

Effiziente Methode zur Simulation von elektrostatischen Entladungen in verzweigten Leitungsanordnungen mithilfe von modalen Netzwerken

M.Sc. Christoph Lange, IAV GmbH, DE,
 Dr.-Ing. Oussama Sassi, VW AG, DE
 Dr.-Ing. Andreas Mantzke, IAV GmbH, DE,
 Dr.-Ing. David Hamann, IAV GmbH, DE,
 Dr.-Ing. Martin Obholz, VW AG, DE

1 Einleitung

Elektrostatische Entladungen (ESD) können aufgrund der hohen Spannungsamplituden zum Ausfall oder zur Beschädigung von elektronischen Komponenten führen. Durch die schnelle Anstiegszeit und die Berücksichtigung von nichtlinearen Bauelementen, z.B. ESD-Dioden, ist die exakte Simulation von ESD-Impulsen in komplexen Systemen eine große Herausforderung für aktuelle Simulationssoftware. Ein netzwerkbasierter Ansatz bietet im Gegensatz zur 3D-Simulation, bzw. Einrichtung eines Messaufbaus, die Möglichkeit effiziente Berechnungen mit hinreichender Genauigkeit durchzuführen und somit die Auslegung von ESD-Entstörmaßnahmen massiv zu beschleunigen. In dieser Arbeit wird gezeigt, wie ein Netzwerkmodell zur Modellierung von Kontakt-ESD-Ereignissen in verteilten Mehrfachleitungsnetzwerken aufgestellt wird und damit Berechnungen mit nichtlinearen Abschlüssen und Auswertungen zu Änderungen in der Leitungstopologie durchgeführt. Solche Leitungsanordnungen sind beispielsweise als Versorgungs- oder Kommunikationsleitungen als Teil des Bordnetzes in einem Kraftfahrzeug (KFZ) zu finden. Zunächst werden die Bestandteile des Netzwerkmodells eines ESD-Generators diskutiert. Anschließend wird ein modales Netzwerkmodell zur Beschreibung der Mehrfachleitungen aufgestellt. Anhand eines Messaufbaus werden die Ergebnisse aus dem Schaltungsmodell mit Ergebnissen aus einem 3D-Simulationsmodell und den gemessenen Werten verglichen. Abschließend wird an zwei Beispielen die vielseitige Anwendbarkeit der vorgestellten Methode demonstriert.

2 Modellierung des ESD-Generators

Es existieren zahlreiche Modelle in der Literatur, mit deren Hilfe ein ESD-Impuls auf Schaltungsebene erzeugt werden kann. Die Autoren haben in diesem Fall das Modell aus [1] als Ausgangsbasis gewählt (siehe Abbildung 1). Hierbei sind C_1 und R_1 das Entladenetzwerk, wobei C_1 auf die Prüfspannung vorgeladen ist. Der Entladevorgang wird durch das Schaltnetzwerk,

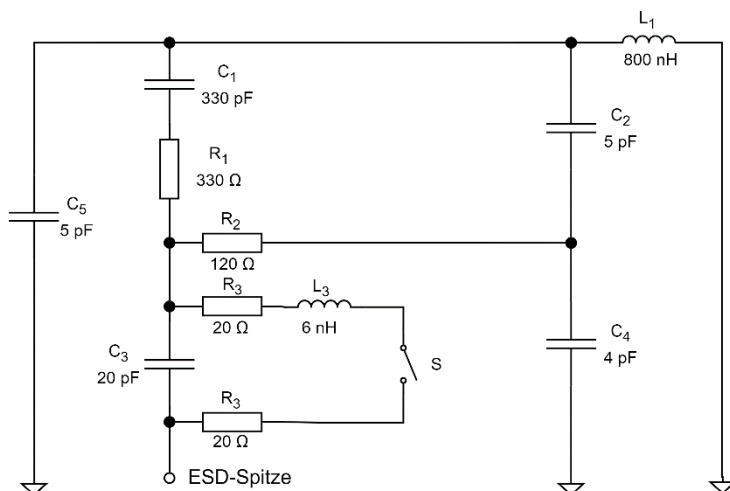


Abbildung 1: Angepasste Topologie des Generators nach [1]

welches aus C_3 , R_3 , L_3 und einem Schalter besteht, ausgelöst. Die Kapazitäten C_2 , C_4 , und C_5 sind Parasitärelemente, die sich aus unterschiedlichen Gehäuseteilen, bzw. der Massefläche ergeben. Das Erdungskabel der ESD-Pistole wird mit L_1 berücksichtigt. Da die Parasitärelemente C_4 , und C_5 und die Induktivität des Erdungskabels immer vom Messaufbau abhängen, wurde zur Bestimmung dieser Werte für einen konkreten Anwendungsfall ein 3D-Simulationsmodell (Abbildung 2) aufgestellt. Dieses Modell basiert

auf der Schaltungstopologie des Netzwerkmodells und ermöglicht über Ports die Anpassung des Entlade- und Schaltnetzwerkes und über konzentrierte Schaltungselemente (*engl.* lumped elements) die Anpassung der internen parasitären Kapazitäten. Zur Validierung dieses Modells wurde $C_1 = 330 \text{ pF}$ und $R_1 = 330 \text{ }\Omega$ gewählt und der in der Norm [8] beschriebene Kalibrieraufbau digital nachgestellt. Hierbei konnte gezeigt werden, dass mit den in Abbildung 1 dargestellten Schaltelementwerten der im $2 \text{ }\Omega$ Kalibrierwiderstand fließende Strom die durch die IEC 61000-4-2 vorgegebenen Toleranzen für Maximalstrom und Stromamplitude nach $t_1 = 65 \text{ ns}$ und $t_2 = 130 \text{ ns}$ einhält. Daraus folgt, dass der durch die Simulation bestimmte im Kalibrierwiderstand fließende Strom mit dem tatsächlich fließenden Strom eines realen Aufbaus vergleichbar ist.

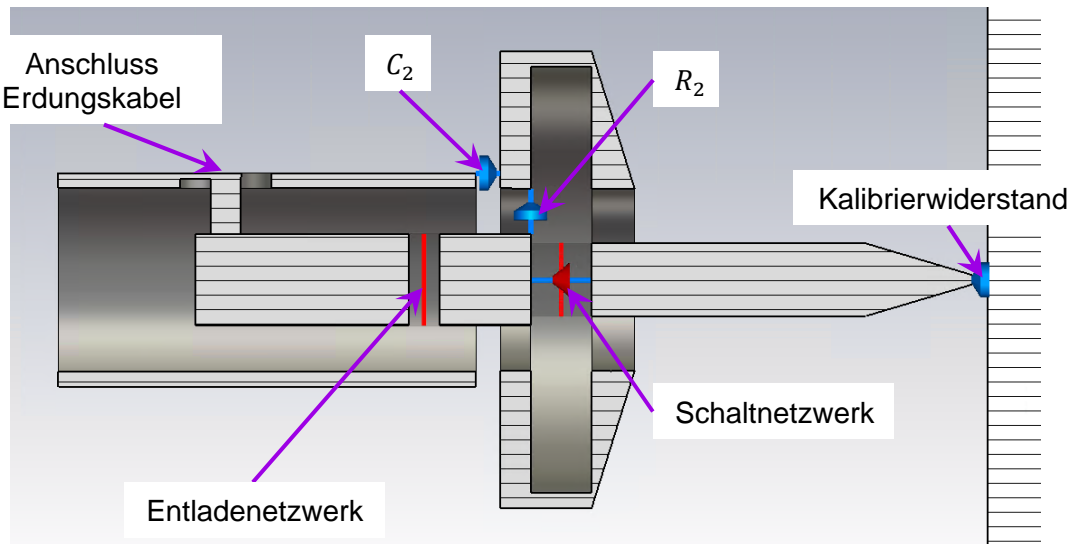


Abbildung 2: Schnittbild des 3D-Modells des ESD-Generators

3 Leitungsmodellierung per Foster-ESB

Bordnetze in Kraftfahrzeugen, besonders in Bezug auf den Niedervoltbereich, sind für eine hinreichende Betrachtung der Störfestigkeit gegenüber ESD-Pulsen als Netz aus Mehr- und Einfachleitungen anzusehen. Dabei lassen sich die Leitungen schematisch wie in Abbildung 3 darstellen, wobei die Leitungsbeläge R', L', G', C' für Mehrfachleitungen (MTLs) in Matrizenform gegeben sind.

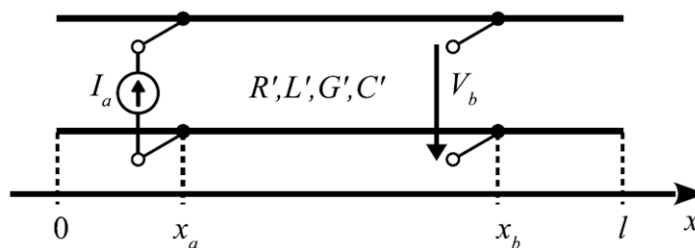


Abbildung 3: Einfachleitung mit Quell- und Aufpunkt bei x_a bzw. x_b

Für eine möglichst effiziente Modellierung werden sämtliche Leitungen durch Ersatzschaltbilder (ESB) abgebildet. Eine Berücksichtigung in Form eines 3D-Vollwellenmodells ist nicht zu empfehlen, da sich die Durchlaufzeit der Simulation in diesem Fall dramatisch erhöht. Die Modellierung als Ersatzschaltbild erlaubt außerdem, unter Einhaltung der zugehörigen Konventionen, die Simulation mittels eines generischen SPICE-Solvers (bspw. LTSpice [7]). Grundsätzlich kann im Rahmen der Modellierung ausgenutzt werden, dass der Aufbau eines Bordnetzes in erster Näherung wohl definiert und daher als Verschaltung gleichförmiger Mehr- und Einfachleitungen interpretierbar ist. D.h. das Bordnetz wird in Abschnitte unterteilt, deren

Leitungsbeläge als ortsunabhängig angesehen werden können, sodass die jeweilige Leitung durch ihre Beläge, die Leitungslänge sowie die Portpositionen vollständig beschrieben ist. Die Güte des angestrebten Gesamtmodells aus ESD-Pistole, Bordnetz und Abschlusslasten korrespondiert direkt mit der Güte der verwendeten Leitungsmodelle, da diese den Hauptteil der passiven Strukturen darstellen. Um eine möglichst hohe Güte zu gewährleisten, haben sich die Autoren daher für ein modales Leitungersatzschaltbild entschieden, das in der jüngeren Vergangenheit entwickelt wurde [2,4] und vor kurzem auf beliebige Strukturen erweitert wurde [6],

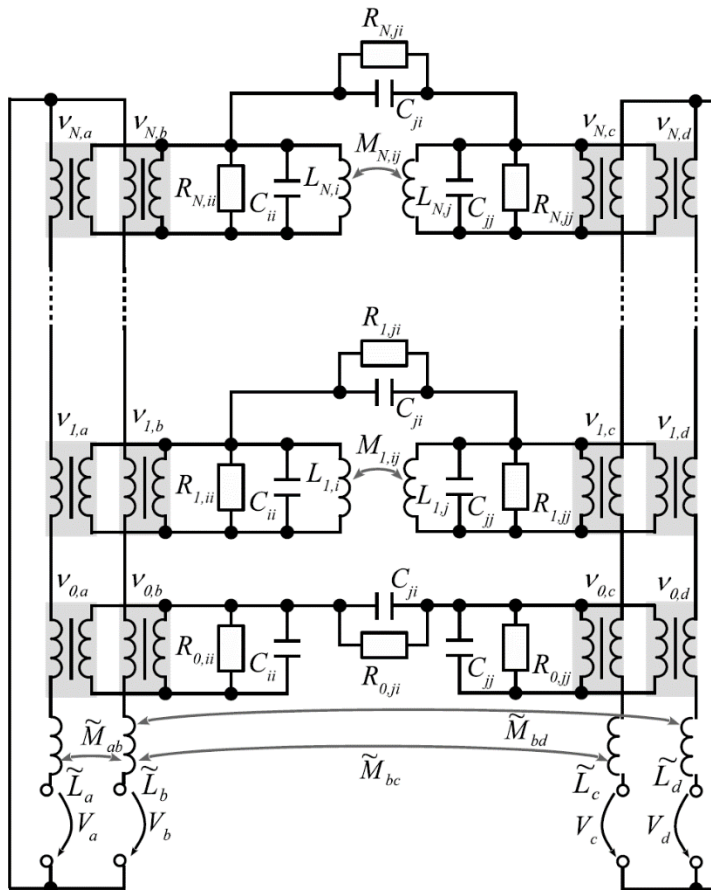


Abbildung 4: Modales Netzwerkmodell für uniforme Mehrfachleitungen [2]

womit sogar ein Bordnetz berücksichtigt werden kann, das vorwiegend aus inhomogenen Leitungen besteht. Wie der zugrunde liegenden Literatur für uniforme MTLs entnommen werden kann [2], handelt es sich um ein Foster-Ersatzschaltbild zweiter Art, also um eine Reihenschaltung von Parallelschwingkreisen. Das Modell ist aufgrund seiner Struktur inhärent stabil, effizient und sowohl für die Nutzung im Frequenz- und Zeitbereich geeignet. Da über den modalen Ansatz außerdem frequenzabhängige Verluste mit einfachen Mitteln berücksichtigt werden können, ist diese Netzwerkstruktur ideal für das vorliegende Modellierungsproblem geeignet. Eine exemplarische Netzwerkstruktur, wie sie in [2] hergeleitet ist, ist in Abbildung 4 dargestellt.

4 Messtechnische Validierung

Zur Validierung des dargestellten Modellansatzes für die ESD-Pistole in Kombination mit einer bordnetzartigen Struktur, wurde ein

Messsetup umgesetzt, das anstelle eines komplexen, realen Kabelbaums eine vereinfachte Netzstruktur, wie in Abbildung 5 dargestellt, verwendet. Das Setup besteht aus einer zwei Meter langen Leitung, an deren Beginn über die ESD-Pistole ein Puls eingepreßt wird, und an deren Ende sich ein 47Ω Lastwiderstand befindet. Diese Zweidrahtleitung soll eine dezidierte Versorgungs- und Masseleitung zwischen zwei Teilnehmern eines Bordnetzes darstellen. Die Leitung ist 5 cm über einer Massefläche angeordnet, wobei die Masseleitung 80 cm hinter der Einspeisestelle über eine Stichleitung mit der Masseebene verbunden ist.

Konkret berücksichtigt werden muss ebenfalls das Erdungskabel der ESD-Pistole, das direkt auf der Masseebene fixiert wurde und daher trotz schleifenförmiger Verlegung als zwei Meter lange Leitung mit konstantem Querschnitt genähert werden kann. Dies erlaubt die Modellierung des Erdungskabels über ein Foster-ESB für Einfachleitungen [4]. Bedingt durch die Handhabung der ESD-Pistole, ergibt sich am Übergang von Erdungskabel zu Pistolen eine zusätzliche Halbschleife gegenüber Masseebene, die aber nicht wohl definiert ist. Die Autoren haben ihren Einfluss durch eine Induktivität von 800 nH berücksichtigt, was der Größenordnung für Induktivitäten vergleichbarer Anordnungen entspricht. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass diese Abschätzung eine Unschärfe darstellt, die beim Aufstellen eines Netzwerkmodells eines realen Aufbaus mit ESD-Pistole immer gegeben ist.

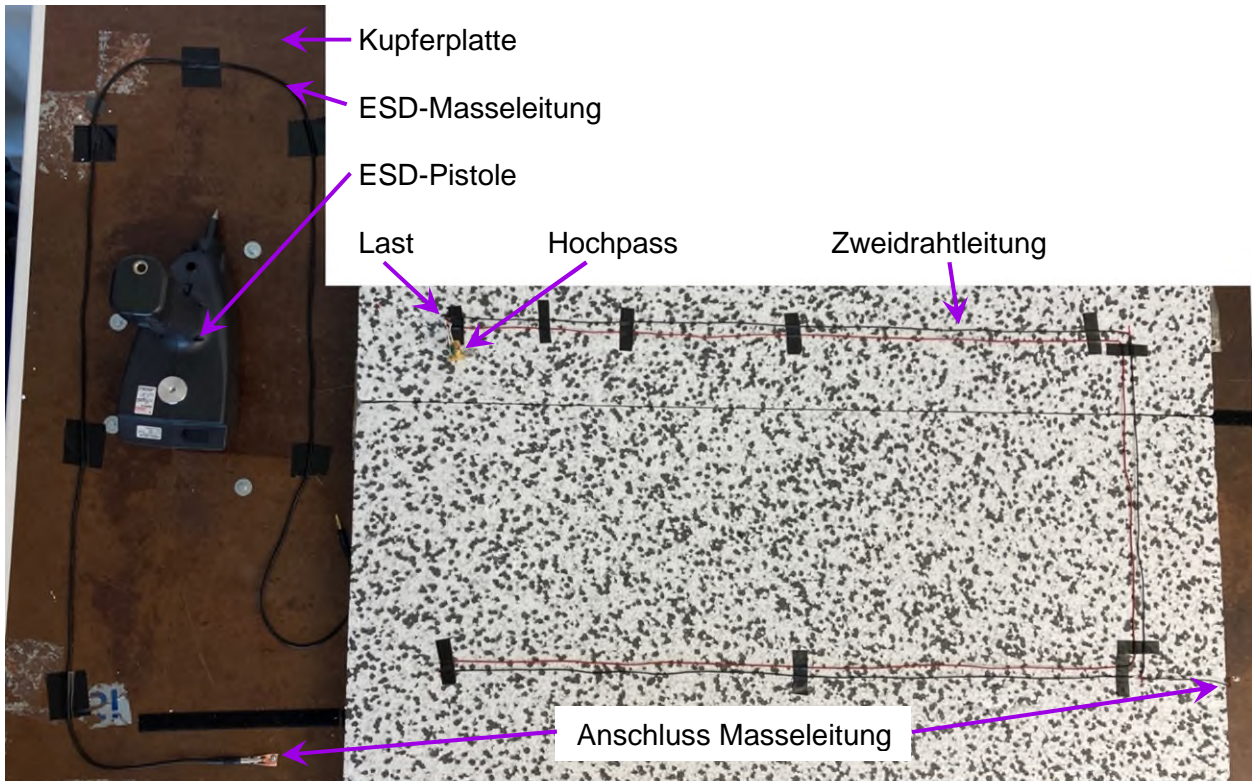


Abbildung 5: Draufsicht des Messaufbaus mit ESD-Pistole und Zweidrahtleitung mit Masseanschlag und Lastwiderstand mit angeschlossenem Hochpass

Als Zielgröße zum Vergleich mit der 3D- und Schaltungssimulation wird der Spannungsverlauf an der 47Ω Last festgelegt und mit einem Oszilloskop gemessen. Um zu verhindern, dass dessen 50Ω Eingang durch den ESD-Puls zerstört wird, wurde ein prototypischer Hochpassfilter genutzt, der zudem den Übergang von zwei diskreten Leitern auf eine SMA-Buchse realisiert. Für die korrekte Berücksichtigung des Filterverhaltens im Netzwerkmodell wurde das Filter mittels Netzwerkanalysator vermessen und per Vector-Fitting basierendem Algorithmus in eine äquivalente Netzliste für die Spice-Simulation überführt. Analog zu den anderen Leitungen im Setup, wurde auch die koaxiale 50Ω Messleitung des Oszilloskops im Netzwerkmodell durch ein Foster-ESB

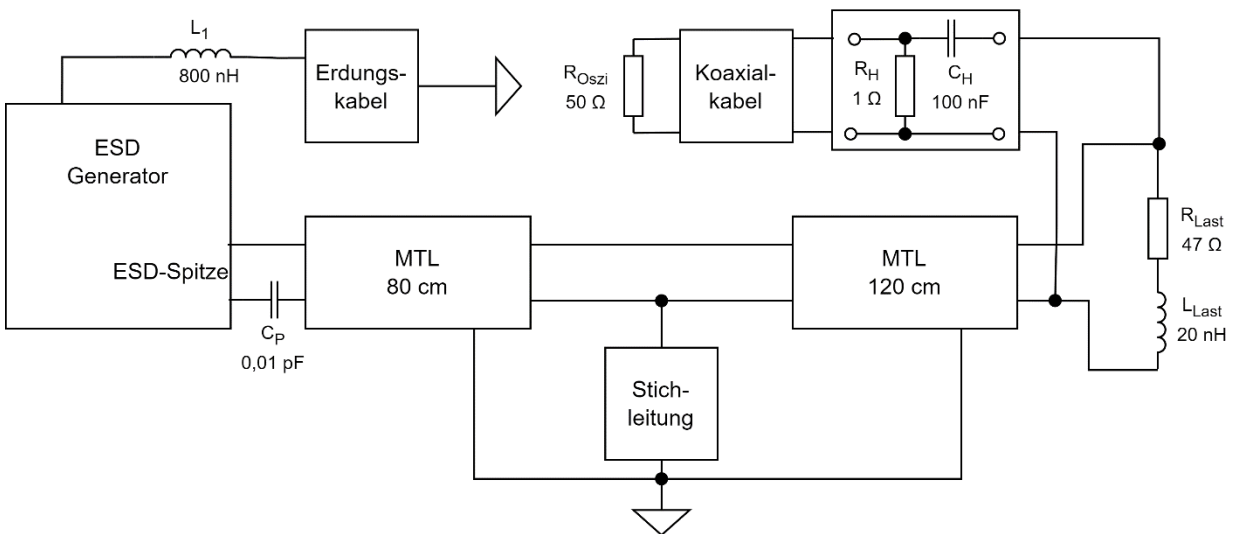
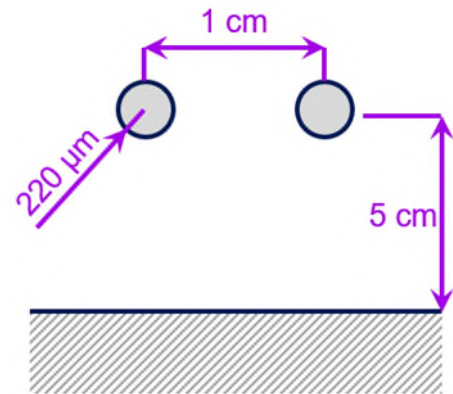


Abbildung 6: Netzwerkmodell des Messaufbaus mit Teilmodellen für ESD-Generator und Leitungen, inklusive Abschlüssen und Parasitärelementen

für Einfachleitungen abgebildet. Der vollständige schematische Aufbau ist in Abbildung 6 dargestellt. Hierbei wurden zusätzlich die aus dem realen Aufbau resultierenden Parasitärelemente C_p , und L_{Last} berücksichtigt. Die Kapazität C_p entsteht zwischen der ESD-Spitze, welche dem Signalleitungskontakt aufliegt, und dem Masseleitungskontakt des offenen Leitungsendes. Für diese Kapazität wird ein sehr kleiner Wert gewählt, da der Hauptanteil der kapazitiven Kopplung zwischen Signal- und Masseleitung über das Netzwerkmodell abgebildet wird. Im Netzwerkmodell des ESD-Generators (Abbildung 1) sind die Kapazitäten mit Bezug zur Massefläche C_4 und C_5 berücksichtigt, die Induktivität des Erdungskabels L_1 ist separat aufgeführt.

4.1 Parametrierung Leitungsmodelle

Der Messaufbau, wie er in Abbildung 5 dargestellt ist, besteht aus einer „Hauptleitung“ zwischen dem Speisepunkt der ESD-Pistole und einem 50 Ohm Lastwiderstand. Diese Leitung ist in Form einer Zweidrahtleitung umgesetzt, deren Leiter einen Querschnitt von $0,15 \text{ mm}^2$ sowie einen Abstand von 1 cm zueinander und 5 cm zur Bezugsebene haben. Wie in Kapitel 3 geschildert, ist die Leitung hinreichend beschrieben, sobald Länge, Portpositionen und Leitungsbeläge definiert sind. Da die Ports als auch die Leitungslänge durch den Messaufbau direkt vorgegeben sind, müssen lediglich die Matrizen der Leitungsbeläge ermittelt werden, um ein Ersatzschaltbild wie in Abbildung 4 aufstellen zu können.



Per numerischer Berechnung wird die Matrix der Kapazitätsbeläge nach Konvention der Standard-Literatur ermittelt [5], die sich wiederum über das Verhältnis zur Lichtgeschwindigkeit v in die korrespondierende Matrix für Induktivitätsbeläge umrechnen lässt:

Abbildung 7: Querschnitt der Zweidrahtleitung

$$[C'] = \begin{bmatrix} 10.62 & -3.99 \\ -3.99 & 10.62 \end{bmatrix} \text{ pF/m}$$

$$[L'] = \frac{1}{v^2} [C']^{-1} = \mu\epsilon [C']^{-1}$$

$$= \begin{bmatrix} 1.22 & 0.46 \\ 0.46 & 1.22 \end{bmatrix} \mu\text{H/m}$$

Dabei wird angenommen, dass die Styrodurunterlage, auf der die Leitungen fixiert sind, eine Permittivität ϵ und Permeabilität μ von Vakuum habe. In diesem Sinne werden die Querleitwerte zu Null gesetzt, d.h. $[G'] = 0 \cdot [E] \text{ S/m}$ mit der Einheitsmatrix $[E]$. Die Widerstandsbeläge der einzelnen Leitungen, die infolge des identischen Leiterradius r_i ebenfalls identisch sind, werden über die Näherung eines starken Skin-Effekts abgeschätzt. D.h. es wird angenommen der gesamte Strom fließt in einer Schicht der Dicke der frequenzabhängigen Skin-Tiefe $\delta(f)$:

$$R'_{i,i}(f) = \frac{1}{\delta(f)\kappa 2\pi r_i} = \sqrt{\frac{\kappa\pi f\mu}{1}} \frac{1}{\kappa 2\pi r_i} = \sqrt{\frac{f\mu}{\kappa\pi}} \frac{1}{2r_i} \Omega/\text{m}$$

Koppelwiderstandsbeläge $R'_{i,j}$ werden vernachlässigt, da aufgrund der Nähe der beiden Leiter die Kopplung durch das reaktive Nahfeld überwiegt und die ohm'schen Verluste der Leiter infolge des Skin-Effekts, repräsentiert durch $R'_{i,i}$, in der Verlustbetrachtung dominant sind.

Die verbleibenden Leitungen im Messaufbau sind Einfachleitungen in Form eines Drahtes über einer leitfähigen Ebene. Diese Anordnung ist in der Literatur oft beschrieben worden, sodass sich auch in frei zugänglichen Nachschlagewerken die entsprechenden Berechnungsgrundlagen finden lassen. Entsprechend ergeben sich die kapazitiven und induktiven Leitungsbeläge:

$$L' = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{2h}{r_i}\right) = 1.22 \mu\text{H/m}$$

$$C' = \frac{1}{L'v^2} = \frac{\mu\epsilon}{L'} = 9.09 \text{ pF/m}$$

Hierbei ist $h = 5 \text{ cm}$ die Höhe der Styrodurunterlage. Analog zur Zweidrahtleitung wird der Querleitwert $G' = 0$ gesetzt und für den Widerstandsbelang dieselbe Berechnungsvorschrift wie für die Drähte der Zweidrahtleitung genutzt.

4.2 Auswertung

Um die Genauigkeit des Netzwerkmodells zu überprüfen, wird der mit dem Oszilloskop gemessene Spannungsabfall über der Last mit den Ergebnissen aus der 3D- und Netzwerksimulation verglichen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 8 dargestellt.

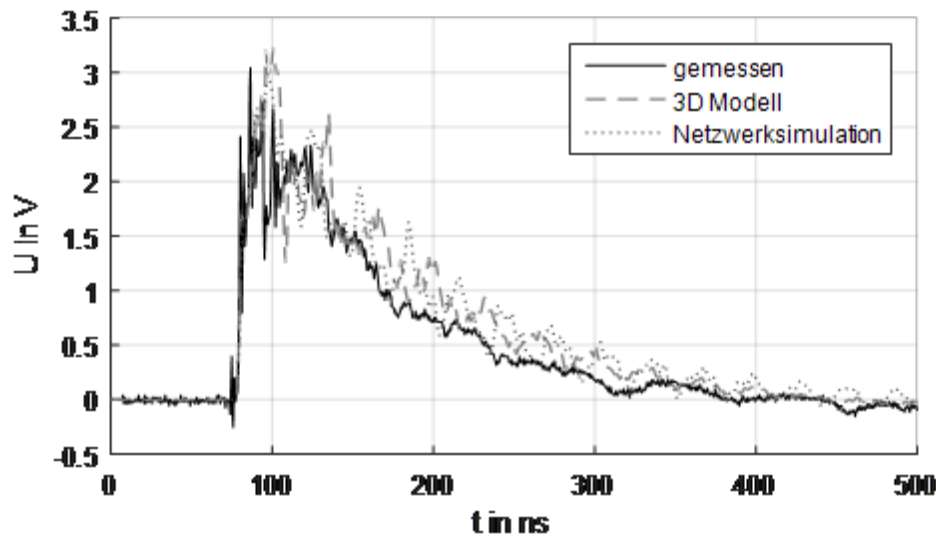


Abbildung 8: Mit dem Oszilloskop gemessener Spannungsabfall am Abschlusswiderstand des einfachen Aufbaus im Vergleich mit den Ergebnissen aus 3D-Simulation und Netzwerkmodell

Der Vergleich der drei Methoden zeigt, dass sowohl das 3D-Simulationsmodell als auch das Netzwerkmodell sehr gut übereinstimmende Ergebnisse liefern. Insbesondere die Anstiegszeit, die Maximalamplitude und der langsam abklingende Spannungsverlauf mit überlagerter periodischer Oszillation, die aufgrund der einseitig leerlaufenden Leitung entsteht, werden durch das Netzwerkmodell gut abgebildet.

5 Beispiele

Um die Anwendungsmöglichkeiten der vorgestellten Methode zu demonstrieren, werden ausgehend vom Aufbau in Kapitel 4 zwei Beispiele untersucht. Im ersten Fall wird die Zweidrahtleitung in Abbildung 5 um einen weiteren Abzweig der Signalleitung erweitert (siehe Abbildung 9). In diesem Abzweig ist sowohl an der Knickstelle (Last1) als auch am Ende eine 47Ω -Last angebracht. Zusätzlich wird der Masseanschlag an die Position bei Leitungslänge 120 cm verschoben. Die Länge dieses Masseanschlages wird variiert und die Auswirkungen auf den Spannungsabfall an Last1 ausgewertet.

In Abbildung 10 sind für die Längen 50 cm, 200 cm und 500 cm die mithilfe des Netzwerkmodells berechneten Spannungen dargestellt. Hierbei ist der Einfluss der Länge des nicht reflexionsfrei abgeschlossenen Masseanschlages sofort erkennbar. Aus dieser qualitativen Untersuchung können Maßnahmen abgeleitet werden, um z.B. den durch den ESD-Impuls verursachten Spannungshub an Last1 zu verringern. Die Wirksamkeit dieser Maßnahmen kann direkt mit dem

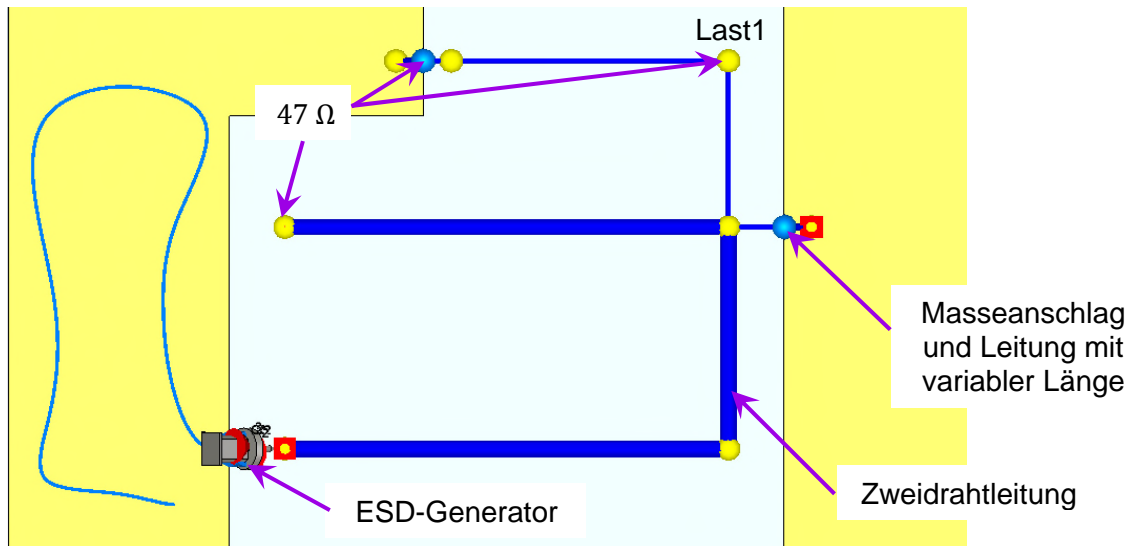


Abbildung 9: 3D-Modell der Erweiterung des einfachen Aufbaus mit zusätzlichem Abzweig und Masseanschlag mit variabler Länge

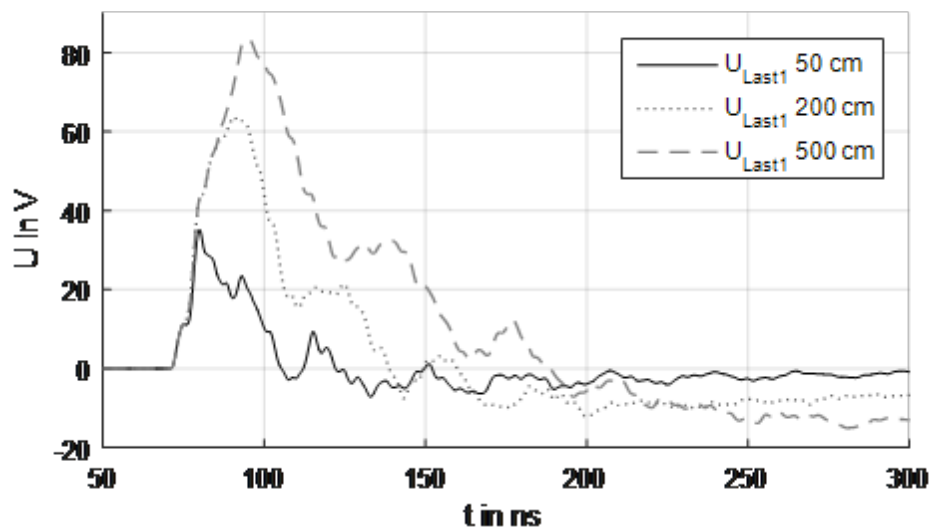


Abbildung 10: Spannungsabfall an Last1 bei unterschiedlichen Längen des Masseanschlages

vorgestellten Netzwerkansatz überprüft werden, wobei längere Simulationszeiten oder kostenintensive Messaufbauten umgangen werden.

Im zweiten Beispiel wird ausgehend vom Aufbau in Abbildung 5 eine Schutzbeschaltung vor der Last in Form einer ESD-Diode [3] untersucht. Die mithilfe des Netzwerkmodells berechnete Spannung ist in Abbildung 11 dargestellt. Die Schutzwirkung der Diode ist deutlich zu erkennen. Dieses Beispiel zeigt, dass in das vorgestellte Netzwerkmodell nichtlineare Lasten direkt integriert werden können. Im Vergleich zu anderen Methoden, die auf Frequenzbereichsantworten beruhen und nicht zwangsläufig passiv sind, ist dies hier möglich, da die verwendeten Teilmodelle für den ESD-Generator und die Mehrfachleitungen vollständig passiv und somit inhärent stabil im Zeitbereich sind.

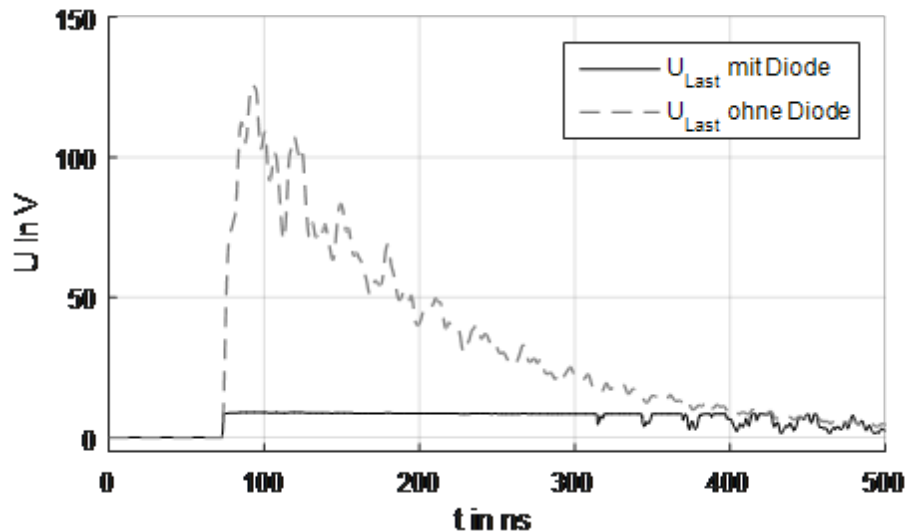


Abbildung 11: Aus dem Netzwerkmodell berechnete Spannung über der Last, mit und ohne ESD-Diode im Vergleich

6 Ergebnisse / Abschluss

In dieser Arbeit wurde gezeigt, wie ESD-Ereignisse in verzweigten Mehrfachleitungssystemen per Simulation abgeschätzt werden können. Dazu wurden aus der Literatur bekannte Schaltungsmodelle für den ESD-Generator und modale Netzwerkmodelle für Mehrfachleitungen aufgestellt und am Beispiel einer konkreten Leitungstopologie kombiniert. Zusätzlich wurde diese Leitungstopologie in einem Messsetup nachgebaut, so dass die Ergebnisse aus 3D- und Schaltungssimulation mit den gemessenen Ergebnissen verglichen werden konnten. So konnte gezeigt werden, dass mit dieser Methode eine sehr gute Übereinstimmung erreicht wird. Darüber hinaus wurde anhand von Beispielen gezeigt, wie sehr effizient Änderungen an der Leitungstopologie simuliert und anschließend ausgewertet werden können. Zusätzlich wurde durch eine an der Last ergänzte, nichtlineare Schutzbeschaltung gezeigt, dass diese Methode die Simulation von beliebigen linearen / nichtlinearen und aktiven / passiven Lasten erlaubt.

Literatur

- [1] K. Wang et al., „Numerical modeling of electrostatic discharge generators“, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Bd. 45, Nr. 2, S. 258-271, Mai 2003, doi: 10.1109/TEMC.2003.810817.
- [2] A. Mantzke, S. Südekum und M. Leone, „Broadband Equivalent-Circuit Model for Uniform Multiconductor Transmission Lines“, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Bd. 59, Nr. 4, S. 1252-1259, Februar 2017, doi: 10.1109/TEMC.2016.2636565.
- [3] ESD Protection Diode PESD5V0X1UB, Nexperia, Datenblatt online (13.12.23): <https://assets.nexperia.com/documents/data-sheet/PESD5V0X1UB.pdf>
- [4] M. Leone and A. Mantzke, "A Foster-Type Field-to-Transmission Line Coupling Model for Broadband Simulation," in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 56, no. 6, pp. 1630-1637, Dec. 2014, doi: 10.1109/TEMC.2014.2336792.
- [5] C. R. Paul, „Analysis of Multiconductor Transmission Lines“, Wiley, 2007.
- [6] S. Südekum and M. Leone, "Rigorous Modal Circuit Synthesis Including Modal Coupling for Linear, Time-Invariant, and Passive Electromagnetic Systems," in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 62, no. 5, pp. 2024-2035, Oct. 2020, doi: 10.1109/TEMC.2019.2948099.
- [7] LTSpice, Analog Devices, online (13.12.23): <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>
- [8] IEC 61000-4-2:2008: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-2: Testing and measurement techniques - Electrostatic discharge immunity test