

ESD im Kraftfahrzeugbereich

Dr.-Ing. Stephan Frei, AUDI AG, Ingolstadt

Dipl.-Ing. (FH) Johannes Edenhofer, SiemensVDO Automotive AG, Regensburg

Kurzfassung

Ziel dieses Beitrages ist es, zu zeigen welche Belastungen im Kraftfahrzeugbereich durch ESD auftreten können. Es wird herausgearbeitet, wo die Unterschiede im Kraftfahrzeug zu anderen Umgebungen liegen, und inwieweit diese Unterschiede signifikant sind. Zum besseren Verständnis der Ergebnisse werden in diesem Beitrag auch wichtige Grundlagen zur ESD vermittelt.

Es werden die Ergebnisse von Messreihen zu den die Entladung bestimmenden Parametern (Impedanzen und Ladespannungen) gezeigt. Da der Strom die dominierende Störgröße ist, wurden Messreihen zur Bestimmung des Entladestroms von Menschen durchgeführt. Die Ströme der Entladungen von Menschen werden mit den Entladeströmen von Simulatoren verglichen. Aus den Untersuchungen werden Empfehlungen für die Prüfpraxis abgeleitet.

1 Einleitung

Für die ESD-Prüfung von KFZ-Elektronik gelten einige Besonderheiten. Die Norm ISO TR 10605 versucht, diese Besonderheiten im Vergleich zu „Consumer“- bzw. Industrieelektronik (IEC 1000-4-2) zu berücksichtigen. Dabei wird unter anderem ein gegenüber allen anderen bedeutenden Prüfvorschriften unterschiedlicher Simulatorenbau spezifiziert. Die Aufbauten für die zu prüfenden Systeme unterscheiden sich und die abzuprüfenden Ladespannungen sind höher. Einige Unterschiede sind ohne Frage gerechtfertigt, andere Unterschiede sind schwerer nachvollziehbar.

Wie unten noch näher erläutert wird, lässt sich der ESD-Stromverlauf aus zwei Pulsfunktionen zusammensetzen. Die Unterschiede in der Stromspezifikation betreffen hauptsächlich den zweiten langsamen Puls.

Die Norm ISO CD 10605 beruht im wesentlichen auf Untersuchungen, die bereits über 10 Jahre zurückliegen. Der Kenntnisstand zur ESD hat sich in der Zwischenzeit aber erweitert. Auch die kommende Neufassung wird viele Probleme nicht beseitigen.

Dieser Beitrag liefert einige Grundlagen zur ESD zum besseren Verständnis der Störintensität. Da der erste Puls einer Entladung bereits sehr gründlich untersucht wurde, zum zweiten Puls, der deutlich energiereicher ist, aber nur wenige Ergebnisse vorliegen, liegt der Schwerpunkt in diesem Beitrag auf dem zweiten langsamen Puls. Es werden messtechnische und theoretische Untersuchungen hauptsächlich zu den langsameren Stromkomponenten einer ESD vorgestellt. Ab-

schließend werden Empfehlungen für die Optimierung von Prüfungen gegeben.

2 Grundlagen zur ESD

Wenn es zu scheinbar unerklärlichen Elektronikausfällen oder Systemreaktionen im Feld kommt, wird ESD oft dafür verantwortlich gemacht, denn ESD kann nahezu nie mit absoluter Sicherheit als Störquelle ausgeschlossen werden. Die Prüfpraxis zeigt auch, dass eine Vielzahl von Reaktionen und Ausfällen durch ESD-Prüfungen hervorgerufen werden können. ESD-Prüfungen decken aufgrund der hohen Ströme und Feldstärken, sowie der extremen Bandbreite der Spektren viele Schwachstellen eines Systems auf. Inwieweit aber scheinbar unerklärliche Feldausfälle tatsächlich ESD-Ausfälle sind, ist oft nicht eindeutig zu klären. Die Häufigkeit und Intensitätsverteilung von ESD ist in der Praxis - nicht nur in Kraftfahrzeugen - unbekannt ist. Deshalb erscheint ESD vielen vielleicht als eine besonders rätselhafte Störgröße. Auch bei ESD-Prüfungen zeigen sich oft unerklärliche Systemreaktionen. Die Interpretation der Reaktionen erfordert fundiertes Grundlagenwissen zur ESD. Dieses Wissen ist auch für das Festlegen von individuellen Prüfschwellen erforderlich.

2.1 Ladespannung und Kapazität

Als Ladespannung wird im allgemeinen die Potentialdifferenz zwischen dem entladenden Objekt und dem Entladeziel bezeichnet. Nicht nur Menschen können sich aufladen und entladen. Auch geladene Werkzeu-

ge, Leitungen oder Rollwagen können beispielsweise ESD verursachen. Die Ladespannung bestimmt mit der Gesamtkapazität des entladenden Objekts, die stark von der Geometrie abhängt, die maximal verfügbare Energie einer ESD:

$$W = 1/2 CU^2 \quad (1)$$

Von dieser Energie kommt nur ein Teil im Entladeziel an, da an vielen Stellen Verluste auftreten. Beispielsweise stellt der Lichtbogen, über den der Strom abfließt, einen nichtlinearen Widerstand dar und bildet zusammen mit dem Entladeziel vereinfacht gesehen einen Spannungsteiler.

Bei ESD im KFZ-Bereich ist fast immer Reibung die Ursache für eine Ladungstrennung, die dann die Potentialdifferenz verursacht. Auch Flüssigkeits- und Gasströmungen, die Reibung verursachen, sind zu berücksichtigen. Bei sehr hohen Spannungen entstehen Corona-Entladungen, die dann wieder zu einem Ladungsabbau führen. Auch nimmt die Leitfähigkeit mit höheren Spannungen oft zu. Eigene Messungen haben gezeigt, dass 30 kV kaum überschritten werden können. Auch in der Literatur findet sich dieser Wert oft wieder. Spannungen jenseits von 20 kV sind in der Regel nur noch selten anzutreffen. Niedrigere Spannungen treten deutlich häufiger auf. Genauere Verteilungen der Feldamplituden, die mit den Strömen eng verknüpft sind, finden sich in [1]. Aber auch niedrige Spannungen können aufgrund ihrer oft höheren Strom- und Feldsteilheiten eine größere Störwirkung haben als hohe Spannungen. Dies bestätigen auch Versuche zu Felddausfällen, die durch ESD im KFZ-Bereich verursacht wurden. Die Ausfälle waren nur mit Spannungen unter 10 kV auf dem Labortisch zu reproduzieren.

2.2 Entladeströme der ESD

Die Spannung alleine ist meist unkritisch. Erst der beim Potentialausgleich fließende Entladestrom ist schädigend. Der genaue Stromverlauf hängt von der Ladespannung, den Geometrien, den Material- bzw. Oberflächeneigenschaften und den Eigenschaften des Lichtbogens ab.

In Bild 1 ist dargestellt, wie der Entladestrom eines Menschen aussehen kann. Zunächst entlädt sich die Hand, dies führt zu einem ersten Puls, der „Initial Peak“ genannt wird. Ein zweiter Puls kommt durch die Entladung des gesamten Körpers zustande. Aufgrund der endlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit spielt in den ersten Nanosekunden nur die Hand und der Arm des Menschen bzw. der Lichtbogen eine Rolle. In Abhängigkeit von der Lichtbogenlänge ist nach 100 ps bis einigen Nanosekunden der Lichtbogen vergleichsweise niederohmig und die Hand-

Widerstände können beispielsweise den Stromverlauf dominieren.

Bei ansonsten absolut konstanten Gegebenheiten kann der Lichtbogen zu einer sehr großen Schwankungsbreite des Stromes führen. In Bild 2 ist unter anderem dargestellt, in welchen Bereichen Stromamplitude und maximale Ableitung des ersten Stromanstiegs schwanken können, wenn sich ein Mensch wiederholt entlädt. Bei dieser Versuchsreihe war die Ladespannung und die Entladekonfiguration immer konstant. **Allein die Statistik des Lichtbogens verursacht die Variationen.** Hier spielen statistische Effekte, wie beispielsweise die zufällige freie Elektronenverteilung in der Luft eine entscheidende Rolle.

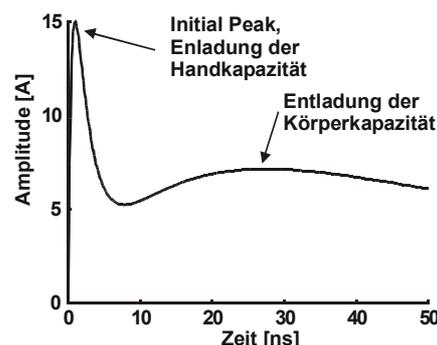


Bild 1 Beispiel für einen Entladestromverlauf

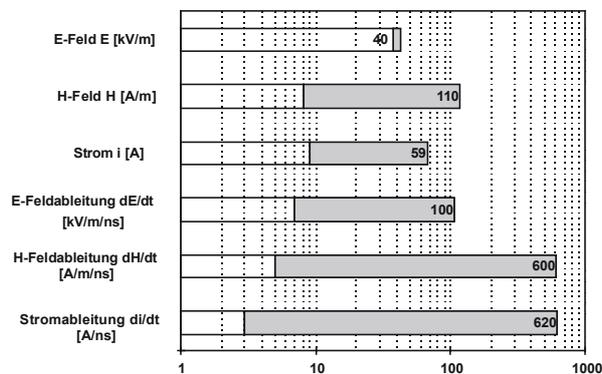


Bild 2 Mögliche Schwankungsbreite der Entladeparameter bei konstanter Entladekonfiguration und Ladespannung

2.3 Ersatzschaltbild einer ESD

Für jedes sich entladende Objekt lässt sich ein Ersatzschaltbild erstellen, das die wesentlichen elektrischen Eigenschaften wiedergibt. Für die Nachbildung des Stromverlaufs eines Menschen kann beispielsweise das in Bild 3 dargestellte Ersatzschaltbild erstellt werden [2]. Für die Widerstände und Kapazitäten lassen

sich keine festen Werte, sondern nur Bereiche angeben. Das Ersatzschaltbild setzt sich aus zwei RLC-Gliedern zusammen. Ein Glied stellt den Entladestrom der Hand-/ Arm-Entladung dar (C_H , R_H , L_H) und das zweite Glied den Entladestrom des restlichen Körpers (C_B , R_B , L_B). Die Kapazitäten des Menschen C_H und C_B hängen von dem Körperbau und der Umgebung ab. Der Lichtbogen und der Handwiderstand R_H bestimmen den Entladewiderstand in den ersten Nanosekunden der Entladung.

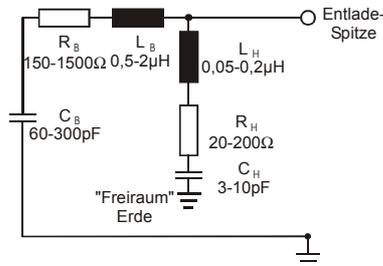


Bild 3 Ersatzschaltbild für die ESD eines Menschen nach [2]

2.4 Felder der ESD

Die Spannung verursacht vor der Entladung ein statisches E-Feld. Zum Zeitpunkt des Durchschlags fließt ein Strom und das statische E-Feld bricht schnell zusammen, was zu einem transienten E-Feld führt. Gleichzeitig entsteht aufgrund des Stromes ein transientes H-Feld. Der genaue Verlauf der Felder hängt von der Geometrie und den Materialien aller stromdurchflossenen Objekte ab. Wie der Strom, hängen auch die Felder von der Statistik des Lichtbogens ab (Bild 2).

Mit einem einfachen Dipolmodell [3] lassen sich aus den Strömen grob die Felder abschätzen. In Bild 4 ist dargestellt, welche Geometrie der Berechnung zugrunde liegt.

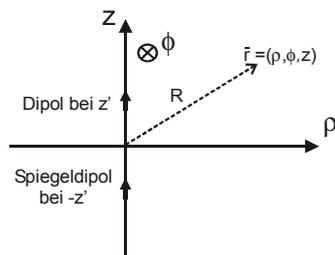


Bild 4 Berechnung der Feldstärke über einen Dipol

Das E-Feld bestimmt sich dann zu:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{e}_\rho dl \frac{Z_0}{2\pi} \frac{\rho z}{R^2} \left[\frac{3}{R^2} i + \frac{1}{cR} \frac{\partial i}{\partial t} \right] + \vec{e}_z dl \frac{Z_0}{2\pi} \left\{ \left[\frac{3z^2}{R^2} - 1 \right] \frac{i}{R^2} + \left[\frac{z^2}{R^2} - 1 \right] \frac{1}{cR} \frac{\partial i}{\partial t} \right\}$$

Das H-Feld lässt sich über die Formel

$$\vec{H}(\vec{r}, t) = \vec{e}_\phi dl \frac{1}{2\pi} \frac{\rho}{R} \left[\frac{1}{R^2} i + \frac{1}{cR} \frac{\partial i}{\partial t} \right]$$

berechnen. R ist hierbei der Abstand vom Aufpunkt zum Lichtbogen, z die Höhe über der leitenden Ebene, dl die äquivalente Länge des Dipols, c die Lichtgeschwindigkeit und Z_0 der Feldwellenwiderstand des freien Raums.

In Tabelle 1 [4] ist exemplarisch für eine Konfiguration dargestellt, welche Größenordnung die Feldstärken eines Menschen in Abhängigkeit vom Abstand erreichen können (Messung). Die maximalen Feldstärken sind in der Nähe der Entladung sehr groß und nehmen dann mit etwa $1/r$ ab [5].

Leider werden die Felder der ESD in der Normung bisher nicht berücksichtigt. Dadurch unterscheiden sich die produzierten Felder verschiedener Generatoren oft erheblich. Dies ist ein weiterer Grund dafür, dass ESD-Prüfungen oft schlecht reproduzierbar sind.

Abstand [m]	Maximales E-Feld [kV/m]	Maximales H-Feld [A/m]
0,1	12,0	26,5
0,2	4,5	8,1
0,3	3,0	5
0,6	1,4	3
0,7	0,95	2,1
0,9	0,6	1,3
1,2	0,4	1,1

Tabelle 1 Amplituden von E- und H-Feld einer ESD gemessen in etwa 10 cm Entfernung vom Lichtbogen (Anstiegszeit ca. 0.8 ns)

2.5 Luft- und Kontaktentladung

Bei der Prüfung gegen ESD wird zwischen Luft- und Kontaktentladungen unterschieden. Bei Kontaktentladungen wird der freie Lichtbogen umgangen. Die Spitze des ESD-Simulators wird mit dem Prüfling in Kontakt gebracht. Die Spitze ist noch nicht geladen, nur der Kondensator im Simulator ist auf die eingestellte Ladespannung aufgeladen. Erst wenn die Spitze mit dem Prüfling verbunden ist, wird ein Vakuumrelais geschlossen und die Spannung des aufgeladenen Kondensators auf die Spitze geschaltet. Das Vakuumrelais kommt einem idealen Schalter sehr nahe. Statistische Effekte des Lichtbogens werden so vermieden. In Bild 5 und in Bild 6 ist dargestellt, wie der Stromverlauf bei einer Anzahl von jeweils 10 Luft- und Kontaktentladungen schwanken kann. Bei Luftentladungen erhält man eine Kurvenschar, während man bei Kontaktentladungen idealerweise nur eine Kurve erhält.

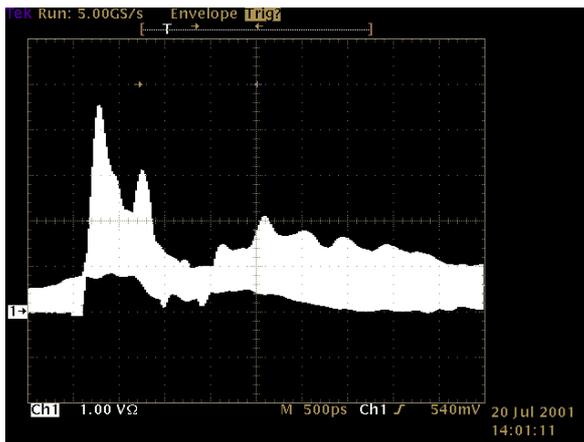


Bild 5 Beispiele für die Schwankungsbreite bei 10 Luftentladungen.

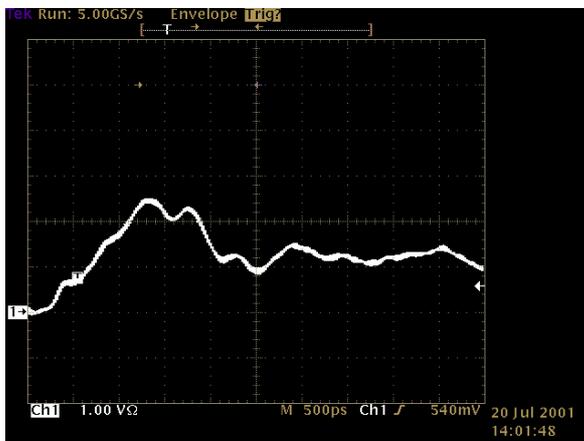


Bild 6 Beispiele für die Schwankungsbreite bei 10 Kontaktentladungen.

2.6 Störintensität der ESD

Die Störintensität von ESD ist ein nur in Verbindung mit einem konkreten System zu definierender Begriff. So wie die Zerstörungsmechanismen auf verschiedenen physikalischen Effekten beruhen können wie:

- thermischer Durchbruch (Energie),
- dielektrischer Durchbruch (Spannung),
- Aufschmelzen von Metallstrukturen (Energie),

so können auch bei den Störmechanismen jeweils verschiedene Parameter der ESD verantwortlich sein:

- Ströme (Anstiegszeit, Pulsbreite, Amplitude, ...),
- Felder (Anstiegszeit, Amplitude, Feldwellenwiderstand, Orientierung der Felder,...),
- Wiederholzeit zwischen Entladungen,

- Zeitpunkt der Entladung (SW-Zyklus, Taktzyklus,...)

Auch beliebige Kombinationen hiervon sind denkbar. Die Störintensität einer ESD nur über die Ladespannung zu definieren, ist in vielen Fällen unvollständig, da wie bereits dargestellt, besonders bei Luftentladungen sehr große Schwankungen möglich sind.

Bei Feldstörungen ist die Entfernung des ESD-Ereignisses zum Einkopplungspfad entscheidend. Dies ist leicht einsichtig, wenn man die Abhängigkeit der E- und H-Feldamplituden mit $1/r^3$ im extremen Nahfeld und $1/r$ im Fernfeld von der Entfernung bedenkt. Da die Entladung in den ersten Nanosekunden sehr niederohmig ist, ist auch das H-Feld im Nahbereich sehr groß, was das Koppelpotential in niederohmige Leiterschleifen auf PCB- oder sogar auf IC-Ebene erheblich erhöht. Gerade im KFZ-Bereich können Teile eines elektronischen Systems nahe (teilweise nur einige mm) an einem möglichen ESD-Ereignis liegen. Um einerseits mögliche ESD-Ausfälle durch indirekte ESD zu erkennen, aber andererseits ein Übertesten zu vermeiden, kann eine Unterscheidung der Verbausituation in

- ESD-exponiert und
- ESD-geschützt

sinnvoll sein. Dabei kann eine Elektronik als ESD-exponiert gelten, wenn sich diese in der unmittelbaren Nähe von einem möglichen ESD-Entladepfad befindet. (z.B. Verstrebungen, Gestänge, Zündschloß, ...). In diesem Fall, das hat die Praxis gezeigt, sind sehr harte Tests notwendig, um in der Praxis die einwandfreie Funktion sicherzustellen.

3 Messtechnik

ESD-Untersuchungen erfordern spezielle Messeinrichtungen. Es müssen sehr hohe Spannungen extrem hochohmig gemessen werden, und es sind sehr schnelle transiente Stromverläufe aufzuzeichnen.

3.1 Ladespannung

Geräte zur Messung der Ladespannung müssen sehr hochohmig sein und einen Messbereich bis etwa 30 kV abdecken. Die hier gemessenen Ladespannungen wurden indirekt über ein statisches E-Feld-Messinstrument gemessen. Über die Messung des Feldes in einem Kondensator kann durch Berechnung oder auch Kalibration mit einer bekannten Hochspannungsquelle die Ladespannung bestimmt werden. Bei allen Messungen ist auf eine sehr gute Isolierung aller spannungsführenden Objekte zu achten.

3.2 Entladestromverläufe

In den allgemeinen ESD-Normen [6] finden sich Verfahren und Aufbauten zur Messung der Entladeströme, die hier gezeigten Untersuchungen verwendete weitestgehend diese Verfahren. Die Messungen wurden mit einem digitalen Speicheroszilloskop der Fa. Tektronix mit einer Samplerate von 10 GS/s aufgenommen. Als Spannungsquelle für die Aufladung wurde ein ESD-Generator verwendet (Bild 7).

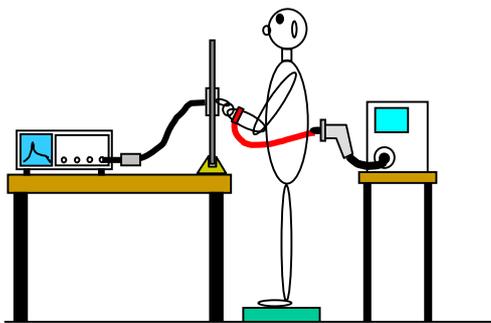


Bild 7 Aufbau für die ESD-Strommessung bei der menschlichen Entladung

Weiterhin wurden ein Stromsensor von D. Pommerenke (University of Missouri-Rolla) [7] und ein „Pelegrini-Target“ eingesetzt. Der Sensor von D. Pommerenke ist bis zu einer oberen Grenzfrequenz von 4 GHz auf 0,75 dB linear.

Der Proband wurde mit einem NoiseKen ESD Simulator hochohmig an der linken Hand mit schnell aufeinander folgenden Pulsen geladen. Um das Abfließen der Ladung zu verhindern, stand der Proband auf einer 1,5 cm dicken Styroporplatte. Die Aufladung des Probanden wurde mit einer Feldmühle an der rechten Hand, mit der auch auf den Stromsensor entladen wurde, überprüft. Ein Abfließen der Ladung war nicht messbar.

3.2.1 Stabilisierung des Lichtbogens durch UV-Licht

Um einen Simulator im Luftentlade-Modus zu kalibrieren ist ein stabiler Lichtbogen notwendig. In [8,1] wurde gezeigt, dass sowohl bei sehr schneller als auch bei sehr langsamer Annäherungsgeschwindigkeit der ESD-Beteiligten die Lichtbogenlänge nahezu keinen Schwankungen unterliegt. Für Kalibrierzwecke ist die schnelle bzw. langsame Annäherung nicht praktikabel. UV-Licht führt zu einer hohen Anfangselektrodenkonzentration und einer Verkürzung der statistischen Streuzeit [1]. Es wurde mit einem NoiseKen-ESD-Simulator gezeigt, dass durch die Bestrahlung der Funkenstrecke mit UV-Licht eine hohe Stabilität des gesamten Entladestromverlaufs erzeugt werden kann. Nachteil des Verfahrens ist es, dass nur maximale

Lichtbogenlängen entstehen. Die Steilheiten und Amplituden dieser Entladungen sind also die minimal möglichen. In Bild 8 ist dargestellt, wie die Entladestromverläufe ohne UV-Licht variieren können. Bild 9 zeigt, wie sich die UV-Bestrahlung auswirkt.

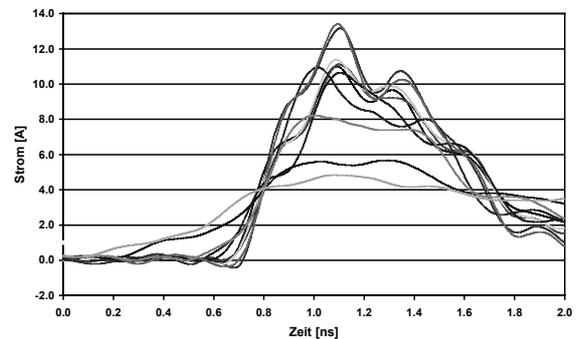


Bild 8 Stromverläufe bei 2 kV ohne UV-Lichtbestrahlung

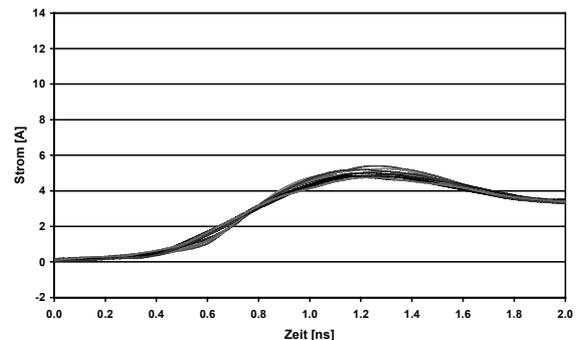


Bild 9 Stromverläufe bei 2 kV mit UV-Lichtbestrahlung

UV-Licht kann also - gezielt eingesetzt - die Lichtbogenstabilität erhöhen.

Durch Versuche mit Ionisatoren im Bereich des Lichtbogens konnte keine Stabilisierung des Stromverlaufs erzielt werden.

3.3 Impedanzen im Frequenzbereich

Nimmt man den menschlichen Körper als ein elektrisch lineares System an, was natürlich nur näherungsweise zutrifft, so kann über eine Messung der komplexen Fußpunktimpedanz im Frequenzbereich ein lineares Ersatzschaltbild erzeugt werden [9]. In Bild 10 ist der Messaufbau dargestellt. Es wurde ein Networkanalyzer der Fa. Rohde & Schwarz, der Messungen bis 8 GHz erlaubt, eingesetzt. Die Messungen ermöglichen es, Unterschiede zwischen Umgebungen und Konfigurationen herauszufinden. Ersatzschaltbilder können bei der Definition von passenden Simula-

torparametern unterstützen. Einflüsse des Lichtbogens werden durch diese Messungen nicht erfasst.

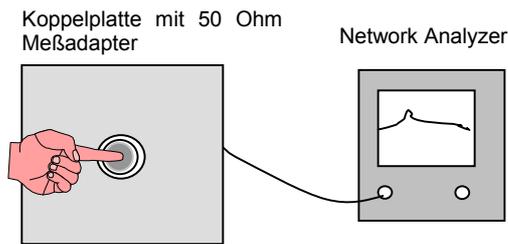


Bild 10 Aufbau zur Messung der Impedanz

4 Vergleich der ESD-Parameter im Kraftfahrzeug mit anderen Umgebungen

4.1 Ladespannungen im Kraftfahrzeug

Die Ladespannungen hängen sehr von der Umgebung (Leitfähigkeit von Materialien, Luftfeuchtigkeit usw.) und den Tätigkeiten (schnelle Bewegungen, viel Reibung usw.) ab.

Die Umgebungen, in denen sich Kraftfahrzeuge befinden können, sind kaum eingrenzbar. Dies gilt auch für die Tätigkeiten, die im Bereich von Fahrzeugen verrichtet werden. Für den KFZ-Bereich gelten also leider keinerlei Einschränkungen. Mit maximalen Ladespannungen bis 30 kV ist in Extremfällen zu rechnen. Eine wesentliche Ursache für Aufladungen in Fahrzeugen ist das Aussteigen aus den Sitzen. Hier reibt die Kleidung intensiv an den Sitzbezügen und es kommt zu deutlichen Aufladungen.

Um festzustellen, in welcher Größenordnung die Ladespannungen beim Aussteigen liegen, wurden Messungen mit verschiedenen Fahrzeugen verschiedener Fabrikate durchgeführt (Bild 11). Die Versuche wurden bei etwa 25% relativer Luftfeuchte und 20° Celsius durchgeführt.

Die Messungen ergaben eine maximale Ladespannung von 12 kV (**Bild 12**). Es ist hier anzumerken, dass nicht bewusst „worst-case“-Verhältnisse erzeugt wurden. Mit anderen Kleidungskombinationen, Probanden oder klimatischen Bedingungen sind durchaus deutlich abweichende Ergebnisse zu erwarten. Maximale Spannungen von 25 kV und mehr sind also durchaus realistisch.

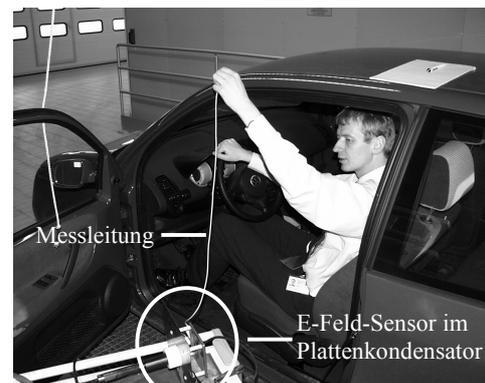


Bild 11 Messung der Ladespannung beim Aussteigen aus einem Fahrzeug

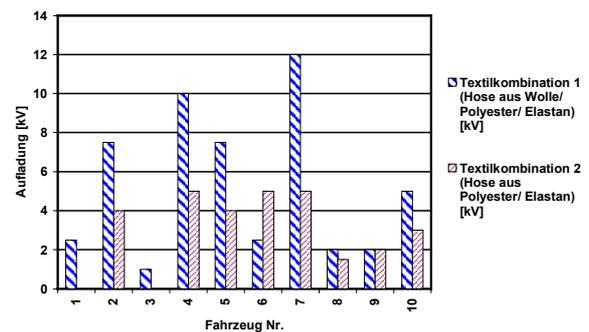


Bild 12 Ladespannungen beim Aussteigen vom Fahrersitz (Fahrzeuge verschiedener Hersteller)

4.2 Messung der Fußpunktimpedanzen

Über die Messung der Fußpunktimpedanz können Unterschiede zwischen verschiedenen Entladekonfigurationen herausgearbeitet werden.

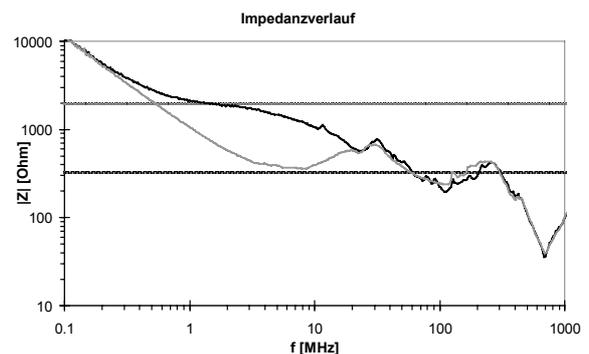


Bild 13 Betrag der Impedanzen, NoiseKen Generator, 150 pF 2000 Ohm (schwarz) und NoiseKen Generator, 150 pF 330 Ohm (grau)

In Bild 13 ist für den „Freiraum“ dargestellt, wie sich die Fußpunktimpedanz über der Frequenz für verschiedene Simulator-Konfigurationen ändert. Nahezu alle Konfigurationen sind bei niedrigen Frequenzen

sehr hochohmig. Die Kapazitäten dominieren hier. Mit steigender Frequenz werden sie deutlich niederohmiger. Ausgeprägte Resonanzen mit niedriger Dämpfung sind nicht zu erkennen.

In Bild 14 ist dargestellt, wie die Impedanzen für eine Kontaktierung des Sensors direkt über die Haut bzw. eine Kontaktierung über ein Metallstück im Fahrzeug in Abhängigkeit von der Frequenz aussehen.

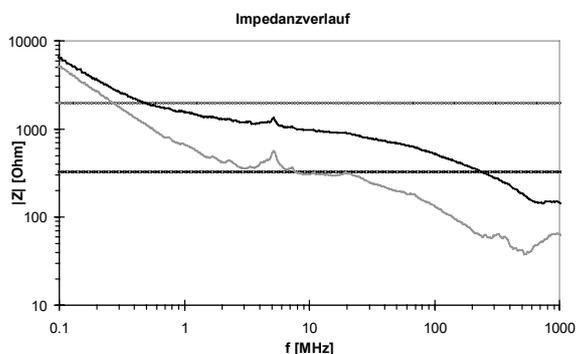


Bild 14 Betrag der Impedanzen, Mensch kontaktiert Sensor über einen Finger (schwarz) und Mensch kontaktiert Sensor über einen runden metallischen Gegenstand (grau); beide Messungen wurden im Fahrzeug aufgenommen

4.3 Identifikation von Parametern

Messergebnisse wie in Bild 13 und Bild 14 dargestellt erlauben Rückschlüsse auf das Ersatzschaltbild einer Entladekonfiguration. In [9] wird vorgeschlagen, für ESD ein Modell aus drei Kondensatoren, zwei Widerständen und einer Übertragungsleitung zu verwenden. Damit wurden verschiedene Konfigurationen untersucht und die entsprechenden Netzwerke identifiziert. Empfehlungen für Simulatoren lassen sich nur schwer ableiten, da der Bezug zum Aufbau eines Simulators kaum herzustellen ist. Das Modell aus Bild 3 ist dafür besser geeignet. R_B und C_B stellen den Simulatorwiderstand bzw. die Simulatorkapazität dar. L_B steht für die Induktivität, die hauptsächlich durch die Erdungsleitung gebildet wird. Die Elemente des „Handkreises“ werden hauptsächlich durch parasitäre Effekte gebildet. Für Bild 3 lässt sich die Impedanz über die folgende Gleichung berechnen:

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{R_B + j\omega L_B + \frac{1}{j\omega C_B}} + \frac{1}{R_H + j\omega L_H + \frac{1}{j\omega C_H}}} \quad (2)$$

Für die Übereinstimmung zwischen dem Entladeobjekt und dem zu identifizierenden Netzwerk muss über alle Frequenzen die folgende Beziehung gelten:

$$Z_{\text{Messung}}(\omega) \approx Z_{\text{Ersatzschaltbild}}(\omega)$$

Durch Bildung des minimalen Fehlerquadrats über einen Nelder-Mead-Simplex-Algorithmus können die Parameter von Gleichung 2 aus den Messwerten bestimmt werden. In Bild 15 ist dargestellt, wie die Absolutwerte einer Messung und eines identifizierten Netzwerks aussehen können. Da der Schwerpunkt der Untersuchungen auf die langsameren Anteile des Stroms gelegt wurde, wurde nur der untere Frequenzbereich zwischen 200 kHz und 10 MHz betrachtet.

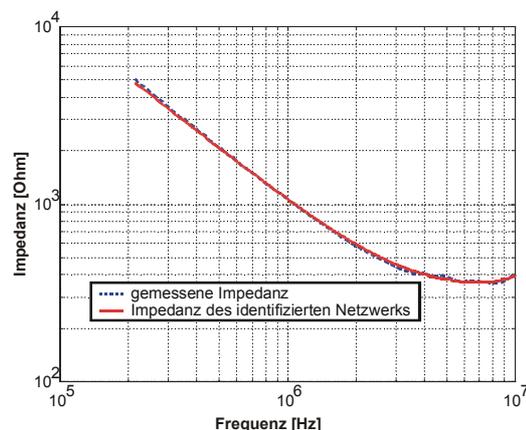


Bild 15 Verlauf des Absolutwerts der Impedanz des identifizierten Netzwerks und des gemessenen Simulators

	R_B [Ω]	C_B [pF]
ESD-Simulator 330 - 150pF Ohm	359	152
ESD-Simulator 2000 - 150pF Ohm	2046	147
Mensch mit Metallspitze im Labor	537	135
Mensch direkter Kontakt (Finger)	1170	122
Mensch mit Metallspitze im Auto	540	232
Mensch direkter Kontakt (Finger über einen dünnen Draht) im Auto	1536	215

Tabelle 2 Identifizierte Parameter R_B und C_B nach Bild 3

Tabelle 2 zeigt die identifizierten Parameter. Die bekannten Simulatorparameter werden sehr gut wiedergegeben. Es zeigt sich:

- Die Widerstände des menschlichen Körpers liegen bei etwa 500 Ohm und sind somit höher als der Simulator-Widerstand von 330 Ohm
- Der Widerstand bei einer direkten Entladung über die Haut oder nur über einen kleinen Draht liegt deutlich höher als 330 Ohm

- Die Kapazität von Personen außerhalb von Fahrzeugen liegt bei etwa 120 bis 140 pF und somit etwas niedriger als die für Simulatoren geforderten 150 pF
- Die Kapazität eines Menschen im Fahrzeug liegt nach den Messungen bei etwa 230 pF (Audi A6) und somit auch niedriger als der in der Norm ISO TR 10605 geforderte Wert. Für sehr kleine Fahrzeuginnenräume scheint aber der Wert von 330 pF erreichbar
- Der Entladewiderstand ist erwartungsgemäß von der Umgebung unabhängig

Die Messungen wurden nur mit wenigen Personen durchgeführt. Es ist sinnvoll, mit vielen verschiedenen Personen und Fahrzeugen diese Messungen zu wiederholen, um die mögliche Schwankungsbreite der Parameter zu bestimmen.

4.4 Messungen und Simulationen der Stromverläufe

Die Stromverläufe verschiedener Konfigurationen wurden gemessen. Der Schwerpunkt lag dabei nicht auf dem ersten, sondern dem zweiten Peak der Entladung, der durch die Körperkapazität und die Körperwiderstände bestimmt wird.

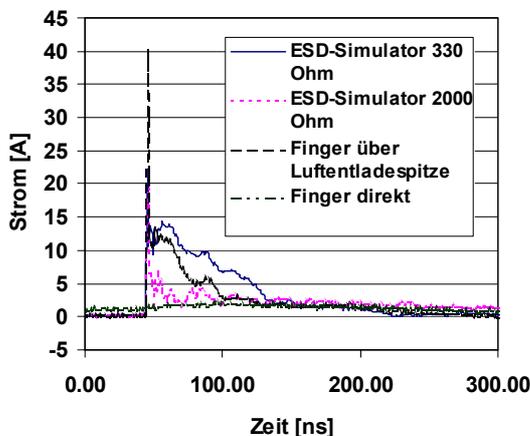


Bild 16 Stromverlauf für verschiedene Entladekonfigurationen bei 6 kV-Ladespannung (Simulatorkapazität 150 pF)

Bild 16 zeigt die Stromverläufe für einen ESD-Simulator (NoiseKen), mit zwei verschiedenen Entladewiderständen, und die Stromverläufe für zwei menschliche Entladungen. Die menschliche Entladung ist einmal über ein Metallstück (Luftentladespitze eines Simulators) und einmal über den Finger direkt erfolgt. Es zeigt sich, dass die Entladung über das Me-

tallstück deutlich heftiger erfolgt als direkt über die Haut. Der zweite Peak des ESD-Simulators liegt in seiner Amplitude über der Amplitude einer menschlichen Entladung über das Metallstück, der erste Peak liegt darunter. Die Ströme bei einer Entladung über die Haut direkt liegen unterhalb aller anderen Ströme. Der Stromverlauf bei Entladung eines Simulators mit einem Entladewiderstand von 2000 Ohm liegt über dem gesamten betrachteten Zeitraum unterhalb des Stroms der menschlichen Entladung über ein Metallstück. Aufgrund des ersten Pulses ist dieser Stromverlauf auch ungeeignet, eine Entladung direkt über die Haut nachzubilden.

Die Messungen im Zeitbereich decken sich sehr gut mit den Ergebnissen aus den Frequenzbereichsuntersuchungen.

Der Einfluss der Entladekapazität wurde durch eine SPICE-Simulation untersucht. Ziel war es, herauszuarbeiten, wie die Kapazität in den Stromverlauf einget. Bild 17 zeigt eine Entladung eines Netzwerks aus Bild 3 für verschiedene Kapazitäten. Es ist zu sehen:

- Eine Entladung mit einem 330 pF Kondensator klingt langsamer ab, als eine Entladung über einen 150 pF Kondensator
- Der Anstiegszeiten des zweiten Pulses werden durch die Kapazität kaum beeinflusst

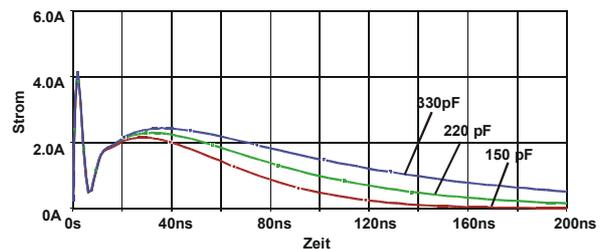


Bild 17 Verlauf des Entladestroms in Abhängigkeit von verschiedenen Körperkapazitäten (Simulationen)

5 Fazit für die Prüfpraxis

Ziel der Untersuchungen war es, die Entladung besser zu verstehen und Daten für die Dimensionierung von Entladenetzwerken zu erhalten. Es zeigt sich, dass Entladungen über ein Metallstück (Werkzeug, Schlüssel, Ring, ...) am kritischsten sind. Diese Entladungen werden in akzeptabler Näherung durch einen IEC-Simulator mit 330 Ohm und 150 pF nachgebildet. Entladungen direkt über die Haut weisen nur geringe Amplituden auf. Der „Initial Peak“ fehlt hier ganz. Es muß basierend auf den Ergebnissen hinterfragt werden, inwieweit ein Entladewiderstand von 2000 Ohm, der einer direkten Entladung über die Haut etwas nä-

her kommt, in Verbindung mit einem „Initial Peak“ physikalisch sinnvoll ist.

Weiterhin stellt sich die Frage, ob eine Unterscheidung zwischen 150 pF und 330 pF im KFZ-Bereich wirklich notwendig ist. Betrachtet man die Energie (Gleichung 1) und fordert, dass diese gleich sein müssen ($1/2C_1U_1^2=1/2C_2U_2^2$), so ergibt sich für verschiedene Kapazitäten das folgende Spannungsverhältnis:

$$\sqrt{\frac{C_1}{C_2}} = \frac{U_2}{U_1}$$

Für ein Kapazitätsverhältnis von $C_1/C_2=150/330$ ergibt sich ein Spannungsverhältnis U_1/U_2 von etwa 1,5. Nimmt man ein Kapazitätsverhältnis C_1/C_2 von 150/220, wie es nach den Fahrzeugmessungen realistischer wäre, an, erhält man nur noch einen Faktor von etwa 1,2. Mit etwa 20% mehr Spannung lässt sich die gleiche Energie einprägen wie mit einem höheren Kapazitätswert.

Es ist in Zukunft also zu überlegen, ob die Unterscheidung zwischen KFZ und andere Bereiche zwangsläufig zu einem weiteren Kapazitätswert führen muss oder ob nicht durch eine geringfügige Spannungserhöhung den etwas anderen Verhältnissen Rechnung getragen werden kann. Betrachtet man die Schwankungsbreite realer Entladungen, so erscheint der Unterschied zwischen einer 150- und 330-pF-Entladung vernachlässigbar.

Da der Entladewiderstand eines Menschen im unteren Frequenzbereich auch höher liegt als 330 Ohm, sind menschliche Entladungen im unteren Frequenzbereich eher schwächer als Simulatorentladungen. Dadurch wird im Freiraum durch einen Simulator mit 330 Ohm und 150 pF bereits eine etwas höhere Störintensität erzeugt als durch einen Menschen. Die Verwendung einer höheren Kapazität im Simulator vergrößert die Abweichungen noch weiter.

Es ist nochmals anzumerken, dass das hier gesagte nur für den langsamen Puls einer Entladung gilt, und nicht grundsätzlich auf für den „Initial Peak“ zutrifft.

6 Zusammenfassung

Nach der Darstellung der wichtigsten Grundlagen der ESD wurden verschiedene Messungen vorgestellt, die hauptsächlich den zweiten Peak, d.h. die Entladung des menschlichen Körpers (nicht die Entladung der Hand), zum Gegenstand hatten.

Es wurde gezeigt, dass durch eine Bestrahlung der Funkenstrecke mit UV-Licht der Lichtbogen stabilisiert werden kann. Dies kann für Kalibrierzwecke sehr hilfreich sein.

Messungen der Impedanzen von Menschen und Simulatoren im Frequenzbereich erlauben es, ein Ersatz-

schaltbild zu bestimmen, das Hinweise gibt, wie das RC-Glied im Simulator dimensioniert werden sollte. Es wurde gezeigt, dass im unteren Frequenzbereich der Mensch, wenn er ein Metallstück fest in den Händen hält, einen Widerstand von etwa 500 Ohm und eine Kapazität von etwa 130 pF besitzt. Ohne Metallstück ist der Widerstand deutlich höher. Diese Ergebnisse wurden auch durch Messungen im Zeitbereich belegt. Ein Widerstand von 2000 Ohm vermag also nicht die störintensiveren ESD-Ströme nachzubilden.

Weiterhin wurde vor dem Hintergrund der Kapazitätserhöhung durch die Autokarosserie untersucht, welchen Einfluss eine veränderte Entladekapazität auf den Stromverlauf haben kann. Es muss kritisch hinterfragt werden, ob ein spezieller Kapazitätswert für KFZ-ESD-Prüfungen notwendig und sinnvoll ist.

7 Literatur

- [1] Frei, Stephan: Elektrostatische Entladungen (ESD) und ihre Störwirkung auf elektronische Systeme, Shaker Verlag, 1999
- [2] Richman, P.: Computer Modeling the Effects of Oscilloscope Bandwidth in ESD Waveforms, Including Arc Oscillations, IEEE International Symposium on EMC, 1985
- [3] Wilson, P. F., Ma, M. T.: Fields radiated from Electrostatic Discharge, IEEE Transactions on EMC, 1991
- [4] Frei, Stephan, Pommerenke, David: An Analysis of the Fields on the Horizontal Coupling Plane in ESD Testing, EOS/ESD Symposium, 1997
- [5] Pommerenke, David: Transiente Felder der Elektrostatischen Entladungen (ESD), VDI-Verlag, 1995
- [6] IEC 61000-4-2: Electromagnetic Compatibility (EM) Part 4: Testing and measurement techniques – Section 2: Electrostatic discharge immunity test, 1995
- [7] Sroka, Jan: Target Influence on the Calibration Uncertainty of ESD Simulators, International Zurich Symposium on EMC, 2001
- [8] Daout, B., Ryser, H., Germond, A., Zweiacker, P.: The Correlation of the Rising Slope and Speed of Approach in ESD Tests, IEEE International Symposium on EMC, 1987
- [9] Pommerenke, David, Aidam, Martin: ESD: waveform calculation, field and current of human and simulator ESD, Journal of Electrostatics 38, 1996