

Untersuchung des Einflusses von Parametervariationen auf die Störfestigkeit differentieller Kfz-Bussysteme

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

1 Einleitung

Differentielle Kfz-Datenbusse wie CAN oder FlexRay zeichnen sich durch eine hohe Festigkeit gegen elektromagnetische Störungen aus. Um negative Einflüsse auf die Störsicherheit durch ungünstige Netzwerkkonstellationen oder Terminierungen zu identifizieren, können in einer Rechnersimulation vorab viele relevante Parameter eines Bussystems analysiert werden.

Für die Störfestigkeitssimulation sind auf Systemebene geeignete Impedanz- und Verhaltensmodelle aller beteiligten Komponenten erforderlich. In [1] wurde ein Verfahren vorgestellt, mit dem sich das Verhalten der ICs im kritischen Ausfallpunkt messtechnisch bestimmen und in Form frequenzabhängiger Impedanz- und Ausfallspannungen in die Modelle implementieren lässt.

Mit VHDL-AMS können simulationsbasierte BCI-Störfestigkeitsuntersuchungen an CAN- und FlexRay-Bussystemen im Frequenzbereich bis 100 MHz durchgeführt werden. Die Methodik von BCI-Simulationen wurde bereits in [2] an einem ausgedehnten FlexRay-Netzwerk vorgestellt und die Anwendbarkeit des Verfahrens mit Modellen des gesamten Systemaufbaus nachgewiesen. Weiterführende Analysen in unterschiedlichen Netzwerkkonfigurationen wurden damit jedoch noch nicht durchgeführt.

Daher werden in der vorliegenden Arbeit simulationsbasierte Untersuchungen an CAN- und FlexRay-Bussystemen mit der BCI-Methode angestellt. Die Buserminierungsparameter, die Leitungslängen und die Speiseposition der BCI-Koppelzange werden variiert und die problematischen Konfigurationen herausgearbeitet.

Die vorgestellten Simulationsmodelle von Kfz-Bussystemen können auch in anderen Anwendungsbereichen eingesetzt werden. Beispielsweise wird in [3] auf der Basis eines einfachen Leitungsmodells die Einkopplung einer ebenen Welle in eine einzelne Leitung analytisch beschrieben, die sich 5 cm über einer Metallplatte befindet. Sind die Impedanzen an den Leitungsabschlüssen bekannt, kann beispielsweise das Erreichen der Störschwelle eines Bustransceivers in Abhängigkeit von der Feldstärke in der Umgebung der Leitung berechnet werden. Die Anwendung des Verfahrens auf ein FlexRay-Bussystem wird in Kapitel 3 näher beschrieben.

2 Störsicherheit differentieller Bussysteme

Differentielle Datenbusse wie CAN oder FlexRay arbeiten mit gegensinnigen Signalpegeln und verdrehten Busleitungen. Aufgrund der Verdrehung mit einer kurzen Schlaglänge von etwa 20 mm kann davon ausgegangen werden, dass Gegentaktstörungen den Transceiver nicht oder nur mit einem geringen Störpegel erreichen. Eine Störung des differentiellen Bussignals ist daher sehr unwahrscheinlich. Somit können im Wesentli-

chen Gleichtaktstörungen einkoppeln und sich über die verdrehte Leitung zu den Busknoten fortsetzen. Dadurch werden bei gleichen Impedanzverhältnissen beide Buspegel um einen Offset angehoben. Die Differenz bleibt gleich.

Die Störsicherheit der Bussysteme ist von diversen Faktoren abhängig. Störfestigkeitsmessungen an den Transceivern zeigen, dass die beaufschlagte Störampplitude soweit erhöht werden kann, bis entweder die Transceiverlogik beeinflusst wird oder die Treiber-FETs beziehungsweise ESD-Schutzstrukturen durchbrechen. Letztere können durch Ableiten des hohen Stroms gegen Masse oder V_{DD} zu einer thermischen Zerstörung von Siliziumstrukturen und damit zu einem Defekt des ICs führen.

2.1 Optimierung der Störsicherheit

Eine weitere Erhöhung der Störfestigkeit differentieller Bussysteme kann durch den Einsatz von Gleichtaktdrosseln, Stütznetzwerken oder anderen Filterschaltungen erreicht werden. Abb. 1 zeigt typische EMV-Maßnahmen an einem CAN- beziehungsweise FlexRay-Busknoten bestehend aus einer Gleichtaktdrossel und einem 4,7 nF Split-Kondensator.

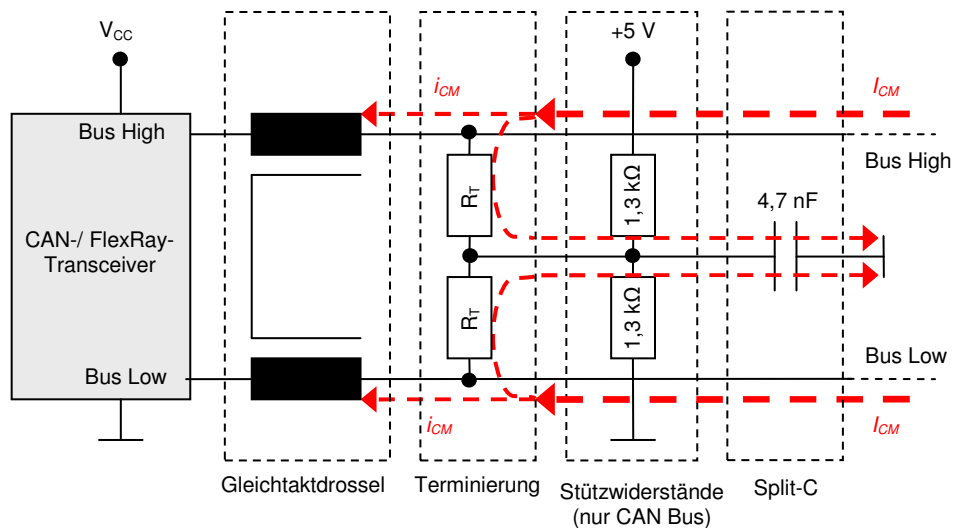


Abb. 1: Typische Terminierung eines CAN- oder FlexRay-Busknotens

Die Stützwiderstände sind in Verbindung mit dem Split-Kondensator nur in der CAN-Spezifikation vorgesehen. Sie sollen das rezessive Bussignal stabilisieren und die Störfestigkeit erhöhen. Durch den 4,7 nF-Split-Kondensator wird ein Tiefpassfilter ($f_g \approx 25$ kHz) realisiert. Common-Mode-Ströme I_{CM} werden zum Teil über die Terminierungswiderstände R_T und den Kondensator gegen Masse abgeleitet. Die Stützwiderstände und der Split-Kondensator sind eine optionale Bestückungsvariante. In der zweiten Stufe dämpft die CM-Drossel weitere asymmetrische Störanteile. An den wellenwiderstandsabgeschlossenen Knoten ist der CAN-Bus mit zweimal $R_T = 50 - 65 \Omega$ [5] und der FlexRay-Bus mit zweimal $R_T = 40 - 55 \Omega$ [6] zu terminieren.

2.2 Struktureller Aufbau differentieller Bustransceiver

FlexRay-Transceiver können in verschiedene Submodule untergliedert werden, die in Interaktion wesentlich die Störfestigkeit gegenüber elektromagnetischen Feldeinkopp-

lungen bestimmen. Hierzu zählen nicht nur die Empfangs- und Treiberstufe, sondern auch der ESD-Schutz, die interne Tiefpassfilterung und die Logikstufe, welche die Signale auf dem Bus überwacht und bei Störungen den Treiber deaktiviert [4].

In Abb. 2 wird ein vereinfachter Überblick über die in einem FlexRay-Transceiver in der Regel integrierten Substrukturen gegeben. Es werden der strukturelle Aufbau einer Empfangsstufe mit einer Differenzverstärkerschaltung zur Detektion des differentiellen Bussignals sowie eine analoge und eine digitale Filterstufe gezeigt.

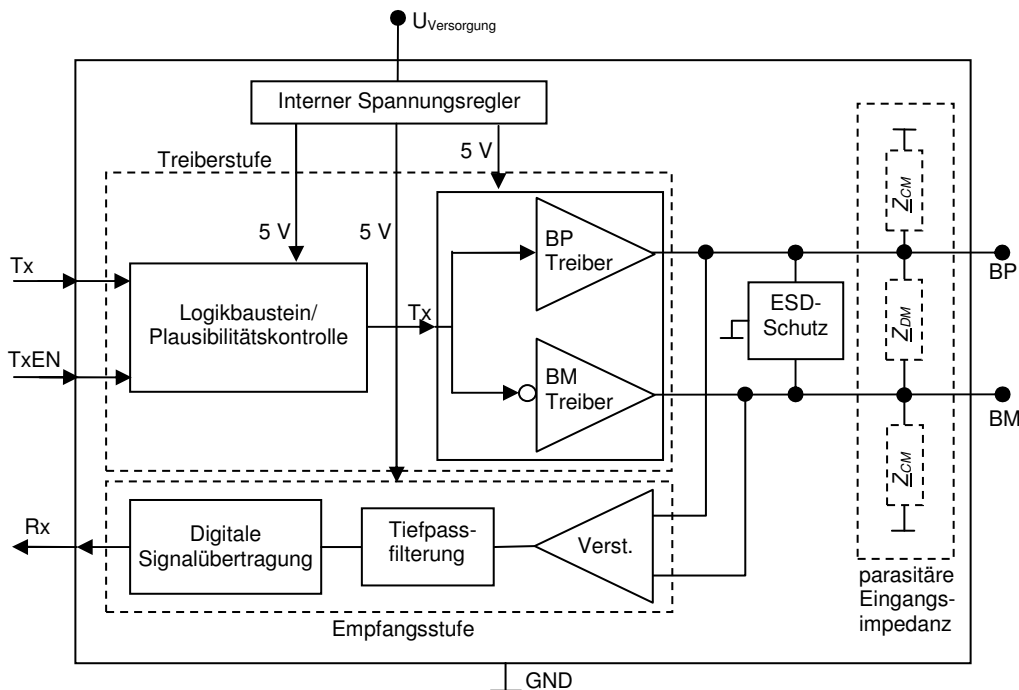


Abb. 2: Stark vereinfachter Aufbau eines FlexRay-Transceivers

In der digitalen Filterung wird das Signal digital aufbereitet und am Rx-Ausgang zur Verfügung gestellt. Die Treiberstufe besteht aus einem Logikbaustein sowie aus der Ansteuerung der Treibertransistoren. Weiterhin werden der integrierte ESD-Schutz sowie die Gleichtaktimpedanz Z_{CM} und die Gegentaktimpedanz Z_{DM} berücksichtigt.

Einem Störfall des Transceivers können verschiedene Ursachen zu Grunde liegen, die meist von außen nicht ersichtlich und somit nicht im Detail modellierbar sind. In dieser Arbeit wird daher ein einfaches Verhaltensmodell verwendet [1], [2]. Ein Ausfall des Logikbausteins oder der Treibertransistoren wird durch die Aufnahme der frequenzabhängigen Störspannung oder Störleistung ebenso im Verhalten erfasst wie das Ansprechen des integrierten ESD-Schutzes. Der Einfluss der Eingangsimpedanzen Z_{CM} und Z_{DM} im kritischen Ausfallpunkt der Transceiver ist ein wesentlicher Bestandteil der Störfestigkeitsmodelle. Da Z_{CM} im Vergleich zu Z_{DM} jedoch um einige Zehnerpotenzen höher sein kann, dominiert dieser Strompfad über Masse und Z_{DM} kann vernachlässigt werden.

3 Einfluss von Parametervariationen auf die Störfestigkeit von CAN- und FlexRay-Bussystemen in einem Netzwerk

Um die Auswirkung unterschiedlicher Parameter auf die Störfestigkeit von Bussystemen zu untersuchen, werden Einflussfaktoren wie Leitungslängen, die Art der Terminierung und die Einkoppelposition der BCI-Zange gezielt variiert. Die Ergebnisse der Simulatio-

nen können Anschluss über Konfigurationen geben, die sich negativ auf die Störsicherheit des Bussystems auswirken.

3.1 Aufbau der Simulationsmodelle

Die Störfallmodelle der verwendeten Bustransceiver werden in einem Netzwerkverbund mit Kabelmodellen und dem Modell einer BCI-Zange verschaltet. Das Systemmodell, bestehend aus vier Knotenplatinen mit passivem Sternpunkt, wurde in [2] an einem FlexRay-Bussystem bis 200 MHz messtechnisch verifiziert. In Abb. 3 ist die Grundkonfiguration des modellierten Bussystems zu sehen. Die Leitungen an den wellenwiderstandsabgeschlossenen Knoten 2 und 3 werden mit einer definierten Länge von jeweils 1 m ausgeführt. Die BCI-Zange befindet sich in einem Abstand von 20 cm zum Knoten 2. Die Leitungslängen an den hochohmig terminierten Knoten 1 und 4 sollen abhängig von der zu untersuchenden Konfiguration variabel ausgeführt werden.

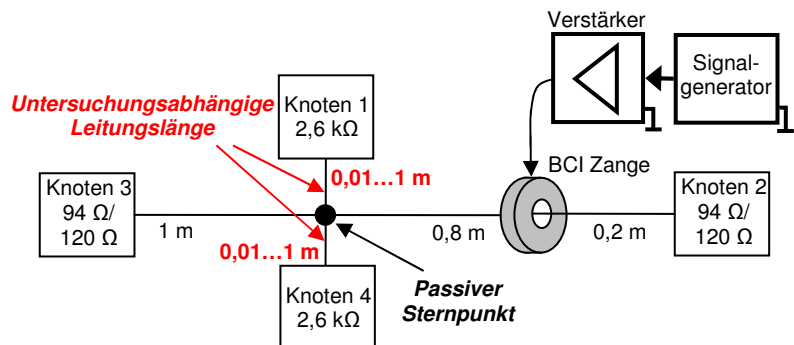


Abb. 3: Grundkonfiguration eines Bussystems mit vier Teilnehmern

Für die Netzwerksimulationen werden die Busknoten jeweils mit einem Störfallmodell des verwendeten CAN- beziehungsweise FlexRay-Transceivers von NXP verschaltet. Für Simulationen bis 100 MHz kann dieses als Ersatzimpedanz bestehend aus einer Parallelschaltung eines Kondensators mit einem Widerstand ausgeführt werden [1].

Die Ausfallschwellen und -impedanzen der verwendeten NXP CAN- und FlexRay-Transceiver sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Transceiver	CAN TJA1050	FlexRay TJA1080
Störfallimpedanz (Z_{CM})	450 Ω 12 pF	2 kΩ 10 pF
Ausfallschwelle	≈ 20...30 V _{RMS}	≈ 50 V _{RMS}

Tabelle 1: Ausfallimpedanzmodell

3.2 Einfluss des Split-Kondensators und der Stützwiderstände

Abb. 1 zeigt eine typische Terminierung, wie sie bei CAN- oder FlexRay-Knoten vorkommen kann. Um den Einfluss des optionalen Split-Kondensators sowie der Stützwiderstände hinsichtlich der Störsicherheit zu untersuchen, werden BCI-Simulationen an einem CAN- und an einem FlexRay-Bussystem mit vier Teilnehmern durchgeführt. Der Aufbau und die Konfiguration der Netzwerke hinsichtlich der Stranglänge und der Einkoppelposition werden entsprechend Abb. 3 realisiert. Die Stichleitungen zu den hochohmig terminierten Knoten 1 und 4 haben hier eine feste Länge von 10 cm.

In Abb. 4 ist eine Gegenüberstellung der in die BCI-Zange einzuspeisenden Leistungen zum Hervorrufen eines Ausfalls in einem Netzwerk mit vier CAN-Knoten abhängig von der Terminierung zu sehen. Die Störfestigkeit des CAN-Bussystems mit NXP TJA1050 Transceivern ist am höchsten, wenn eine Terminierung mit Split-Kondensator und Stützwiderständen verwendet wird. Entfallen die optionalen Stützwiderstände, reduziert sich die Störsicherheit jedoch nur marginal. Bei Entfall des 4,7 nF Split-Kondensators werden hochfrequente Ströme nicht mehr gegen Masse abgeleitet und die Störfestigkeit

sinkt in dieser Konfiguration um 5 – 8 dB. Die Wirkung des Split-Kondensators ist an den wellenwiderstandsabgeschlossenen Knoten am höchsten. Sind die Knoten hochohmig abgeschlossen, reduzieren die hochohmigen Terminierungswiderstände den Ableitstrom über den 4,7 nF Kondensator nach Masse.

In Abb. 5 wird analog die Störsicherheit eines FlexRay-Bussystems in derselben Konfiguration mit NXP TJA1080 Transceivern untersucht. Zu sehen ist die in die BCI-Zange einzuspeisende Ausfalleistung. Die absolute Störfestigkeit des FlexRay-Netzwerks ist im Vergleich zum CAN-Bus in der Simulation um etwa 5 dB höher. Durch den Entfall des optionalen Split-Kondensators sinkt die Störfestigkeit des FlexRay-Busses ebenfalls um etwa 5 – 8 dB.

Durch die Stützwiderstände kann keine signifikante Steigerung der Störfestigkeit erzielt werden. Einflüsse auf die Signalintegrität werden in dem verwendeten Simulationsmodell nicht berücksichtigt. Der Split-Kondensator bringt eine deutliche Erhöhung der Störsicherheit bei CAN- und FlexRay-Bussystemen. Die Bestückung ist daher zu empfehlen.

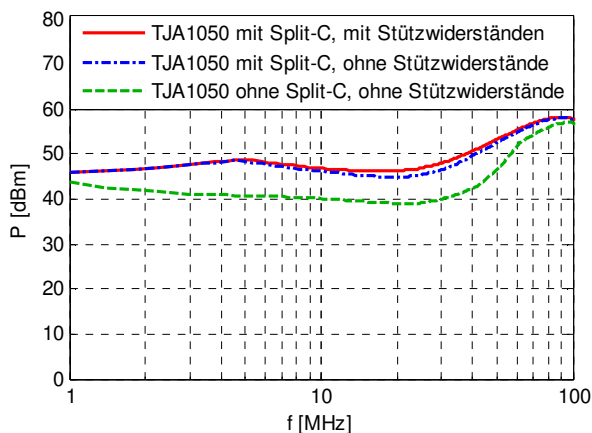


Abb. 4: In ein CAN-Netzwerk mit vier Teilnehmern und unterschiedlicher Terminierung einzuspeisende Ausfalleistung

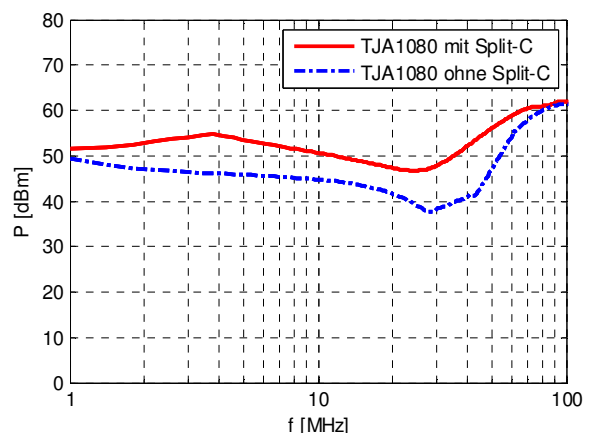


Abb. 5: In ein FlexRay-Netzwerk mit vier Teilnehmern und unterschiedlicher Terminierung einzuspeisende Ausfalleistung

3.3 Variation der BCI-Zangenposition

Zur Untersuchung des Einflusses der Zangenposition auf die Störfestigkeit eines FlexRay-Netzwerks mit vier Teilnehmern wird die BCI-Zange jeweils in einem Abstand von 20 und 100 cm zu unterschiedlichen Busknoten positioniert. Dabei entsprechen 100 cm einer Einkoppelposition unmittelbar am passiven Sternpunkt. Um zusätzliche Resonanzen durch unterschiedliche Leitungslängen zu minimieren, werden alle Busleitungen jeweils mit einer Länge von 1 m ausgeführt. Die Einkopplung erfolgt dabei sowohl auf die Busleitung des hochohmig terminierten Knoten 1 als auch auf den wellenwiderstandsabgeschlossenen Leitungsstrang am Knoten 2.

Alle FlexRay-Knoten sind mit einem 4,7 nF Split-Kondensator gegen Masse bestückt. Da es sich um eine Grundsatzuntersuchung zur Einspeiseposition der BCI-Zange handelt, und die zu erwartenden Effekte nicht direkt abhängig vom Transceivertyp sind, werden die nachfolgenden Untersuchungen beispielhaft ausschließlich mit einem Modell des NXP FlexRay-Transceivers Typ TJA1080 durchgeführt.

Abb. 6 zeigt einen Vergleich von BCI-Einkopplungen auf unterschiedliche Leitungsstränge, jeweils in einem Abstand von 20 cm oder 100 cm zum betroffenen FlexRay-Knoten 1 und 2. Bei Einspeisung in einem Abstand von 20 cm auf den hochohmig terminierten Leitungsstrang am Knoten 1 sinkt die Störfestigkeit aufgrund einer geringeren

Wirkung der Split-Terminierung um etwa 7 dB im Vergleich zur Einspeisung am Knoten 2. Bei einer Zangenposition im Abstand von 100 cm zum betroffenen Knoten nimmt die Störfestigkeit bei Frequenzen oberhalb von 50 MHz zu, da die ersten Resonanzen bei dieser Einspeiseposition etwas gedämpfter auftreten.

Die Ursache für eine Abweichung von bis zu 7 dB bei der Einkopplung auf unterschiedliche Leitungsstränge liegt in der Aufteilung der Impedanzen der angeschlossenen FlexRay-Knoten beidseitig der BCI-Zange. Wird auf den Leitungsstrang von Knoten 1 eingekoppelt, muss der gesamte Störstrom einseitig durch diesen, aufgrund seiner hochohmigen Terminierung weniger störfesten, FlexRay-Knoten fließen. Auf der anderen Seite der BCI-Zange wird sich der Störstrom entsprechend der Impedanzen der restlichen drei Teilnehmer aufteilen und die einzelnen Knoten weniger belasten. Sind alle beteiligten FlexRay-Knoten ähnlich störfest, hängt die Störfestigkeit des gesamten Netzwerks primär von dem Teilnehmer ab, auf dessen Leitungsabschnitt eingekoppelt wird.

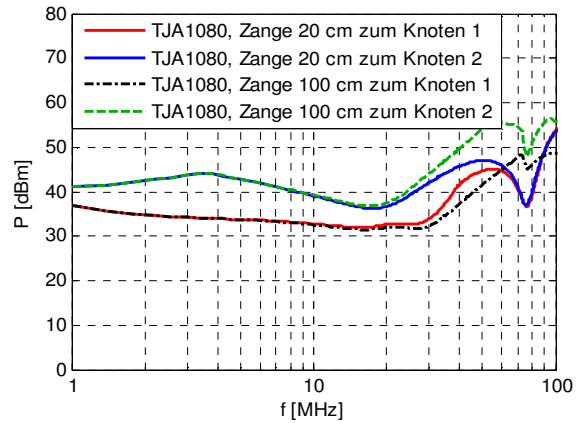


Abb. 6: Ausfalleistung bei BCI-Einkopplung in einem Abstand von 20 oder 100 cm auf unterschiedliche Leitungsstränge

3.4 Längenvariationen der hochohmigen Stichleitungen

Um Leitungsresonanzen in bestimmten Frequenzbereichen zu reduzieren und die Signalintegrität zu verbessern, sollten die hochohmig terminierten FlexRay-Knoten mit möglichst kurzen Stichleitungen an den Bus angebunden werden. Durch die direkte Verbindung aller Busknoten über den passiven Sternpunkt wirken sich Resonanzen auf alle angeschlossenen Stränge aus.

Zur simulatorischen Untersuchung des Einflusses der Leitungslängen werden an den hochohmig terminierten Knoten 1 und 4, basierend auf der Grundkonfiguration in Abb. 3, die Stichleitungen im Bereich von 1 – 100 cm mit einer Schrittweite von 1 cm variiert. Abb. 7 zeigt das Ergebnis der Parametervariation über den Frequenzbereich von 1 – 100 MHz abhängig von der Länge der hochohmig terminierten Stichleitungen. Die Variationsbreite im Bereich unterhalb von 10 MHz ist relativ gering. Oberhalb treten erste Leitungsresonanzen auf, die sich durch die Verlängerung der Stichleitungen um mehr als 30 MHz hin zu niedrigeren Frequenzen verlagern. Mit zunehmender Leitungslänge nimmt die Störfestigkeit des Netzwerks bei Frequenzen oberhalb von 10 MHz um bis zu 15 dB ab. Werden die Resonanzen erst angeregt, so kann der Bus ausfallen und eine Entstörung relativ aufwendig sein. Ein möglicher Lösungsansatz ist eine Variation der Kabellängen am passiven Sternpunkt und somit eine Verlagerung der kritischen Resonanzstelle.

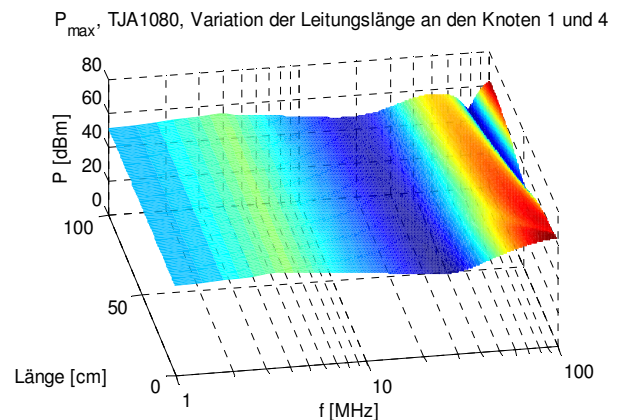


Abb. 7: Einzuspeisende BCI Ausfalleistung, abhängig von der Leitungslänge an den hochohmig terminierten Knoten

4 Berechnung der gestrahlten Störfestigkeit eines FlexRay-Bussystems

In [3] wird ein analytisches Verfahren vorgestellt, das es ermöglicht, den Strom in einer Leitung mit bekannten Abschlussimpedanzen, die sich oberhalb einer Metallplatte befindet, in Abhängigkeit vom umgebenden E-Feld einer ebenen einfallenden Welle zu berechnen. Für die Berechnung der Störfestigkeit eines FlexRay-Bussystem ergibt sich somit die Möglichkeit, mit bekannten Störausfallimpedanzen und den Stromkennlinien der Transceiver auf das kritische E-Feld zurückzurechnen. Hierfür sind die Impedanz \underline{Z}_C und die Ausbreitungsfunktion γ der Leitung erforderlich.

Da FlexRay-Leitungen verdreht ausgeführt werden und die Berechnung in [3] nur für Einzelleiter gültig ist, werden folgende vereinfachende Annahmen getroffen:

- Aufgrund der Verdrehung sind nur Common-Mode-Störungen relevant. Diese koppeln auf beide Busleitungen gleichermaßen ein. Daher wird die verdrehte Leitung im vorliegenden Modell als ein einfacher Leiter realisiert.
- Die Impedanzen Z_{CM} der Transceiver an Bus Plus und Bus Minus werden parallel an das Ende der Einzelleitung geschaltet. Die Ausfallschwellen bleiben unverändert.
- \underline{Z}_C und γ werden aus einer ABCD-Matrix einer verdrehten Leitung extrahiert. Die ABCD-Matrix wurde aus Touchstone-Datensätzen transformiert, die mit dem Netzwerkanalysator anhand einer verdrehten Leitung gemessen wurden.
- Die einfallende Welle ist vertikal polarisiert ($\theta_E = 90^\circ$).

Das kritische E-Feld kann nach Umstellen der Formeln aus [3] und Einsetzen aller Parameter mit Gleichung (1) berechnet werden. Der Aufbau soll in Anlehnung an ISO11452-2 realisiert sein. Die Leitungslängen und Abmessungen gehen aus Abb. 8 hervor.

$$E = \frac{I_L \left(\cosh(\gamma l) (Z_L + Z_R) + \sinh(\gamma l) \left(Z_C + \frac{Z_R Z_L}{Z_C} \right) \right)}{2h \left[\cosh(\gamma l) - 1 + \sinh(\gamma l) \left(\frac{Z_R}{Z_C} \right) \right]} \quad (1)$$

Die berechnete vertikale Ausfallfeldstärke ist in der Umgebung der Busleitung einer Punkt-zu-Punkt-Verbindung des modellierten FlexRay-Bussystems mit NXP TJA1080 Transceivern in Abb. 9 zu sehen. Dabei werden sowohl Konfigurationen mit als auch ohne Split-Kondensator überprüft.

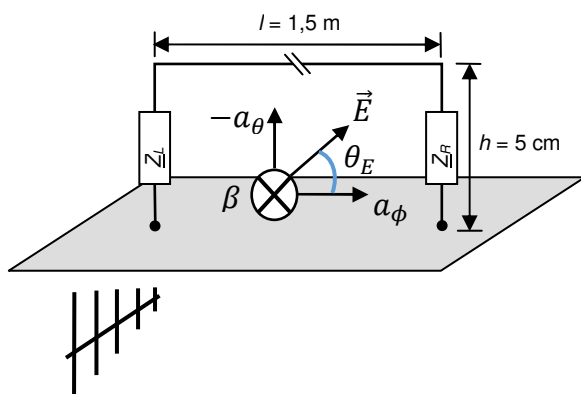


Abb. 8: Aufbau Störfestigkeitsprüfung einer FlexRay Punkt-zu-Punkt-Verbindung gemäß ISO11452-2

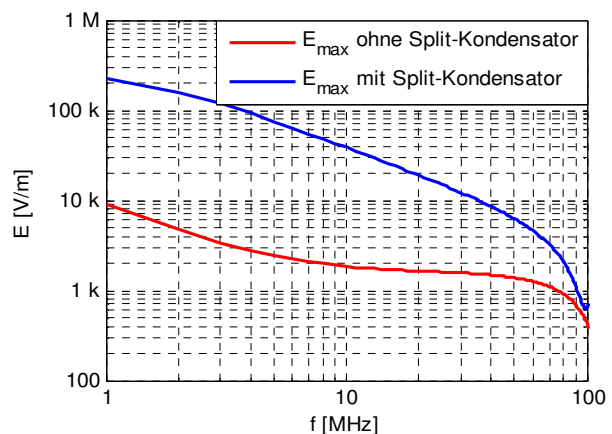


Abb. 9: Ausfallfeldstärke zwischen Busleitung und leitfähiger Grundplatte bei einer FlexRay Punkt-zu-Punkt-Verbindung

Die erforderliche elektrische Feldstärke zum Hervorrufen eines Ausfalls liegt beim Flex-Ray-Bus ohne Split-Kondensator unterhalb von 80 MHz bei über 1000 V/m. Oberhalb von 80 MHz treten erste Resonanzen auf. Durch den Split-Kondensator kann die Störfestigkeit bis zum Auftreten erster Resonanzen um etwa 20 dB gesteigert werden. Im Vergleich zu den BCI-Untersuchungen weist die untersuchte Punkt-zu-Punkt-Verbindung keine hochohmig terminierten Knoten auf. Der Split-Kondensator kann seine Tiefpassfilterwirkung nahezu ungedämpft einbringen. Unter den gegebenen idealisierten Randbedingungen zeigt sich der FlexRay-Bus daher in der Simulation als sehr stör-sicher.

5 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der durchgeführten Berechnungen zeigen, dass mit Hilfe von Simulationen Netzwerke mit mehreren Knotenplatinen in verschiedenen Topologien mit unterschiedlichen Transceivertypen auf ihre Störfestigkeit hin überprüft werden können. Die Analyse gibt Aufschlüsse über die Störfestigkeit abhängig von der Terminierung und den Leitungslängen.

Die Variation der hochohmigen Stichleitungen hat bei den BCI-Untersuchungen keinen Einfluss auf die Ausfallgrenze des FlexRay-Netzwerks. Leitungsresonanzen können sich jedoch aus höheren Frequenzbereichen mit steigender Leitungslänge hin zu niedrigeren Frequenzen verschieben und dort durch eine geringere Störfestigkeit kritisch sein.

Eine Variation der BCI-Zangenposition zeigt erst oberhalb von 20 MHz Abweichungen in der Störfestigkeit. Erste Resonanzen fallen deutlich gedämpfter aus.

Die Berechnung der gestrahlten Störfestigkeit eines FlexRay-Bussystems mit einfachen analytischen Formeln zeigt eine weitere Anwendungsmöglichkeit der entwickelten Störfestigkeitsmodelle von Kfz-Bustransceivern.

6 Literatur

- [1] 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
- [2] U. Hilger, S. Miropolsky, S. Frei: *Analyse der Störfestigkeit von ausgedehnten Flex-Ray-Netzwerken durch BCI-Simulationen*, Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit, EMV 2012, Düsseldorf, Tagungsband Seiten 79 – 84, VDE Verlag, 2012
- [3] C. R. Paul: *Analysis of Multiconductor Transmission Line*, John Wiley & Sons, Inc, 1994
- [4] FlexRay Protocol Specification V2.1 Rev. A, 2005, <http://www.flexray.com>
- [5] Norm ISO 11898-2:2003: *Road vehicles -- Controller area network (CAN) -- Part 2: High-speed medium access unit*, 2003, <http://www.iso.org>
- [6] FlexRay Electrical Physical Layer Specification V2.1 Rev. B, 2006, <http://www.flexray.com>