

Analyse der Störfestigkeit von ausgedehnten FlexRay-Netzwerken durch BCI-Simulationen

Dipl.-Ing. Ulf Hilger, M.Sc. Sergey Miropolsky, Prof. Dr.-Ing. Stephan Frei
Technische Universität Dortmund, Dortmund

1 Einleitung

FlexRay ist ein schneller Kfz-Datenbus mit einer hohen Störfestigkeit gegen elektromagnetische Einflüsse. Um die Störsicherheit auch komplexerer Busnetzwerke einzuschätzen, können diese mit speziellen Störfestigkeitstests wie beispielsweise BCI qualifiziert werden.

Eine Simulation von BCI-Prüfungen würde es erlauben den Einfluss elektromagnetischer Störungen auf das FlexRay-Netzwerk bereits in frühen Entwicklungsphasen zu berechnen. Zur Durchführung simulationsbasierter Tests an ausgedehnten FlexRay-Netzwerken sind geeignete Modelle der Transceiver, Kabel und der BCI-Zange notwendig.

In [1] und [2] wurden Methoden zur Modellierung von BCI-Stromzangen zur Einkopplung auf Mehrfachleitungen vorgestellt. In [3] wurde ein darauf basierendes verbessertes BCI-Zangenmodell gezeigt, mit dem die Einkopplung auf eine verdrehte Busleitung simuliert werden kann. In Kombination mit einfachen Verhaltensmodellen von FlexRay-Transceivern wurde in [4] die Anwendbarkeit der BCI-Simulationsmethodik an einem größeren Netzwerk nachgewiesen. Hierbei werden sowohl die Ausfallcharakteristika der Transceiver als auch parasitäre Effekte der Platinen und Steckverbindungen berücksichtigt.

Für die Störempfindlichkeit eines Bussystems spielt die Verkabelungstopologie und die Art der Terminierung eine besondere Rolle. Eine Laboruntersuchung des kompletten Bussystems mit den Leitungslängen und Terminierungen des Zielfahrzeugs mit BCI ist daher sinnvoll. Mit der hier entwickelten neuen Methodik kann diese Untersuchung mit beliebigen Leitungstopologien und FlexRay-Knoten simulationsbasiert durchgeführt werden. Im Folgenden wird die Methodik vorgestellt und Untersuchungen an zwei Transceivern unterschiedlicher Hersteller werden gezeigt.

2 Modellierung von Systemkomponenten eines FlexRay-Netzwerkes für Störfestigkeitssimulationen

Im Folgenden werden Methoden zur Entwicklung messtechnisch parametrierter Verhaltensmodelle von Kfz-Bustransceivern für EMV-Simulationen vorgestellt. Dabei stehen die Modellierung der einzelnen Transceiverbausteine sowie deren Implementierbarkeit in VHDL-AMS im Vordergrund. Die Modellgenerierung der internen ESD-Schutzbeschaltungen, Eingangsfiler, parasitären Effekte sowie der Treiber- und Empfangsstufe wird näher beschrieben. Die Simulationsmodelle werden mit vorhandenen Modellen von verdrehten Busleitungen und einer BCI-Koppelzange er-

weitert. Das Gesamtsystem kann beliebig variiert und somit können simulatorische BCI-Untersuchungen in unterschiedlichen Konfigurationen durchgeführt werden.

2.1 Struktureller Aufbau und Modellgenerierung für FlexRay-Transceiver

FlexRay-Transceiver können in verschiedene Submodule untergliedert werden, von denen in der Regel nur wenige die Störfestigkeit beeinflussen. Hierzu zählen die Empfangs- und Treiberbausteine, der ESD-Schutz, die interne Tiefpassfilterung und der Logikbaustein, welcher die Bussignale überwacht und bei Störungen den Treiber deaktiviert [6]. Die Störung des Logikbausteins oder der Treiberstufen kann durch die Aufnahme der frequenzabhängigen Störspannung erfasst werden. Die Charakterisierung des ESD-Schutzes ist anhand von U/I-Kennlinien möglich, die bei höheren Spannungen mit einem Transmission Line Pulser (TLP, <http://www.hppi.de>) aufgenommen werden.

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick zu den relevanten Substrukturen der Transceiver gegeben. Mögliche Störeinflüsse werden diskutiert.

2.1.1 Störsensitivität und Modellierung der Treiberstufe

Die interne Treiberstufe besteht im Wesentlichen aus zwei MOSFETs, die über Spannungsquellen die Buspegel bereitstellen [5]. Signale am Tx-Eingang werden durch eine Logikstufe plausibilisiert. Entsprechen die Datenpakete nicht der Protokollstruktur, wird die Treiberstufe deaktiviert. Diese Schutzfunktion gewährleistet bei Hardwarestörungen eine sichere Kommunikation zwischen den restlichen Teilnehmern. Eingehende Signale werden über die Treibertransistoren pegelangepasst als differenzielles Bussignal ausgegeben. Da die beiden Treiberstufen gegenseitig arbeiten, werden die Signale einer Stufe invertiert. Abb. 1 zeigt ein vereinfachtes Modell einer Treiberstufe. C_p ist die Eingangskapazität der FETs und der internen ESD-Schutzstrukturen.

Elektromagnetische Störungen können zu Schaltvorgängen der FETs oder auch komplexeren Störmechanismen führen. Der interne Spannungsregler oder der Logikbaustein können beeinflusst werden, was zu einem Ausfall des Tx-Modus führt.

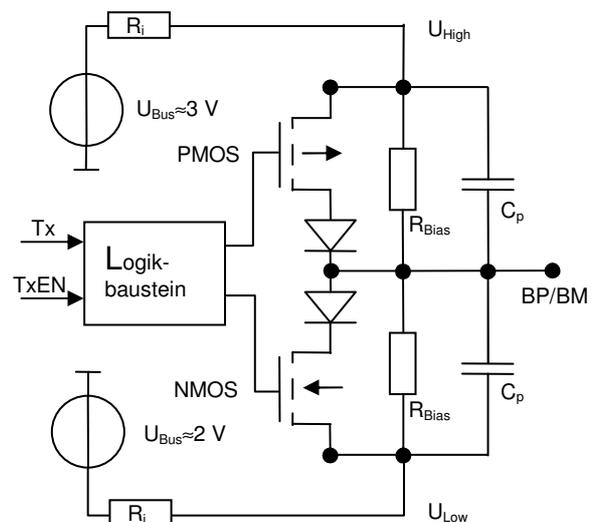


Abb. 1: Vereinfachter Aufbau der Treiberstufen

2.1.2 Modellierung der Empfangsstufe mit Tiefpassfilterung

Die Empfangsstufe ist durch einen Operationsverstärker in Komparatorschaltung modelliert. Abb. 2 zeigt den vereinfachten Modellansatz mit analoger und digitaler Filterstufe. An den hochohmigen Eingängen wird die Differenzspannung auf den

Busleitungen bestimmt und am OP-Ausgang bereitgestellt. C_p ist die parasitäre Gegentakt-Kapazität und liegt bei diesen Beschaltungen im Bereich von 1 bis 2 pF.

Der FlexRay-Bus ist mit einer Datenrate von bis zu 10 MBit/s spezifiziert [6].

Um hochfrequente Störsignale zu eliminieren, ist im Transceiver ein Tiefpassfilter integriert.

Die Filter sind etwa auf eine Grenzfrequenz von circa 30 MHz abgestimmt. Messungen zeigten, dass hochfrequente Störungen am Rx-Ausgang nicht mehr zu detektieren sind. Die analog gefilterten Signale werden an einem digitalen „Entscheider“ A/D-gewandelt und nach einer zusätzlichen digitalen Filterung am Rx-Ausgang als TTL-Pegel dargestellt.

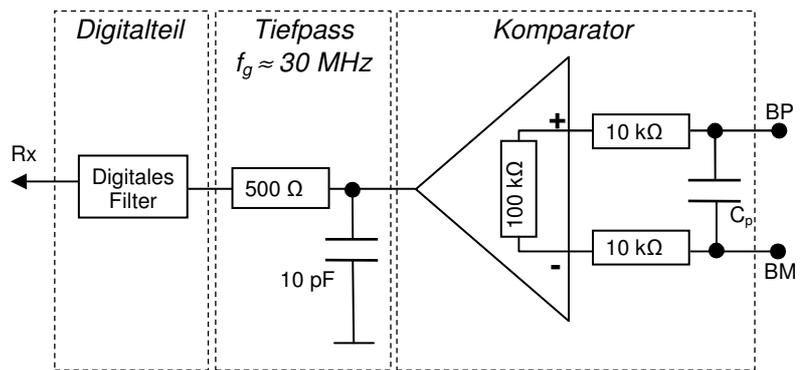


Abb. 2: Empfangsstufe mit Tiefpassfilterung

2.1.3 Einfluss und Modellierung des internen ESD-Schutzes/ Thermische Degradation der Transceiver

Um die Transceiver vor ESD zu schützen werden Schutzmaßnahmen auf dem Chip realisiert. Die internen Schutzstrukturen schalten bei Überschreiten der Durchbruchspannung auch hochfrequente Störströme kurz. Dies kann je nach Leistung der Störgröße zur thermischen Zerstörung oder Degradation des Halbleitersubstrates führen.

Die Modellierung der ESD-Strukturen erfolgt durch eine Kapazität und einem U/I-Kennlinienmodell [7]. Abb. 3 zeigt das Ersatzmodell eines ESD-Schutzelementes.

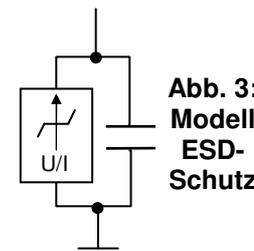


Abb. 3: Modell ESD-Schutz

2.1.4 Modellierung der Eingangsimpedanzen

Solange die Transceiver unterhalb der Ausfallschwelle betrieben werden, genügt ein lineares Modell aus der Parallelschaltung einer Kapazität und einem Widerstand. Da die parasitäre Kapazität gegen Masse dominant ist kann die differentielle Last bei Gleichtaktstörungen auf den Busleitungen vernachlässigt werden. Diese fließt über den Massebezug mit ein. Wird die kritische Spannung an den Knotenplatinen erreicht, greifen die Kennlinienmodelle der Transceiver. Die äquivalenten Ersatzimpedanzen können sowohl im ungestörten, linearen Bereich als auch im nichtlinearen, kritischen Ausfallbereich Anwendung finden. In Tabelle 1 sind die Ersatzimpedanzen der untersuchten Transceiver für den gestörten Fall dargestellt. Verschiedene Impedanzmodelle, die abhängig von der Ausfallcharakteristik des Transceivers sind, sind notwendig.

Transceiver	Typ A	Typ B
Störausfallimpedanz	2 kΩ 10 pF	20 kΩ 42 pF

Tabelle 1: Ersatzimpedanzen Ausfallmodell

Für die Simulation bestimmter definierter Betriebszustände müssen unterschiedliche Lastmodelle generiert

werden. Messungen mit dem NWA ergaben, dass die parasitäre Eingangskapazität abhängig vom Betriebszustand des Transceivers stark variieren kann (Abb. 5). Im Idle-Mode sind die Transistoren der Treiberstufe nicht durchgeschaltet und die parasitäre Kapazität beträgt etwa 68 pF. Im TxEn-Mode schaltet ein FET den Pfad BM gegen Masse durch und ein Teil der Eingangskapazität wird kurzgeschlossen. Die resultierende Kapazität an BM sinkt auf etwa 47 pF. Die invertierte Treiberstufe schaltet auf ein High-Potential und an BP steigt die Kapazität auf 72 pF an. Die Störausfallmodelle wurden im Tx-Mode an BP und BM bestimmt. Ein Vergleich mit der Kapazität im TxEn-Mode bestätigt die Messergebnisse der Störfestigkeitsmodellierung aus Tabelle 1 für Typ B mit $C = 42 \text{ pF}$.

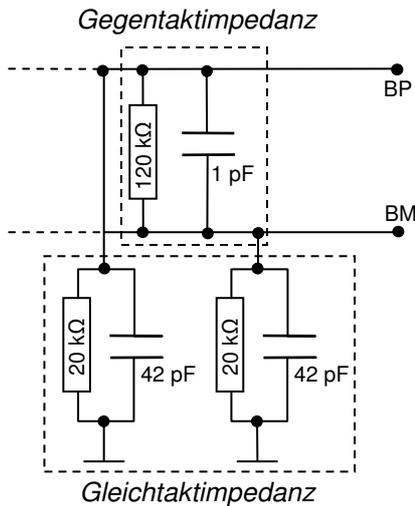


Abb. 4: Eingangsimpedanzmodell für Typ B (Störausfallmodell)

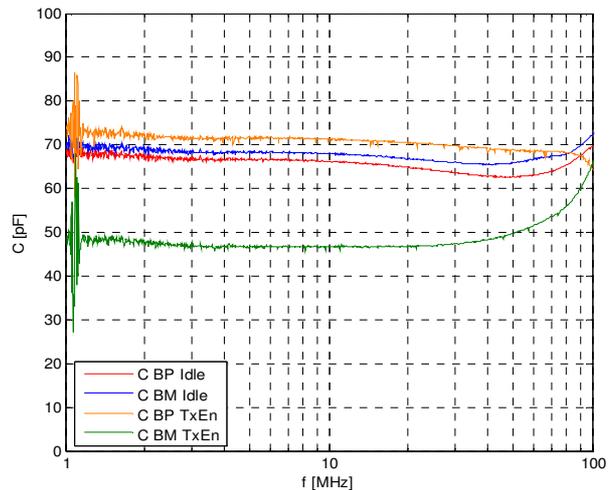


Abb. 5: Eingangsimpedanz für Typ B abhängig vom Schaltzustand der Treiber

2.2 Modell der BCI-Zange und der verdrehten Busleitung

Wesentliche Bestandteile der Netzwerksimulation sind die Modelle der BCI-Zange und der verdrehten Leitung.

Das Zangenmodell wurde in [3] vorgestellt und besteht aus passiven Bauelementen sowie spannungsgesteuerten Spannungs- und stromgesteuerten Stromquellen.

Das Modell der verdrehten FlexRay-Leitung beruht auf einem Zeitbereichsmodell eines Mehrleitersystems unter Berücksichtigung frequenzabhängiger Verluste wie zum Beispiel dem Skin-Effekt. Es kann für lineare und nicht lineare Simulation im Frequenzbereich uneingeschränkt eingesetzt werden und wird in [8] näher beschrieben.

2.3 Verkettung der Modelle für Störfestigkeitsimulationen

Die in Abschnitt 2.1 beschriebenen Modelle der Substrukturen können mit VHDL-AMS zu einem Gesamtmodell kombiniert werden. Für Störfestigkeitsimulationen sind die Impedanzen am Bus relevant. Bei Überschreiten der kritischen Störspannung werden die nichtlinearen Kennlinienmodelle eingesetzt. Abb. 6 zeigt die Struktur des in VHDL-AMS formulierten Simulationsmodells. Am „HF IN“ Port befindet sich eine ideale Sinusspannungsquelle mit einem Innenwiderstand von 50Ω .

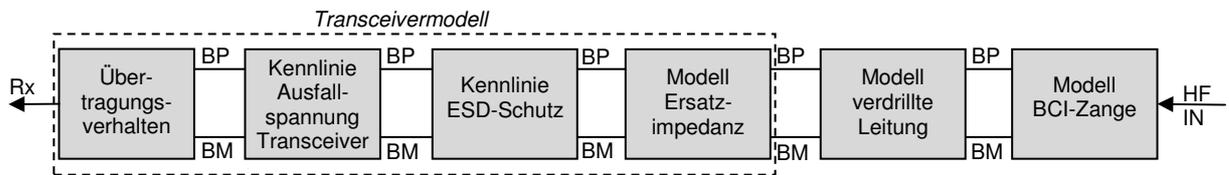


Abb. 6: Simulationsmodell mit verketteten Submodellen

3 Simulatorische Untersuchungen eines FlexRay-Bussystems

Die Untersuchungen finden an einem Aufbau mit vier Knotenplatinen und passivem Sternpunkt statt. Auf den Platinen befindet sich lediglich der Transceiver mit der für die Untersuchungen notwendigen Peripherie. Die durch BCI eingekoppelten Störströme können sich über das gesamte Netzwerk ausbreiten.

Auf den Einsatz eines aktiven Sternpunktes wird hier nicht näher eingegangen, da die durch die BCI-Einkopplung eingepprägten Störströme nur vom Sternpunkttransceiver absorbiert würden. Die sichere Kommunikation der übrigen Teilnehmer in den „ungestörten“ Zweigen hängt somit nur von der Störfestigkeit des aktiven Sternes und nicht von der Kabeltopologie ab [9].

3.1 Systemaufbau und Verifikation der Simulationsmodelle im Labor

Das in Abb. 7 dargestellte FlexRay-Netzwerk wurde zur Verifikation der Simulationsmodelle im Labor aufgebaut. Zwei der Platinen sind hochohmig und zwei wellenwiderstandsangepasst terminiert. In Untersuchungen wird der Einfluss der Terminierungen und der Leitungslängen überprüft.

Die Modellgenerierung und Verifikation erfolgte in drei Stufen. Im ersten Schritt wurden mit einem NWA S_{21} -Messungen zur Bestimmung der Impedanzen im Netzwerk zwischen BCI-Zange und den einzelnen Knoten durchgeführt. Um auch höhere Leistungen in das Netzwerk einspeisen zu können, wurde im nächsten Schritt die Anwendbarkeit des Verfahrens mit einem Signalgenerator und einem Oszilloskop überprüft. Es wurden aktive Tastköpfe mit einer sehr geringen Kapazität verwendet, um die Resonanzen nicht zu stark zu beeinflussen. Die Tastkopfimpedanzen werden im Modell separat berücksichtigt. Abb. 8 zeigt einen Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Knotenspannungen mit aktiven Transceivern (Typ B). Die Einspeisung erfolgt über den Signalgenerator mit einer Leistung von 10 dBm. Die Simulation zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit der Messung. Im weiteren Verlauf wird die Speiseleistung weiter erhöht und zwischen Signalgenerator und BCI-Zange ein HF-Verstärker sowie ein Leistungsmessgerät geschaltet. Um auch bei höheren Eingangsleistungen die Gültigkeit der verwendeten Modelle zu überprüfen, wird gezielt an diskreten Punkten die Leistung nachgemessen.

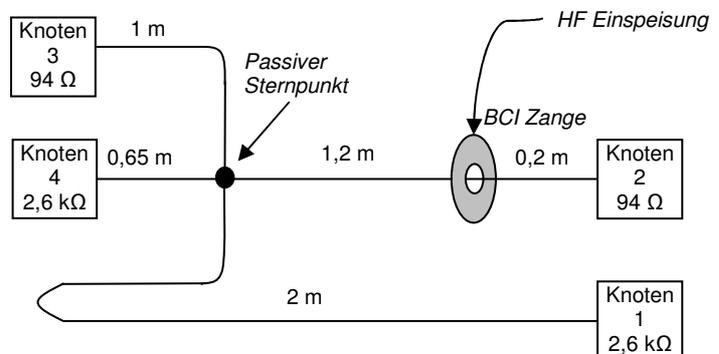


Abb. 7: Laboraufbau mit passivem Sternpunkt

Ein Vergleich zwischen der Simulation und den Messpunkten mit 40 dBm (Abb. 9) zeigt eine gute Übereinstimmung im Rahmen der Messgenauigkeit. Somit ist das erweiterte FlexRay-Netzwerkmodell auch für Simulationen mit höheren Leistungen im Frequenzbereich bis 200 MHz geeignet um Busstörungen zu berechnen.

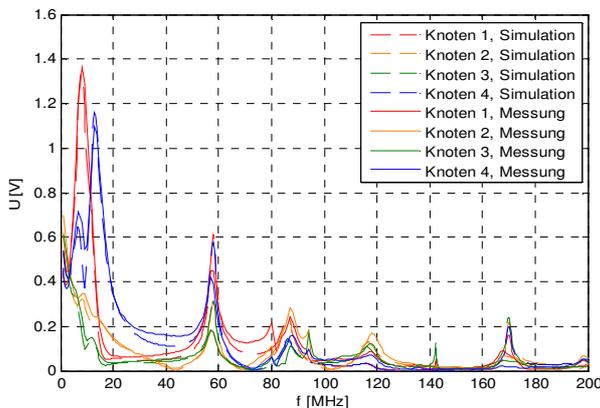


Abb. 8: Vergleich Messung - Simulation der Knotenspannungen Transceiver Typ B

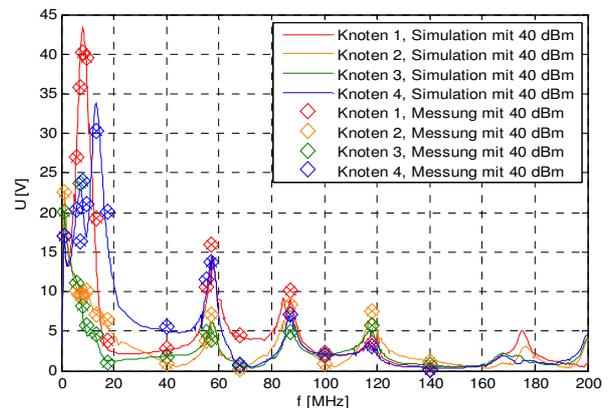


Abb. 9: Verifikation Einspeisung 40 dBm

3.2 Auswirkung von Leitungslängen und Transceiverimpedanzen

In Abb. 8 und Abb. 9 ist zu sehen, dass die Resonanzen in niederohmig terminierten Knoten auf Grund der stärkeren Dämpfung weniger ausgeprägt sind, was sich auch auf die Störsicherheit dieser Teilnehmer auswirkt. Um zusätzliche Leitungsresonanzen zu vermeiden, sollten die hochohmig abgeschlossenen Knoten mit möglichst kurzen Stichleitungen an den Hauptstrang angebunden werden. Die Hauptursache für die Resonanzen bei niedrigen Frequenzen liegt in der parasitären Kapazität des Transceivers in Kombination mit den Leistungsinduktivitäten. Bei Transceivern mit einer vergleichsweise geringeren Eingangskapazität treten die ersten Resonanzen erst bei höheren Frequenzen auf. Ein Vergleich der Resonanzen zwischen Transceiver Typ B (Abb. 8) und Typ A mit geringerer Eingangskapazität (Abb. 10) bei gleicher Netzwerkkonfiguration bestätigt dieses Verhalten.

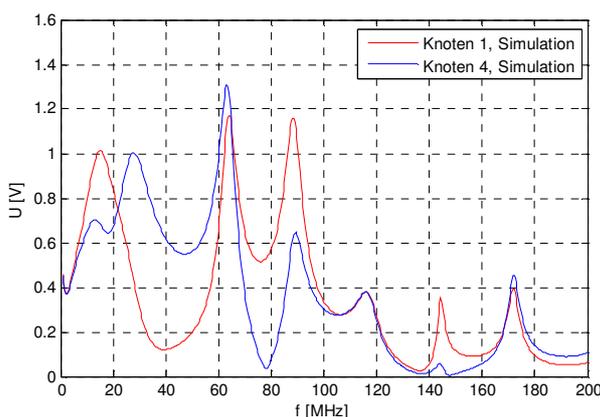


Abb. 10: Simulation der Resonanzen am 2,6 kΩ Knoten, Transceiver Typ A

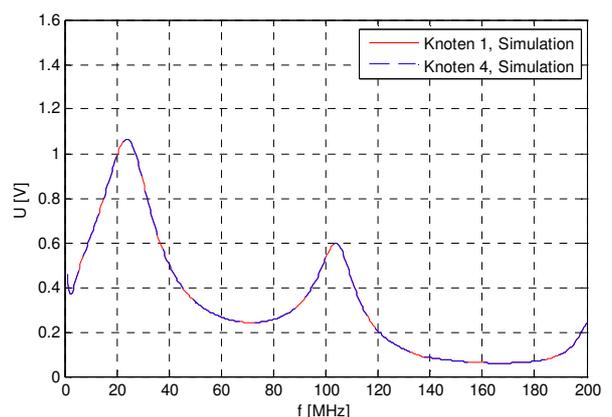


Abb. 11: Simulation 3 cm Stichleitungen am 2,6 kΩ Knoten, Transceiver Typ A

Auf der anderen Seite sorgt eine hohe parasitäre Kapazität im Bauelement für einen höheren Ableitstrom gegen Masse und bildet eine Tiefpasscharakteristik. Je nach Leistung der eingekoppelten Störgröße kann das Tiefpassverhalten ein Vorteil bei der Störfestigkeit sein. Zu hohe Ströme können im Halbleiter jedoch zur thermischen Zerstörung führen. Werden die beiden Sticheleitungen zu den hochohmig terminierten Knoten 1 und 4 auf 3 cm verkürzt, wirkt sich dies auch auf die Anzahl der Resonanzstellen aus. Abb. 11 zeigt ein symmetrisches Verhalten der Störspannung auf beiden Leitungen mit einer geringeren Anzahl an Resonanzpunkten.

3.3 Störfestigkeit der FlexRay-Knoten

Im Folgenden wird mit den generierten Simulationsmodellen das Netzwerk aus Abb. 7 mit den zwei modellierten Transceivertypen A und B untersucht.

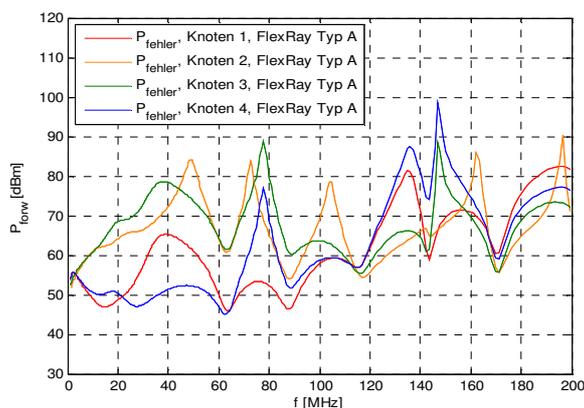


Abb. 12: Notwendige Leistung für Ausfall Typ A

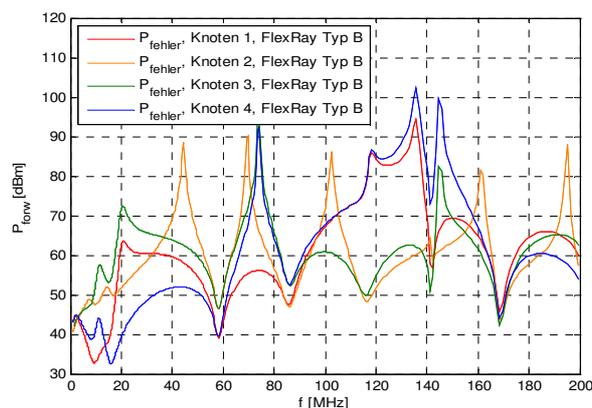


Abb. 13: Notwendige Leistung für Ausfall Typ B

Die Ausfallcharakteristika beider Typen wurde bereits anhand von Kennlinien in vorhergehenden Untersuchungen [4] erfasst und fließen in die Simulation mit ein. Transceiver Typ A hat mit annähernd konstant 50 V_{RMS} eine deutlich höhere Ausfallschwelle als Typ B mit etwa 13 bis 15 V_{RMS} . Fließen die Kennlinien in die Simulation mit ein, kann die Störschwelle abhängig von der eingekoppelten BCI-Leistung bestimmt werden. Abb. 12 zeigt die Ausfallschwelle des Transceivers Typ A. Die minimal in die BCI-Zange einzuspeisende Leistung liegt knapp unter 50 dBm (100 W).

Auf Grund verschiedener Leitungslängen im Netzwerk sind die Resonanzen deutlich zu sehen. In Abb. 13 ist die Störleistungskurve des Typs B dargestellt. Da dieser Transceiver eine deutlich geringere Störfestigkeit aufweist, reichen im unteren Frequenzbereich schon Leistungen unter 10 W aus, um einen Busausfall hervorzurufen. In Abb. 14 ist die Grenzwertlinie der maximal einzuspeisenden Störleistung über alle Knoten angegeben. Der Vergleich zeigt, dass trotz einer deutlich geringe-

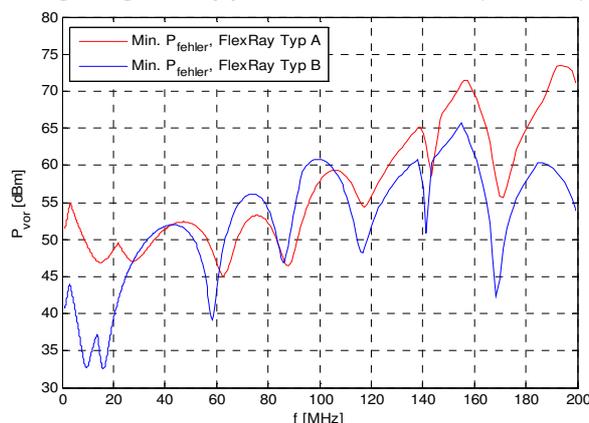


Abb. 14: Vergleich der Ausfalleleistungen

ren spannungsabhängigen Störfestigkeit der Transceiver Typ B im Netzwerk ähnlich resistent gegen hohe Störleistungen sein kann wie Typ A. Dies ist auf die höhere Eingangskapazität und dem damit verbundenen Tiefpasscharakter zurückzuführen.

4 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Modellierung und der Simulation eines ausgedehnten FlexRay-Netzwerkes. VHDL-AMS Modelle der Transceiver, der BCI-Zange und der Busleitungen wurden in einem Modell zusammengefasst und im Labor in einem Systemaufbau überprüft. Dabei zeigte sich eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung im Frequenzbereich bis 200 MHz.

Mit den entwickelten Modellen kann die Störfestigkeit eines FlexRay-Netzwerkes mit vier Knotenplatinen, passivem Sternpunkt und zwei verschiedenen Transceivertypen simuliert werden. Es ist möglich den Einfluss der Terminierungen und Leitungsresonanzen im Netzwerk zu berechnen. Es können beliebige Topologien mit unterschiedlichen Leitungslängen und passivem Sternpunkt simulatorisch untersucht werden. Die vorgestellten Simulationen generieren verlässliche Aussagen ob bestimmte Verkabelungsstrategien oder Terminierungskonzepte sich negativ auf die sichere Buskommunikation auswirken. Während der Konzeptphase kann somit die Störfestigkeit umfangreicherer Bussysteme abgesichert werden.

5 Literatur

- [1] F. Grassi, F. Marliani, S. A. Pignari: *SPICE modeling of BCI probes accounting for the frequency-dependent behavior of the ferrite core*, in Proc. XIXth General Assembly of U.R.S.I., Chicago, IL, USA, Aug. 7-16, 2008, Commission E, Paper E07.6.
- [2] F. Lafon, Y. Belakhoy, F. De Daran: *Injection probe modeling for bulk current injection test on multiconductor transmission lines*, IEEE Symp. on Embedded EMC Proceedings, Rouen, France, 2007
- [3] S. Miropolsky, S. Frei, J. French: *Modeling of Bulk Current Injection (BCI) Setups for Virtual Automotive IC tests*, EMC Europe, Wroclaw 2010
- [4] U. Hilger, S. Miropolsky, S. Frei: *Modeling of Automotive Bus Transceivers and ESD Protection Circuits for Immunity Simulations of Extended Networks*, EMC Europe, Wroclaw 2010
- [5] C. Heller: *FlexRay on Aeronautic Harnesses*, Dr. Hut Verlag 2010
- [6] FlexRay Protocol Specification V2.1 Rev. A, <http://www.flexray.com>
- [7] B. Arndt, F. Kremer, F. zur Nieden, Y. Cao, J. Edenhofer, S. Frei: *Modellierung und Simulation von ESD-Schutzelementen mit VHDL-AMS*, EMV 2010, VDE-Verlag
- [8] H. Zhang, K. Siebert, S. Frei, T. Wenzel, W. Mickisch: *Multiconductor Transmission Line Modeling with VHDL-AMS for EMC Applications*, IEEE-EMC 2008 Symposium, Detroit 2008
- [9] M. Rausch: *FlexRay*, Carl Hanser Verlag, 2008