

Kfz-Komponentenprüfverfahren für die Sicherstellung der Systemstörfestigkeit gegen indirekte ESD

Dr.-Ing. Stephan Frei, AUDI AG, Ingolstadt, stephan.frei@audi.de
Dipl.-Ing. (FH) Johannes Edenhofer, SiemensVDO Automotive AG, Regensburg

Abstract

Not only during production process but also after the delivery to the customer electronics is threatened by Electrostatic Discharges (ESD) in the automobile. Development-accompanying tests should guarantee that the risk of an ESD-damage or a disturbance is minimized. In the last years different procedures in the automotive sector for testing against transient fields of ESD were developed. The differences in the degree of severity are not well-known and the efforts for the test laboratories to handle different methods are large. This contribution presents different procedures for the investigation against indirect ESD. The effects of the procedures are analyzed both on the basis of measurements and numerical simulations. Differences are worked out and suggestions are provided for the improvement of the standards.

Kurzfassung

Nicht nur in der Produktion sondern auch nach der Auslieferung an den Kunden ist die Elektronik im Kfz durch Elektrostatische Entladungen (ESD) bedroht. Entwicklungsbegleitende Prüfungen sollen sicherstellen, dass das Risiko eines ESD-Ausfalls oder einer Störung minimiert wird. In den letzten Jahren sind verschiedene Verfahren im Kfz-Bereich für Prüfungen gegen transiente Felder der ESD entstanden. Die Unterschiede in der Prüfschärfe sind unbekannt. Der Aufwand für die Prüflabore ist groß. Dieser Beitrag stellt verschiedene Verfahren für die Untersuchung gegen indirekte ESD vor. Die Wirkungen der Verfahren werden sowohl anhand von Messungen als auch von numerischen Simulationen analysiert. Unterschiede werden herausgearbeitet und Vorschläge für die Verbesserung der Normung gegeben.

1 Einleitung

Neben der Sicherstellung der ESD-Festigkeit in der Kfz-Herstellung ist auch der Nachweis der Festigkeit beim Betrieb des Kfz von großer Bedeutung. Häufig wird dies auch als Sicherstellung der ESD-Systemstör- oder Zerstörfestigkeit bezeichnet. Nicht nur die Entladeströme der ESD können im Betrieb eines Kfz ein Risiko darstellen, auch die dabei entstehenden transienten Felder der ESD können Prozessoren stören oder andere schwerwiegende Fehlfunktionen hervorrufen.

Zur Vermeidung von Kundenproblemen müssen Kfz-Komponenten entwicklungsbegleitend vor dem Verbau im Kfz auf ihre System-ESD-Festigkeit in einer Laborkonfiguration geprüft werden. Grundsätzlich sollen die Laborprüfverfahren nachbilden, was im Kfz im Betrieb beim Kunden maximal an ESD-Belastungen auftreten kann. Hier besteht die Schwierigkeit, dass nicht nur der Mensch eine Quelle für Entladungen sein kann. Auch sich bewegende Teile, Gas- und Flüssigkeitsströmungen im Kfz können unabhängig vom Menschen hohe Aufladungen verursachen und zu Schäden führen. Dennoch ist es allein aus wirtschaftlichen Gründen, um ein Übertesten zu vermeiden, wichtig, die verschiedenen möglichen ESD-Szenarien im Fahrzeug zu betrachten und daraus konkrete Testanforderungen abzuleiten.

Verschiedene Normen und Vorschriften fordern unterschiedliche Laboraufbauten und zum Teil auch zu verwendende ESD-Simulatoren. Bei den gängigen Prüfungen wird meist gegen Ströme und die transienten Felder der ESD geprüft. Während die Variationsmöglichkeiten bei der Strominjektion vergleichsweise recht gering sind, kann bei der Prüfung gegenüber den Feldern der ESD, auch indirekte ESD genannt, eine geringe Modifikation des Aufbaus bereits deutlich andere Ergebnisse hervorrufen. In der IEC-Norm 61000-4-2 [1] für Consumer-Elektronik werden Entladungen in eine horizontale und vertikale Koppelplatte gefordert. Firmenspezifikationen wie die Technische Lieferbedingung des VW-Konzerns oder die EMV-Anforderungen von DaimlerChrysler schreiben indirekte Entladungen mit sehr unterschiedlichen Aufbauten vor. Während die Technische Lieferbedingung von VW eine Anlehnung an die IEC-Norm sucht, beschreitet DaimlerChrysler andere Wege. Hier wird eine Entladung in ein schmales Kupferband gefordert. Die zur Zeit gültige Kfz-Norm ISO 10605 [2] schreibt keinerlei in-

direkte Entladungen vor. In dem Neuentwurf für die ISO 10605-Norm ist eine Anlehnung an die IEC-Norm vorgesehen. Bei SiemensVDO existiert eine weitere spezifische Anforderung. Hier wird eine indirekte Entladung in eine dem Leitungssatz parallel geführte Koppelleitung gefordert.

Neben der Frage der Übertragbarkeit von Prüfergebnissen gibt es aufgrund der verschiedenen Ansätze das Problem, dass die Bereitstellung unterschiedlichster Verfahren für Prüflabore einen erhöhten Aufwand und eine Quelle für Anwendungsfehler darstellt.

In der Literatur finden sich nur wenige Angaben zu den Unterschieden der verschiedenen Verfahren. In [3] wurde der Einfluss der Ausrichtung des Simulators im IEC-Testaufbau untersucht. Es wurde hier gezeigt, dass allein aufgrund einer Änderung der Ausrichtung des Simulators die maximale Feldstärke um mehr als den Faktor 2 variieren kann. Die direkte Abstrahlung (nicht der genormte Stromverlauf) des Simulators ist dafür verantwortlich.

Dieser Beitrag stellt verschiedene Verfahren für die Untersuchung gegenüber indirekter ESD vor. Konfigurationen unterschiedlicher Komplexität werden untersucht. Die Untersuchungen werden sowohl anhand von Messungen als auch von numerischen Simulationen im Frequenz- und Zeitbereich analysiert. Empfehlungen für die Normungspraxis werden abgeleitet.

2 Kfz-Prüfungen gegenüber indirekter ESD

Im Folgenden werden einige im Kfz-Bereich gängige Prüfaufbauten gegen indirekte ESD vorgestellt und diskutiert. Es wird versucht, einen Bezug zu Phänomenen beim Kfz-Endkunden herzustellen und somit die Relevanz zu bewerten. In der Regel werden die indirekten ESD-Prüfungen mit Entladungen im Contact-Mode über ein Hochspannungsrelais durchgeführt, d.h. der Einfluss des Lichtbogens kann vernachlässigt werden. Die Störintensität nimmt linear in Abhängigkeit von der Ladespannung zu.

2.1 Einkopplung über eine horizontale Koppelplatte

Wie bereits erläutert, gibt es in der für den Kfz-Bereich gültigen ESD-Norm keine Vorschrift für eine Prüfung gegen indirekte ESD. In der geplanten Neufassung wird versucht, eine Annäherung an die für den Consumer-Bereich gültige ESD-Norm zu erreichen. In Bild 1 ist der vorgesehene Aufbau dargestellt. Es wird in die Kante einer Metallplatte (HCP, Horizontal Coupling Plane) entladen, um eine zum Prüfling benachbarte Entladung nachzubilden. Neben der Entladung in die Kante mit horizontal orientiertem Simulator wird auch die Entladung in die Platte mit vertikal orientiertem Simulator diskutiert. Hintergrund dieser Prüfung im Kfz-Bereich ist eine Entladung eines Menschen in die Karosserie, die durch die Platte nachgebildet wird. Dieser Fall tritt vergleichsweise häufig auf, die Praxisrelevanz dieser Prüfung ist groß.

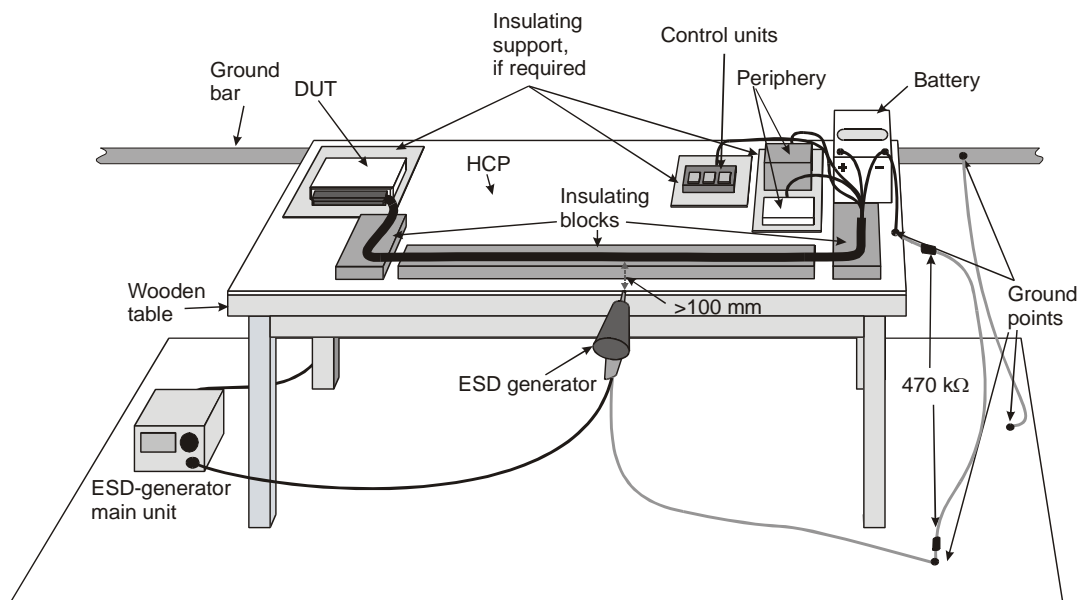


Bild 1 Prüfaufbau mit horizontaler Koppelplatte und typischen Entladeorten

2.2 Einkopplung über eine vertikale Koppelplatte

In der IEC-Norm wird auch die Entladung in eine vertikale Koppelplatte gefordert. Diese Forderung wurde auch in den ISO-Normungsgremien diskutiert. Hintergrund einer solchen Prüfung ist die Nach-

bildung von Entladungen in benachbarte isolierte Metallteile. Ein möglicher Aufbau ist in Bild 2 dargestellt.

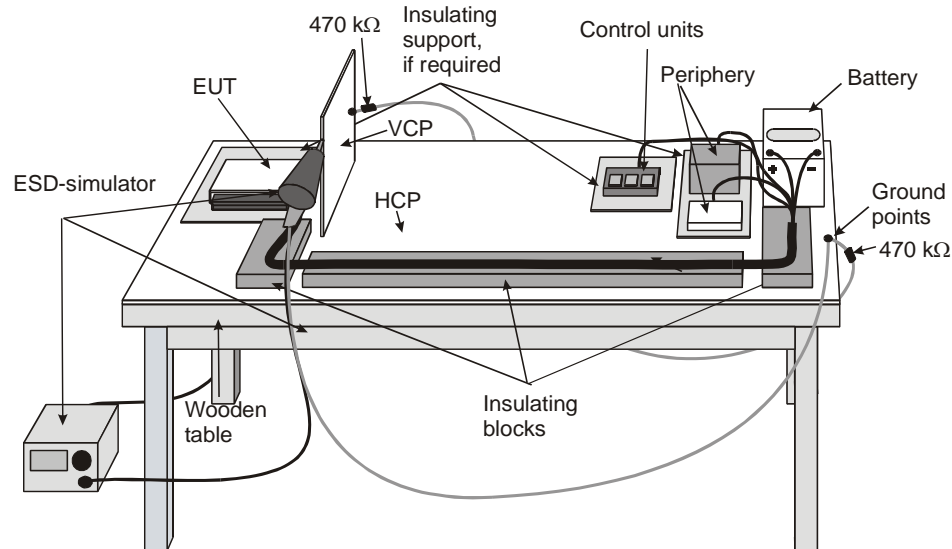


Bild 2 Prüfaufbau mit vertikaler Koppelplatte und typischen Entladeorten

2.3 Einkopplung über eine parallele Leitung

Die Einkopplung von ESD in parallele Leitungen kann nicht ausgeschlossen werden. So ist es möglich, dass sich der Mensch über einen Schalter in eine unkritische oder gut geschützte Leitung entlädt. Dieser Puls kann beispielsweise auf eine parallel im Leitungssatz verlaufende empfindliche Sensorleitung überkoppeln. In Bild 3 ist ein möglicher Aufbau dargestellt.

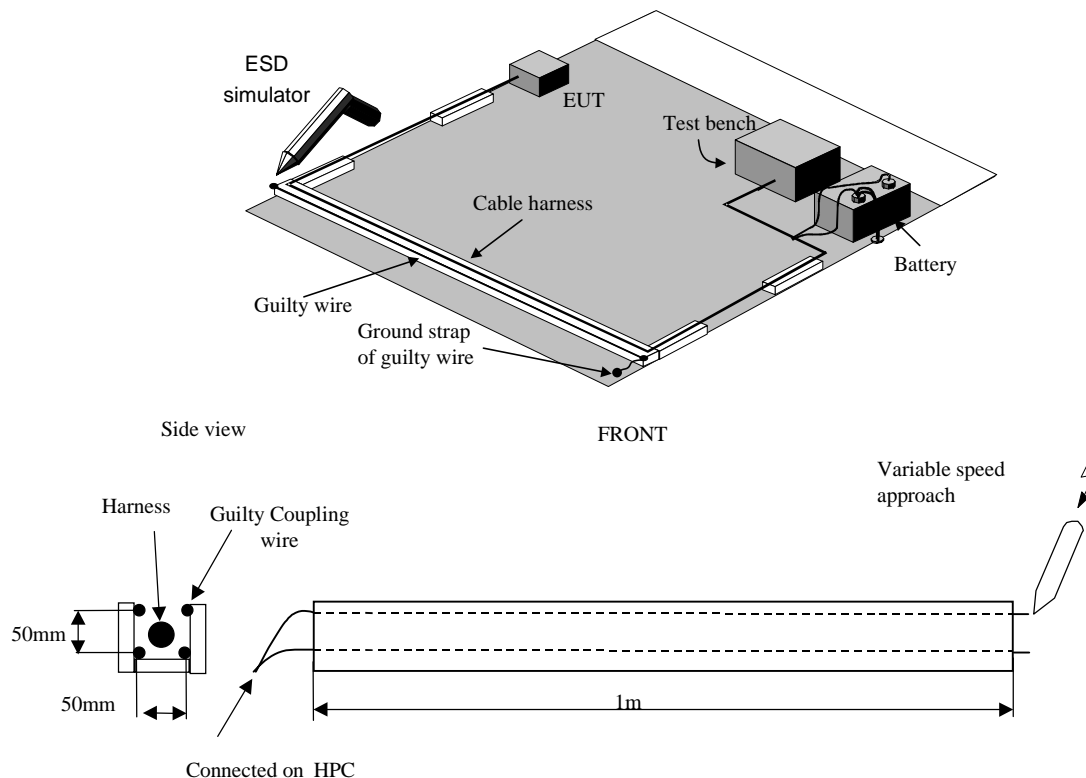


Bild 3 Prüfaufbau für Feldeinkopplung in eine Leitung/ Leitungsbündel über eine parallele Leitung

2.4 Einkopplung in ein Kupferband (A-Säulennachbildung)

Seit kurzem wird ein weiteres Verfahren diskutiert, das die Einkopplung eines ESD-Pulses in die A-Säule eines Fahrzeugs nachbilden soll. Eine Einkopplung in die A-Säule kann kritisch sein, wenn parallel dazu empfindliche Leitungen verlaufen. In der Prüfung wird dies durch die Einkopplung in ein

Kupferband nachgebildet. Verglichen zu den anderen Verfahren stellt das Kupferband sicher eine Sondersituation dar. In Bild 5 und Bild 8 sind Details zu dem Aufbau dargestellt.



Bild 4 Prüfaufbau für Feldeinkopplung in eine Leitung oder ein Leitungsbündel über die A-Säule

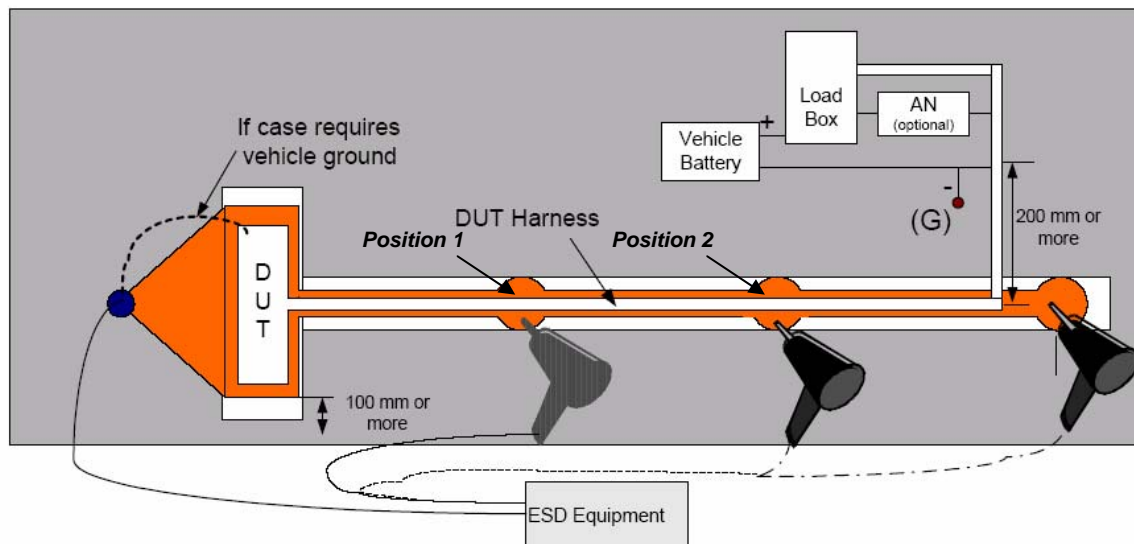


Bild 5 Prüfaufbau für Feldeinkopplung in eine Leitung/ Leitungsbündel über ein Kupferband

2.5 H-Feld-Adapter

Besonders für Analyseuntersuchungen werden spezielle H-Feld-Adapter eingesetzt, die durch die Erzeugung eines niederimpedanten Feldes helfen sollen, Koppelmechanismen zu analysieren. In Bild 6 ist die Einkopplung mit diesem Prüfmittel dargestellt.

2.6 Einfluss der Masseanbindung

Die Masseanbindung eines Prüflings kann eine erhebliche Rolle spielen. Während eine kurze Anbindung am Steuergerät zu einer großen Schleifenfläche führt, ergibt eine im Leitungsbündel mitgeführte Anbindung eine sehr kleine Fläche. In vielen Fällen sind die Ausführung der Verkabelung und die Art der Masseführung von größerer Bedeutung als die Wahl des Einkoppelverfahrens.

3 Verwendete Untersuchungsverfahren

Die hier vorgestellten Untersuchungen wurden mithilfe von Messungen und Simulationen durchgeführt. Der messtechnische Aufbau dient als Referenz. Nach Abgleich der Simulationsmodelle mit den Messdaten wurde für die Untersuchungen das jeweils am schnellsten oder am einfachsten anzuwendende Verfahren gewählt.



Bild 6 Prüfaufbau H-Feld-Adapter

3.1 Messtechnische Untersuchung der Feldeinkopplung

Die Untersuchungen wurden mit einem NoiseKen ESS-2000 ESD-Simulator im Kontaktentlademodus durchgeführt. Der H-Feld-Adapter ist NoiseKen-Originalzubehör. Die Laboraufbauten entsprechen weitestgehend den Forderungen der wichtigen Normen.

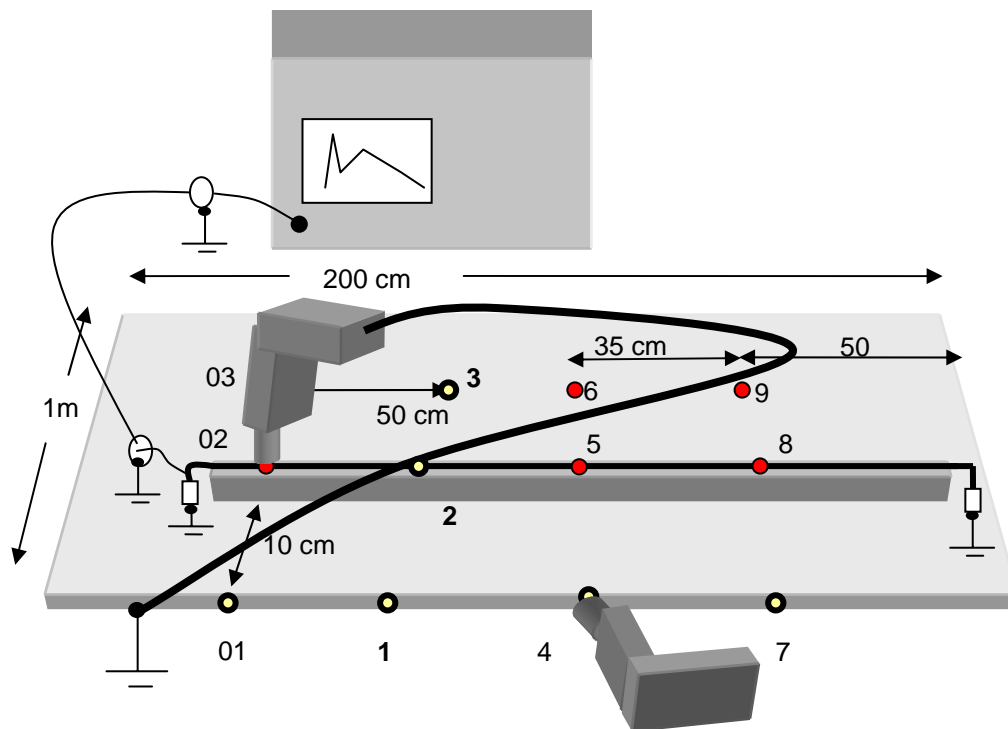


Bild 7 Prüfaufbau auf horizontaler Koppelplatte; Prüfleitung und typische, durch Nummern gekennzeichnete Entladeorte

3.2 Numerische Untersuchung der Feldeinkopplung

Zur numerischen Berechnung der elektromagnetischen Felder von ESD-Simulatoren können verschiedene Verfahren eingesetzt werden. In [4] ist beispielsweise eine genaue Nachbildung eines ESD-Simulators basierend auf der Methode der Finiten Differenzen, FDTD, im Zeitbereich beschrieben. Die FDTD hat den Vorteil, dass Pulse und auch nicht-lineare Vorgänge vergleichsweise einfach beschrieben werden können. Während für das Design eines Simulators ein möglichst präzises Modell für den zu entwerfenden realen Simulator notwendig ist, stand bei den hier durchgeführten Untersuchungen die Verkopplung des Simulators mit benachbarten metallischen Objekten im Vordergrund. Solche Strukturen lassen sich gut mit der Momentenmethode (MoM) berechnen.

3.2.1 Momentenmethode (MoM)

Die Momentenmethode hat sich bei der Berechnung der Abstrahl- und Empfangscharakteristiken von metallischen Strukturen wie Antennen, Kraftfahrzeugen oder Flugzeugen bewährt. Der Vorteil der Momentenmethode ist es, dass nur die metallischen Strukturen mit Dreiecksflächen oder Leitungsegmenten diskretisiert werden müssen. Ausgangsbasis für die Momentenmethode sind die Helmholtz-Gleichungen für das skalare elektrische Potential und das Vektorpotential im schnellveränderlichen elektromagnetischen Feld in einem verlustlosen Medium, wie z.B. Luft. Nach komplexen Umformungen erhält man ein Gleichungssystem, das numerisch gelöst werden kann. Die gängigen Implementierungen der MoM arbeiten im Frequenzbereich. Durch Anwendung der Fourier-Transformation können Probleme wie eine ESD-Entladung im Zeitbereich berechnet werden. Moderne Programme erlauben die schnelle Erstellung von beliebigen Berechnungsmodellen und die komfortable Auswertung der Ergebnisse. Die hier dargestellten Berechnungen wurden mit dem Programmpaket EMC Studio [5] durchgeführt.

3.2.2 Modellierung des ESD-Generators

Die einfachste Beschreibung eines ESD-Generators besteht in der Parallelschaltung zweier RLC-Glieder [6]. Da dieses Modell aber nur den Strom und nicht die Abstrahlung nachbilden kann, ist es ungeeignet für die Untersuchung von Feldeinkopplungen. Hierfür wurde ein einfaches abstrahlfähiges Modell aus Stäben gewählt, damit können die wesentlichen Eigenschaften eines Generators nachgebildet werden. Das Relais bzw. der Lichtbogen wurde durch eine zeitabhängige Spannungsquelle realisiert. In Bild 8 ist das einfache Modell des Simulators mit Masseleitung dargestellt. Bild 9 zeigt Stromverläufe verschiedener Berechnungsmodelle im Vergleich zum normierten IEC-Stromverlauf. Für alle weiteren Untersuchungen wurde das gezeigte MoM-Modell verwendet.

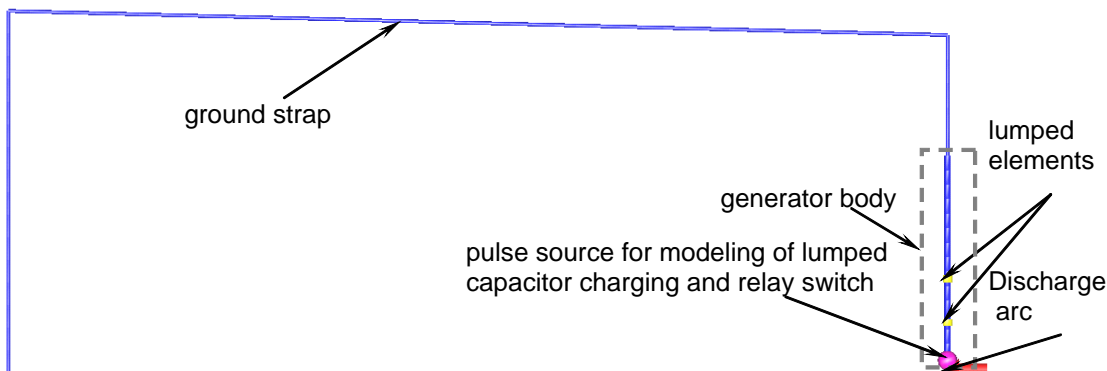


Bild 8 Einfaches ESD-Generatormodell mit Stabelementen und uniformer Stromverteilung

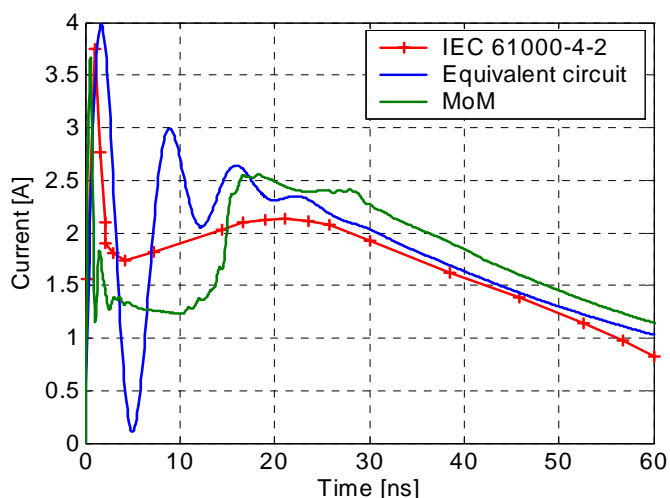


Bild 9 Entladestrom entsprechend der IEC- bzw. ISO-Norm

3.2.3 Modellierung der Testkonfigurationen

Die in Abschnitt 2 diskutierten Modelle wurde auch für die Simulation nachgebildet. In Bild 10 sind zwei Beispiele für verwendete Simulationsmodelle dargestellt. Die Metallplatte wurde aus ideal leitfähigen Dreiecken modelliert. Die Berechnung einer solchen Konfiguration benötigt etwa 3 Stunden. Durch adaptives Frequenz-Sampling wurden jeweils 10.000 äquivalente Frequenzschritte berechnet.

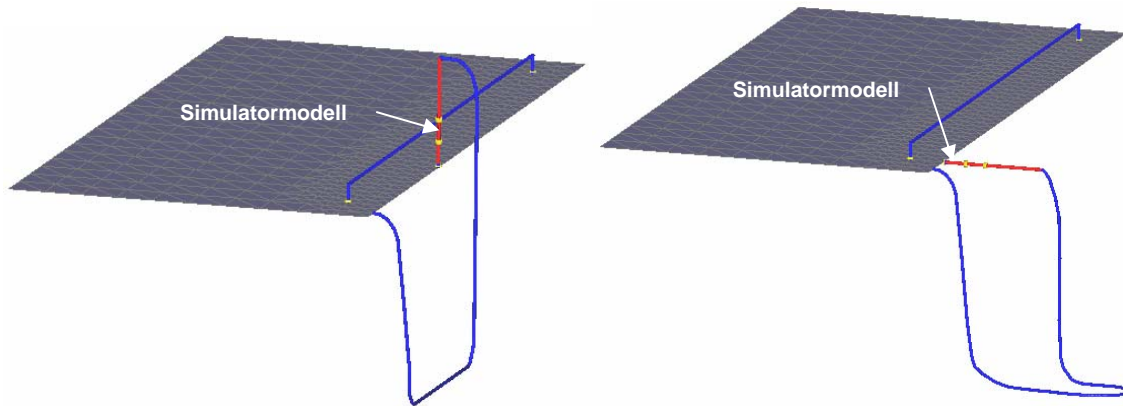


Bild 10 Simulationsmodelle für die Einkopplung in eine Leitung über einer Metallplatte

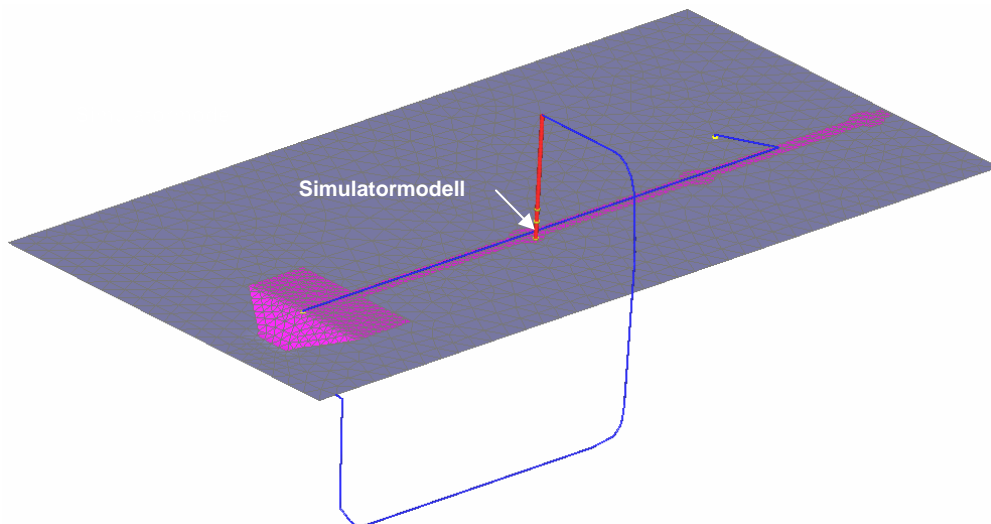


Bild 11 Simulationsmodelle für die Einkopplung in eine Leitung auf einem leitfähigem Band

In Bild 12 und Bild 13 sind exemplarisch die Übereinstimmungen zwischen Simulation und Messung dargestellt.

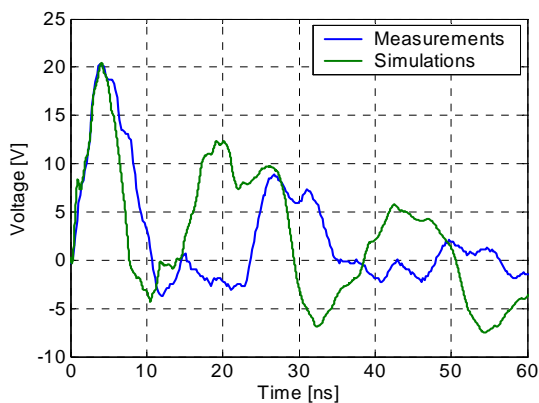


Bild 12 Entladung in die Bandstruktur
(Position 1)

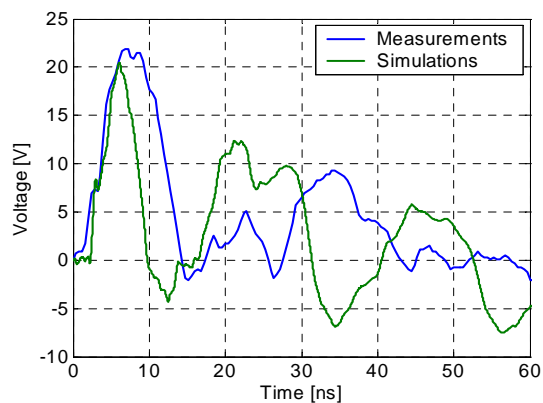


Bild 13 Entladung in die Bandstruktur
(Position 2)

4 Ergebnisse

Alle Messungen wurden mit einer Ladespannung von 1 kV mit einem NoiseKen ESS-2000 ESD-Simulator durchgeführt. Für die Berechnung wurde ein einfaches Stabsimulatormodell verwendet. Das Entladnetzwerk hatte eine Kapazität von 150 pF und einen Widerstand von 330 Ohm. Einkoppelt wurde in eine nicht-isolierte Leitung mit einem Querschnitt von $0,45\text{mm}^2$ und einer Länge von ca. 1,8m. Die Höhe der Leitung über Masse betrug mit Ausnahme der Einkopplung in das Band 50 mm. Bei der Einkopplung in das Kupferband betrug die Höhe ca. 5 mm.

Alle Ergebnisse können aufgrund der Linearität der Kontaktentladung leicht auf andere Ladespannungen übertragen werden.

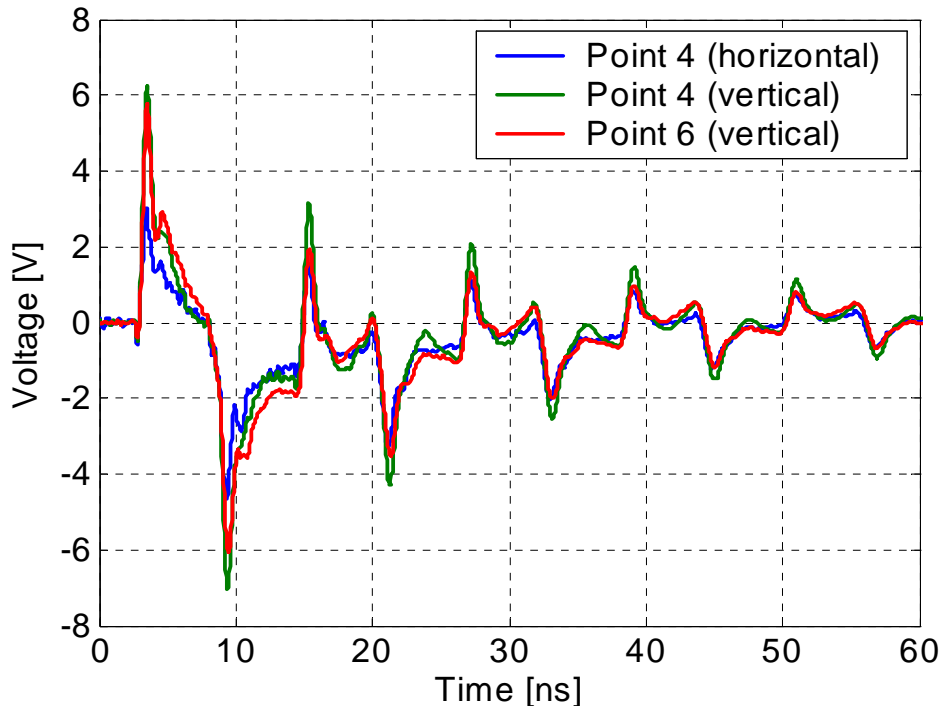


Bild 14 Vergleich verschiedener Entladeorte und Ausrichtungen des ESD-Simulators (Simulation)

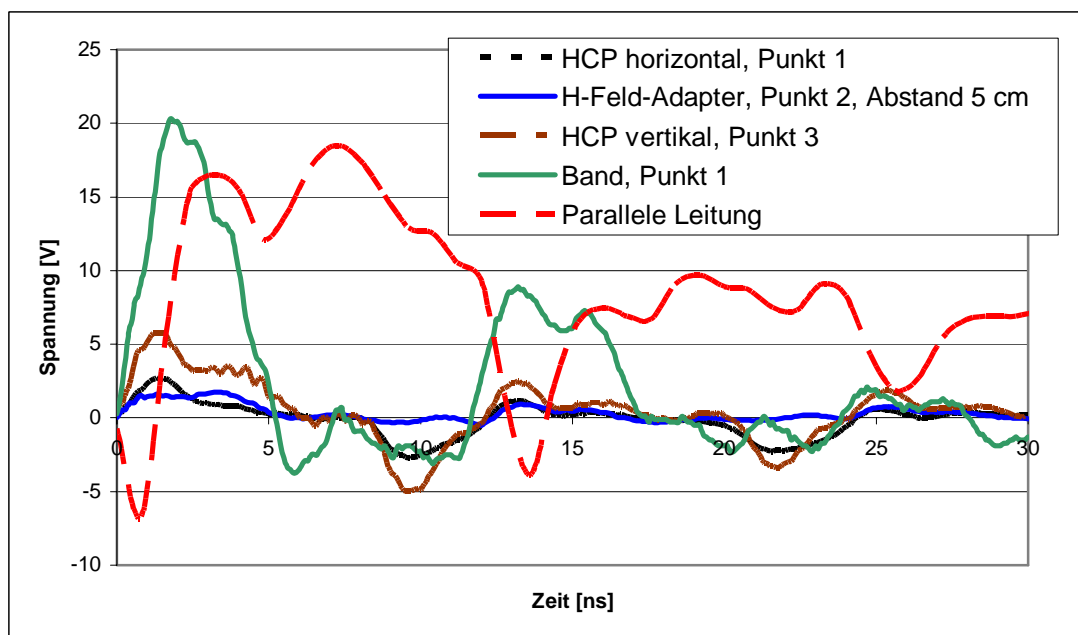


Bild 15 Vergleich verschiedener Entlademodi und Ausrichtungen des ESD-Simulators (Messung)

In Bild 14 und Bild 15 ist dargestellt, wie in Abhängigkeit von der Einkoppelart das Ergebnis variieren kann. Die Kopplung mit einer parallelen Leitung und mit dem Band ist am stärksten. Während der Puls durch das Band vergleichsweise kurz ist, wird über die parallele Leitung ein relativ langer Puls erzeugt. Die Kopplung mit dem vertikalen ESD-Simulator auf der HCP ist um etwa ein Drittel schwächer als die Band- oder Leitungskopplung. Durch die vertikale Position des ESD-Simulators reduziert sich die Amplitude nochmals um die Hälfte. Auch die Einkopplung durch den H-Feld-Adapter ist relativ gering.

In Bild 16 ist die Abhängigkeit der Pulsform von dem Entladeort dargestellt. Aufgrund der homogenen Leitung ist der Einfluss des Entladeorts nur sehr gering. Deutliche Verschiebungen der nachfolgenden Pulse sind aber feststellbar.

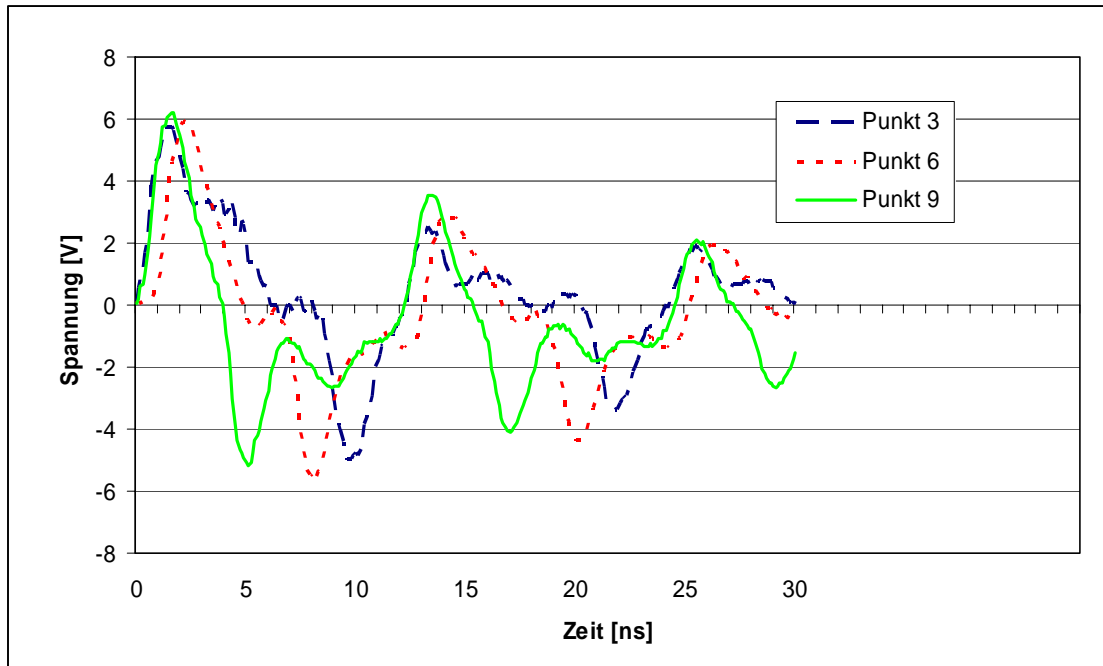


Bild 16 Vergleich verschiedener Entladeorte (Messung)

5 Fazit für die Prüfpraxis und Empfehlung für die Normung

Verschiedene Verfahren wurden untersucht und für eine ausgewählte Koppelstruktur wurden die eingekoppelten Spannungen gemessen und simuliert. In Tabelle 1 sind die wesentlichen Unterschiede qualitativ gegenübergestellt. Es wird deutlich, dass die Entladung in eine Bandstruktur und eine parallele Leitung eine deutlich höhere Störspannung verursachen kann im Vergleich zu einer Entladung in eine Koppelplatte. Bei der parallelen Leitung wird noch am meisten von dem langsamen Anteil des Normpulses eingekoppelt. Dies ist auf die Konzentration des Entladestroms auf der räumlich begrenzten Struktur zurückzuführen. Alle Verfahren haben ihre Berechtigung und Anwendungsfälle. Für die Normenarbeit in der Zukunft ist wichtig, die Relevanz der Anwendungsfälle zu bewerten und die dazugehörigen Prüfverfahren verbindlich festzuschreiben.

Verfahren	Störintensität	Praxisrelevanz	Fehlertoleranz	Bemerkung
Horizontale Koppelplatte (horizontale Ausrichtung des Simulators)	gering	hoch	hoch	(derzeit IEC-Norm)
Horizontale Koppelplatte (vertikale Ausrichtung des Simulators)	mittel	hoch	niedrig	
Vertikale Koppelplatte	gering	hoch	mittel	(derzeit IEC-Norm)
Parallele Leitung	hoch	hoch	hoch	
Bandstruktur	hoch	mittel	mittel	

Tabelle 1: Vergleich der Verfahren

6 Literatur

- [1] IEC 61000-4-2: Electromagnetic Compatibility (EM) Part 4: Testing and measurement techniques – Section 2: Electrostatic discharge immunity test, 1995
- [2] ISO 10605: Road vehicles - Electrical disturbances from electrostatic discharges
- [3] Frei, S.; Pommerenke, D., An Analysis Of The Fields On The Horizontal Coupling Plane In ESD Testing, D.; Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium Proceedings, 1997
- [4] Kai Wang; Pommerenke, D.; Chundru, R.; Van Doren, T.; Drewniak, J.L.; Shashindranath, A.; Numerical modeling of electrostatic discharge generators; Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on, Volume 45, Issue 2, May 2003
- [5] EMC Studio Version 2.9, User Manual, www.emcos.com
- [6] Frei, S.; Edenhofer, J., ESD im Fahrzeugbereich; ESD-Forum, 2003