gleitentladung entstehen neben den möglichen Luftkanälen, die die Entladungselektrode mit der Oberfläche verbinden, viele einzelne Entladungs-

kanäle auf der Oberfläche, in denen jeweils Energie umgesetzt wird. Geht man von nur *einem* Luftkanal aus, so fließt durch den Luft-Funkenwiderstand der gesamte Strom aller einzelnen Oberflächen-Kanäle, wodurch in diesem räumlich sehr kleinen Bereich die größte Energiedichte entsteht. Entlang der Kanäle auf der Oberfläche fließt nur jeweils ein Teilstrom, weshalb die umgesetzte Energie dort nicht so groß sein kann. Deshalb wird die umgesetzte Energie im Luft-Funkenwiderstand ermittelt. Wie in Kapitel 5.1.4 gezeigt wurde, ist es für kleine Werte von d/d_p möglich, dass mehrere Kanäle in Luft entstehen. Für diesen Fall ist die umgesetzte Energie pro Luftkanal kleiner. Für eine worst case Betrachtung wird deshalb immer nur *ein* Luftkanal angenommen.

Die zwei Modellansätze, die zum einen auf *der radialen Kanalentwicklung (Modell A)* und zum anderen auf den *unterschiedlichen Startzeiten der Kanäle (Modell B)* beruhen, werden anhand der umgesetzten Energie im Entladungskanal untereinander und mit den Energiewerten, die direkt aus der Messung ermittelt wurden, verglichen. Die Energie wird dabei wie in Kapitel 2.7 beschrieben aus dem Entladungsstrom-Impuls berechnet.

	Messung	Modell A radiale Kanal- entwicklung	Modell B Startzeiten der Kanäle
①	18,44 mWs	18,60 mWs	18,53 mWs
③	16,25 mWs	16,13 mWs	15,91 mWs

Tabelle 5.1:

Energiewerte für die Messungen ① und ③ im Vergleich mit den Werten der speziellen Simulation mit Modell A und B

In Tabelle 5.1 werden als erstes die Werte der umgesetzten Energie für die schon in den vorangegangenen Kapiteln betrachteten Messungen ① und ③ im Vergleich zu den Werten dargestellt, die sich aus den speziellen Beispielsimulationen mit Modell A und B ergeben. Man sieht, dass neben dem Stromimpuls (Bild 5.30 und 5.32b) auch die umgesetzte Energie gut wiedergegeben wird.

Wie schon erwähnt, liegt der Schwerpunkt dieser Arbeit in der Beschreibung bzw. Vorhersage der maximal zu erwartenden umgesetzten Energie. Deshalb wird, für die Simulation der Energiewerte, die in Kapitel 5.6.1 und 5.6.2 angegebene worst case Bedingung benutzt. Dies sind für Modell A die minimale *Differenz der Zuschaltzeiten* der Kreisringe mit $\Delta t_{zu,min} = 10$ ns für eine Kreisringradius-Schrittweite von 10 mm. Für Modell B ist es die minimale *Differenz der Startzeiten*

$\Delta t_{\text{Start}} = 0$. Für die ebenfalls diskutierten praktisch minimal ermittelten Werte ($\Delta t_{\text{zu}} = 20 \text{ ns}$ und $\Delta t_{\text{Start}} = 14 \text{ ns}$) wurden ebenfalls Simulationen durchgeführt.

Die ermittelten Energiewerte für die zwei Modelle, für worst case und für die praktisch minimal ermittelten Bedingungen, sind in Bild 5.34 in Abhängigkeit vom Parameter Flächenladungsdichte σ_i vor der Entladung dargestellt (Linien). Die aus den Messwerten ermittelten Werte sind ebenfalls im Bild zu sehen (Kreuze).

Beim Vergleich zeigt sich, dass mit Modell A etwas höhere Werte als bei Modell B ermittelt werden. Dies kann nachvollzogen werden, weil für Modell A beide Bedingungen, minimale Differenz der Startzeiten der Kanäle (weil von vornherein vernachlässigt) und maximal schnelle radiale Ausbreitung, erfüllt werden. Für Modell B ist die minimale Differenz der Startzeiten erfüllt, die maximal schnelle radiale Ausbreitung hingegen nicht, weil der typische Stromverlauf für einen einzelnen Kanal aus Messungen abgeleitet wurde (vergleiche Kapitel 5.6.2).

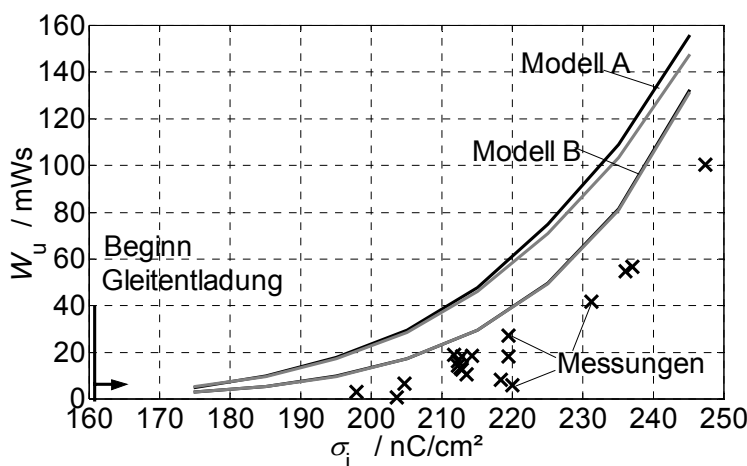


Bild 5.34:

Umgesetzte Energie W_u im Funkenkanal für Modell A und B jeweils für den worst case Fall und den Fall, bei dem mit praktisch minimal ermittelten Werten für Δt_{zu} und Δt_{Start} gerechnet wurde, zusätzlich sind einige Energiewerte, die direkt aus der Messung abgeleitet wurden dargestellt (Kreuze)

Vergleicht man die Energiewerte der Simulation, die mit worst case Bedingungen durchgeführt wurden mit den Werten der Simulation, die mit den praktisch ermittelten Bedingungen erzielt wurden, so ist kaum ein Unterschied zu erkennen. Die dargestellten Energiewerte, die aus den Messwerten ermittelt wurden, liegen alle unterhalb der Kurven für Modell A und B, welche den Maximalwert abschätzen. Die Streuung der Messwerte liegt hauptsächlich an den unterschiedlichen Entladungsabständen d .

Für die Beschreibung der maximal zu erwartenden umgesetzten Energie eignen sich beide Modelle, wobei Modell A, welches die radiale Kanalentwicklung berücksichtigt, den größeren Wert ermittelt und deshalb für Sicherheitsbetrachtungen vorzuziehen ist.

6 Ausblick

Zwischen der aufgeladenen isolierten Oberfläche und geerdeten Objekten in der Nähe können elektrostatische Entladungen (ESD) stattfinden, die zu ungewollter Beeinflussung empfindlicher Elektronik führen und die Gefahr der Entzündung von Gasgemischen darstellen. Abhängig von den Ausgangsgrößen, können Büschel- oder Gleitentladung auftreten. Die Größe der entladenen Fläche beeinflusst die Größe der entladenen Ladungsmenge, die umgesetzte Energie im Entladungskanal und somit das Gefährdungspotential.

Für den Bereich der Büschelentladungen wurden, ausgehend von dem verwendeten Aufbau und den durchgeführten Messungen, die Funktionen zur Beschreibung des Entladungskegels und des Entladungsstrom-Impulses in Abhängigkeit von den Ausgangsparametern approximiert. Mit diesen kann in der Praxis bei der Entwicklung von Geräten schnell und ohne Messung die sich entladende Fläche, die dazugehörige entladene Ladungsmenge und die zu erwartende umgesetzte Energie im Funkenkanal abgeschätzt werden. Durch die Vielzahl der Ausgangsparameter und deren Verknüpfung in der Approximationsformel können sich geringe Abweichungen bei einem Parameter in der Verknüpfung aufschaukeln. Deshalb sind besonders bei sich stark ändernden Abhängigkeiten, wie dem Parameter Dicke, weitere Messungen zur Verbesserung der Beschreibungsgenauigkeit zu empfehlen. Es ist zu überlegen, die Abhängigkeit von der Materialdicke mit weiteren Kombinationen der anderen Ausgangsparameter (z.B. andere Materialien und andere Werte des Oberflächenpotentials) zu überprüfen, um weitere mögliche Abhängigkeiten zu erkennen.

Im Gegensatz zu den Untersuchungen bei Büschelentladungen, wurde bei den Gleitentladungen nur das prinzipielle Verhalten anhand des ausgewählten Materials PVC in Abhängigkeit vom Parameter Flächenladungsdichte untersucht. Für die abgeleiteten Kenngrößen der Gleitentladung, wie der mittleren entladenen Flächenladungsdichte, der mittlere Radius der entladenen Fläche und die gesamte entladene Ladungsmenge, wurden approximierende Funktionen für die Abhängigkeit von der Flächenladungsdichte angegeben. Analog zu den Büschelentladungen können diese Untersuchungen für Gleitentladungen für weitere Parameter, wie z.B. Material, Materialdicke und Entladeabstand fortgesetzt werden, um weitere Zusammenhänge darzustellen.

Für die bisherigen Betrachtungen wurde von einer ebenen und sauberen Anordnung der aufgeladenen Fläche ausgegangen, um grundlegende Zusammenhänge zu erkennen. Daraus können weitere zukünftige Untersuchungen abgeleitet werden, die für beide Entladungsarten gelten. Zum einen ist dies die Betrachtung von weiteren geometrischen Anordnungen z.B. von gekrümmten Flächen. Diese Untersuchung kann z.B. in Abhängigkeit vom Krümmungsradius der aufgeladenen Oberfläche stattfinden, wofür allerdings die Messtechnik, besonders bezüglich der Oberflächenpotential-Bestimmung angepasst werden muß. Damit nähert man sich den in der Praxis auftretenden Geometrien Schritt für Schritt an. Ein weiterer sehr wichtiger Einflussparameter bei der Betrachtung des Gefahrenpotentials von Entladungen durch aufgeladene Oberflächen, stellt in der Praxis die Verschmutzung der Oberflächen dar. Grundlegende Untersuchungen hierzu sind für die Erklärung und das weitere Verständnis von auftretenden Unterschieden zwischen Labormessungen und praxisnahen Untersuchungen von großem Vorteil. Hierzu könnten einige Verschmutzungsgrade definiert werden, anhand deren die Änderung der umgesetzten Energie bzw. des Gefahrenpotentials betrachtet wird.

Eine weitere Möglichkeit der Fortsetzung dieser Arbeit ist die Simulation der Entladung von aufgeladenen Oberflächen mit geeigneten Programmen, z.B. auf Basis der Finiten Elemente. Dabei können die in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse helfen, die Schwierigkeiten bei der Verknüpfung von Entladungen in Luft und auf der Oberfläche zu lösen.

Das Interesse der Industrie an dieser Arbeit, während der gesamten Zeit der Bearbeitung, zeigt den Bedarf an weiteren Untersuchungen auf diesem Gebiet. Dabei ist der Industrie daran gelegen, dass mit möglichst wenig Aufwand die sichere Beurteilung einer Problemstellung möglich ist.

7 Anhang

A Definition von Begriffen

Die für die Entzündung von Gasgemischen wichtigen Begriffe werden im folgenden erläutert:

Entzünden: Einleiten einer Reaktion, die selbstständig durch das ganze Volumen fortschreitet [Dietlen, 1976].

Entflammung: Der Begriff „Zündung“ wird teilweise doppeldeutig verwendet. Zum einen für die Plasmabildung eines "Zünd"-Funkens, zum anderen für die Einleitung einer Verbrennung. Deshalb wurde für letzteres der Begriff Entflammung geprägt.

Zündenergie: Die bestimmende Größe für eine Zündquelle ist die freigesetzte Energie in einem bestimmten Volumen. Um ein Gasgemisch bestimmter Zusammensetzung unter festgelegten Bedingungen zu entzünden, muss die freigesetzte Energie einen Grenzwert überschreiten. Dieser wird als Zündenergie bezeichnet. Die Ermittlung der Zündenergie wird mit Funkenentladungen durchgeführt, wobei die Energiemenge durch die kapazitiv gespeicherte Energie bestimmt wird [Dietlen, 1976] [Berthold1987] [Lüttgens, 1988].

Mindestzündenergie (minimale Zündenergie): Der Energiebetrag, der imstande ist, ein Gas/Luft-Gemisch bei optimaler zündwilligster Konzentration gerade eben zu entflammen, wird als Mindestzündenergie bezeichnet. Dieser Energiebetrag ist eine charakteristische Größe für das Gemisch unter definierten Bedingungen, wie Temperatur, Druck und Feuchte. Die Mindestzündenergie üblicher Kraftstoffe beträgt ca. 0,2 mJ. Werte der Mindestzündenergie von weiteren Gemischen sind in den folgenden Quellen zu finden [Lewis, 1961] [Nabert, 1968] [Steen, 2000].

Äquivalentenergie (äquivalente Zündenergie): Eine Entladung besitzt die Äquivalentenergie, wenn sie eben gerade imstande ist, ein explosionsfähiges Gemisch mit der Mindestzündenergie zu entzünden. Der Wert muss für jede einzelne Zündquellenart gesondert ermittelt werden [Gibson, 1965] [Lüttgens, 1988].

B Berechnung von $E_{S,hom}$

In Bild B.1 ist die Platte-Platte-Anordnung dargestellt, für welche die Feldstärke $E_{S,hom}$ in Luft und die Feldstärke E_{iso} im Isolator hergeleitet wird.

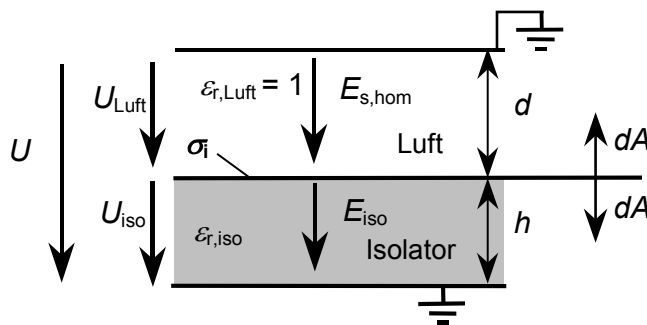


Bild B.1

Bestimmung der Feldstärke $E_{S,hom}$ in Luft und E_{iso} im Isolator einer Platte-Platte Anordnung

Aus der Maxwell'schen Gleichung, welche die Quellen des elektrischen Feldes beschreibt,

$$\oint (\varepsilon \cdot E) dA = Q \quad (B.1)$$

folgt für diese Anordnung mit Berücksichtigung der Pfeilung von dA :

$$\varepsilon_0 \varepsilon_{r,iso} \cdot E_{iso} - \varepsilon_0 \varepsilon_{r,Luft} \cdot E_{S,hom} = \sigma_i \quad (B.2)$$

Aus der Wirbelfreiheit des elektrischen Feldes erhält man für diese Anordnung:

$$U = U_{Luft} + U_{iso} = E_{S,hom} \cdot d + E_{iso} \cdot h \quad (B.3)$$

Löst man Gleichung (B.2) nach E_{iso} auf und setzt sie in Gleichung (B.3) ein, so ergibt sich:

$$U = E_{S,hom} \cdot d + \frac{\sigma_i + \varepsilon_0 \varepsilon_{r,Luft} \cdot E_{S,hom}}{\varepsilon_0 \varepsilon_{r,iso}} \cdot h \quad (B.4)$$

Wird Gleichung (B.4) nach $E_{S,hom}$ aufgelöst und die Spannung U zu Null gesetzt, weil die obere und untere Platte auf Masse liegen (Bild B.1), so erhält man die Ergebnisgleichung.

$$E_{S,hom} = \frac{-\sigma_i \cdot h}{\varepsilon_0 \cdot (\varepsilon_{r,iso} \cdot d + h)} \quad (B.5)$$

In analoger Weise kann auch E_{iso} abgeleitet werden.

C Ermittlung der räumlichen Impulsantwort des Sensors

Die Impulsantwort kann nicht direkt gemessen werden. Stattdessen wird das Verhältnis zwischen einem definiert angelegten Potential auf der Oberfläche und der vom Sensor ermittelten Spannung $U_{s,m}$ bestimmt (Bild C.1).

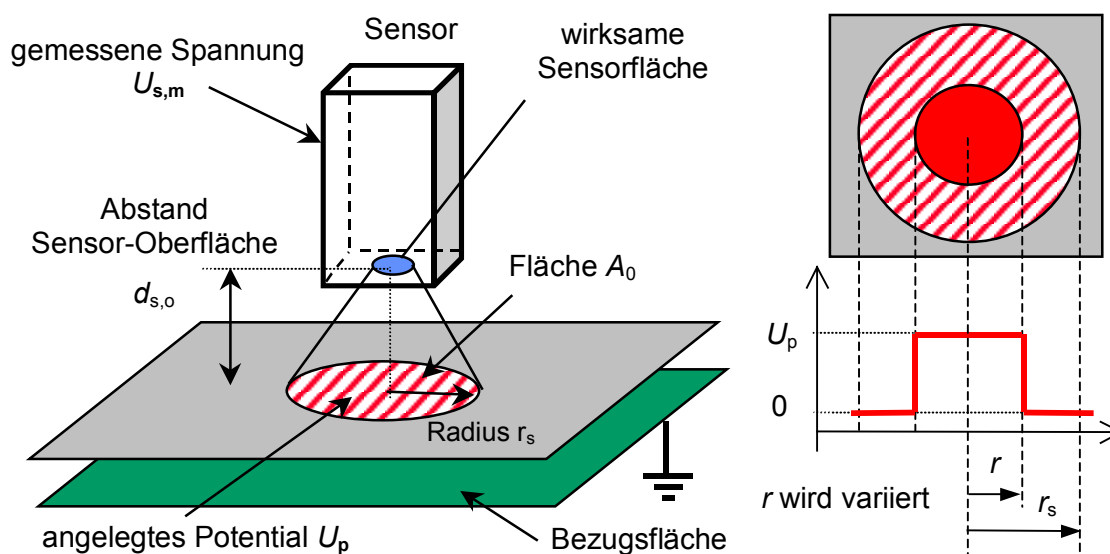


Bild C.1 Ermittlung vom Verhältnis $U_{s,m}/U_p$ in Abhängigkeit vom Radius r

Allgemein kann der Zusammenhang zwischen der gemessenen Spannung $U_{s,m}$ und dem anliegenden Potential U_p mit Gleichung (C.1) beschrieben werden.

$$U_{s,m} = \int_{A_0} \lambda(r) \cdot U_p(r) \cdot dA_0 \quad (\text{C.1})$$

Die Funktion $w(t)$ stellt dabei eine vom Ort abhängige Bewertungsfunktion dar, die physikalisch durch die Feldverhältnisse zwischen Sensor und Oberfläche zustande kommt. Mit der Rotationsymmetrie und der Vorgabe, die angelegte Spannung U_p sei konstant, ergibt sich Gleichung (C.2). Zusätzlich wird die gemessene Spannung $U_{s,m}$ auf das anliegende Potential U_p normiert.

$$\frac{U_{s,m}}{U_p} = 2\pi \int_{A_0} \lambda(r) \cdot dr \quad (\text{C.2})$$

Die abgeleitete Funktion $\lambda(r)$ stellt die räumliche Impulsantwort des Sensors dar und kann mit Gleichung (C.2) bestimmt werden, wenn $U_{s,m}$ und U_p bekannt sind. Im folgenden sind die benutzten Variablen aufgelistet.

A_0	Fläche über die der Sensor mittelt
r_0	Radius der Fläche A_0
r	Radius des auf Potential liegenden Bereiches
$U_p(r)$	Potential auf der Oberfläche
$U_{s,m}(r)$	gemessenes Potential der Oberfläche
$d_{s,o}$	Abstand Sensor-Oberfläche (bei allen Betrachtungen 2 mm)
$\lambda(r)$	räumliche Impulsantwort des Sensors

Das Verhältnis von $U_{s,m}/U_p$ wurde messtechnisch bestimmt. Dazu wurden Kreisinge mit variierendem Radius an 500 V gelegt und die Sensor-Spannung ermittelt (Bild C.1). Das Verhältnis $U_{s,m}/U_p$ ist in Bild C.2 in Abhängigkeit von Radius r des auf Potential liegenden Bereiches dargestellt.

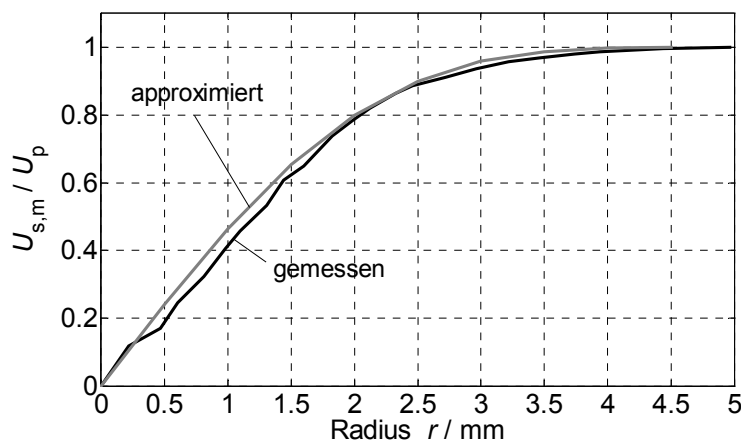


Bild C.2

Ermitteltes Verhältnis von $U_{s,m}/U_p$ in Abhängigkeit vom Radius r des auf Potential liegenden Bereiches

Eine Approximation dieser Messwerte beschreibt nach Gleichung (C.2) das Integral der eigentlich gesuchten Funktion, der räumlichen Impulsantwort $\lambda(r)$. Zur Vereinfachung wurde für $\lambda(r)$ eine Ansatzfunktion gewählt, die integriert und dann mit dem Verhältnis $U_{s,m}/U_p$ in Abhängigkeit von Radius r verglichen wird.

Für $\lambda(r)$ wurde als Approximationsfunktion eine aus der Hochfrequenztechnik bekannte Funktion der Strahlungscharakteristik einer Kreisapertur gewählt.

$$\lambda(r) = P_1 \cdot \left(1 - \frac{r^2}{P_2 \cdot r_0^2} \right)^n \quad (\text{C.3})$$

Die in Gleichung (C.3) dargestellten Parameter P_1 , P_2 und n sind für die Anpassung der Messkurve frei wählbar.

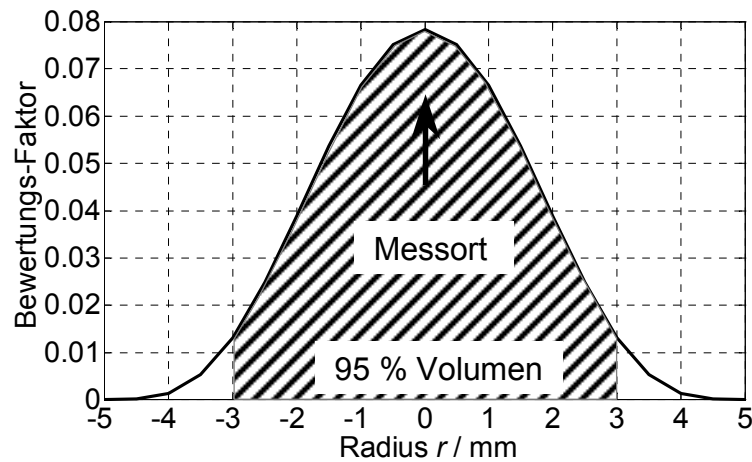


Bild C.3

*räumliche Impulsantwort
des Sensors $\lambda(r)$ in
Abhängigkeit vom Radius r
vom Messort*

Die Impulsantwort $\lambda(r)$ beschreibt, wie ein Potentialwert im Abstand r vom Messort des Sensors bewertet wird. Dies ist mit einer Tiefpassfilterung bzw. einer Mittelung des Signal gleichzusetzen. Aus Bild C.3 ist abzulesen, dass 95 % des Volumens unter der Impulsantwort innerhalb eines Kreises mit Radius ≈ 3 mm liegen. Dies stimmt überein mit der Aussage des Herstellers der einen Durchmesser von 6 mm für 5 % Fehler angibt [Trek, 2000].

D Parameterstudie bei der Büschelentladung

- entladene Flächenladungsdichte

$$\sigma(r) = \sigma_i \cdot p_1 \cdot \left(1 - \frac{r^2}{p_2^2}\right)^2 \quad (4.1)$$

Parameter p_1 – Faktor für die maximale Amplitude des Entladungskegels

Parameter p_2 – Wert für die Breite des Entladungskegels

- Entladungsstrom-Impulse

$$i(t) = i_1 \cdot (e^{-t/t_1} - e^{-t/t_2}) \quad (4.3)$$

$$i_1 = \frac{i_0}{(e^{-t_{\max}/t_1} - e^{-t_{\max}/t_2})} \quad \text{mit } t_{\max} = \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \cdot \frac{t_1 \cdot t_2}{t_2 - t_1} \quad (4.4)$$

$$Q_{e,i} = \frac{i_0}{(e^{-t_{\max}/t_1} - e^{-t_{\max}/t_2})} \cdot (t_2 - t_1) \quad (4.5)$$

Parameter t_1 – Faktor für die Anstiegszeit des Entladungsstrom-Impulses

Parameter i_0 – Spitzenwert des Entladungsstrom-Impulses

Parameter Q_e – entladene Ladungsmenge (Integral über Entladungsstrom)

Im folgenden sind die experimentellen Ergebnisse wiedergegeben, die für die Bestimmung der Parameter p_1 , p_2 , t_1 , i_0 und Q_e durchgeführt wurden.

Parameter p_1 – Faktor für die maximale Amplitude des Entladungskegels

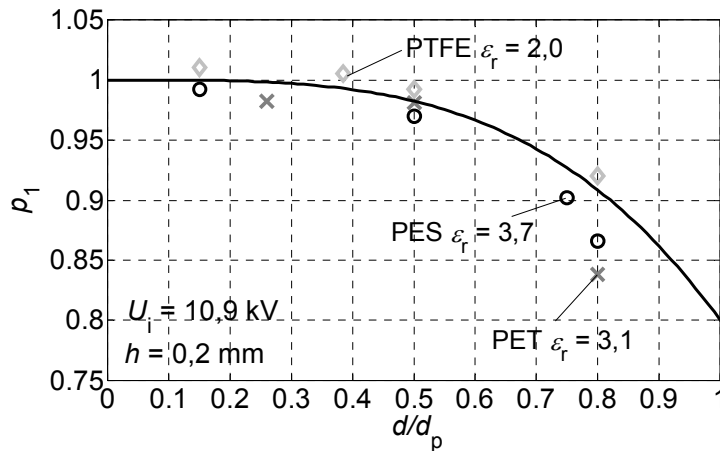


Bild D.1

Parameter p_1 in Abhängigkeit von den Ausgangsparametern d/d_p und ϵ_r ; die Messwerte sind durch Symbole dargestellt, die Approximation mit einer durchgezogenen Linie

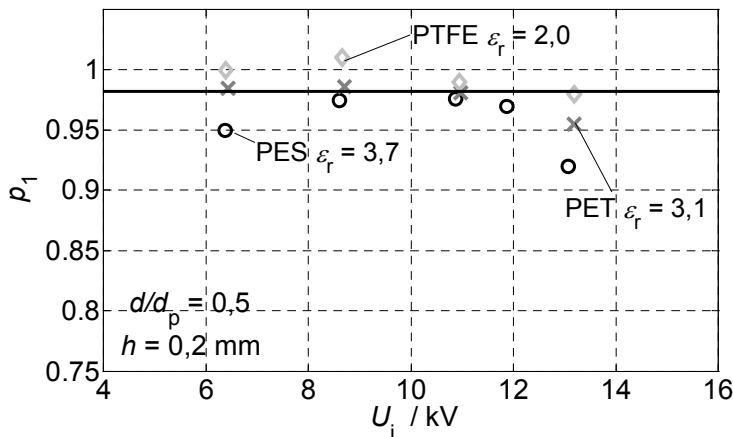


Bild D.2

Parameter p_1 in Abhängigkeit von den Ausgangsparametern U_i und ϵ_r ; die Messwerte sind durch Symbole dargestellt, die Approximation mit einer durchgezogenen Linie

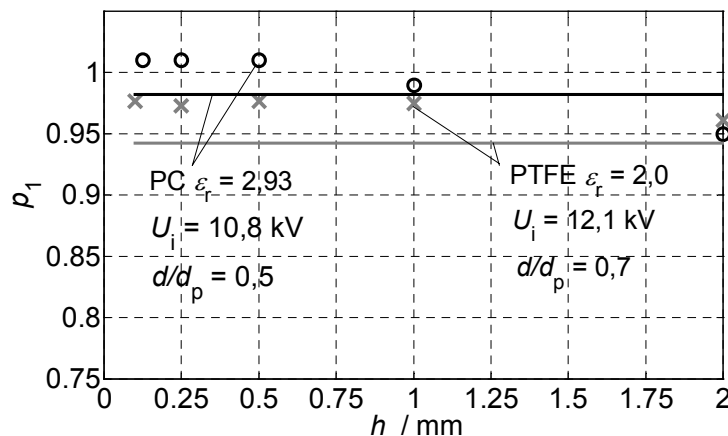


Bild D.3

Parameter p_1 in Abhängigkeit von den Ausgangsparametern h und ϵ_r ; die Messwerte sind durch Symbole dargestellt, die Approximation mit durchgezogenen Linien

Aus diesen Messergebnissen wurde folgende Abhängigkeit für p_1 abgeleitet:

$$p_1 = 1 - 0,2 \cdot (d/d_p)^{3,5} \quad (4.6)$$

Parameter p_2 – Wert für die Breite des Entladungskegels

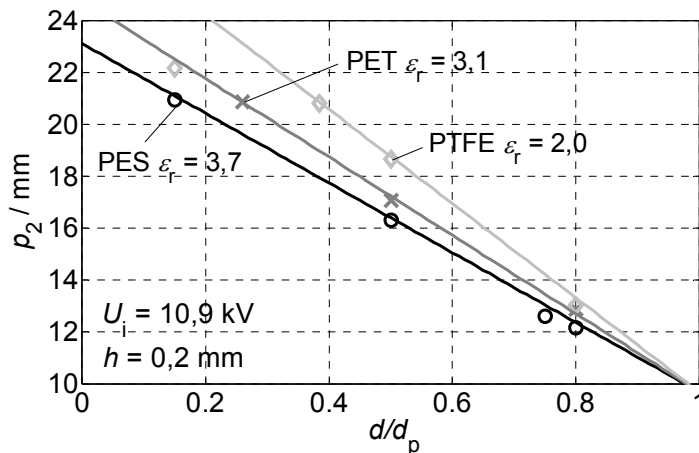


Bild D.4

Parameter p_2 in Abhängigkeit von den Ausgangsparametern d/d_p und ϵ_r ; die Messwerte sind durch Symbole dargestellt, die Approximation mit durchgezogenen Linien

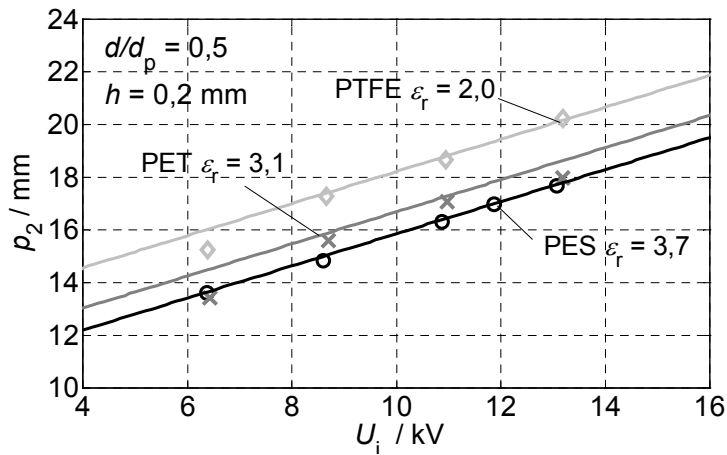


Bild D.5

Parameter p_2 in Abhängigkeit von den Ausgangsparametern U_i und ϵ_r ; die Messwerte sind durch Symbole dargestellt, die Approximation mit durchgezogenen Linien

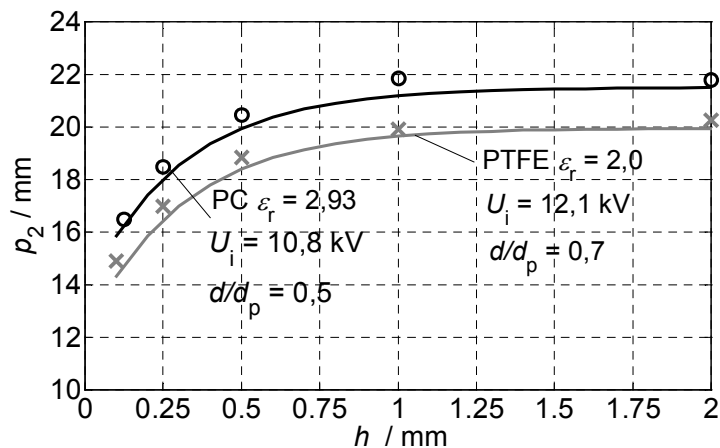


Bild D.6

Parameter p_2 in Abhängigkeit von den Ausgangsparametern h und ϵ_r ; die Messwerte sind durch Symbole dargestellt, die Approximation mit durchgezogenen Linien

Aus diesen Messergebnissen wurde folgende Abhängigkeit für p_2 abgeleitet:

$$p_{2,0} = 31 - 23,7 \cdot d/d_p + 2,8 \epsilon_r (d/d_p - 1) \quad (4.7)$$

$$p_2 / \text{mm} = p_{2,0} + 0,61 \cdot |U_i| / \text{kV} - 4,1 \cdot 0,04^{(h/\text{mm} - 0,2)}$$

Parameter t_1 – Faktor für die Anstiegszeit des Entladungsstrom-Impulses

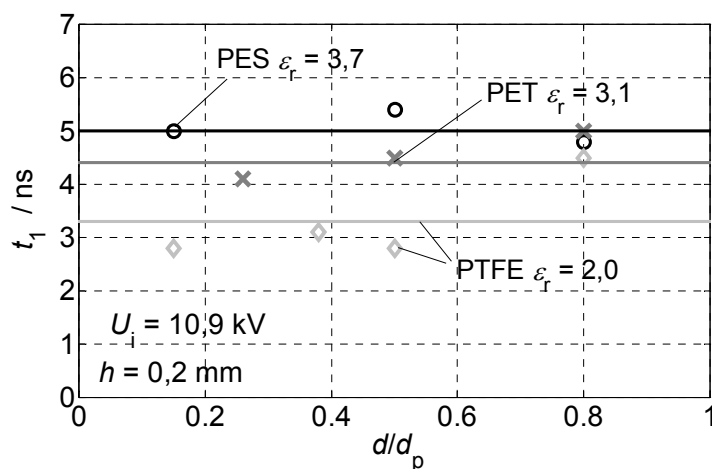


Bild D.7

Parameter t_1 in Abhängigkeit von den Ausgangsparametern d/d_p und ϵ_r ; die Messwerte sind durch Symbole dargestellt, die Approximation mit durchgezogenen Linien

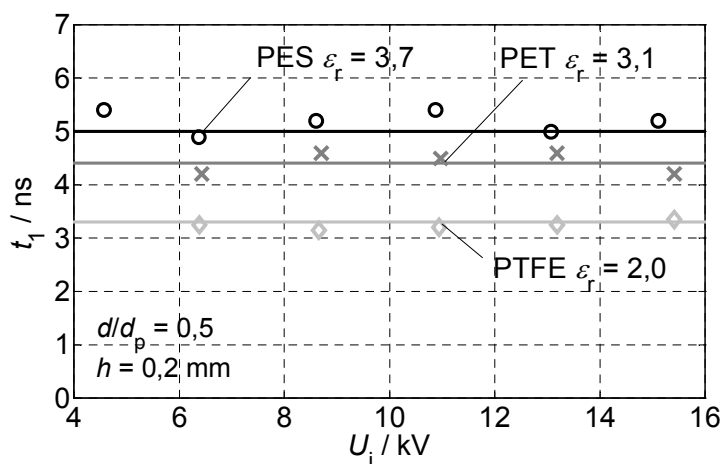


Bild D.8

Parameter t_1 in Abhängigkeit von den Ausgangsparametern U_i und ϵ_r ; die Messwerte sind durch Symbole dargestellt, die Approximation mit durchgezogenen Linien

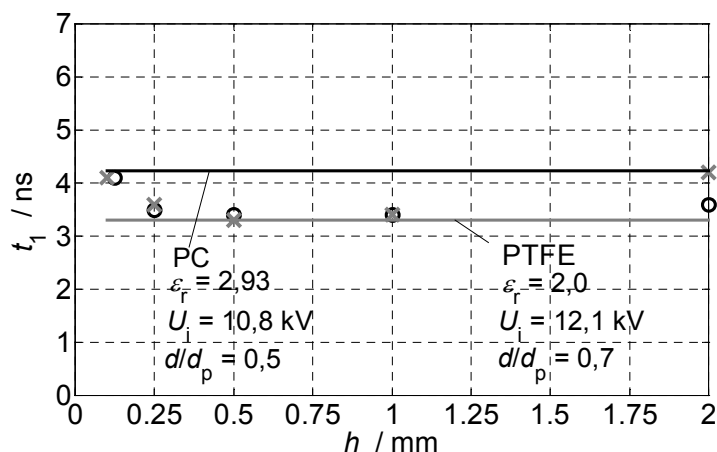


Bild D.9

Parameter t_1 in Abhängigkeit von den Ausgangsparametern h und ϵ_r ; die Messwerte sind durch Symbole dargestellt, die Approximation mit durchgezogenen Linien

Aus diesen Messergebnissen wurde folgende Abhängigkeit für t_1 abgeleitet:

$$t_1 / \text{ns} = \epsilon_r + 1.3 \quad (4.9)$$

Parameter i_0 – Spitzenwert des Entladungsstrom-Impulses

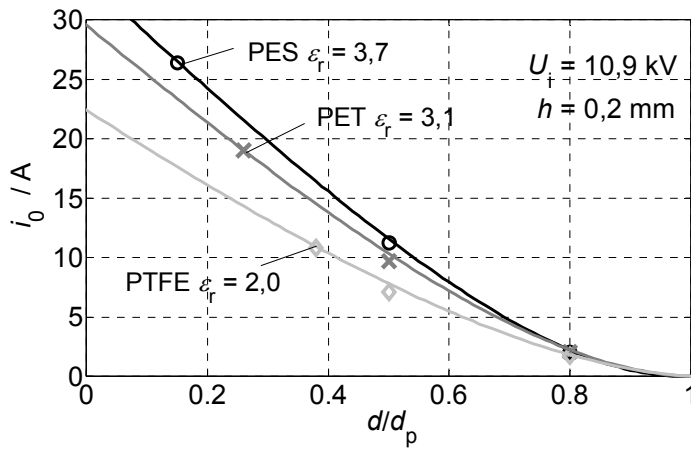


Bild D.10

Parameter i_0 in Abhängigkeit von den Ausgangsparametern d/d_p und ϵ_r ; die Messwerte sind durch Symbole dargestellt, die Approximation mit durchgezogenen Linien

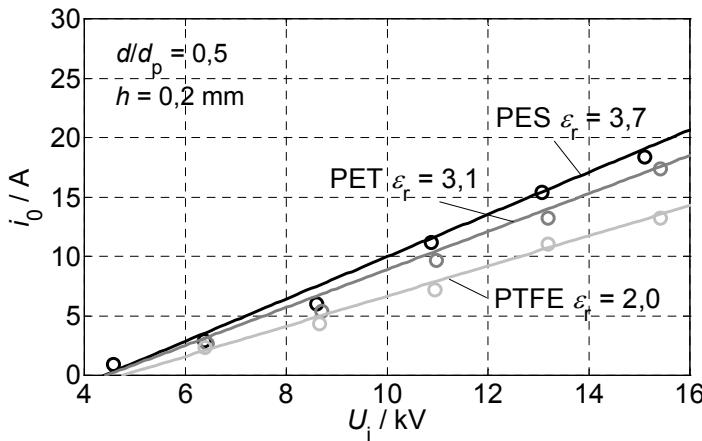


Bild D.11

Parameter i_0 in Abhängigkeit von den Ausgangsparametern U_i und ϵ_r ; die Messwerte sind durch Symbole dargestellt, die Approximation mit durchgezogenen Linien

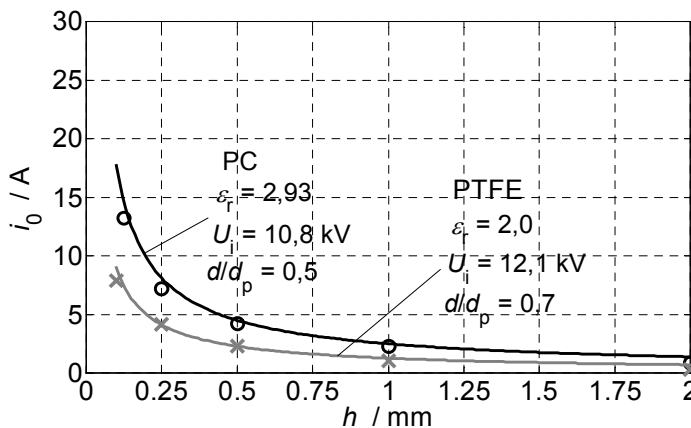


Bild D.12

Parameter i_0 in Abhängigkeit von den Ausgangsparametern h und ϵ_r ; die Messwerte sind durch Symbole dargestellt, die Approximation mit durchgezogenen Linien

Aus diesen Messergebnissen wurde folgende Abhängigkeit für i_0 abgeleitet:

$$i_{01} = (0,3 \cdot \epsilon_r + 0,68) \cdot |U_i| / \text{kV} - 1,3 \cdot \epsilon_r - 3,4$$

$$i_0 / \text{A} = \frac{\left[17 \cdot e^{2 \cdot (d/d_p - 1)} - 37,1 \cdot (d/d_p - 1) - 17 \right] \cdot i_{01}}{69} \cdot 2,25 \cdot (h/\text{mm})^{-0,85} \tag{4.10}$$

Parameter Q_e – entladene Ladungsmenge (Integral über Entladungsstrom)

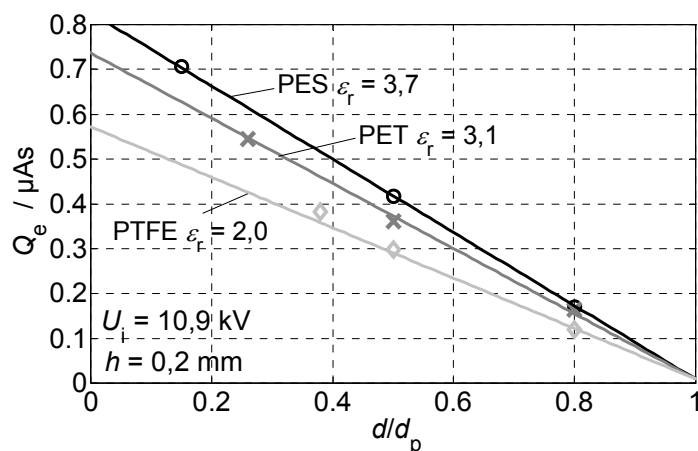


Bild D.13

Parameter Q_e in Abhängigkeit von den Ausgangsparametern d/d_p und ϵ_r ; die Messwerte sind durch Symbole dargestellt, die Approximation mit durchgezogenen Linien

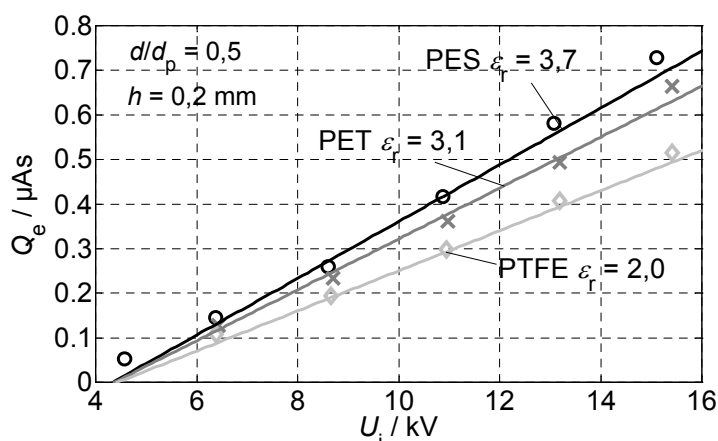


Bild D.14

Parameter Q_e in Abhängigkeit von den Ausgangsparametern U_i und ϵ_r ; die Messwerte sind durch Symbole dargestellt, die Approximation mit durchgezogenen Linien

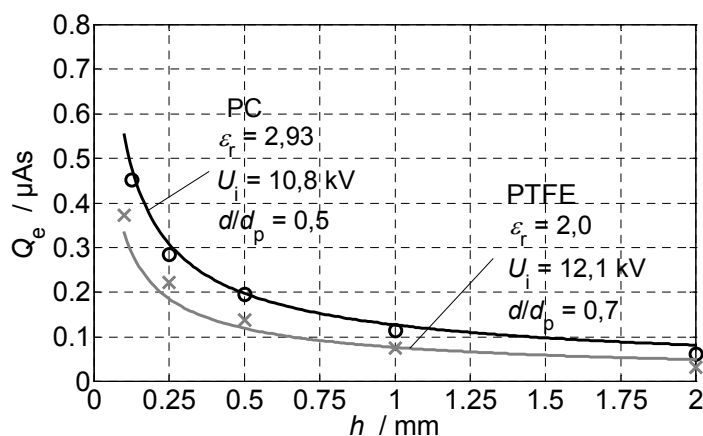


Bild D.15

Parameter Q_e in Abhängigkeit von den Ausgangsparametern h und ϵ_r ; die Messwerte sind durch Symbole dargestellt, die Approximation mit durchgezogenen Linien

Aus diesen Messergebnissen wurde folgende Abhängigkeit für Q_e abgeleitet:

$$Q_{e1} = (0,01\epsilon_r + 0,023) \cdot |U_i|/\text{kV} - 0,045\epsilon_r - 0,11 \quad (4.8)$$

$$Q_e / \mu\text{As} = \frac{Q_{e1} - (2Q_{e1} - 0,01 \cdot (|U_i|/\text{kV} - 4,5)) \cdot (d/d_p - 0,5)}{0,336} \cdot 0,12 \cdot (h/\text{mm})^{-0,64}$$

E Berechnung der Größe der Kapazität $C_{D,e}$

Die Kapazität $C_{D,e}$, in der nur noch die tatsächlich entladene Ladungsmenge Q_e gespeichert ist, kann wie folgt abgeleitet werden.

Die Größe eines ebenen Kondensator wird mit

$$C_{D,e} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r \cdot A_e}{h} \quad (\text{E.1})$$

berechnet, wobei h die Foliendicke und A_e die äquivalente Kreisfläche darstellen. Diese kann wiederum mit der entladenen Ladungsmenge und dem maximalen Wert der Flächenladungsdichte $\sigma_{e,\max}$

$$A_e = \frac{Q_e}{\sigma_{e,\max}} \quad (\text{E.2})$$

dargestellt werden. Ersetzt man in dieser Gleichung $\sigma_{e,\max}$ durch

$$\sigma_{e,\max} = \sigma_i \cdot p_1 \quad (\text{E.3})$$

nach Kapitel 4.2.1 und kombiniert Gleichung (E.1) und (E.2), so ergibt sich

$$C_{D,e} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r \cdot Q_e}{h \cdot \sigma_i \cdot p_1} \quad (\text{E.4})$$

Ersetzt man in Gleichung (E.4) die Flächenladungsdichte σ_i durch das Oberflächenpotential U_i nach Gleichung (2.6) so kann die Kapazität $C_{D,e}$ in folgender Form angegeben werden

$$C_{D,e} = \frac{Q_e}{U_i \cdot p_1}, \quad (\text{E.5})$$

wobei $U_i \cdot p_1$ die an $C_{D,e}$ anliegende Spannung repräsentiert.

F Ermittlung der Bestimmungsgleichung für R_S

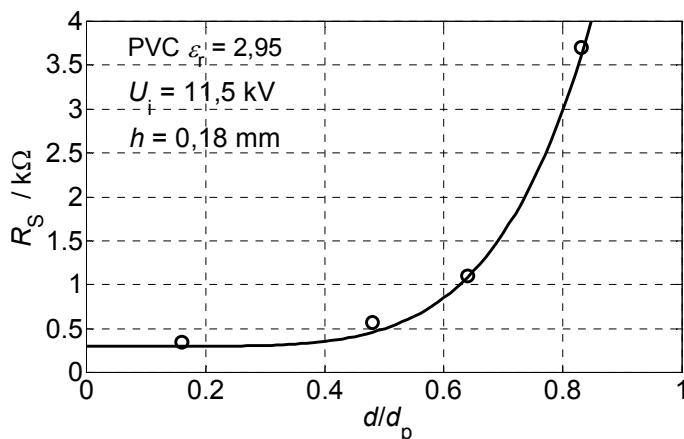


Bild F.1

Parameter R_S in Abhängigkeit von dem Ausgangsparameter d/d_p ; die Werte, welche durch die Annäherung (P Spice Modell) an die gemessenen Stromkurven ermittelt wurden, sind durch Kreise dargestellt, die Approximation mit einer durchgezogenen Linie

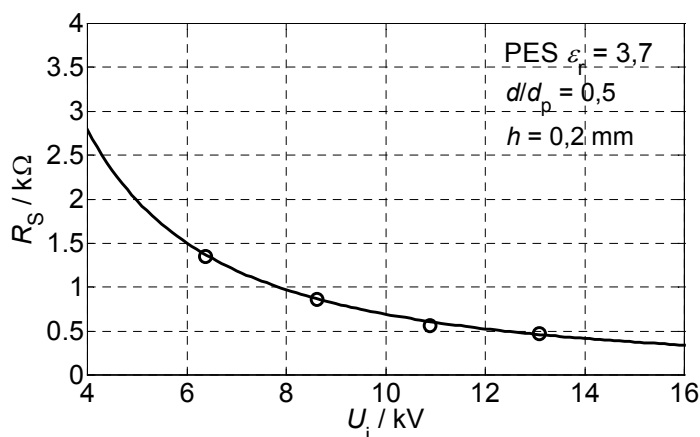


Bild F.2

Parameter R_S in Abhängigkeit von dem Ausgangsparameter U_i ; die Werte, welche durch die Annäherung (P Spice Modell) an die gemessenen Stromkurven ermittelt wurden, sind durch Kreise dargestellt, die Approximation mit einer durchgezogenen Linie

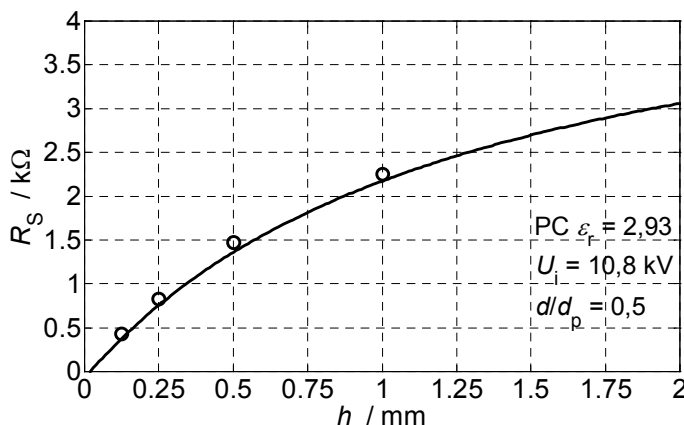


Bild F.3

Parameter R_S in Abhängigkeit von dem Ausgangsparameter h ; die Werte, welche durch die Annäherung (P Spice Modell) an die gemessenen Stromkurven ermittelt wurden, sind durch Kreise dargestellt, die Approximation mit einer durchgezogenen Linie

Aus diesen Ergebnissen wurde folgende Abhängigkeit für R_S abgeleitet:

$$R_S / k\Omega = -0,81 + 23,2 \cdot (|U_i| / kV)^{-1,53} + 9,2 \cdot (d/d_p)^{5,5} + \left(\frac{-1 + 51 \cdot h / \text{mm}}{13 + 10 \cdot h / \text{mm}} \right) \quad (4.13)$$

8 Literatur

- [Ballal, 1975] **D. R. Ballal, A. H. Lefebvre**
The Influence of Spark Discharge Characteristics on Minimum Ignition Energy in Flowing Gases
Combustion and Flame 24, 1975, S. 99-108
- [Berthold, 1987] **W. Berthold**
Bestimmung der Mindestzündenergie von Staub/Luft Gemischen
Fortschritt Berichte VDI Reihe3 Nr.134, Düsseldorf VDI-Verlag, 1987
- [Beyer, 1986] **M. Beyer, W. Boeck, K. Möller, W. Zaengl**
Hochspannungstechnik
Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1986
- [Braginskii 1958] **S.I. Braginskii**
Theory of the development of a spark channel
Sov. Phys. JETP, Band 7, 1958, S. 1068-1074
- [Claußnitzer, 1969] **W. Claußnitzer**
Simultane Registrierung von Gleitentladungen als Lichtenbergsche Staubfigur und als Photofigur
ETZ Elektrotechnische Zeitschrift Ausgabe A, 90.Jg.Heft15, 1969
- [Dakin, 1971] **T.W. Dakin et al.**
Breakdown of Gases in uniform fields- Paschen curves for nitrogen, air and sulfur hexafluoride
Electra 32, 1971, S. 61-82
- [Dietlen, 1976] **S. Dietlen**
Ermittlung der Mindestzündenergie brennbarer Gase in Mischungen mit Luft
Dissertation TU Berlin, 1976
- [EN 13463-1, 2002] **EN 13463-1**
Nicht elektrische Geräte für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen - Teil1: Grundlagen und Anforderungen, April 2002
- [EN 50014, 2000] **EN 13463-1**
Elektrische Betriebsmittel für explosionsgefährdete Bereiche - Allgemeine Bestimmungen, Februar 2000
- [EN 61340-5-1, 2001] **EN 61340-5-1**
Elektrostatik Teil 5-1: Schutz von elektronischen Bauelementen gegen elektrostatische Phänomene-Allgemeine Anforderungen, März 2001

- [EN 61340-5-2, 2001] **EN 61340-5-2**
Elektrostatik Teil 5-2: Schutz von elektronischen Bauelementen gegen elektrostatische Phänomene- Benutzerhandbuch, März 2001
- [Fredholm, 1972] **O. Fredholm, K. G. Lövstrand**
On the discharge of static electricity from an insulator surface
Journal of Physics E 5, 1972 , S.1058
- [Frei, 1996] **S. Frei, D.Pommerenke**
Wirkung von transienten Feldern der ESD auf digitale Systeme
EMV 1996, Düsseldorf, 1996, S.163
- [Frei, 1999] **S. Frei**
Elektrostatische Entladungen (ESD) und ihre Störwirkung auf elektronische Systeme
Berichte aus der Elektrotechnik, Shaker Verlag Aachen, 1999
- [Gibson, 1965] **N. Gibson, F. C. Lloyd**
Incendivity of discharges from electrostatically charged plastics
Brit. J. Appl. Phys., Vol. 16, 1965, S. 1619-1631
- [Glor, 1981] **M. Glor**
Ignition of gas/air mixtures by discharges between electrostatically charged plastic surfaces and metallic electrodes
Journal of Electrostatics 10, 1981, S. 327
- [Goodfellow, 2003] **Goodfellow Datenblätter**
Internet: <http://www.goodfellow.com>
- [Greason, 1998] **W. D. Greason**
Analysis of electrostatic discharge (ESD) for the human body and an automobile environment
Industry Applications Conference, Thirty-Third IAS Annual Meeting, 1998 IEEE , Vol. 3, 1998, S. 1758 -1766
- [Greason-2, 1998] **W. D. Greason**
Methodology to simulate speed of approach in electrostatic discharge
Journal of Electrostatics, Vol. 44, 1998, S. 205-219
- [Greason, 2002] **W. D. Greason**
Generalized model of electrostatic discharge (ESD) for bodies in approach: analyses of multiple discharges and speed of approach
Journal of Electrostatics, Vol. 54, 2002, S. 23-37

- [Grünberg, 1965] **R. Grünberg**
Gesetzmäßigkeiten von Funkentladungen im Nanosekundenbereich
Institut für Angewandte Physik der Universität Hamburg, 20a, 1965, 202-212
- [Heidelberg, 1958] **E. Heidelberg**
Zündung von Propan/Luft-gemischen durch Büschelentladungen
Archiv für Elektrotechnik 44 , 1958, S.116
- [Heidelberg, 1960] **E. Heidelberg, G. Schön**
Explosionsgefahren durch elektrostatische Aufladung von Kunststoffbehältern
Die Berufsgenossenschaft Betriebssicherheit, 1960, S. 265-267
- [Heidelberg, 1967] **E. Heidelberg**
Generation of igniting brush discharges by charged layers on earthed conductors
static electrification, Inst. Phys. Conf. Ser. No. 4, 1967, S. 147-155
- [Heidelberg, 1970] **E. Heidelberg**
Zündung explosibler Gemische durch statische Elektrizität
Proceedings of the 1st International Conference on Static Electricity, Vienna, 1970, S. 351
- [Heidelberg, 1970-2] **E. Heidelberg**
Entladungen an elektrostatisch aufgeladenen, nichtleitfähigen Metallbeschichtungen
PTB Mitteilungen, 1970, S.19
- [Hilgarth, 1992] **G. Hilgarth**
Hochspannungstechnik
B.G. Teubner Verlag, Stuttgart, 1992
- [Hyatt, 1992] **H.M. Hyatt**
The resistive phase of an air discharge and the formation of fast risetime ESD pulses
EOS/ESD Symposium Dallas, 1992
- [IEC 61000-4-2, 1995] **IEC61000-4-2**
EMV-Störfestigkeit-Grundnorm: Prüfung der Störfestigkeit gegen die Entladung statischer Elektrizität, 1995
- [Junker, 1995] **M. Junker**
Ein Hybridmodell zur Beschreibung der gesamten Entladungsentwicklung in Funkenstrecken
Technische Hochschule Darmstadt, Elektrische Energietechnik, Fachbereich 17, 1995

- [Kalghatgi, 1989] **G. T. Kalghatgi**
Flame Initiation and Development from Glow Discharge-Effect of Electrode Deposits
Combustion and Flame 77, 1989, S. 321-336
- [Küchler, 1996] **A. Küchler**
Hochspannungstechnik: Grundlagen-Technologie- Anwendungen
VDI-Verlag, Düsseldorf, 1996
- [Landers, 1985] **E.U. Landers**
Distribution of charge and fieldstrength due to discharge from insulating surface
Journal of Electrostatics 17, 1985, S. 59
- [Lewis, 1961] **B. Lewis, G. von Elbe**
Combustion, Flames and Explosions of Gases
Academic Press, New York 1961, S. 333-381
- [Lichtenberg, 1778] **G. C. Lichtenberg**
Nova Methodo Naturam AC Motum Fluidi Electrici Investigandi
Comment. Soc. Göttingen Vol. 8, 1778, S. 65-79
- [Lövstrand, 1981] **K. G. Lövstrand**
The ignition power of brush discharges-experimental work on the critical charge density
Journal of Electrostatics, Vol. 10, 1981, S. 161-168
- [Lüttgens, 1988] **G. Lüttgens, M. Glor**
Elektrostatische Aufladungen begreifen und sicher beherrschen
expert Verlag, 1988
- [Maurer, 1987] **B. Maurer, M. Glor, G. Lüttgens, L. Post**
Electrostatics 1987
Institute of Physics Conference Proceedings 85, 1987, S. 217
- [Meek, 1978] **Meek and Craggs**
Electrical Breakdown of Gases
A. Wiley, 1978
- [Merrill, 1939] **F. H. Merrill, A. von Hippel**
The Atomphysical Interpretation of Lichtenberg Figures and Their Application to the Study of Gas Discharge Phenomena
Electrical Engineering Department, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, Vol. 10, 1939
- [Mesyats, 1968] **G. A. Mesyats, G. S. Kurshunov**
Formation of Nanosecond Sparks in Static Breakdown of a Gap
Soviet Physics - Technical Physics, Vol.13 No. 4, 1968

- [Möller, 1971] **K. Möller**
Ein Beitrag zur experimentellen Überprüfung der Funkengesetze von Toepler, Rompe-Weizel und Braginskii
ETZ-A, Bd. 92 H. 1, 1971
- [Mößler, 1994] **R. Mößler, D.Pommerenke**
Modellierung Elektrostatischer Entladungen (ESD)
EMV'94, Düsseldorf, 1994, S. 693
- [Müller, 1977] **R. Müller**
Einfluß der Zündenergie auf die Zündgrenzen von Gas/Luft-Gemischen unter Variation von Druck und Temperatur
Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg, 1977
- [Müller, 2001] **L. Müller, K. Feser, R. Pfendtner, E. Fauser**
Experimental investigation of discharges for charged plastic or plastic-coated materials
CEIDP 2001, Kitchener, Canada, 2001
- [Müller, 2002] **L. Müller, K. Feser, R. Pfendtner, E. Fauser**
Experimentelle Untersuchung der Entladung elektrostatisch aufgeladener Kunststoffe
EMV 2002, Düsseldorf, 2002
- [Müller, 2003] **L. Müller, K. Feser, E. Fauser**
Experimental investigation and modeling of brush discharges for charged dielectric materials
EMC Zurich' 03, Zurich, 2003
- [Müller-2, 2002] **L. Müller, K. Feser**
Experimental investigation and modeling of surface discharges for charged dielectric materials
EMC 2002, Sorrento, Italy, 2002
- [Müller-3, 2002] **L. Müller, K. Feser**
Experimental and theoretical investigation of surface discharges for charged dielectric materials
CEIDP 2002, Cancun, Mexico, 2002
- [Müller, 2004] **L. Müller, K. Feser**
Die Untersuchung der Entladung elektrostatisch aufgeladener Kunststoffe
EMV 2004, Düsseldorf, 2004
- [Nabert, 1968] **K. Nabert, G. Schön**
Sicherheitstechnische Kennzahlen brennbarer Gase und Dämpfe
Deutscher Eichverlag, Braunschweig, 1968

- [Norberg, 1989] **A. Norberg, N. Szedenik and S. Lundquost**
On the Pulse Sharpe of Discharge Currents
Journal of Electrostatics, Vol. 23, 1989, S. 79-88
- [Norberg, 1990] **A. Norberg**
Current waveform and energy in surface discharges
Industry Applications Society Annual Meeting, Conference Record
of the 1990 IEEE , 1990, Vol. 1, S. 853 -858
- [Norberg, 1992] **A. Norberg**
Modeling Current Pulse Shape and Energy in Surface Discharges
IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28 No. 3, 1992
- [Norberg-2, 1992] **A. Norberg**
On discrete and distributed RC models for electrostatic discharges
Industry Applications Society Annual Meeting, Conference Record
of the 1992 IEEE , 1992, Vol. 2, S. 1598 –1605
- [Paschen, 1889] **F. Paschen**
Über die zum Funkenübergang an Luft, Wasserstoff und Kohlen-
säure bei verschiedenen Drucken erforderliche Potentialdifferenz
Annalen der Physik 37, 1889, S. 69-96
- [Pfeiffer, 1976] **W. Pfeiffer**
Stoßspannungsfestigkeit von Luftstrecken kleiner Schlagweite
TH Darmstadt, 1976
- [Pidoll, 2002] **U. von Pidoll, E. Brzostek, H.-R. Froechtenigt**
Determining the incendivity of electrostatic discharges without
explosive gas mixtures
IEEE Meeting in Pittsburgh (IEEE Transaction on industry
applications), 2002
- [Pommerenke, 1995] **D. Pommerenke**
Transiente Felder der Elektrostatischen Entladung (ESD)
Fortschritt Berichte VDI-Reihe 21 Nr.186, VDI-Verlag Düsseldorf,
1995
- [Pommerenke, 1996] **D. Pommerenke, M. Aidam**
ESD: waveform calculation, field and current of human and
simulator ESD
Journal of Electrostatics 38, 1996 , S.33
- [Raizer, 1991] **Y.P. Raizer**
Gas Discharge Physics
Springer Verlag 1991

- [Schwaiger, 1925] **A. Schwaiger**
Elektrische Festigkeitslehre
Verlag Julius Springer, Berlin, 1925
- [Steen, 2000] **H. Steen, E. Behrend**
Handbuch der Explosionsschutzes
Weinheim, New York, Wiley-VCH, 2000
- [Toedter, 1998] **O. Toedter**
Untersuchungen zur Korona-Entladung als Beschichtungs-
verfahren
Dissertation, Universität des Saarlandes, 1998
- [Toepler, 1906] **M. Toepler**
Zur Kenntnis der Gesetze der Gleitfunkenbildung
Annalen der Physik, Vierte Folge Band 21, 1906
- [Toepler, 1917] **M. Toepler**
Über den inneren Aufbau von Gleitbüscheln und die Gesetze ihrer
Leuchtfäden
Physik. Inst. D. Techn. Hochschule Dresden, 1917
- [Toepler, 1921] **M. Toepler**
Über die physikalischen Grundgesetze der in der Isolatortechnik
auftretenden elektrischen Gleiterscheinungen
Archiv für Elektrotechnik, Vol. 10, 1921, S. 157-185
- [Toepler, 1927] **M. Toepler**
Zur Bestimmung der Funkenkonstante
Archiv für Elektrotechnik, XVIII. Band, 1927
- [Trek, 2000] **Trek-Produkt-Katalog 2000/2001**
Daten zum Modell 341A
Auch im Internet: <http://www.trekinc.com/341a/341a.htm>
- [Weizel, 1947] **W. Weizel, R. Rompe**
Theorie des elektrischen Funkens
Annalen der Physik, Leipzig, 6.Folge, Band 1, 1947, S. 285-300
- [Weizel, 1953] **W. Weizel**
Berechnung des Ablaufs von Funken mit Widerstand und
Selbstinduktion im Stromkreis
Zeitschrift für Physik, Bd.135, 1953, S. 639-657
- [Winter, 2001] **A. Winter, J. Kindersberger**
Measurement of double layer surface charge density distribution
on Insulating plates with capacitive probes
APTADM'2001, Wroclaw, 2001, S.123

[Winter, 2002]

A. Winter, J. Kindersberger

Surface charge accumulation on insulating plates in SF₆ and the effect on DC and AC breakdown voltage of electrode arrangements

CEIDP 2002, Cancun, Mexico, 2002, S. 757

[Winter, 2003]

A. Winter

Elektrische Ladungen auf Isolierstoffoberflächen und deren Wirkung auf die Durchschlagspannung von Elektrodenanordnungen

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 21 Nr. 354, VDI Verlag, Düsseldorf, 2003

