

# **Störfestigkeit von Kfz-Bustransceivern gegen sinusförmige Störgrößen in Verbindung mit nichtlinearen ESD-Schutzbeschaltungen**

Dipl.-Ing. Ulf Hilger, Prof. Dr.-Ing. Stephan Frei  
Technische Universität Dortmund, Dortmund

## **1 Einleitung**

Zur Gewährleistung einer sicheren Datenkommunikation zwischen den einzelnen Steuergeräten im Kraftfahrzeug wurden spezielle Kfz-Bussysteme entwickelt. An die Bustransceiver werden hohe ESD-Festigkeitsanforderungen gestellt, die oft nur durch externe Schutzbeschaltungen wie Varistoren oder Diodenarrays erfüllt werden können. Im Fall der Einkopplung sinusförmiger Störungen können diese Beschaltungen zu einer Spannungsbegrenzung des Buspegels führen, was durch die Transceiver als Bitmuster erkannt werden kann. Simulationen sind geeignet, um Probleme bereits in frühen Entwicklungsphasen erkennen und Abhilfemaßnahmen optimieren zu können. Dafür sind Simulationsmodelle der Transceiver und Schutzelemente notwendig.

In [1] und [2] werden Modelle von CAN-Transceivern für die Signalintegrität (SI) beschrieben. Eine Methodik zur Erstellung von Signalintegritätsmodellen für FlexRay-Transceiver wurde in [3] vorgestellt. In [4] wurden LIN-Transceiver modelliert, der Einfluss externer Schutzelemente jedoch nicht betrachtet. Zur Simulation von CAN- und FlexRay-Bussystemen unter dem Einfluss von sinusförmigen Störgrößen sind keine Untersuchungen bekannt.

Im Rahmen der hier beschriebenen Untersuchungen werden Modelle für CAN- und FlexRay-Transceiver, sowie Verfahren für die Parameterbestimmung entwickelt. Vorhandene VHDL-AMS-SI-Modelle werden auf ihre Eignung für EMV-Untersuchungen überprüft und die Simulationsmodelle anschließend um Modelle typischer ESD-Schutzelemente [5] erweitert.

Die gewonnenen Simulationsergebnisse werden exemplarisch anhand von Messungen verifiziert und so die Anwendbarkeit des Verfahrens nachgewiesen.

## **2 Simulationsmodelle von Kfz-Bustransceivern und ESD-Schutzelementen**

Im Folgenden werden Methoden für die Entwicklung messtechnisch abgesicherter Simulationsmodelle typischer Kfz-Bustransceiver und ESD-Schutzbeschaltungen gezeigt. Dabei steht die Implementierbarkeit in VHDL-AMS im Vordergrund. Mit den daraus generierten Modellen können Aussagen zur Störsicherheit eines Bussystems in unterschiedlichen Konfigurationen getroffen werden. Untersucht werden unter anderem VHDL-AMS- Modelle von Schutzelementen, die in [5] vorgestellt worden sind.

## 2.1 Simulationsmodelle typischer ESD-Schutzelemente

ESD-Schutzelemente werden in Schaltungen zur Absicherung empfindlicher Halbleiter gegen hohe Störimpulse eingesetzt. Die Ansprechzeiten von SMD-Varistoren und TVS-Diodenarrays liegen im Bereich von  $<1$  ns. Die hier näher untersuchten Varistoren weisen eine kapazitive Last von 18 bzw. 150 pF auf. Bei den Diodenarrays wurden Werte von  $\approx 1$  pF gemessen.

In [5] werden Methoden zur Parameterbestimmung und Erzeugung von VHDL-AMS-Modellen von ESD-Schutzstrukturen vorgestellt. Dabei wird die U/I-Kennlinie durch dynamische TLP- und statische Kennlinienmessungen bestimmt. Die maximal zulässige Leistung geht aus dem Datenblatt hervor. Die Bestimmung der HF-Kenngrößen kann mit einem Netzwerkanalysator (NWA) über eine Reflexionsmessung erfolgen [6][7]. Die Bauelemente werden in VHDL-AMS als Ersatzimpedanz aus einer Parallelschaltung einer Kapazität mit einem hochohmigen Widerstand und einer Reiheninduktivität nachgebildet. Das dynamische Durchbruchverhalten beim Überschreiten der zulässigen Schwellspannung kann durch mathematische Kurvenapproximation, Kennlinientabellen [5] oder mit einfachen Diodenschaltungen und Spannungsquellen realisiert werden.

Für EMV-Simulationen mit sinusförmigen Störgrößen sind die Impulscharakteristik und die Ansprechzeit der Schutzbeschaltungen nicht entscheidend. Die wesentlichen Kenngrößen sind hier die Durchbruchspannung, der maximale Strom durch das Schutzelement und die parasitäre Kapazität. Bei den in [5] vorgestellten SI-Modellen sind diese Parameter sehr genau abgebildet.

ESD-Schutzelemente sind für die Kompensation selten auftretender Impulsströme höherer Größenordnung ausgelegt. Es ist nicht möglich, diese dauerhaft mit kontinuierlich einkoppelnden Störgrößen oberhalb der Durchbruchspannung zu betreiben. Die durch den Stromfluss erzeugte thermische Leistung kann nicht abgeleitet werden und führt zur Zerstörung. In Tabelle 1 sind die wichtigsten messtechnisch bestimmten Kenngrößen der hier untersuchten Elemente aufgeführt. Für die Störfestigkeitssimulation mit sinusförmigen Störgrößen wurden exemplarisch ein TVS-Diodenarray von Protek, Typ GBLCS05C, zwei gleiche TVS-Dioden von SEMTECH, Typ SD12 (als Array verschaltet) und zwei Varistoren von Epcos, Typ CT0603K14G sowie CT0603L25HSG, ausgewählt.

Kenngröße	Protek TVS-Array GBLCS05C	SEMTECH TVS-Diode SD12	Epcos Varistor CT0603K14G	Epcos Varistor CT0603L25HSG
Durchbruchspannung (bei 1 mA)	6 V	13,3 V (DC)	14 V (RMS) 22 V (DC)	25 V (RMS) 32 V (DC)
Max. Verlustleistung	--	--	3 mW	3 mW
Ersatzimpedanz für EMV-Simulationen	1,4 pF    100 k $\Omega$	12 pF    100 k $\Omega$	150 pF    30 k $\Omega$	18 pF    70 k $\Omega$

**Tabelle 1: Kenngrößen der untersuchten ESD-Schutzelemente [5]**

## 2.2 Transceivermodelle

Aufgrund des nichtlinearen Eingangsverhaltens der Transceiver ist für die EMV-Modellierung nicht nur die Bestimmung der stationären Impedanz von Bedeutung, sondern auch das dynamische Verhalten beim Ausfall der Buskommunikation [4].

Zur Untersuchung der Kenngrößen kommen spezielle für Störfestigkeitsuntersuchungen entwickelte Testplatinen zum Einsatz. Diese sind mit möglichst kurzen Leiterbahnen und einer minimalen zum Betrieb der Transceiver notwendigen Bestückung ausgestattet. Mit Oszilloskoptastköpfen und Stromsensoren werden Strom und Spannung erfasst und daraus die frequenzabhängige Ausfallimpedanz bestimmt. Andere Untersuchungen zeigten, dass für die Stimulierung des Testaufbaus die DPI-Methode (Direct HF-Power Injection) geeignet ist [4][6]. Die notwendige sinusförmige Störspannung wird durch einen HF-Generator erzeugt, verstärkt und kapazitiv über die Terminierungswiderstände auf die Busleitungen eingekoppelt (Abb. 1). Zur Bestimmung des Ausfallverhaltens wird bei diskreten Frequenzen die Störspannung schrittweise erhöht und am Ausgang werden mögliche Bitfehler detektiert.

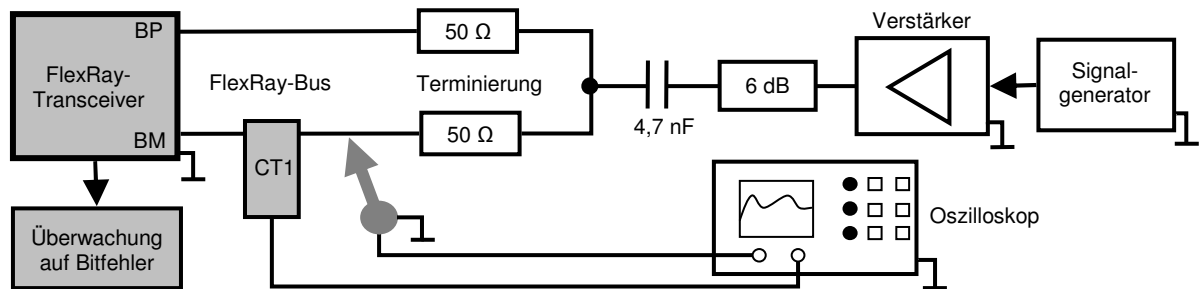


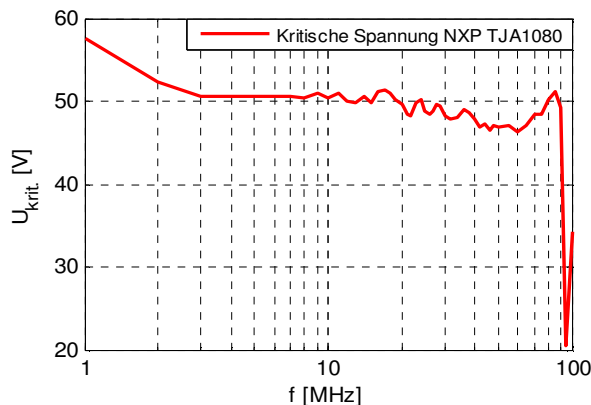
Abb. 1: Messaufbau zur Modellparameterbestimmung

### 2.2.1 Modellparameter eines FlexRay-Transceivers (NXP TJA1080)

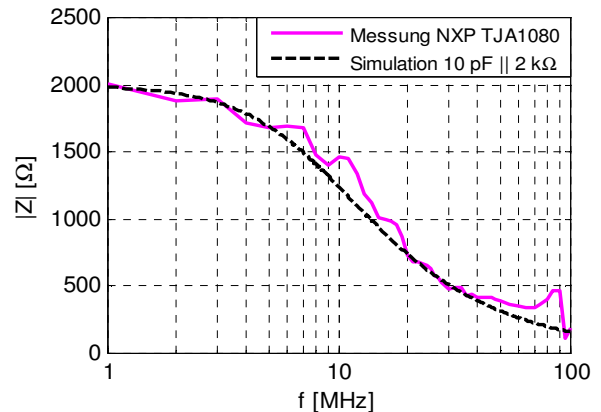
Zur Modellparameterbestimmung wurden die kritische Ausfallspannung und die Stromaufnahme an Bus Minus (BM) gemessen. Da der FlexRay-Transceiver zum Teil symmetrisch aufgebaut ist, können die bestimmten Werte auf Bus Plus (BP) übertragen werden.

Bei den Untersuchungen wurde zunächst auf die Bestückung der Schutzstrukturen verzichtet, da diese die Messungen negativ beeinflussen können. Bei der Beaufschlagung der Busleitung mit einer sinusförmigen Störspannung im Bereich von 1 – 100 MHz zeigte sich der Transceiver hohen Amplituden bis zu 90 V gegenüber sehr störfest. Diese Werte konnten jedoch nur kurzzeitig erreicht werden, da interne ESD-Schutzbeschaltungen durchschalteten und der Transceiver thermisch zerstört wurde. Um die thermische Belastungsgrenze zu ermitteln, wurde die beaufschlagte Störspannung schrittweise erhöht und der aufgenommene Strom betrachtet. Im Bereich von 50 V Störspannung erhitze sich der Transceiver so schnell, dass dieser Betriebszustand zur Zerstörung geführt hätte. Genau in diesem Punkt wurde die kritische Spannung bestimmt. Abb. 2 zeigt die gemessenen Werte. Bis 90 MHz liegt die kritische Schwelle bei etwa 50 V. Der Einbruch zwischen 90 und 100 MHz kann auf mögliche Resonanzen im Messaufbau zurückgeführt werden. Voruntersuchungen mit dem NWA haben eine statische Impedanz des FlexRay-Transceivers von  $10 \text{ pF} \parallel 27 \text{ k}\Omega$  ergeben. In Abb. 3 ist die ermittelte Ausfallimpedanz im Bereich der thermisch kritischen Störspannung dargestellt. Im Fall des Durchschaltens interner ESD-Schutzelemente wird der Buseingang niederohmig. Die Charakteristik der Kurve kann durch eine Ersatzimpedanz von  $10 \text{ pF} \parallel 2 \text{ k}\Omega$  nachgebildet werden. Die mit dem NWA bestimmte Kapazität ist auch bei den Störfestigkeitsmessungen nachzuweisen. Die Anwendbarkeit des vorgestellten Verfahrens wurde somit gleichzeitig

verifiziert. Der Transceiver kann für Störfestigkeitssimulationen vereinfacht als Parallelschaltung einer Kapazität mit einem Widerstand modelliert werden. Liegen die errechneten Störspannungen auf der Busleitung am Transceiver unterhalb der kritischen Spannung  $U_{krit.}$ , ist ein Ausfall des Busses nicht zu erwarten.



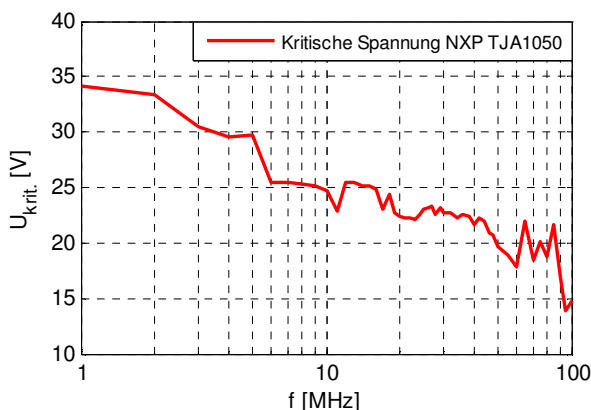
**Abb. 2: Kritische Ausfallspannung des TJA1080 FlexRay-Transceivers**



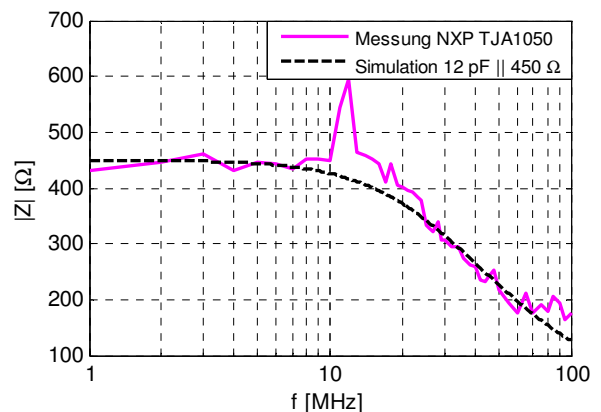
**Abb. 3: Kritische Ausfallimpedanz des TJA1080 FlexRay-Transceivers**

### 2.2.2 Modellparameter eines CAN-Transceivers (NXP TJA1050)

Analog zur Modellparameterbestimmung des FlexRay-Transceivers wird die Ausfallspannung und die Ausfallimpedanz des NXP TJA1050 CAN-Transceivers bestimmt.



**Abb. 4: Kritische Ausfallspannung des TJA1050 CAN-Transceivers**



**Abb. 5: Kritische Ausfallimpedanz des TJA1050 CAN-Transceivers**

Im Gegensatz zum FlexRay-Bus fällt die Kommunikation des CAN-Busses kurz vor oder nach Erreichen der kritischen Spannung  $U_{krit.}$  aus.  $U_{krit.}$  ist gekennzeichnet durch einen sprunghaften Anstieg des aufgenommenen Stromes. Die gemessene Durchbruchspannung scheint aber nicht auf interne ESD-Beschaltungen hinzuweisen, da diese nicht, wie beim TJA1080, konstant um einen festen Spannungswert schwankt. Hier ist ein Durchbruch der internen Treiberstufe wahrscheinlicher. Abb. 4 zeigt die messtechnisch bestimmte Ausfallspannung. In Abb. 5 ist die frequenzabhängige Impedanz im Ausfallpunkt dargestellt. Die gemessene Kurve kann durch eine Ersatzimpedanz von 12 pF || 450  $\Omega$  nachgebildet werden. Um den Einfluss externer Schutzbeschaltungen betrachten zu können, werden im nächsten Schritt die entwickelten Transceiver-Modelle mit VHDL-AMS-SI-Modellen typischer Schutzbeschaltungen, die

mit den in [5] vorgestellten Methoden entwickelt wurden, verbunden und in der Simulation mit sinusförmigen Störgrößen beaufschlagt.

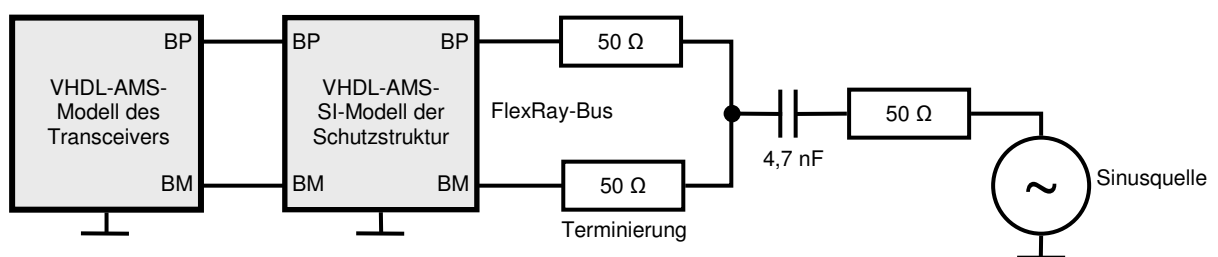
### 3 Simulationsmodell für die Analyse von ESD-Schutzstrukturen

Die Kfz-Bussysteme CAN und FlexRay arbeiten mit differentiellen Buspegeln und die Kommunikation findet über verdrehte Zweidrahtleitungen statt. Die Transceiver werten die Differenzspannung zwischen beiden Busleitungen aus und entscheiden ob „Logisch Null“ oder „Logisch Eins“ vorliegt. Dieses System ist besonders unempfindlich gegenüber hochfrequenten Störspannungen, da aufgrund der Verdrillung der Leitung im Falle der Störeinkopplung von einer Gleichtaktstörung ausgegangen werden kann. Daraus folgt, dass beide Buspegel gleichermaßen um einen dem Betrag der aufgeprägten Störspannung entsprechenden Offset ansteigen, und die Detektion der differentiellen Signalpegel davon unberührt bleibt.

ESD-Schutzelemente können, wenn falsch dimensioniert, den Buspegel auf beiden Leitungen gleichermaßen begrenzen. Somit kann das differentielle Signal auf dem Bus zu Null werden. Bei dem in [8] beschriebenen Highspeed-CAN-Bus würden in diesem Fall die Transceiver eine logische Eins detektieren. Im FlexRay-Protokoll ist ein differentielles Bussignal von Null für die Datenkommunikation nicht vorgesehen [9]. Dies ist nur dann möglich, wenn sich die Transceiver im Idle-Modus befinden. Dennoch kommt in diesem Fall die Buskommunikation zum Erliegen.

#### 3.1 Modellaufbau und Methodik am Beispiel des FlexRay-Bussystems

Um EMV-Untersuchungen in der Gesamtsystemsimulation durchzuführen, werden mit den in Kapitel 2.2 beschriebenen Transceiverparametern in VHDL-AMS-Modelle erzeugt und modular mit Modellen der Schutzelemente, die mit den in [5] vorgestellten Methoden generiert wurden, erweitert. Ein Blockschaltbild des Simulationsmodells ist in Abb. 6 dargestellt. Die Störspannung wird entsprechend der DPI-Methode [10] über die Terminierungswiderstände und einen Kondensator galvanisch auf beide Busleitungen eingekoppelt. So ist es möglich, die Simulation um vorhandene Modelle aus bestehenden Bibliotheken zu erweitern.



**Abb. 6: Strukturaufbau der Gesamtsystemsimulation**

Im Folgenden werden die in Tabelle 1 vorgestellten Schutzelemente näher untersucht. Angeregt werden die Modelle mit einem typischen AM-Signal, Trägerfrequenz 1 MHz, Oberschwungung 1 kHz, Modulationshub 80%. Abb. 7 zeigt das simulierte Bus Plus Signal des FlexRay-Busses in Kombination mit dem Modell des Protek TVS-Diodenarrays. In Abb. 8 ist der Bereich der Spannungsbegrenzung von Bus Plus und Bus Minus durch das Schutzelement vergrößert dargestellt. Bei einer Störampplitude von etwa 8 V kann der Transceiver keine Differenzspannung mehr detek-

tieren. Das gestörte Differenzbussignal mit den daraus resultierenden Bitfehlern ist darunter zu sehen.

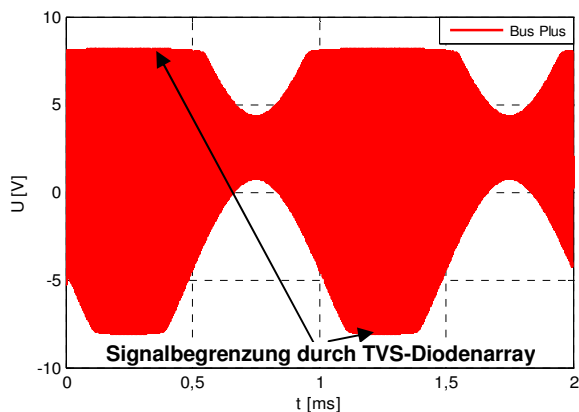


Abb. 7: Simulation des gestörten FlexRay-Bussignals mit TVS-Diodenarray

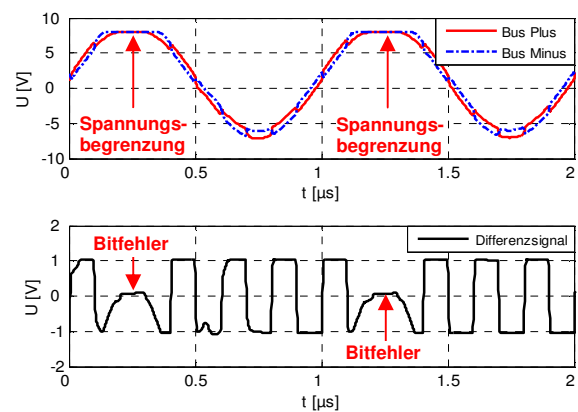


Abb. 8: Detailvergrößerung aus Abb. 7 mit Protek GBLCS05C TVS-Array

### 3.2 Messtechnische Verifikation der untersuchten VHDL-AMS-Modelle

Zur Verifikation der Simulationsmodelle wurden die Testplatinen mit den untersuchten Schutzelementen bestückt und mit sinusförmigen Störspannungen angeregt.

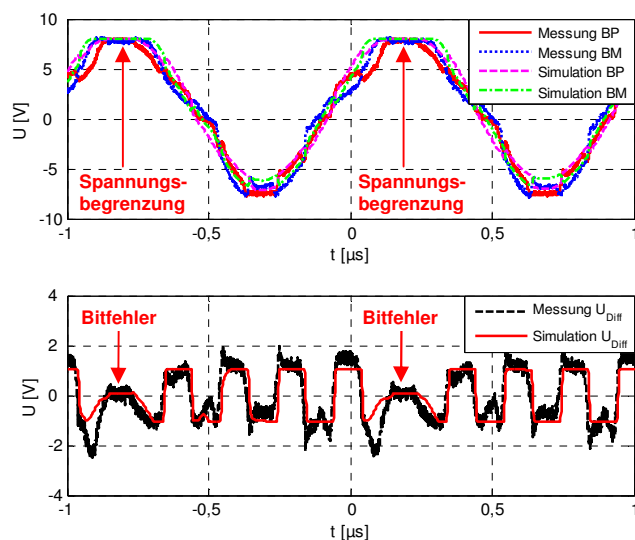


Abb. 9: Vergleich Simulation/Messung mit Protek TVS-Diodenarray GBLCS05C

Abb. 9 zeigt einen Vergleich zwischen gemessenem und simuliertem BP- und BM-Signal des FlexRay-Busses in Kombination mit dem Protek TVS-Diodenarray. Unten im Bild ist das Differenzbussignal dargestellt. In der Messung sind die simulierten Bitfehler auch zu sehen. Bis auf kleine Überschwinger ist die Übereinstimmung zwischen den errechneten und messtechnisch bestimmten Werten sehr gut. Daraus folgt, dass die verwendeten VHDL-AMS-Modelle uneingeschränkt für Frequenzbereichssimulationen und weiterführende EMV-Untersuchungen eingesetzt werden können.

## 4 Simulationsergebnisse und Vergleich der ESD-Schutzelemente

In Abb. 10 ist eine Gegenüberstellung der errechneten maximalen Störpegel auf dem Bus zu sehen. Abhängig von der Durchbruchspannung wird die Amplitude der ein-koppelnden sinusförmigen Störspannung auf dem Bus begrenzt und es kann zu Kommunikationsfehlern kommen. Anlehnend an [10] ist in Tabelle 2 die maximale Störampplitude und maximale in den Bus einzukoppelnde Impulsstörleistung dem entsprechenden Schutzelement zugeordnet. Die Schwellspannung liegt, je nach Dimensionierung, auf unterschiedlichem Niveau. Beim CT0603L25HSG würde der Flex-

Ray-Transceiver bereits vor Erreichen des kritischen Wertes thermisch zerstört. Ist die Durchbruchspannung der ESD-Beschaltungen oberhalb der kritischen Transceiverausfallspannung, können transceiverinterne Schutzmechanismen ansprechen. Ein Großteil der gespeisten Leistung wird dann im Transceiver umgesetzt und dieser kann dadurch zerstört werden.

Sind die einkoppelnden Störfrequenzen größer als die Datenrate, werden nicht nur einzelne Bits sondern das gesamte Bitmuster beeinträchtigt. Abb. 11 zeigt ein 5 Bit breites Differenzbussignal, gestört von einer 50 MHz Sinusschwingung in Kombination mit dem Protek TVS-Array. In Bereichen, in denen die Störampplitude die Schwellspannung der Schutzbeschaltung überschreitet, werden periodisch Teilstücke des Bits zerstört. Das ungestörte Differenzbussignal ist gestrichelt hinterlegt. Inwiefern die Transceiver das gestörte Signal noch auswerten können, hängt von der internen Fehlererkennung ab.

Vorgeschaltete Tiefpassfilter können die eingekoppelte Störampplitude bei hohen Frequenzen zusätzlich dämpfen und die Störsicherheit erhöhen.

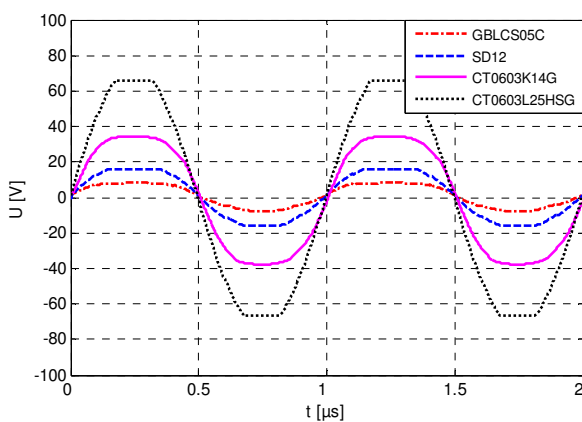


Abb. 10: Vergleich der Schwellspannungen

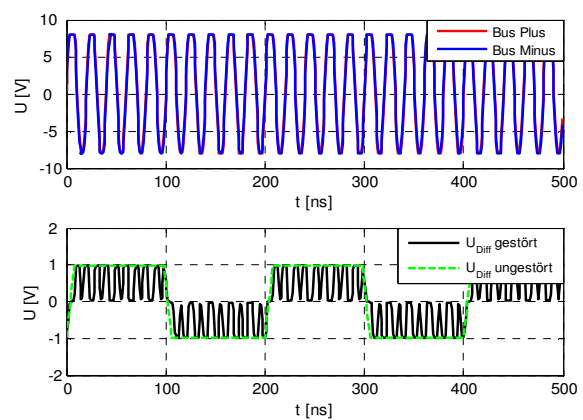


Abb. 11: Gestörter Differenzbuspegel mit Protek TVS-Array, 50 MHz Störsignal

Schutzelement	Maximale Störampplitude	Maximal zulässige Nettoleistung	
		NXP TJA1080 (FlexRay)	NXP TJA1050 (CAN)
Protek TVS GBLCS05C	≈ 8 V	< 5 mW <sup>1)</sup>	< 5 mW <sup>1)</sup>
SEMTECH TVS SD12	≈ 16 V	< 20 mW <sup>1)</sup>	< 20 mW <sup>1)</sup>
EPCOS CT0603K14G	≈ 32 V	< 500 mW <sup>1)</sup>	< 1600 mW <sup>1,2)</sup>
EPCOS CT0603L25HSG	≈ 65 V	< 1250 mW <sup>1,2)</sup>	< 1375 mW <sup>1,2)</sup>
Ohne Schutzbeschaltung	--	< 1250 mW <sup>1,2)</sup>	< 1375 mW <sup>1,2)</sup>

1) Impulsleistungen bei 1 MHz; 2) Modellierung der Transceiver mit Ausfallimpedanzen

Tabelle 2: Maximal zulässige Störampplitude/ -leistung abhängig vom Schutzelement

Die in Kapitel 3 vorgestellten Simulationen zeigen, dass falsch dimensionierte EDS-Schutzbeschaltungen einen negativen Einfluss auf die Buskommunikation haben können. Wird die Durchbruchspannung sehr niedrig angesetzt, sind die Transceiver und die damit verbundenen Halbleiter zwar gut gegen energiereiche, transiente Pulse geschützt, sinusförmige Störspannungen können durch die Schutzelemente aber begrenzt werden und so Bitfehler entstehen. Bei amplitudenmodulierten Signalen können durch den Modulationshub periodisch einzelne Bits zerstört werden. Im Fall des CAN-Busses würde dann eine logische Eins erkannt werden und es kann zur Fehlinterpretation der Signale kommen.

## 5 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Auswirkung von sinusförmigen Störspannungen auf Kfz-Bustransceiver in Verbindung mit ESD-Schutzbeschaltungen. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass sich vorhandene VHDL-AMS - Modelle für Diodenarrays und Varistoren auch für EMV-Simulationen im Frequenzbereich eignen. In Kombination mit den entwickelten Transceivermodellen können diese zu einem Gesamtsystem zusammengefasst und die Simulationsumgebung modular mit VHDL-AMS-Modellen aus anderen Bibliotheken erweitert werden. Dabei ist die Übereinstimmung zwischen den Simulations- und Messergebnissen sehr gut.

Die untersuchten ESD-Schutzbeschaltungen können bei einkoppelnden sinusförmigen Störspannungen das Differenzbussignal begrenzen, sodass es zu Bitfehlern kommt. Die Durchbruchspannung eines Schutzelements sollte möglichst hoch gewählt werden, um die Störfestigkeit des Bussystems nicht herabzusetzen. Hier wird deutlich, dass Maßnahmen zur Spannungsbegrenzung, die zu einer hohen ESD-Festigkeit führen, eine reduzierte Störfestigkeit gegen sinusförmige Störgrößen zur Folge haben können.

Ein signifikanter Einfluss der Schutzelementekapazität konnte nicht beobachtet werden.

## 6 Literatur

- [1] Donnelly, M.: *Automotive CAN Bus Signal Integrity Design*, Application Note, Mentor Graphics, 2005
- [2] Diaz Ortega, L.: *Physical Layer Modellierung der Bussysteme CAN und FlexRay im Kraftfahrzeug*, Dissertation, 2005, Shaker
- [3] Frei, S., Siebert, K., Günther, H., Mickisch, W.: *Challenges and Solution of Modeling a FlexRay Physical Layer*, FlexRay ProductDays, 11/2008, Carl Hanser Verlag
- [4] Hilger, U., Frei, S.: *Modellierung von LIN-Transceivern für EMV-Simulationen im Kraftfahrzeug*, EMV 2008, VDE Verlag
- [5] Arndt, B., Kremer, F., zur Nieden, F., Cao, Y., Edenhofer, J., Frei, S.: *Modellierung und Simulation von ESD-Schutzelementen mit VHDL-AMS*, EMV 2010, VDE-Verlag
- [6] Ali Alaeldine, A., Perdriau, R., Ramdani, R., Levant, J.-L., Drissi, M.: *A Direct Power Injection Model for Immunity Prediction in Integrated Circuits*, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2008
- [7] Lafon, F., de Daran, F.: *From IC characterization to system simulation modeling bottom up approach*, EMC Compo 2007, 6th International Workshop on Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits, 2007
- [8] ISO 11898-2:2003: *Road vehicles -- Controller area network (CAN) -- Part 2: High-speed medium access unit*
- [9] FlexRay Protocol Specification V2.1 Rev. A, <http://www.flexray.com>
- [10] DIN EN 62132-4:2006: *Integrierte Schaltungen - Messung der elektromagnetischen Störfestigkeit im Frequenzbereich von 150 kHz bis 1 GHz - Teil 4: Verfahren direkter Einspeisung der HF-Leistung*, Beuth Verlag