

Modellierung der Einstrahlung elektromagnetischer Felder in Mehrleitersysteme mit VHDL-AMS

Dipl.-Ing. Kerstin Siebert, Cand.-Ing. Haiyan Zhang, Prof. Dr.-Ing. Stephan Frei
Technische Universität Dortmund

1. Einleitung

Bussysteme aus ungeschirmten verdrehten Zweidrahtleitungen sollen im Kraftfahrzeug zunehmend auch für besonders sicherheitskritische Anwendungen wie z.B. eine elektrische Lenkung eingesetzt werden. Eine sehr hohe Zuverlässigkeit der Datenübertragung auch im Bereich starker elektromagnetischer Felder ist unbedingt erforderlich. Durch Simulationen kann bereits in frühen Entwicklungsphasen eine Aussage über die Störfestigkeit eines Bussystems getroffen werden.

Für belastbare Simulationsergebnisse werden genaue Modelle der Mehrleitersysteme im elektromagnetischen Feld benötigt, wie sie unter anderen in [1]-[4] gezeigt werden. Modelle, die in der Industrie letztlich zum Einsatz kommen, zeichnen sich aber neben präzisen Simulationsergebnissen auch durch kurze Simulationszeiten und einfache Erweiterungsfähigkeit aus. Aus diesem Grund beruhen die in diesem Paper beschriebenen Modelle auf der erweiterten Leitungstheorie und sind in der Hardwarebeschreibungssprache VHDL-AMS (Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language – Analog and Mixed-Signal) verfasst.

In der Kfz-Industrie findet die Hardwarebeschreibungssprache VHDL-AMS aus vielen Gründen zunehmend Verbreitung. Wichtige Vorteile von VHDL-AMS sind die hohe Abstraktionsfähigkeit und die große Flexibilität, die sich aus dem gleichungsbasierten Aufbau der Sprache ergibt. Auch die Standardisierung der Sprache vom IEEE hebt sie aus der Masse der Hardwarebeschreibungssprachen hervor. Ein weiterer Vorteil sind die frei erhältlichen, ständig wachsenden Bibliotheken, welche zurzeit z.B. bei der Forschungsvereinigung Automobiltechnik im AK 30 [5] entstehen.

Für das ebenfalls weit verbreitete Berechnungsprogramm SPICE und seine Derivate gibt es inzwischen eine Vielzahl an Leitungsmodellen, die für Erweiterungen aber entweder eine Modifikation des Quellcodes oder aufwändige mathematische Berechnungen mit externen Programmen erfordern. Durch die Flexibilität und Mächtigkeit der Beschreibungssprache VHDL-AMS ist es möglich, die Leitungsmodelle transparent zu formulieren und die aufwändigen Berechnungen im Modell zu integrieren.

Aufbauend auf einem einfachen VHDL-AMS-Modell für eine Zweidrahtleitung [5], das auf dem Modell aus [6] beruht und keine Feldkopplungen berücksichtigen kann, werden Mehrleitermodelle für Signalintegritätsbetrachtungen und die Einstrahlung ebener elektromagnetischer Wellen in VHDL-AMS vorgestellt. Diese Modelle können für Analysen der Übertragungseigenschaften und Störfestigkeitsuntersuchungen von z.B. CAN- oder FlexRay-Bussystemen in Kraftfahrzeugen eingesetzt werden.

2. Modellierung von Mehrleitersystemen mit VHDL-AMS

Die hier beschriebenen Modelle berücksichtigen Verkopplungen zwischen einer beliebigen Anzahl von Leitungen und beliebige Feldeinkopplungen ebener elektro-

magnetischer Wellen im Zeit- und Frequenzbereich. Sie beruhen auf der klassischen Theorie der Mehrfachleitungen [1], da solche direkten Modelle zu viel kürzeren Simulationszeiten führen, als zum Beispiel Modelle auf Basis der Momentenmethode. Die Mehrleitermodelle sind in VHDL-AMS verfasst, weil VHDL-AMS zum einen die Möglichkeit bietet, komplexe Gleichungen direkt zu implementieren und zum anderen können Module auf höheren Abstraktionsebenen wie in einem Netzwerk über Knoten verbunden werden.

Ein VHDL-AMS-Modell ist in zwei Abschnitte gegliedert, den `Entity`-Teil, der die Schnittstelle des Modells zu seiner Umgebung definiert und den `Architecture`-Teil, in dem das Verhalten des Modells beschrieben wird. Weiterhin können in einem `Package` häufig benutzte Funktionen und Prozeduren abgelegt werden. In Abbildung 1 ist der Modellaufbau des entwickelten VHDL-AMS-Mehrleitermodells für den Frequenz- und den Zeitbereich dargestellt.

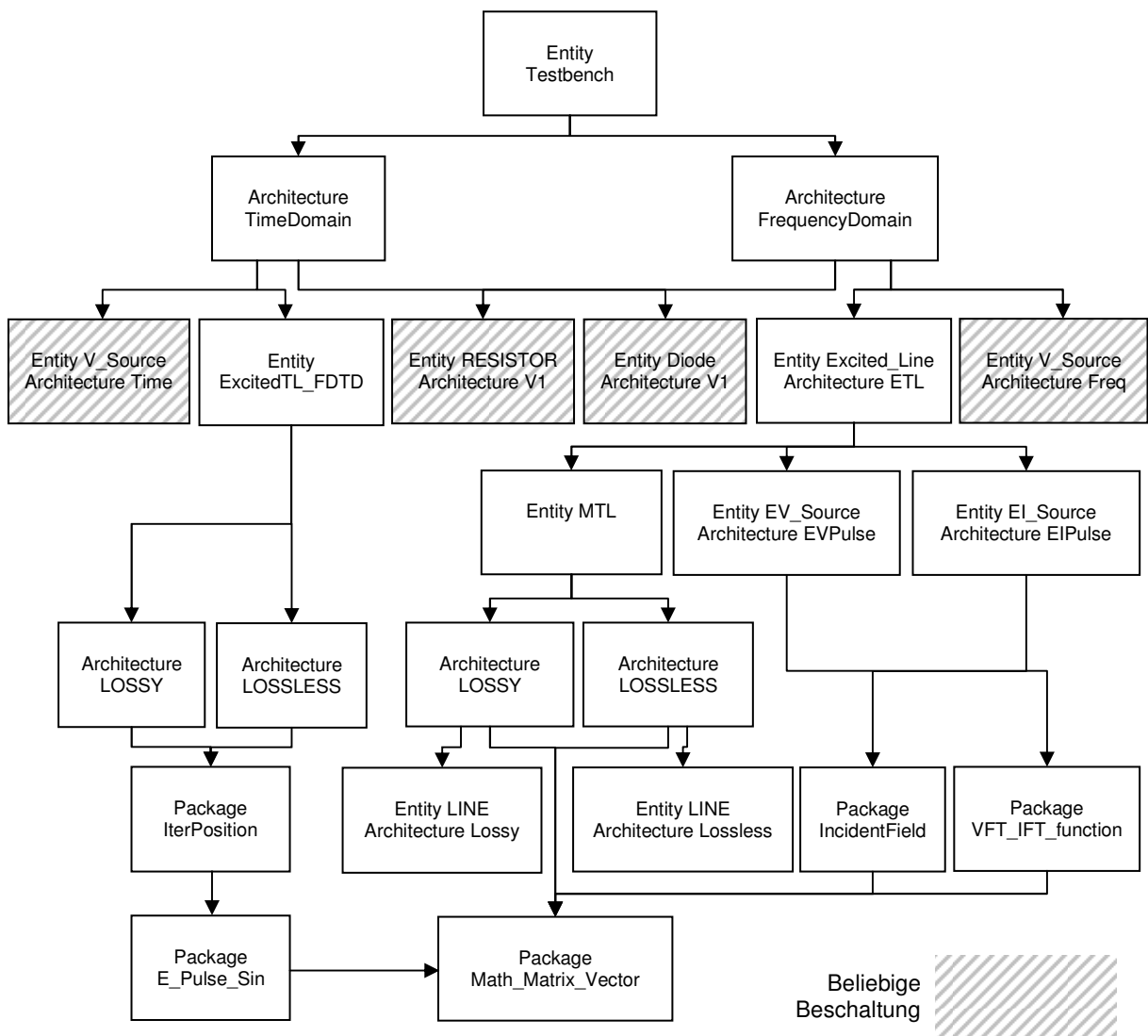


Abbildung 1: Aufbau des VHDL-AMS-Modells

Hinter der `Entity MTL` verbirgt sich das im Folgenden beschriebene Mehrleitermodell. In der `Entity Excited_Line` wird die Feldeinkopplung für den Frequenzbereich hinzugefügt und in der `Entity ExcitedTL_FDTD` die für den Zeitbereich, wobei die FDTD-Analyse (Finite Difference Time Domain) wie in [1] verwendet wird.

Diese Modelle können mit beliebigen linearen und nichtlinearen Elementen beschaltet werden, in Abbildung 1 ist beispielhaft die Beschaltung mit Widerständen, Dioden und Spannungsquellen dargestellt.

2.1 Modellierung der Übertragungseigenschaften von Mehrleitersystemen

Der VHDL-AMS-Befehl `generate` bietet eine elegante Möglichkeit, das vorhandene Zweidrahtmodell [5,7] in ein Mehrleitermodell für N verlustlose Leiter einzufügen:

```

TLINE: for p in 0 to N-1 generate
  MODEL: entity LINE(LOSSLESS)
    generic map (TAU => TAU(P), Z0 => Z0(P))
    port map (T1=>Y_A(P), T2=>A0, T3=>Y_B(P), T4=>A0);
end generate TLINE;

```

Damit die Verwendung dieses Zweidrahtmodells [5,7] für die Modellierung beliebig vieler Leiter möglich wird, müssen zunächst die Leitungsgleichungen entkoppelt werden. Hierzu benötigte Funktionen, wie unter anderem die Matrixinvertierung und die Berechnung von Eigenwerten und -vektoren von Matrizen, wurden in VHDL-AMS mit Hilfe der Array-Datenstruktur implementiert. Da diese Funktionen auch unabhängig von den Leitungsmodellen Verwendung finden, werden sie in einem Package gespeichert (siehe Abbildung 1 Package `Math_Matrix_Vector`), welches universell einsetzbar ist. Darin ist auch die Überlagerung des Multiplikationsoperators für Matrizen und Vektoren enthalten.

Zur Modellierung des Übersprechens zwischen den Leitern werden mehrfach gesteuerte Stromquellen F_i und Spannungsquellen E_i integriert, welche von den Strömen bzw. Spannungen aller Leiter gesteuert werden (siehe Abbildung 2). Durch die Verwendung der entwickelten Matrizen- und Vektorenoperationen können diese mehrfach gesteuerten Strom- und Spannungsquellen für beliebig viele Leiter in nur vier Zeilen beschrieben werden:

```

E_A == TRANSFORMATION_V*VM_A;
F_A == INV_TRANSFORMATION_I*I_A;
E_B == TRANSFORMATION_V*VM_B;
F_B == INV_TRANSFORMATION_I*I_B;

```

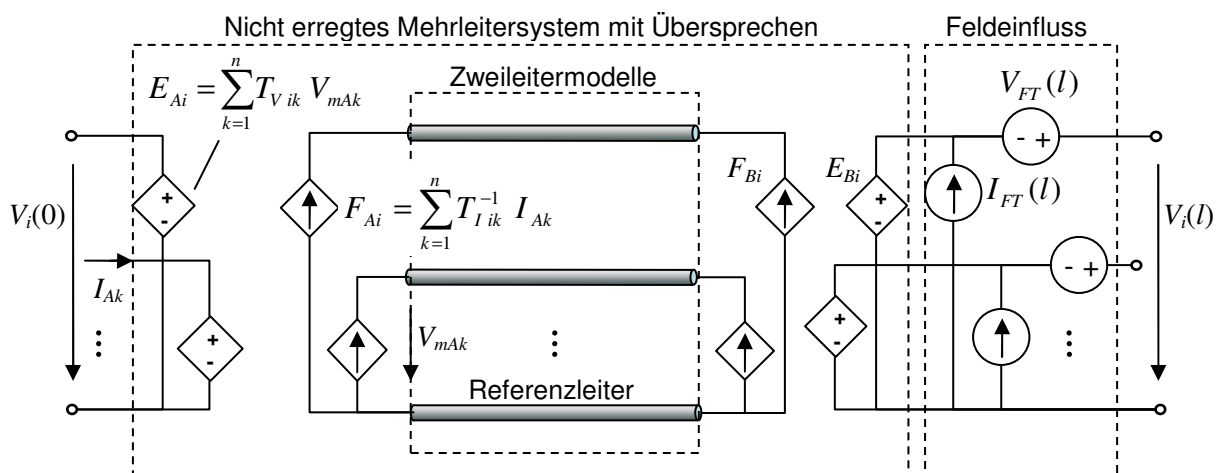


Abbildung 2: Zusammensetzung des Modells für die Beschreibung mit VHDL-AMS

2.2 Modellierung des Skineffektes

Bei der Modellierung der verlustbehafteten Leitersysteme wird auch der Skineffekt berücksichtigt. Der Widerstandsbelag setzt sich dann aus einem konstanten und einem frequenzabhängigen Anteil zusammen [8]. Dadurch wird die Telegraphengleichung im Laplacebereich zu:

$$\frac{d}{dz}V(z,s) = -[A + B\sqrt{s}]I(z,s) - sLI(z,s) \quad (1)$$

Für die Modellierung im Zeitbereich werden die Gleichungen transformiert und FDTD-basiert implementiert.

2.3 Modellierung der Feldeinkopplung

Der Einfluss eines eingestrahltten ebenen elektromagnetischen Feldes auf die Leiter wird durch Stromquellen $I_{FT}(l)$ zwischen den Leitern und Spannungsquellen $V_{FT}(l)$ im Längszweig nachgebildet [2], wie es in Abbildung 2 auf der rechten Seite dargestellt ist. Mathematisch entspricht dies einer Addition der Leitungsgleichungen in Kettenparameterform mit den Quelltermen [1]:

$$\begin{bmatrix} V(l) \\ I(l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{11}(l) & \Phi_{12}(l) \\ \Phi_{21}(l) & \Phi_{22}(l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V(0) \\ I(0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{FT}(l) \\ I_{FT}(l) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Dabei ist $[\Phi]$ die Kettenparametermatrix. Zur Berechnung der Quellen wird der Einfluss des Feldes über die gesamte Leiterlänge l integriert:

$$\begin{bmatrix} V_{FT}(l) \\ I_{FT}(l) \end{bmatrix} = \int_0^l \begin{bmatrix} \Phi_{11}(l-z) & \Phi_{12}(l-z) \\ \Phi_{21}(l-z) & \Phi_{22}(l-z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_F(z) \\ I_F(z) \end{bmatrix} \cdot dz \quad (3)$$

V_F beschreibt den Einfluss des magnetischen Feldes und I_F den des elektrischen Feldes auf die Leiter, wobei V_F auch durch das elektrische Feld ausgedrückt werden kann [1].

Durch zwei verschiedene optionale Quellenberechnungen in VHDL-AMS werden die zwei wichtigsten Fälle eines drahtförmigen Referenzleiters und einer Metallfläche als Referenzleiter abgedeckt. Im zweiten Fall wird berücksichtigt, dass das einfallende Feld an der Metallfläche reflektiert wird und somit doppelt auf das Leitersystem trifft.

2.3.1 FDTD-basierte Berechnung

Für die Modellierung der elektromagnetischen Feldeinkopplung im Zeitbereich wird die FDTD-Methode wie in [1] verwendet. Dazu werden zum einen die Leiter in N_{DZ} Segmente der Länge Δz aufgeteilt und außerdem die gesamte Simulationszeit in N_{DT} Zeitabschnitte. Für jeden Zeitabschnitt der Länge Δt werden alle Spannungen der N_{DZ} Segmente berechnet. Die Ströme werden aus Stabilitätsgründen jeweils für die Mitte eines Segments berechnet. Außerdem wird auf Grund der Stabilität darauf geachtet, dass

$$\Delta t \leq \frac{\Delta z}{v_{i \max}} \quad (4)$$

gilt, wobei $v_{i\max}$ die maximal auftretende Modengeschwindigkeit ist.

4. Simulationsergebnisse und Verifikation des VHDL-AMS-Modells

Zur Verifikation des erstellten VHDL-AMS-Modells werden die Simulationsergebnisse mit Simulationen auf Basis der Momentenmethode verglichen, sowie Messungen an einem Leitersystem mit einer für den Serieneinsatz vorgesehenen FlexRay-Leitung herangezogen.

4.1 Verifikation durch andere Simulationsverfahren

Die Simulationsergebnisse des entwickelten VHDL-AMS-Modells werden hier exemplarisch an einem Beispiel im Frequenz- und Zeitbereich mit Simulationen mit EMC-Studio auf Basis der Momentenmethode (MoM) verglichen. Dazu wird beispielhaft ein elektromagnetisches Feld in Längsrichtung auf zwei Leiter über einer leitenden Fläche eingestrahlt (siehe Abbildung 3).

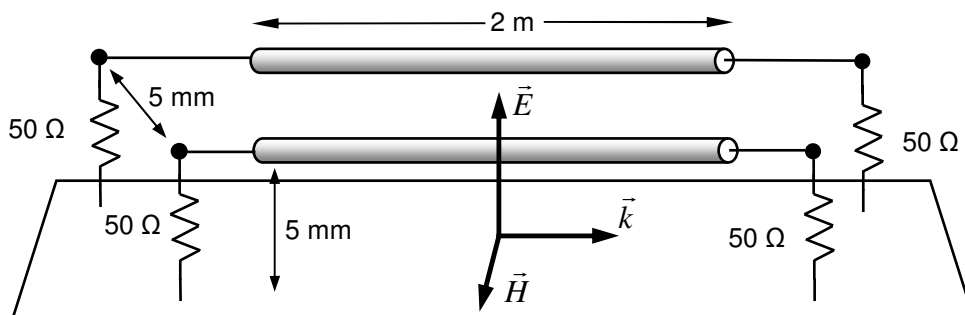
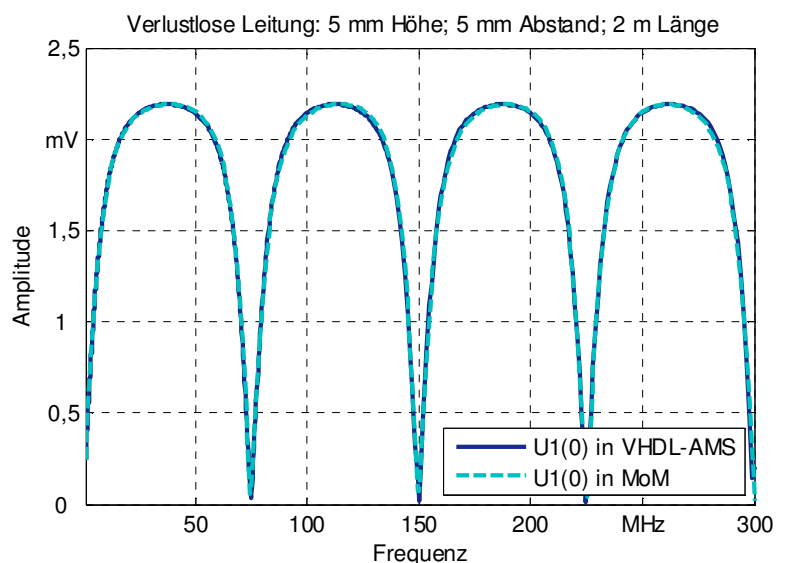


Abbildung 3: Beispielhafte Feldeinkopplungssituation zum Vergleich des VHDL-AMS-Modells mit der Momentenmethode

In Abbildung 4 sind die Simulationsergebnisse des VHDL-AMS-Modells unter SMASH von Dolphin und die Simulationsergebnisse aus EMC-Studio im Frequenzbereich dargestellt.

Abbildung 4: Vergleich der Simulationsergebnisse des VHDL-AMS-Modells und eines MoM-Modells am Beispiel einer Feldeinstrahlung längs einer Zweidrahtleitung über einer leitenden Fläche im Frequenzbereich



Die Simulationsergebnisse in Abbildung 4 zeigen eine gute Übereinstimmung der VHDL-AMS-Simulation mit der MoM-Simulation im Frequenzbereich. Abweichungen beruhen auf unterschiedlichen Leiterlängen, da bei der Momentenmethode die Verbindung zur Referenzfläche zusätzlich als Leiterlänge mitmodelliert wird. Abstrahleffekte werden nur in der MoM berücksichtigt.

Für die Verifikation im Zeitbereich wurden die MoM-Simulationsergebnisse im Frequenzbereich mit der Fouriertransformation in den Zeitbereich transformiert. Dieses Ergebnis wird in Abbildung 5 mit dem Simulationsergebnis des VHDL-AMS-Modells, welches auf FDTD beruht, verglichen. Die 2 m lange Leitung wurde für die FDTD-Berechnung in 133 Segmente unterteilt und die Simulationszeit von 100 ns in 2000 Zeitabschnitte.

Abbildung 5: Vergleich der Simulationsergebnisse im Zeitbereich des VHDL-AMS-Modells und eines MoM-Modells (Rechnung im Frequenzbereich mit anschließender Transformation in den Zeitbereich) am Beispiel einer Feldeinstrahlung längs einer Zweidrahtleitung über einer leitenden Fläche

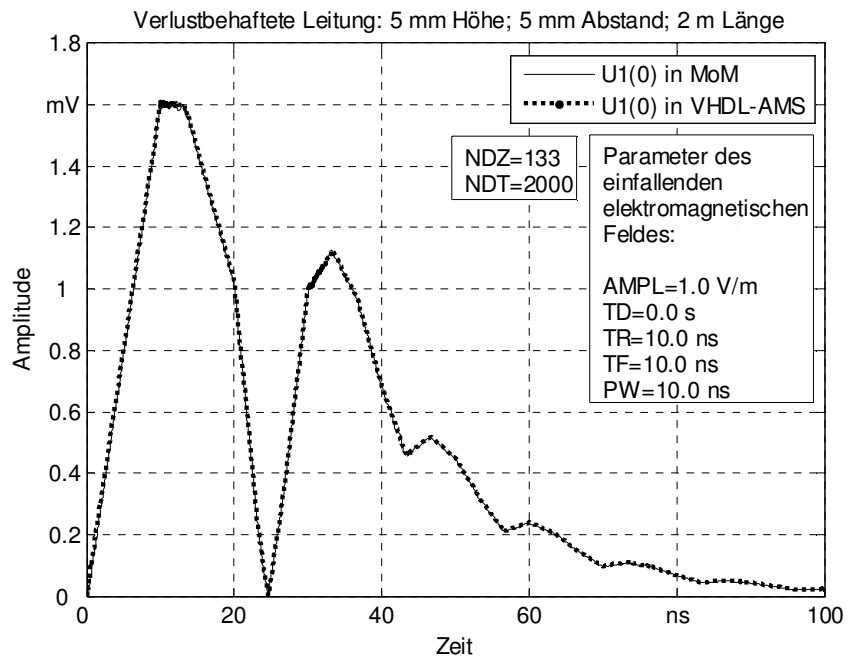


Abbildung 5 zeigt eine gute Übereinstimmung der Simulationsergebnisse im Zeitbereich.

4.2 Verifikation durch Messungen

Zur weiteren Verifikation der Simulationsergebnisse wurde ein Leitersystem mit einer für den Serieneinsatz vorgesehenen FlexRay-Leitung aufgebaut (siehe Abbildung 6) und messtechnisch untersucht. Für möglichst realitätsnahe Verhältnisse verläuft die verdrehte FlexRay-Leitung nahe einer Kupferplatte, die zum Beispiel die Karosserie eines Kraftfahrzeuges nachbildet.

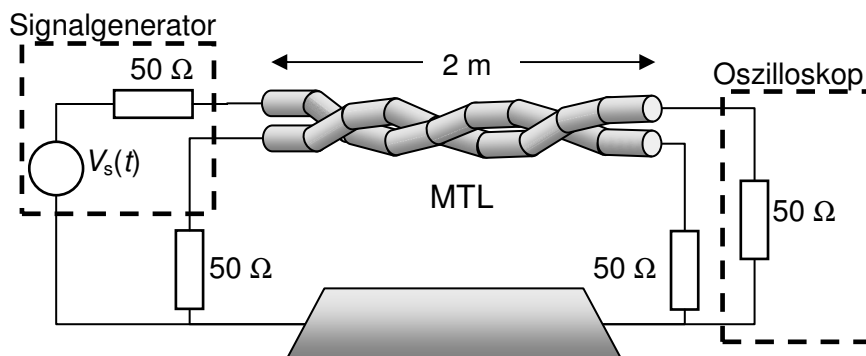


Abbildung 6: Messaufbau mit einer FlexRay-Leitung für die Verifikation des MTL-Modells

Für die Simulation notwendige Parameter wie Leitungsbeläge und Signallaufzeit werden entsprechend der Geometrie und den Materialien des Aufbaus berechnet und in die Modelle eingegeben, so dass das VHDL-AMS-Mehrleitermodell dem Messaufbau entspricht. Die Mess- und Simulationsergebnisse sind in Abbildung 7 im Zeit- und im Frequenzbereich gegenübergestellt und zeigen eine gute Übereinstimmung.

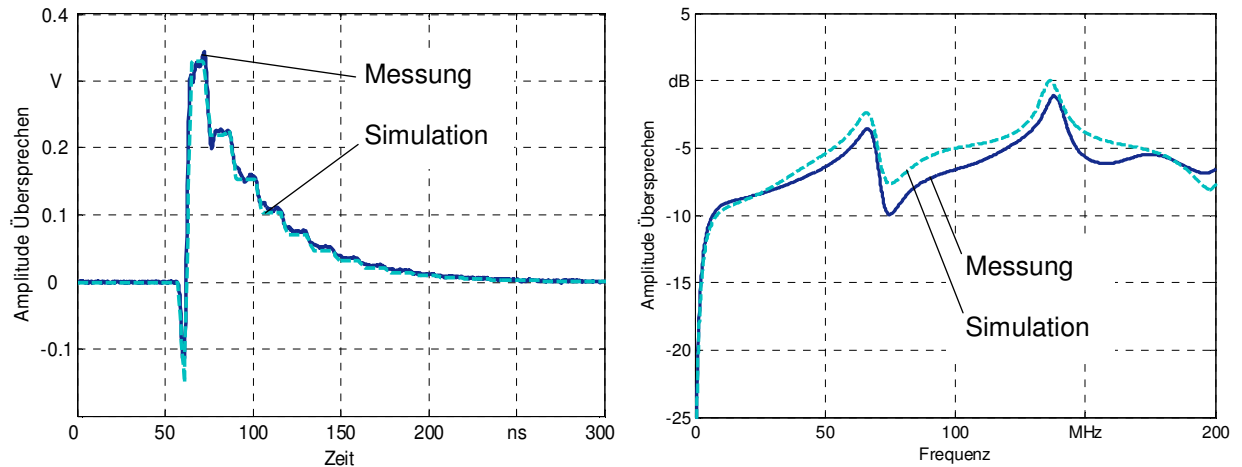


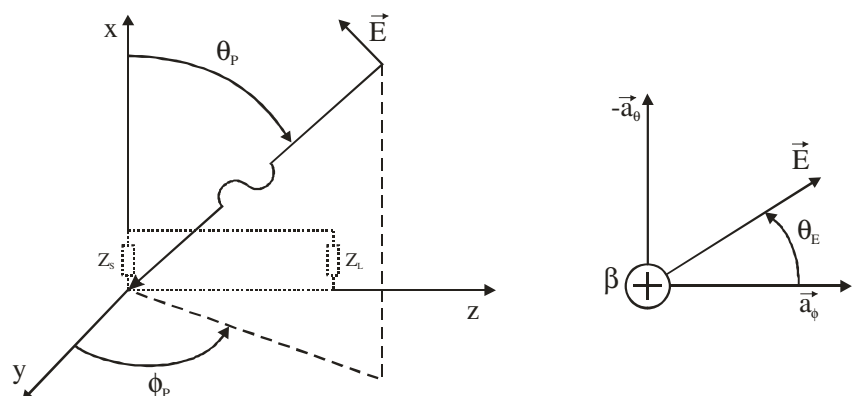
Abbildung 7: Vergleich der Simulations- und Messergebnisse des Übersprechens einer FlexRay-Leitung im Zeit- und im Frequenzbereich

5. Anwendungsbeispiel

Das so entstandene Modell eines felderregten Mehrleitersystems lässt sich mit beliebigen linearen und nichtlinearen VHDL-AMS-Modellen beschalten. So kann die Leitung beispielsweise mit Transceivermodellen abgeschlossen werden, um die Verwendung des Mehrleitersystems als Busleitung im Kfz nachzubilden.

Für Grundsatzuntersuchungen der Störfestigkeit der Bussysteme werden Frequenzbereichsanalysen durchgeführt. Da die Parameter des störenden elektromagnetischen Feldes in der Regel nicht bekannt sind, werden diese mit Hilfe von Parametersweeps variiert. So kann z.B. der Einfluss der Winkel zur Beschreibung der Einfallsrichtung des elektromagnetischen Feldes (siehe Abbildung 8) systematisch analysiert werden.

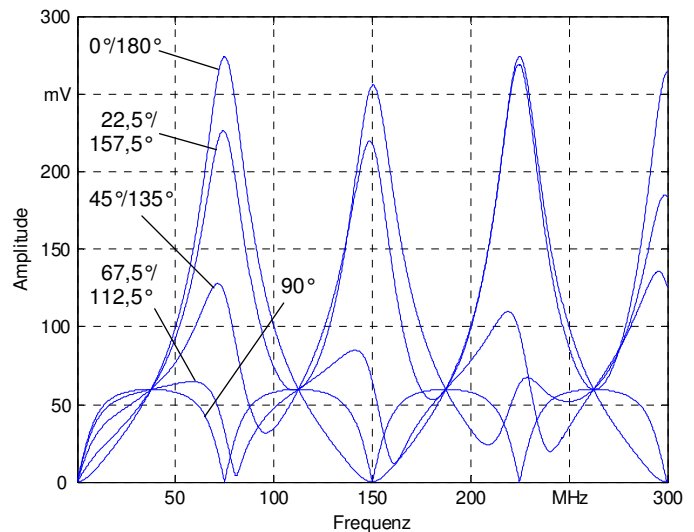
Abbildung 8: Definition der Einfallswinkel des eingestrahlten Feldes gegenüber dem kartesischen Koordinatensystem des Mehrleitersystems



In Abbildung 9 ist die Veränderung der Spannung an einem Ende eines Dreileitersystems aufgrund des Einflusses der Veränderung des Einfallswinkels θ_p des elektromagnetischen Feldes von 0° bis 180° exemplarisch dargestellt. Bei

niedrigen Frequenzen hat die Änderung des Einfallswinkels kaum Veränderungen der Amplitude zur Folge, aber bereits ab 30 MHz ergibt sich aufgrund der Einfallswinkeländerung des elektromagnetischen Feldes ein völlig anderer Frequenzverlauf.

Abbildung 9: Veränderung der Spannung an einem Ende eines Dreileitersystems durch den Einfluss des Einfallswinkels Θ_p bei festem $\Theta_E = \Phi_p = 90^\circ$ und einer Amplitude von 120 V/m



6. Zusammenfassung

Wie einleitend dargestellt, ist das Interesse an zuverlässigen Leitungsmodellen zur Signalintegritäts- und EMV-Analyse besonders in der Kfz-Industrie groß, um belastbare Aussagen über Zuverlässigkeiten der Systeme bereits zu Beginn der Entwicklung zu erhalten. Die Hardwarebeschreibungssprache VHDL-AMS eignet sich gut zur Modellierung von beliebig komplexen Mehrleitersystemen. Die entwickelten Modelle beruhen auf der erweiterten Leitungstheorie und sind modular aufgebaut, so dass neben dem Übersprechen zwischen parallelen Leitern und frequenzabhängigen Verlusten auch eine beliebige Einstrahlung von ebenen elektromagnetischen Wellen berücksichtigt werden kann. Durch einen Vergleich der Simulationsergebnisse mit Ergebnissen der MoM-Berechnung und Messungen an einer für den Serieneinsatz vorgesehenen FlexRay-Leitung wurden die entwickelten VHDL-AMS-Modelle verifiziert. Durch die Flexibilität von VHDL-AMS kann das Modell für eine Vielzahl von Anwendungen, beispielsweise für eine Zuverlässigkeitsanalyse von Kfz-Bussystemen, eingesetzt werden.

7. Literatur

- [1] C.R. Paul: „Analysis of Multiconductor Transmission Lines“, Wiley & Sons, 1994
- [2] J. Rumold, J.L. ter Haseborg: „Komplexe Kabelbündel unter elektromagnetischer Feldeinwirkung“, EMV 2000
- [3] V. Zwillich, W. Menzel, H. Leier: „Worst Case Signal Integrity Analysis for In-Vehicle Data Transmission via UTP Cables“, Proceedings, 18th Int. Zurich Symposium on EMC, Munich 2007
- [4] C.R. Paul: “A Brief History of Work in Transmission Lines for EMC Applications“, IEEE Transactions on EMC, 2007
- [5] VDA/FAT-Arbeitskreis 30; <http://fat-ak30.eas.iis.fraunhofer.de>, 19.10.2007
- [6] Branin: „Transient Analysis of Lossless Transmission Lines“, Proceedings of the IEEE, 1967
- [7] Frevert, Haase, Jancke, Knöchel, Schwarz, Kakerow, Darianian: “Modeling and Simulation for RF System Design“, Verlag Springer, The Netherlands, 2005
- [8] Nahman, Holt: „Transient Analysis of Coaxial Cables Using the Skin Effect Approximation $A + B\sqrt{s}$ “, IEEE Trans. on Circuit Theory, 1972