

Störungen von Kfz-Bussystemen durch Überkopplungen von Versorgungskabeln für elektrische Antriebe

Dipl.-Ing. Kerstin Siebert, Prof. Dr.-Ing. Stephan Frei, Arbeitsgebiet Bordsysteme, Technische Universität Dortmund, Dortmund, Germany

1 Einleitung

Elektro- und Hybridfahrzeuge werden in Zukunft eine große Rolle in unserem Straßenverkehr spielen. Durch viele zusätzliche elektrische Komponenten, wie den Elektromotor und dessen Ansteuerung, müssen weitere mögliche elektromagnetische Störungen berücksichtigt und untersucht werden.

Aus Kosten- und Gewichtsgründen werden auch für die Ansteuerleitungen des Elektromotors ungeschirmte Kabel in Betracht gezogen. Ein Spannungssprung, welcher beispielsweise beim Ausschalten des Motors auftritt, könnte Datensignale auf benachbarten Busleitungen stören. Auch bei geschirmten HV-Kabeln führen mögliche Defekte an den Schirmen zur selben Problematik.

Die möglichen Störungen und ihre Auswirkungen werden in diesem Beitrag in verschiedenen Einsatzszenarien genau untersucht, um ein Systemdesign bewerten zu können. Zur ausgiebigen Analyse sind Simulationen sinnvoll, da mit diesem Hilfsmittel verschiedene Anordnungen im Vorfeld kostengünstig überprüft werden können.

2 Simulationsmodelle

Zur Simulation einer Störung von Datensignalen auf Busleitungen durch benachbarte HV-Kabel werden verschiedene Modelle benötigt. Mehrleitermodelle bilden die Überkopplung zwischen den Kabeln nach. Zur Simulation der störenden Pulse muss sowohl eine Nachbildung eines DC/AC-Inverters als auch die eines Elektromotors vorhanden sein. Die Datensignale werden von Transceivern gesendet und empfangen. Somit ist für realitätsnahe Simulationen ein Gesamtsystem nötig, wie es beispielhaft für ein differentielles Bussystem in Abbildung 1 dargestellt ist.

Die Kombination der Modelle der beteiligten Komponenten kann problematisch sein, da aufgrund der Verschiedenartigkeit von z.B. Sender und Empfänger der Datensignale, DC/AC-Inverter, Kabel und Elektromotor unterschiedlichste Modellierungsansätze vorhanden sind. Während sich beispielsweise für die Kabel eine zweidimensionale Feldberechnung anbieten könnte, sollte sie für den Elektromotor vielleicht schon dreidimensional sein, wohingegen für einen DC/AC-Inverter oder einen Transceiver Ersatzschaltbilder mit konzentrierten Elementen verwendet werden oder womöglich nur rein digitale Modelle existieren.

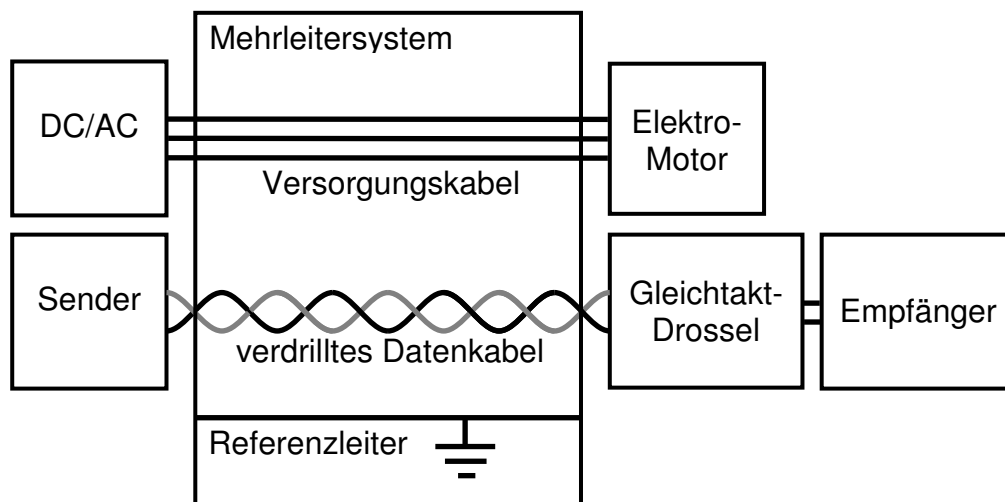


Abbildung 1: Schema der verwendeten Komponenten für ein differentielles Bussystem

Eine Möglichkeit zur Kombination solcher unterschiedlicher Komponenten in einem Gesamtmodell, welche unter anderem auch vom FlexRay Consortium und vom FAT AK-30 unterstützt wird, bietet die Hardwarebeschreibungssprache VHDL-AMS (Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language – Analog and Mixed Signal), insbesondere da hier schon messtechnisch abgesicherte Modelle der einzelnen Komponenten erstellt wurden [1][2][3].

2.1 Mehrleiterkonfiguration

Die eigentliche Überkopplung der Störungen wird mit Hilfe eines Mehrleitermodells simuliert [2]. Dieses berücksichtigt neben der elektromagnetischen Kopplung zwischen den Leitern auch frequenzabhängige Verluste der Leiter, welche für die Übertragung schneller Datensignale relevant sind. Frequenzabhängige Verluste des Dielektrikums werden vernachlässigt, stattdessen wird ein homogenes Dielektrikum mit einer konstanten effektiven Permittivität von $\epsilon_r=2$ modelliert.

Für die HV-Kabel im Kfz werden häufig Querschnitte von 35 mm^2 und auch Querschnitte von 50 mm^2 diskutiert. Für die hier durchgeführten Simulationen werden drei Leiter mit 35 mm^2 Querschnitt im Dreieck angeordnet, was aufgrund der Kompaktheit als naheliegende Anordnung erscheint. Typische Querschnitte von $0,35 \text{ mm}^2$ werden für die Buskabel verwendet. Für differentielle Bussysteme sind die beiden Leiter in der Regel verdrillt ausgeführt, was sich im Modell als identische Überkopplung auf beide Leiter widerspiegelt. Alle Leiter werden parallel zur Karosserie des Kfz geführt, welche als ebene Referenzfläche modelliert wird. Die Leiteranordnung für ein differentielles Bussystem ist in der Seitenansicht in Abbildung 1 zu sehen. Zusätzlich sind der Querschnitt der Leiteranordnung und die Parameter in Abbildung 2 dargestellt.

Während die Abstände zwischen den HV-Kabeln d_E , der Abstand zwischen den Busleitern d_B und die Höhe des Buskabels über der Referenzfläche h_B gleich bleiben, wird der Abstand der HV-Kabel zu den Buskabeln mit h_E variiert. Eine dichte

Verlegung der Leiter führt bei typischen Isolationswanddicken zu $d_E = 14,85 \text{ mm}$ und $d_B = 1,4 \text{ mm}$.

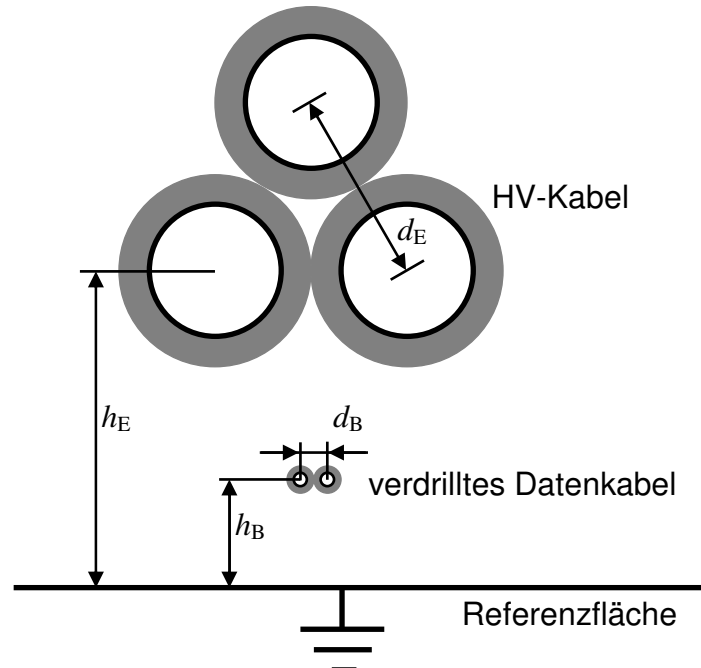


Abbildung 2: Querschnitt der Leiteranordnung für ein differentielles Bussystem

2.2 DC/AC-Inverter und Elektromotor

Der Elektromotor wird mittels Pulsweitenmodulation angesteuert. Die Pulse werden vom DC/AC-Inverter erzeugt, welcher mit einer Gleichspannung von bis zu 300 V versorgt wird. Die Modelle des FAT AK-30 für den Elektromotor und den DC/AC-Inverter [1] wurden verwendet. Für die Simulationen in Abschnitt 3 wurde eine Gleichspannung von 75 V verwendet, da die Modelle bisher nur bis zu dieser Spannung messtechnisch verifiziert wurden [4].

Ausschnitte der Ansteuerpulse des Elektromotors sind in Abbildung 3 dargestellt.

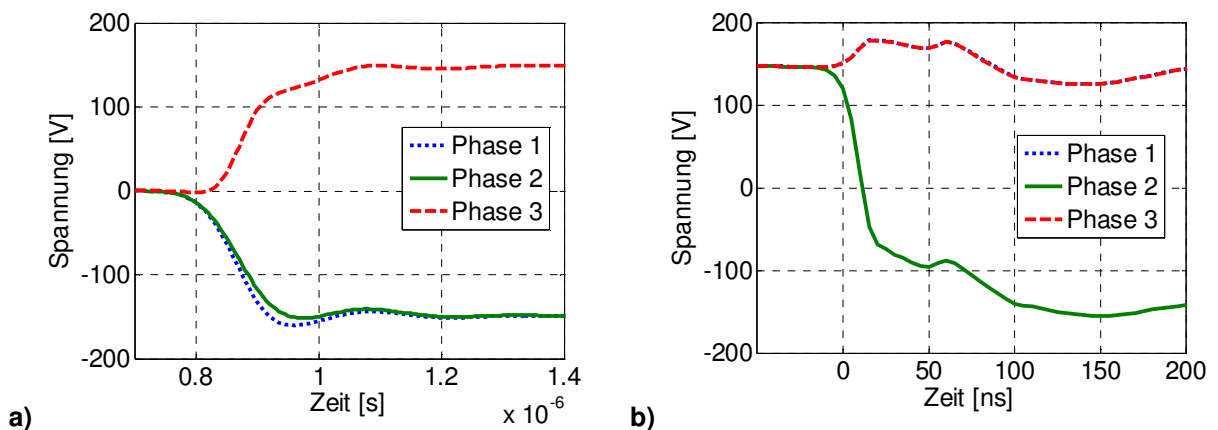


Abbildung 3: Flankenform und Anstiegszeit der Ansteuerpulse des Elektromotors

Am Anfang der Pulsweitenmodulation (PWM) schalten alle drei Phasen in etwa gleichzeitig (Abbildung 3a). Hier haben die Pulse im Vergleich zu den Pulsen nach ISO 7637-3 eine deutlich flachere Flanke. Die Steigung der Flanken der Ansteuerpulse beträgt etwa 1,5 V/ns, während sie, zum Vergleich, in der ISO 7637-3 [5] 10 V/ns beträgt. Im weiteren Verlauf der PWM kommen jedoch auch deutlich steilere Flanken mit Steigungen von ca. 15 V/ns vor (siehe Abbildung 3b), so dass die ISO 7637-3 die leitungsgebundenen Störungen, welche vom DC/AC-Inverter zum Elektromotor fließen nicht mehr vollständig abdecken würde.

2.3 Transceiver, Terminierung und Drossel

Simulationsergebnisse für zwei Bussysteme, den LIN-Bus und den FlexRay-Bus, werden verglichen. Der LIN-Transceiver wird mit einer typischen Spannung von 12 V versorgt, während für FlexRay-Transceiver typische 5 V verwendet werden. Der LIN ist ein Eindraht-Bus und hat eine Datenrate von bis zu 20 kBit/s. FlexRay ist ein differentielles Bussystem mit einer Datenrate von bis zu 10 MBit/s. Der LIN-Transceiver hat einen pull up Widerstand $R_{\text{pullupSlave}} = 30 \text{ k}\Omega$ von im Empfangszustand und von $R_{\text{pullupMaster}} = 1 \text{ k}\Omega$ beim Senden. Für FlexRay werden die üblichen sogenannten Split-Terminierungen modelliert, mit zwei $47,5 \Omega$ Widerständen und einer $4,7 \text{ nF}$ Kapazität zur Masse. Auch eine für FlexRay gebräuchliche Drossel wird modelliert. Weitere Daten können aus den Spezifikationen [6] und [7] entnommen werden.

3 Ergebnisse

Zur Bewertung der Auswirkung der Störungen auf die Nutzdaten werden die Augendiagramme verwendet, welche in den Spezifikationen der Kfz-Bussysteme [6] und [7] festgelegt sind. Simulationen werden für LIN und für FlexRay durchgeführt, da diese sehr unterschiedliche Physical Layer haben. Mit Hilfe der Simulation werden längenabhängig kritische Abstände zwischen Motorkabeln und Datenkabeln gefunden, bei denen es zu Störungen der Datenkommunikation kommt.

3.1 LIN

Zur Untersuchung der Signalintegrität des LIN-Busses wird die in Abbildung 2 dargestellte Leiterkonfiguration mit nur einem Busleiter gewählt. Der Abstand des LIN-Leiters zur Referenzfläche beträgt konstant $h_B = 1 \text{ cm}$, während der Abstand der Versorgungskabel zur Referenzfläche h_E , sowie die Länge l variiert werden. Denkbare Längen könnten hierbei bis zu 5 m sein, wenn die Batterie und der Inverter im Heck des PKW untergebracht sind, während sich der Motor vorne befindet. Obwohl der LIN bis zu 40 m spezifiziert ist [6], werden kaum längere Längen im Pkw eingesetzt. Abbildung 4 zeigt beispielhafte Augendiagramme des LIN-Signals. Hierbei sind Grenzfälle ausgewählt, bei denen die Augendiagramme auf der linken Seite a) verletzt werden und die Augendiagramme auf der rechten Seite b) gerade noch nicht verletzt werden.

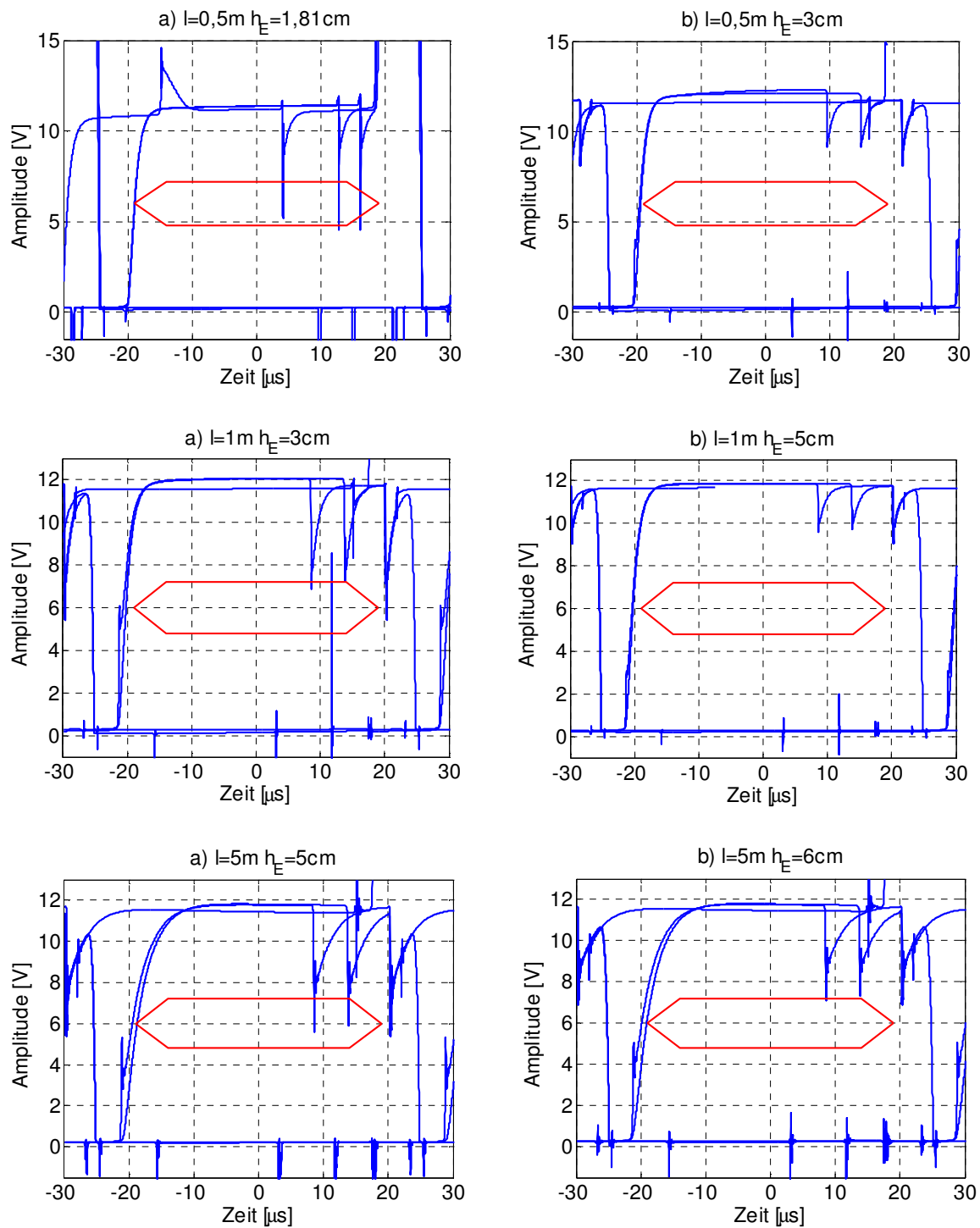


Abbildung 4: a) verletzte und b) gerade nicht verletzte Augendiagramme des LIN-Signals

In Abbildung 5 sind die Abstände zwischen den HV-Kabeln und dem Bus-Kabel über der Länge aufgetragen, bei denen es zu Verletzungen der Augendiagramme kommt bzw. gerade noch nicht kommt. Diese Abstände entsprechen h_E minus h_B aus Abbildung 2. Außerdem ist der minimal mögliche Abstand der Kabel bei typischer Isolationswanddicke eingetragen.

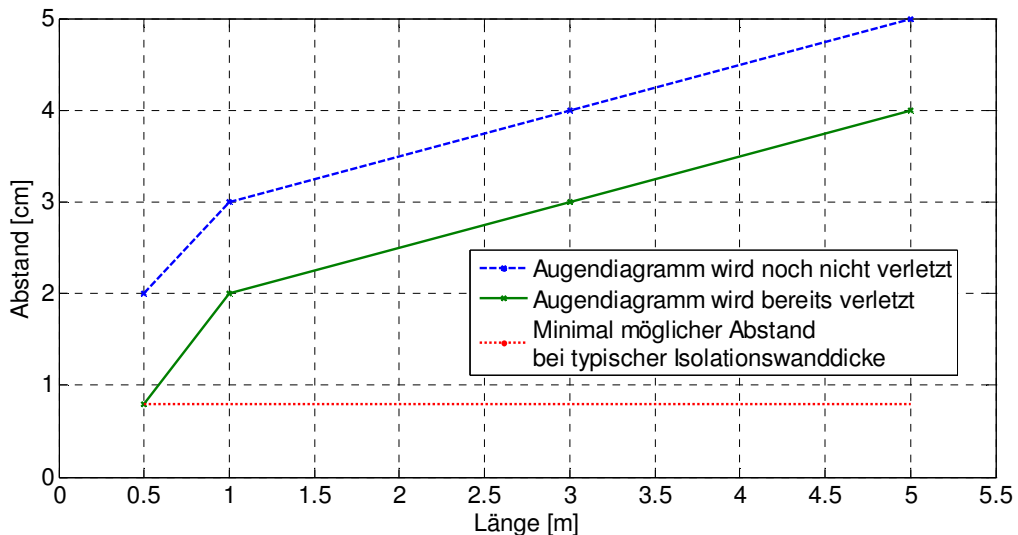


Abbildung 5: Grenzen für parallele Längen bei bestimmten Abständen von Versorgungskabeln und Buskabel

Aus Abbildung 5 geht hervor, dass generell Mindestabstände zwischen ungeschirmten HV-Kabeln und LIN-Bus-Kabeln eingehalten werden müssen. Bei einer direkten Nachbarschaft ist nicht mal eine parallele Länge von 0,5 m möglich ohne das Augendiagramm zu verletzen. Eine fehlerhafte Biterkennung ist bei diesen Grenzfällen allerdings noch nicht zu erwarten, da die Einschnitte in das Augendiagramm äußerst kurz sind (siehe Abbildung 4).

Es wird die für LIN typische Spannung von 12 V verwendet. Wenn die minimal spezifizierte Spannung von 7 V verwendet wird [6], ist eine Verletzung des Augendiagrammes schon bei größeren Abständen und kürzeren parallelen Verlegewegen zu erwarten.

Bei der Interpretation von Abbildung 5 ist zu beachten, dass der Abstand des LIN-Leiters zur Referenzfläche ideal konstant über die gesamte Länge ist. In der realen Situation sind Abstandsänderungen zu erwarten, was zu einer weiteren Verschlechterung des LIN-Signals und damit zu größeren notwendigen Abständen bei kürzeren Längen führen kann.

3.2 FlexRay

Die Dimensionen der verdrehten Busleiter sind von einem typischen FlexRay-Kabel übernommen. Aufgrund der ideal angenommenen Verdrehung ist die Überkopplung auf beide Busleiter gleich, so dass das Differenzsignal nicht gestört wird. In Abbildung 6 ist eine durch die Motoransteuerung hervorgerufene erhebliche Störung auf die Einzelsignale dargestellt, welche das Differenzsignal nicht beeinflusst.

Untersuchungen in [8] zeigen, wie sich Gleichtaktstörungen durch die Verwendung von Schutzelementen auch auf die Differenzsignale auswirken können. Während interne Schutzelemente erst bei 40 V bis 50 V greifen, begrenzen externe Schutzele-

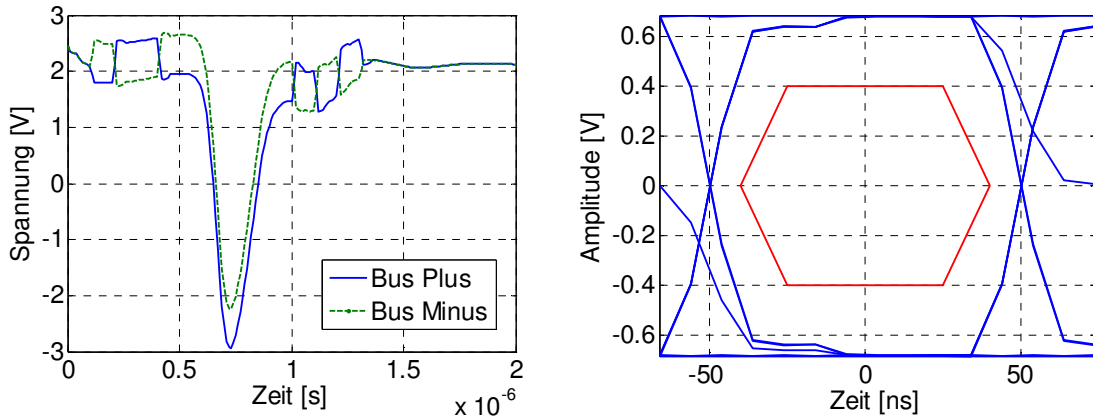


Abbildung 6: a) Störung der Einzelsignale und b) entsprechendes Differenzsignal

mente Gleichtaktsignale zum Teil schon bei Spannungen im Bereich von 12 V bis 20 V. Bei einer großen Störeinkopplung wird die Spannung auf einem Leiter, Bus-Plus oder Bus-Minus, begrenzt und somit das Differenzsignal gestört. Je nach eingesetztem Schutzelement ergeben sich daher unterschiedliche Mindestabstände zwischen HV-Kabeln und Bus-Kabeln. Hier wird beispielhaft eine TVS-Diode mit einer minimalen Durchbruchspannung von 6 V bei 1 mA und mit einer parasitären Kapazität von 1,5 pF verwendet [3].

Zu Beginn der PWM (siehe Abbildung 3a) schalten alle drei Phasen nahezu gleichzeitig mit unterschiedlichen Vorzeichen, so dass es bei sehr dichter Verlegung der drei HV-Kabel ($d_E = 14,85$ mm, Mindestabstand bei typischer Isolationswanddicke) zu einer teilweisen Kompensation der Abstrahlung kommt. Dadurch wird das Differenzsignal des FlexRay-Busses bei einer Speisung des DC/AC-Inverter mit 75 V selbst bei einer theoretischen Leitungslänge von 100 m noch nicht gestört. Bei größeren Abständen zwischen den HV-Kabeln kann das Differenzsignal auch bei gebräuchlichen Längen gestört werden. Abbildung 7 zeigt beispielsweise das FlexRay-Augendiagramm des Differenzsignals bei einem Abstand von 10 cm zwischen den HV-Kabeln ($d_E = 14,85$ mm + 10 cm) und einer Länge von 1,5 m.

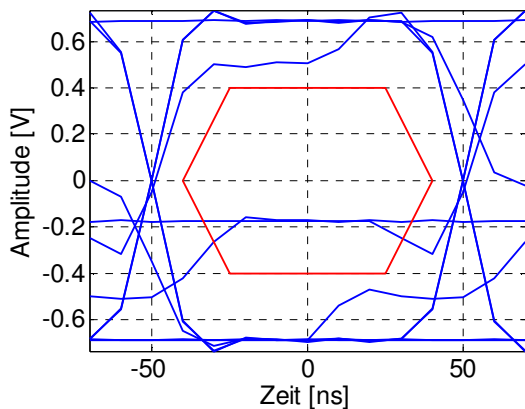


Abbildung 7: Verletztes Augendiagramm des Differenzsignals bei $l = 1,5$ m, $h_E = 0,0188$ m, $d_E = 14,85$ mm + 10 cm

Die drei HV-Kabel sind, wie in Abbildung 2 dargestellt, dreieckförmig angeordnet. Bei einer Anordnung der drei HV-Kabel in einer Ebene nebeneinander ist der Abstand zwischen den äußeren Kabeln größer als bei dreieckförmiger Anordnung, was zu einer Störung des Datensignals schon bei größeren Abständen und kürzeren Längen führen wird. Auch ist zu beachten, dass die Verdrillung möglicherweise in der Realität nicht wie hier angenommen ideal ist.

4 Zusammenfassung

Durch Simulationen der Überkopplung in Mehrleitermodellen kann gezeigt werden, bei welchen parallelen Verlegelängen von ungeschirmten Versorgungskabeln für Elektromotoren oder Versorgungskabeln mit defekten Schirmen und typischen Datenkabeln welche Abstände eingehalten werden müssen, um eine störungsfreie Datenübertragung zu gewährleisten. Hierzu sind vielfältige, verlässliche Modelle der verschiedenen Komponenten notwendig, die zu einem Gesamtmodell zusammengefügt werden können. Die Hardwarebeschreibungssprache VHDL-AMS eignet sich dazu besonders. Es wurde gezeigt, dass für den LIN-Bus schon bei einem kurzen parallelen Verlauf der Kabel derartige Störungen auftreten, dass Augendiagramme verletzt werden und Mindestabstände zwischen den Kabeln beachtet werden sollten.

Eine Zwei-Knoten-Topologie des FlexRay-Busses wird bei einer idealen Verdrillung und einer dichten Verlegung der HV-Kabel selbst bei direkter Nachbarschaft zu den HV-Kabeln über große Längen (100 m) nicht gestört. Nur wenn zwischen den HV-Kabeln größere Abstände bestehen (10 cm) und die Symmetrie der Motoransteuerung beim Einschalten gestört ist, kommt es auch bei kleinen Längen (1,5 m) zu Verletzungen des FlexRay-Augendiagrammes. Daher dürfen maximale Abstände zwischen den HV-Kabeln nicht überschritten werden, um eine störungsfreie Datenkommunikation des FlexRay-Busses zu gewährleisten.

5 Literatur

- [1] VDA/FAT-Arbeitskreis 30; <http://fat-ak30.eas.iis.fraunhofer.de>, 28.04.2011
- [2] K. Siebert, H. Günther, S. Frei, W. Mickisch: „*Modeling of Frequency Dependent Losses of Transmission Lines with VHDL-AMS in Time Domain*“, International Zurich EMC Symposium, Zurich, Switzerland, 2009
- [3] B. Arndt, F. zur Nieden, F. Kremer, Y. Cao, J. Edenhofer, S. Frei: „*Modellierung und Simulation von ESD-Schutzelementen mit VHDL-AMS*“, EMV-Düsseldorf, Germany, 2010
- [4] F. Kremer, S. Frei: „*Modellierung des Störaussendungsverhaltens von Kfz-Hochspannungsbordnetzen in VHDL-AMS*“, ASIM 2011, Krefeld, 2011
- [5] Deutsche Norm, ISO 7637-3, „*Elektrische Störungen durch Leitung und Kopplung, Teil 3: Fahrzeuge mit 12-V- oder 24-V-Bordnetz-Nennspannung Übertragung von impulsförmigen elektrischen Störgrößen durch kapazitive und induktive Kopplung auf Leitungen, die keine Versorgungsleitungen sind*“, Februar 1999
- [6] LIN Specification Package, Revision 2.1, November 2006
- [7] FlexRay Communications System, Electrical Physical Layer Specification, Version 2.1, Revision B, November 2006
- [8] 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