

Der Einfluß der Annäherungsgeschwindigkeit und der Luftfeuchtigkeit auf die Störwirkung der ESD

Stephan Frei¹
Audi AG
85045 Ingolstadt
e-mail: Stephan.Frei@audi.de

Abstract

By the current flow and the resulting transient fields Electrostatic Discharges (ESD) can disturb or even destroy electronic devices or systems.

With special tests normally attempts were carried out to find out already in the device or system design phase whether ESD can cause damages. Unfortunately, the currents injected during the ESD-tests vary often considerably. As a result, the information gathered with such tests is often ambiguous. The speed of approach and the humidity in air influence strongly the current shape and the intensity of a test.

The influences of these quantities were investigated with a new experimental method. Ways to get to a better reproducibility are shown.

Übersicht

Elektrostatische Entladungen (ESD=Electrostatic Discharge) können sowohl durch den mit der Entladung verbundenen Stromfluß als auch durch die entstehenden transienten Felder elektronische Geräte bzw. Bauelemente stören oder sogar zerstören.

Durch entsprechende Prüfungen wird in der Regel versucht, bereits in der Geräte- oder Bauelementdesignphase festzustellen, ob ESD Schaden anrichten können. Leider schwanken die bei den Prüfungen eingepprägten Ströme oft erheblich. Die Aussagekraft der Prüfungen ist dadurch oft gering. Einen großen Einfluß auf den Stromverlauf üben Annäherungsgeschwindigkeit und Luftfeuchtigkeit aus.

Mit einem neuartigen Aufbau wurden diese Einflüsse quantifiziert. Wege zu einer besseren Reproduzierbarkeit werden aufgezeigt.

Einleitung

Die hohe Variabilität und die schlechte Reproduzierbarkeit von ESD verursacht große Probleme beim Testen gegen ESD. Es kommt vor, daß ein elektronisches Bauteil oder ein System einen Test den ein Tag ohne Probleme besteht und an einem anderen Tag bei unverändertem Versuchsaufbau ausfällt. Der Grund für dieses Verhalten ist in der Natur des Lichtbogens zu finden. Der Widerstand des Lichtbogen unterliegt starken, z.T. statistischen Schwankungen. Dies führt dazu, daß beispielsweise die Stromamplitude bei gleicher Ladespannung um mehr als zwei Zehnerpotenzen schwanken kann [1]. Um diese Probleme zu

¹ vorher: Technische Universität Berlin, Institut für Elektrische Energietechnik, Einsteinufer 11, 10587 Berlin

überwinden, wurden in vielen Testvorschriften die Tests mit Lichtbogen - wenn möglich - durch Tests mit einem Vakuumrelais ersetzt. So konnte der Lichtbogeneinfluß deutlich reduziert werden. Diese Methode funktioniert aber nur, wenn die zu testenden metallischen Strukturen direkt zugänglich sind, andernfalls muß mit Luftentladungen getestet werden. Auf die Luftentladungen kann also nicht verzichtet werden.

Um die Zuverlässigkeit der ESD-Tests zu erhöhen, ist ein besseres Verständnis der Physik der ESD und des Lichtbogens notwendig. Bei gleichbleibenden Objekteigenschaften, fester Ladespannung und Lichtbogenlänge ist die Störintensität einer ESD fest definiert [2]. In diesem Beitrag soll die Frage beantwortet werden, wie einzelne Parameter quantitativ die Lichtbogenlänge beeinflussen.

Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt dabei auf den besonders wichtigen Parametern Annäherungsgeschwindigkeit [3,4] und Luftfeuchtigkeit [5]. Unter Annäherungsgeschwindigkeit ist hierbei die Geschwindigkeit zu verstehen, mit der sich die Objekte zwischen denen eine Entladung stattfindet vorher aneinander angenähert haben. Hier herrscht Unsicherheit, welche Geschwindigkeit für ESD-Prüfungen verwendet werden soll.

Auch die Luftfeuchtigkeit übt einen deutlichen Einfluß auf die Störintensität aus. In den geltenden Prüfvorschriften ist die für einen Test erforderliche Luftfeuchtigkeit nur unzureichend eingegrenzt. In Abbildung 1 ist dargestellt, wie die absolute und relative Luftfeuchtigkeit im Mittel sich in Berlin verhält. Die dieser Grafik zugrunde gelegten Annahmen sind in [6] näher beschrieben. Es ist deutlich zu sehen, daß selbst die mittlere relative Luftfeuchtigkeit um etwa 40 % schwanken kann. Für die Spitzenwerte ist der Schwankungsbereich noch deutlich größer.

Der Einfluß der oben genannten Parameter wurde mit einem neuen Versuchsaufbau untersucht. Die gewonnenen Ergebnisse können helfen, Tests reproduzierbarer und zuverlässiger zu gestalten.

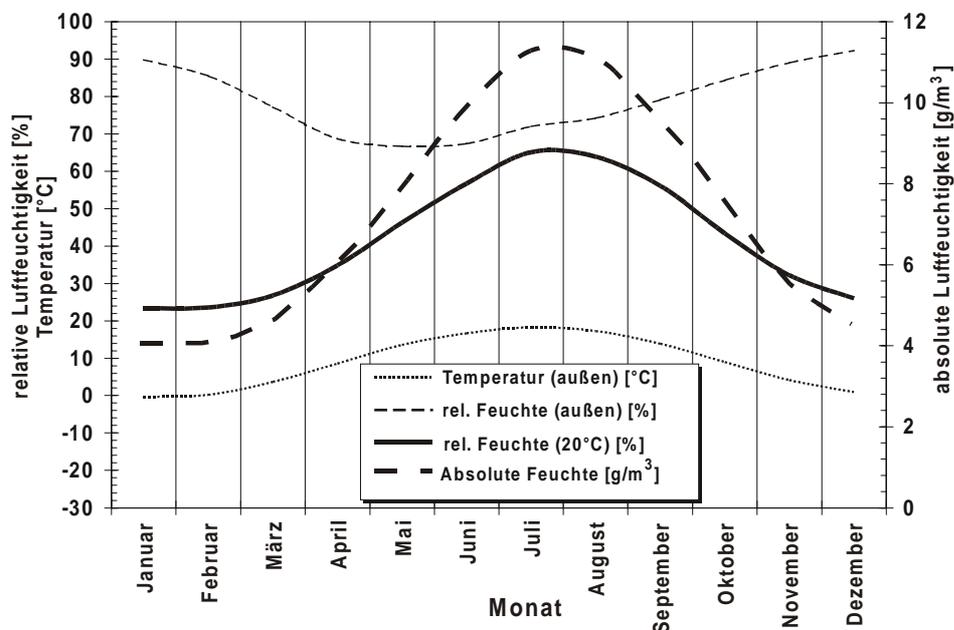


Abbildung 1: Schwankungen der mittleren Außentemperatur und der mittleren äußeren relativen Luftfeuchtigkeit (Berlin) mit überschlägig berechneten Werten für die Luftfeuchtigkeit in Räumen bei 20°C (Klimadaten aus „Berliner Wetterkarte“ [7])

Die statistische Streuzeit

Für die beliebig langsame Annäherung zweier Körper, zwischen denen eine Spannung U_d besteht, unter Annahme homogener Feldverhältnisse läßt sich der Abstand d_p , bei dem es zur Lawinenbildung bzw. zum Durchbruch kommt, durch das sogenannte Paschengesetz bestimmen. Stellt man Gleichung 1 nach der Funkenstreckenlänge d_p um, so erhält man Gleichung (1).

$$U_d = 24,4 d_p + 6,53 \sqrt{d_p} \quad (\text{Paschengesetz}) \quad (1)$$

U_d bezeichnet die Durchbruchspannung in kV, d_p die Länge der Funkenstrecke in cm (im weiteren als Paschenlänge bezeichnet). Das Paschengesetz beruht auf empirischen Untersuchungen, je nach Untersuchung findet man in der Literatur leicht schwankende Werte für die in (1) verwendeten Zahlenwerte. Ausführliche Darstellungen der physikalischen Vorgänge bei einer Lichtbogenentladung finden sich z.B. in [8]. Auf die Besonderheiten bei ESD geht [2] ausführlich ein.

Wie bereits beschrieben, gilt das Paschengesetz nur unter der Voraussetzung einer beliebig langsamen Annäherung zweier Körper und bei homogenen Feldverhältnissen. In der Realität ist besonders die erste Annahme im Fall der ESD meist nicht erfüllt. Auch wenn viele Elektrodenanordnungen näherungsweise homogene Felder erzeugen, so ist die Annäherung der an einer ESD beteiligten Körper meist nicht beliebig langsam. Diese Tatsache kann zu deutlichen Abweichungen der Lichtbogenlänge von der Paschenlänge führen.

Damit ein Entladungsprozeß stattfinden kann, muß die in einem homogenen Feld nach dem Paschengesetz berechenbare Feldstärke überschritten sein und an oder in der Nähe der Kathode ein Anfangselektron entstehen. Dieses Anfangselektron ist unbedingt notwendig, um die Stoßionisation und Lawinenbildung in Gang zu setzen. Das Anfangselektron ist jedoch meist nicht sofort nach dem Überschreiten der Durchschlagfeldstärke vorhanden. Statistische Prozesse bestimmen die Bereitstellung.

Die statistische Streuzeit bezeichnet die mittlere Zeit, die zwischen dem Überschreiten der Durchschlagfeldstärke und dem Beginn des Aufbaus der Entladung bzw. des Lichtbogens vergeht. Sie schließt die gegebenenfalls mehrfache Erzeugung eines Startelektrons ein. Die Streuzeit kann im Bereich von einigen Nanosekunden bis hin zu Sekunden liegen [8]. Die Erzeugung von möglichen Startelektronen und deren Erfolgsaussicht, einen Durchbruch zu initiieren, kann nur mit Mitteln der Wahrscheinlichkeitsrechnung beschrieben werden. Dadurch können nur statistische Aussagen über die Länge der Streuzeit getroffen werden. Es läßt sich für jede Entladekonfiguration ein Mittelwert bestimmen, um den die Streuzeit mehr oder weniger stark schwankt. Die Höhe der jeweiligen Schwankung kann durch die Streuung ausgedrückt werden.

Im Falle der ESD nähern sich meist zwei auf unterschiedlichen Potential befindliche Körper einander an, was gleichbedeutend mit dem Schließen einer Funkenstrecke ist. Da es nicht zwangsläufig sofort bei Überschreitung der Durchschlagfeldstärke zu einer Zündung kommt, sondern danach oft noch einige Zeit vergeht, können die Elektroden der Funkenstrecke aufgrund der statistischen Streuzeit sich weiter annähern, wobei der Abstand der Elektroden die Paschenlänge vor der Entladung unterschreitet. Das Paschengesetz gilt in diesem Fall dann nicht mehr für die Berechnung der Schlagweite. Die Schlagweite verkürzt sich, bezogen auf das Paschengesetz, um einen Faktor d_{rel} auf:

$$d_v = d_p d_{rel}; \quad d_{rel} < 1 \quad (2)$$

d_p ist hierbei die Paschenlänge und d_v die verkürzte Lichtbogenlänge. d_{rel} ist also eine Funktion der Streuzeit.

Der zeitabhängige Lichtbogenwiderstand hängt stark von der Lichtbogenlänge ab. Ein kürzerer Lichtbogen führt zu einem niedrigeren Widerstand. Die Entladung kann schneller ablaufen, die Steilheiten von Strom und Feldern nehmen zu: Die Störintensität kann also größer werden. In dieser Untersuchung wird von der Tatsache Gebrauch gemacht, daß der die Störintensität oft bestimmende Stromverlauf während einer Entladung nur durch die Lichtbogenlänge, die Ladespannung und die Objekt- bzw. Gaseigenschaften bestimmt wird.

In Abbildung 2 ist die Wirkungskette zwischen der statistischen Streuzeit und der Störintensität nochmals in einem Blockdiagramm dargestellt.

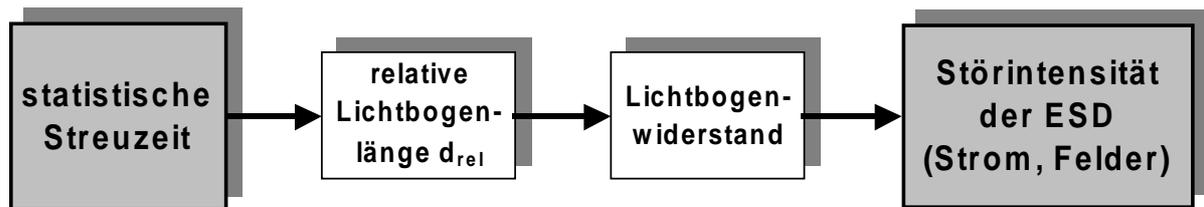


Abbildung 2: Abhängigkeit der Störintensität von der Streuzeit

Einfluß der Annäherungsgeschwindigkeit und der Luftfeuchtigkeit auf die statistische Streuzeit

Die Annäherungsgeschwindigkeit beeinflusst die Länge der statistischen Streuzeit. Zur Erklärung der Geschwindigkeitsabhängigkeiten muß die statistische Streuzeit betrachtet werden. Der Zeitpunkt der Bereitstellung eines Startelektrons hängt im Falle der ESD sehr von der Überspannung in der Funkenstrecke ab. Je größer die Überspannung desto kürzer ist die Streuzeit [9]. Eine schnelle Annäherung von zwei Elektroden mit einer festen Potentialdifferenz führt zu einem schnellen Anstieg der Überspannung bzw. des Feldes zwischen den Elektroden und somit zu einer mittleren Verkürzung der Streuzeit verglichen zu einer langsamen Annäherung. Eine Zunahme der Geschwindigkeit führt aber auch gleichzeitig zu einer Zunahme der mittleren Verkürzung des Elektrodenabstands. Die Entladung hat im Falle einer Lichtbogenverkürzung und höheren Feldstärke im Entladespalt einen geringeren Lichtbogenwiderstand. Die Anstiegszeit des Stroms nimmt deutlich ab, und die Amplitude nimmt zu.

Eine höhere Luftfeuchtigkeit führt zu einer Verkürzung der Streuzeit. Eine Erklärung für den Einfluß der Feuchte findet sich in [10]. Die auf der Kathode sich niederschlagenden bipolaren Wassermoleküle bilden eine Doppelschicht. Diese Doppelschicht führt zu einer massiven Felderhöhung und erleichtert damit den Austritt des für den Durchbruch notwendigen Anfangselektrons. Bei dem Feuchteeinfluß handelt es sich im wesentlichen um einen Oberflächeneffekt. Dies wird durch Versuche von Goshō und Seiki [11] gezeigt. Mit zunehmender absoluter Feuchte steigt der Emissionsstrom. Erwärmt man aber die Kathode, so daß die Fähigkeit der Oberfläche Wasser anzulagern vermindert wird, so nimmt der Emissionsstrom ab. Weitere Erklärungen zu dem Feuchteeinfluß als Oberflächeneffekt finden sich in [2]. In [12] wird dargelegt, daß auch im Volumen vorhandene Feuchtigkeit einen Einfluß auf die Streuzeitverkürzung haben kann. Es ist aber anzunehmen, daß dieser Einfluß vergleichsweise gering ist.

Einfluß der Lichtbogenlänge auf den Stromverlauf

Bei fester Entladekonfiguration kann den verschiedenen Ladespannungen und Lichtbogenlängen ein fester Stromverlauf zugeordnet werden. In Abbildung 3 ist dargestellt, wie die Stromamplitude der Entladung eines Ellipsoiden in eine große Metallplatte von der Ladespannung und der Lichtbogenlänge abhängt. Die Daten wurden durch Simulation der ESD unter Einbindung eines Lichtbogenmodells gewonnen. Der transiente Strom wurde durch die Methode der Momente berechnet. Nähere Informationen zu der Simulation können in [6,13,14] gefunden werden. Das Simulationsprogramm ist jedoch leider nur in der Lage, Lichtbogenlängenverkürzungen von bis auf 20% der Paschenlänge zu berechnen. In der Praxis wurden Verkürzungen von bis auf weniger als 7% beobachtet.

Für alle Spannungen gilt, daß mit abnehmender Lichtbogenlänge die Ladespannung zunimmt. Wie in Abbildung 3 deutlich zu sehen ist, kann beispielsweise die Entladestromamplitude aufgrund von kurzen Lichtbogenlängen wesentlich größer sein als bei 10 kV.

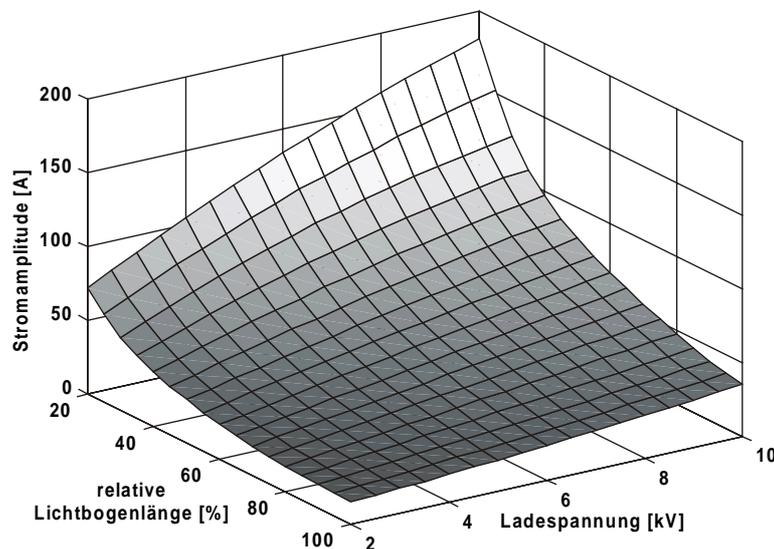


Abbildung 3: Stromamplitude des ersten Pulses für die Entladung eines Rotationsellipsoiden (Halbachsenlänge: 31 cm und 5 cm) in Abhängigkeit von der Ladespannung und der relativen Lichtbogenlänge

Experimentelles Verfahren

Aufgrund der statistischen Natur der Streuzeit können nur statistische Angaben zur Abhängigkeit der Lichtbogenlänge von den verschiedenen Einflußfaktoren gemacht werden. Die statistische Bestimmung dieser Abhängigkeiten erfordert eine große Anzahl von Versuchen.

Neben der vorliegenden Untersuchung gibt es nur wenige Arbeiten zum Einfluß der Annäherungsgeschwindigkeit. Daout und Ryser [3] verwendeten bei ihrer Untersuchung ein System mit rotierenden Elektroden. Die Lichtbogenlänge wurde durch Fotografieren des Lichtbogens bestimmt. Pommerenke [15] verwendete ein translatorisches System, das aber keine Möglichkeit bot, die Geschwindigkeit gezielt vorzugeben. Beide Verfahren erfordern einen immensen zeitlichen Aufwand, um die notwendigen sehr großen Versuchszahlen zu generieren. Umfangreiche Parameterstudien waren somit nicht möglich.

Unbewegter – bewegter Körper

Zur Vermeidung der beschriebenen mechanischen Probleme und der aufwendigen dynamischen Messung der Lichtbogenlänge wurde ein neuartiger Aufbau entwickelt. Prinzipiell bedeutet die Annäherung im Fall der ESD eine Änderung der Feldstärke im Zündspalt [16]. Es ist also äquivalent, bei starren Elektrodenanordnungen die Feldstärke entsprechend zu verändern. In Abbildung 4 ist die mechanische Annäherung der elektrischen Feldstärkeänderung für eine Anordnung Kugel-Platte gegenübergestellt. In einem Fall nähert sich eine Kugel mit festem Potential an eine leitende Ebene an, im anderen Fall befindet sich eine zu entladende Kugel mit variablen Potential in einem festen Abstand zu der leitenden Ebene.

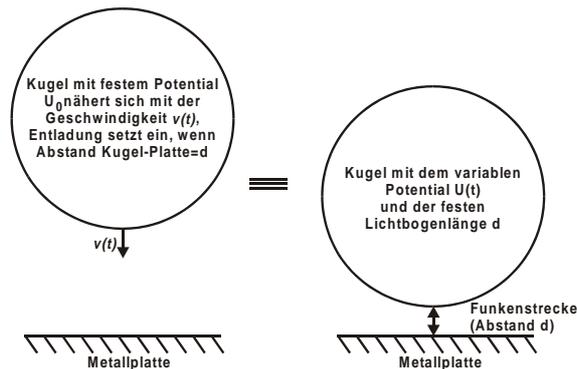


Abbildung 4: Vergleich einer Funkenstrecke mit beweglichen Elektroden mit einer Funkenstrecke mit festen Elektroden

Versuchsaufbau

Durch entsprechende Umformungen lassen sich zeitabhängige Potentialprofile finden, die in einem festen Entladespalt das Feldstärkenprofil einer Annäherung nachbilden [17]. Ein entsprechender Versuchsaufbau wurde entwickelt und aufgebaut.

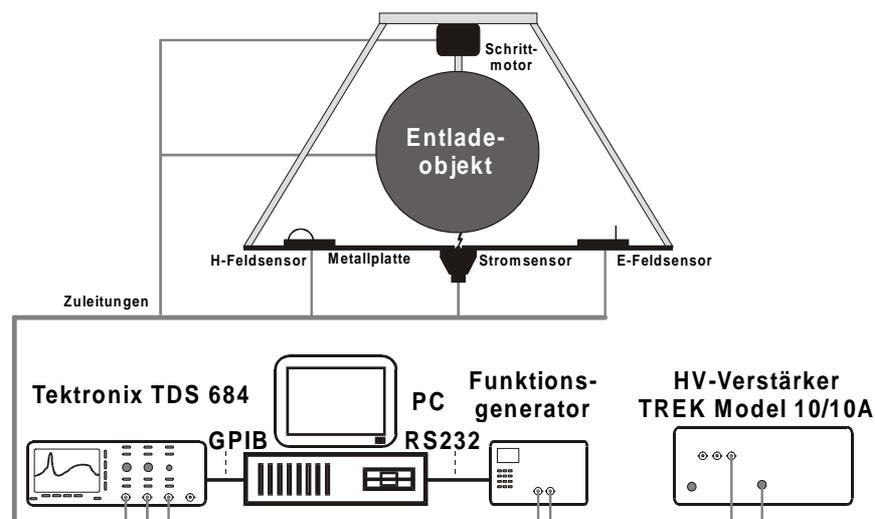


Abbildung 5: Aufbau zur Simulation der Annäherungsgeschwindigkeit

Der schematische Aufbau des entwickelten Simulationssystems ist in Abbildung 5 dargestellt. Die Einstellung der Schlagweite erfolgt rechnergesteuert über eine von einem Schrittmotor

angetriebene Spindel. Als Entladeobjekt wurde für den Großteil der Versuche eine Kugelelektrode verwendet. Das System kann jedoch auch andere Objektformen aufnehmen.

Vor einem Versuch wird über den Schrittmotor die Schlagweite eingestellt. Über einen Funktionsgenerator und einen Hochspannungsverstärker wird ein bestimmtes zeitabhängiges Potentialprofil zwischen Kugel und Metallplatte erzeugt. Die Spannung, bei der es zu einem Durchschlag kommt, wird jeweils aufgezeichnet und mit der berechneten äquivalenten Geschwindigkeit abgespeichert. Innerhalb von kurzer Zeit kann die Prozedur mehrere Tausend Male wiederholt werden.

Anschließend werden die Ergebnisse nach der Spannung und anschließend nach der Geschwindigkeit sortiert. Die mittlere relative Lichtbogenlänge:

$$\bar{d}_{rel}(v) = \frac{1}{n d_p} \sum_{j=1}^n d_j(v)$$

und die relative Streuung:

$$s_{rel}(v) = \frac{1}{(n-1)d_p} \sum_{j=1}^n (d_j(v) - \bar{d}_{rel}(v))^2$$

kann aus den Daten schließlich bestimmt werden.

Ergebnisse

Wie nun im einzelnen die Annäherungsgeschwindigkeit die Lichtbogenlänge beeinflusst hängt von zahlreichen weiteren Parametern ab. Es wurden umfangreiche statistische Untersuchungen zu dieser Problematik durchgeführt. Ein besonders wichtiger Parameter ist die Ladespannung. In Abbildung 6 ist zu sehen, wie der Einfluß der Annäherungsgeschwindigkeit von der Spannungshöhe abhängen kann. Während bei Elektrodenkonfiguration a) die Spannung einen erheblichen Einfluß auf die Art der Verkürzung hat, ist die Verkürzung der Lichtbogenlänge in b) nur in einem relativ geringen Maß von der Spannung abhängig. Die Ursache für das unterschiedliche Verhalten der beiden Meßreihen ist in den unterschiedlichen Kathodenmaterialien und den verschiedenen Oberflächenbeschaffenheiten zu suchen.

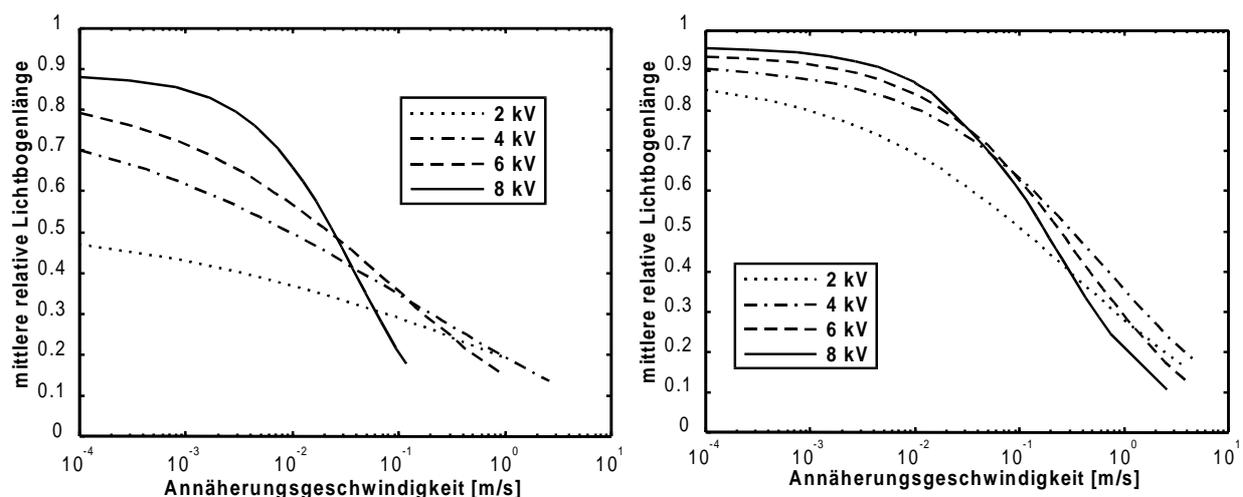


Abbildung 6: Einfluß der Spannung auf die mittlere relative Lichtbogenlänge in Abhängigkeit von der Annäherungsgeschwindigkeit, a) V2A-Kathode poliert, b) Aluminium-Kathode verschmutzt; Abstand zwischen den Pulsen 0,1 s, 20% RH, 20°C.

Alle Kurven in Abbildung 6 zeigen von der Tendenz her ein ähnliches Verhalten. Ist die Annäherungsgeschwindigkeit sehr niedrig, streben die mittleren Lichtbogenlängen dem Paschenwert zu (Bereich I). Mit zunehmender Geschwindigkeit nimmt die Lichtbogenlänge ab. Dieser Bereich wird im folgenden Übergangsbereich genannt (Bereich II). Steigt die Geschwindigkeit noch weiter an, so strebt die mittlere relative Lichtbogenlänge einem Grenzwert zu (Bereich III). Dieser Grenzwert ist durch die feldstärkeabhängige weitere Streuzeitverkürzung bestimmt. Spätestens bei Einsetzen der Feldemission kann keine weitere Verkürzung mehr stattfinden.

Trägt man die relative Streuung der mittleren Lichtbogenlänge über der Geschwindigkeit auf, erkennt man auch drei Bereiche (Abbildung 7). Zunächst ist die Streuung in Abhängigkeit von der Annäherungsgeschwindigkeit relativ gering. Die Funkenstrecke zeigt ein nahezu statisches Verhalten. Der Durchschlag erfolgt im Mittel mit einer Lichtbogenlänge, die nur geringfügig unter der Paschenlänge liegt (Bereich I). Auch für sehr hohe Geschwindigkeiten ist die Streuung relativ klein (Bereich III). Dieser Bereich ist durch die hier sehr hohen Feldstärken geprägt. Zwischen diesen beiden Bereichen befindet sich ein Übergangsbereich (Bereich II). Dieser Bereich zeichnet sich durch eine große relative Streuung aus. Hier kommt die statistische Natur der Streuzeit voll zur Geltung. Bemerkenswert ist die unterschiedliche Amplitude und Breite der relativen Streufunktion in Abhängigkeit von der Spannung. Hier treten große Variationen auf. Für höhere Spannungen fällt dieser Bereich meist schmaler aus.

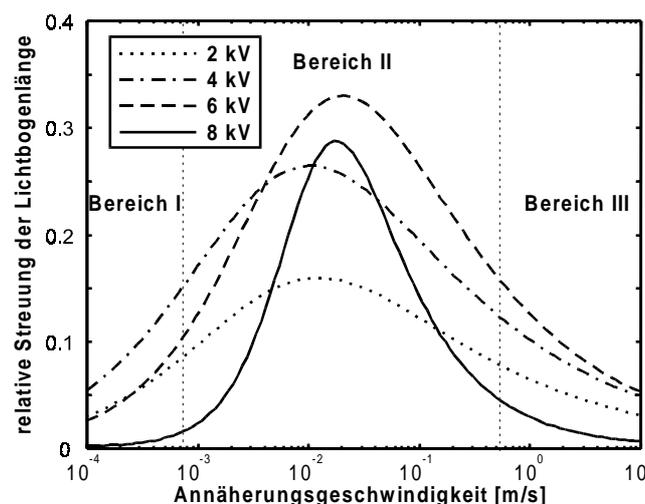


Abbildung 7: Relative Streuung der Lichtbogenlänge, (Meßdaten aus Abbildung 6a))

Mit wachsenden zeitlichen Abstand zwischen zwei Entladungen nimmt meist die Streuzeit zu. Die Lichtbogenlängen werden kürzer. In Abbildung 8 wird an einem Beispiel mit V2A-Elektroden für zwei verschiedene Spannungen dargestellt, wie eine Verkürzung des zeitlichen Abstands auf die Lichtbogenlängenverkürzung in Abhängigkeit von der Annäherungsgeschwindigkeit wirkt. Die Meßreihen wurden mit einem zeitlichen Abstand zwischen den Entladungen von mindestens 100 ms bzw. mindestens 10 s aufgenommen. Die Ursache für die Streuzeitveränderung ist auf eine isolierende Schicht auf der Oberfläche zurückzuführen, die sich durch Oxidation bildet. Paetow [18] erklärt die Streuzeitverkürzung bei kurz aufeinanderfolgenden Entladungen folgendermaßen: Während des Brennens des Lichtbogens werden die Atome der Isolierschicht vom Eigenlicht oder auch durch Stöße angeregt, wodurch sie sich positiv aufladen. Nach dem Erlöschen des Lichtbogens erzeugt die noch aufgeladene isolierende Schicht so hohe Feldstärken, daß aus der metallischen Unterlage Elektronen

herausgelöst werden können. Das Resultat ist ein Elektronenstrom der nach dem Abschalten der äußeren Spannung an der Elektrodenanordnung noch einige Zeit andauert. Die Halbwertszeit dieses Effekts beträgt etwa 1 s.

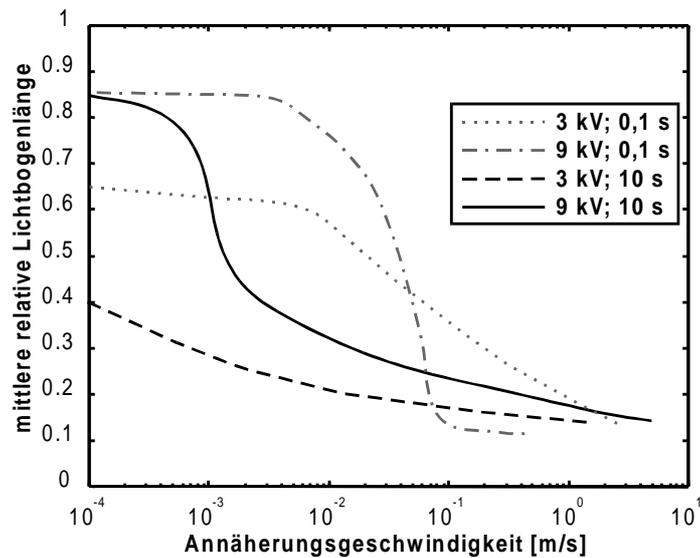


Abbildung 8: Einfluß des zeitlichen Abstands zwischen aufeinanderfolgenden Pulsen auf die mittlere relative Lichtbogenlänge in Abhängigkeit von der Annäherungsgeschwindigkeit (V2A Kugel-Platte, 20°C, 20% RH)²

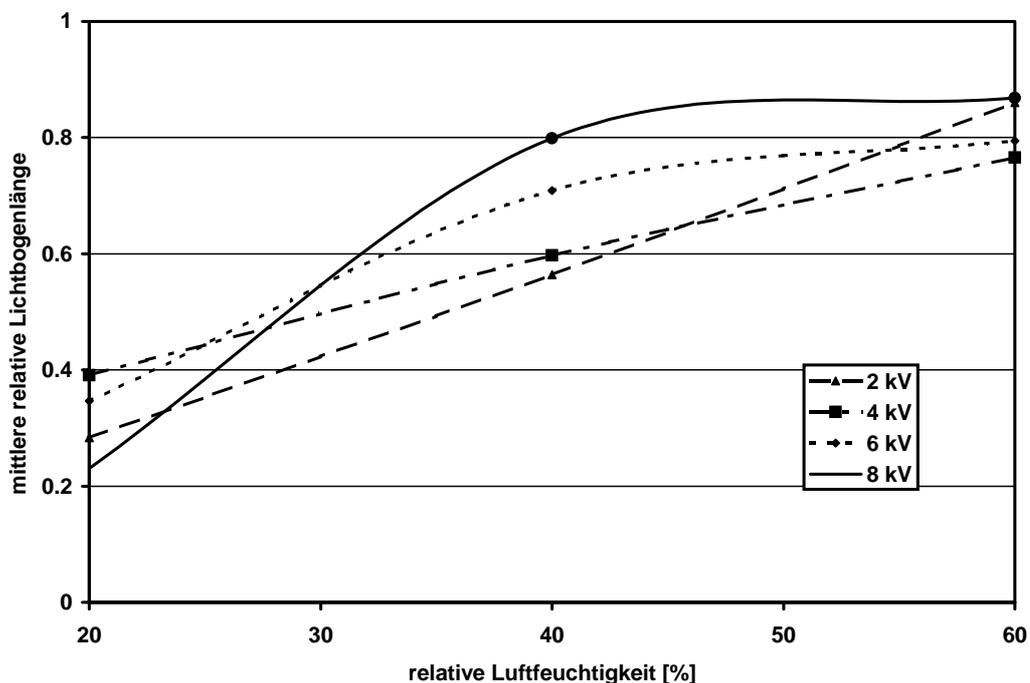


Abbildung 9: Abhängigkeit der relativen Lichtbogenlänge von der relativen Luftfeuchtigkeit bei 2, 4, 6 und 8 kV, einer konstanten Annäherungsgeschwindigkeit von 0,1 m/s und konstanter Temperatur von 20°C (V2A, poliert, Abstand zwischen den Durchschlägen > 100 ms).

²

Die Approximation an die Meßwerte erfolgte durch eine Spline-Funktion

Es wurde bereits beschrieben, daß feuchte Luft die Streuzzeit verkürzt. Zur quantitativen Bestimmung des Feuchtigkeitseinflusses wurden unter verschiedenen relativen Luftfeuchtigkeiten (20, 40, 60% RH) bei 20°C Meßreihen aufgenommen. In Abbildung 9 ist die mittlere relative Lichtbogenlänge für eine Annäherungsgeschwindigkeit von 0,1 m/s in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, daß mit zunehmender relativer Luftfeuchtigkeit die Verkürzung des Lichtbogens abnimmt. Bei höheren Spannungen ist bei hohen Luftfeuchtigkeiten, eine Sättigung zu erkennen. Die Verkürzung der Lichtbogenlänge infolge der Annäherungsgeschwindigkeit ist dann nur noch im geringen Maße feuchtigkeitsabhängig. Bei niedrigen Spannungen ist eine deutliche Zunahme der Lichtbogenlänge über den gesamten beobachteten Feuchtigkeitsbereich sichtbar. Diese Ergebnisse decken sich z.T. mit in [5] festgestellten Tendenzen. Hier wurden menschliche Entladungen in Abhängigkeit von zwei verschiedenen relativen Feuchten (30% und 50%) untersucht. Es konnte für höhere Ladespannungen nahezu keine Abhängigkeit von der Feuchte festgestellt werden. In einem mittleren Spannungsbereich wurde eine stärkere Abhängigkeit beobachtet. Die in [5] für niedrige Spannungen getroffenen Aussagen sind aufgrund der dort verwendeten unzureichenden Meßtechnik nicht aussagekräftig.

In der Regel nimmt auch die Streuung der Lichtbogenlänge mit zunehmender Luftfeuchtigkeit deutlich ab. Bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von etwa 70% mit rauher, oxidiertes Kathode aus Aluminium konnte gezeigt werden, daß die Meßwerte bis zu einer Geschwindigkeit von 1 m/s nahezu keine Streuung mehr aufwiesen.

In Tabelle 1 sind die wichtigsten Faktoren zusammengefaßt, die zu einer Steigerung der Störintensität einer ESD führen können.

Einflußfaktor	Anmerkungen
Geschwindigkeit der Annäherung	Mit zunehmender Geschwindigkeit nimmt die relative Lichtbogenlänge ab. Die Geschwindigkeit hat einen sehr großen Einfluß auf die Störintensität einer ESD.
niedrige Luftfeuchtigkeit	Eine hohe Luftfeuchtigkeit kann verhindern, daß selbst bei höheren Geschwindigkeiten eine Verkürzung des Lichtbogens auftritt.
saubere, polierte Oberflächen	Im Fall der ESD liefert oft die Oberfläche das für den Durchbruch notwendige Startelektron. Verschmutzte Oberflächen emittieren mehr Elektronen.
Verlängerung des zeitlichen Abstands zwischen den Pulsen	Besonders bei verschmutzten oder oxidierten Oberflächen können kurz hintereinander erzeugte Entladungen lichtbogenverlängernd wirken.
hohe Austrittsarbeit	Bei sehr sauberen Kathodenoberflächen ist die Austrittsarbeit wichtig für die Elektronenemissionsraten. Hohe Elektronenaustrittsarbeiten verlängern die Streuzzeit.
Verringerung der Kathodenfläche	Eine kleinere Kathodenoberfläche führt zu einer Verringerung der Elektronenemissionsraten.
verringerte Ladespannung	Ist die Ladespannungen niedrig, kommt es schon bei geringen Geschwindigkeiten oft zu deutlichen Lichtbogenlängenverkürzungen.

Tabelle 1: Einflußfaktoren, die zu einer Verkürzung der relativen Lichtbogenlänge und zur Vergrößerung der Intensität einer Entladung führen können

Zusammenfassung

Mit einem neuartigen Versuchsaufbau wurde gezeigt, wie die Annäherungsgeschwindigkeit und die Luftfeuchtigkeit den Stromverlauf bei einer ESD erheblich beeinflussen können. Die Prozeßgeschwindigkeiten und die klimatischen Umgebungsbedingungen beeinflussen also nicht nur das Aufladeverhalten sondern auch das Entladeverhalten.

Die Untersuchungen zeigen weiterhin Wege zur Verbesserung der Reproduzierbarkeit von ESD-Tests. Es ist eindeutig nachgewiesen worden, daß in Abhängigkeit von der Annäherungsgeschwindigkeit und der Luftfeuchtigkeit die Streuung des Entladestromverlaufs sehr gering sein kann. Durch entsprechende Wahl der Geschwindigkeit und Luftfeuchtigkeit ist eine sehr hohe Reproduzierbarkeit zu erreichen. ESD-Tests könnten also deutlich zuverlässiger werden.

Auch werden Möglichkeiten eröffnet, um die Stromverläufe von ESD-Simulatoren (beispielsweise nach EN 61000-4-2 gefertigte) bei Luftentladung zu vergleichen. Da es bislang keine Möglichkeit gab, die Stromverläufe von Simulatoren bei Luftentladung reproduzierbar zu messen (außer durch gleichzeitige Messung der Lichtbogenlänge), war es auch nicht möglich, eine verbindliche Stromform für Simulatoren zu spezifizieren. Diese Fehlerquelle von ESD-Tests kann nun beseitigt werden.

Literatur

- [1] *Frei, S., Pommerenke, D.:* Wirkung von transienten Feldern auf digitale Systeme, EMV '96, Karlsruhe, 1996, S. 163-170
- [2] *Pommerenke, D.:* ESD: transient fields, arc simulation and rise time limit, Journal of Electrostatics, 36, 1995
- [3] *Daout, B., Ryser, H.:* The Correlation of Rising Slope and Speed of Approach in ESD Tests, 12th International Zurich Symposium on EMC, 1987
- [4] *Renninger, R. G.:* Mechanisms of Charged-Device Electrostatic Discharges, EOS/ESD Symposium, 1991
- [5] *Richman, P.:* Classification of ESD Hand/Metal Current Waves Versus Approach Speed, Voltage, Electrode Geometry and Humidity, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1986, S. 451-460
- [6] *Frei, S.:* Elektrostatische Entladungen (ESD) und ihre Störwirkung auf elektronische Systeme, Dissertation TU-Berlin, Shaker-Verlag, 1999
- [7] *Institut für Meteorologie der FU-Berlin,* Beilage zur Berliner Wetterkarte, Meteorologische Mittel- und Extremwerte für Berlin-Dahlem, 1979
- [8] *Meek J. M., Craggs, J. D.:* Electrical Breakdown of Gases, John Wiley & Sons, 1978
- [9] *Striegel, R.:* Elektrische Stoßfestigkeit, Springer Verlag, 1955
- [10] *Domorod, N. E., Kozharinov, V. V., Khrapovitskii, V. P., Cherenkevich, S. N.:* Influence of the Ambient Humidity on the Characteristics of Electrical Discharges in Short Air Gaps, Sov. Phys. Tech. Phys. 32(2), 1987, 158-160
- [11] *Gosho, Y., Seiki, M.:* Role of Water Vapour in the Breakdown of Atmospheric Air Gap, Gas Discharges and their Applications, Proc. of the 8. Int. Conf., Oxford, 1985, S. 161-162
- [12] *Llewellyn Jones, F., Nicholas, D. J.:* The Theory and Design of an Analyser for Investigating the Electron Emission Characteristics of Surfaces in Gases, Brit. J. Appl. Phys., Vol. 13, 1962, S. 514-520

- [13] *Jobava, R., Karkashadze, D., Zaridze, R., Shubitidze, P., Pommerenke, D., Aidam, M.:* Numerical Calculation of ESD, Electrical Overstress/ Electrostatic Discharge Symposium Proceedings, 1996
- [14] *Jobava, R., Karkashadze, D., Shubitidze, P., Zaridze, R., Bit-Babik, G., Pommerenke, D., Aidam, M.:* Computer Simulation of ESD, International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1997
- [15] *Pommerenke, D.:* Transiente Felder der Elektrostatischen Entladung (ESD), Dissertation TU-Berlin, VDI-Verlag, 1995
- [16] *Greason, W. D.:* Methodology to Simulate Speed of Approach in Electrostatic Discharge (ESD), EOS/ESD Symposium, 1997, S. 125-131
- [17] *Frei, S., Senghaas, M., Jobava, R., Kalkner, W.:* The Influence of Speed of Approach and Humidity on the Intensity of ESD, International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1999
- [18] *Paetow, H.:* Z. Phys. 111, 1939, S. 770