

Simulationsbasierte Absicherung der Störfestigkeit und Signalintegrität von Kfz-Bussystemen unter Berücksichtigung von Parametertoleranzen realer Bauteile

Harald Günther, Technische Universität Dortmund, Dortmund
Kerstin Siebert, Technische Universität Dortmund, Dortmund
Stephan Frei, Technische Universität Dortmund, Dortmund
Wolfgang Mickisch, TÜV Nord IFM, Elektronik und IT, Essen

1 Einleitung und Motivation

Bussysteme werden in Fahrzeugen zur Vernetzung von Steuergeräten und Sensoren eingesetzt. Da oft viele Teilnehmer an einem Bus betrieben werden sollen, ist aufgrund der unvermeidbaren Fehlanpassungen an passiven Verbindungsstellen die Signalintegrität gefährdet. Um trotzdem sicherheitskritische Anwendungen realisieren zu können, muss die Funktionalität des Busses auch unter extremen Bedingungen durch spezielle Erprobungsmethoden sichergestellt werden.

Ein Ansatzpunkt, um mögliche Probleme und dessen Ursachen zu erkennen, sind Signalintegritäts- und Störfestigkeitsuntersuchungen am Physical Layer des Bussystems. Dort sind allerdings viele Parameter variabel, so z.B. durch Bauelementschwankungen, Varianten in der Bustopologie, externe elektromagnetische Einflüsse etc., wodurch sich nahezu unüberschaubar viele Einflussmöglichkeiten ergeben, und eine messtechnische Absicherung schwierig ist. Durch Simulation mit parametrisierten Simulationsmodellen ist der Einsatz von Suchverfahren möglich, um die kritischsten Fälle im Busbetrieb zu finden und somit ein Systemdesign abzusichern. Dieses Problem ist allgemein in der EMV-Absicherung präsent, wo sich Bauteileparameter im Herstellungsprozess oder über Lebensdauer verändern können.

2 Simulationsmodelle

Für die Durchführung von Gesamtbussimulationen wurden Modelle der einzelnen Komponenten eines Bussystems erstellt und zu einem Modell verbunden. Abbildung 1 zeigt schematisch die für ein Bussystem typischen Komponenten.

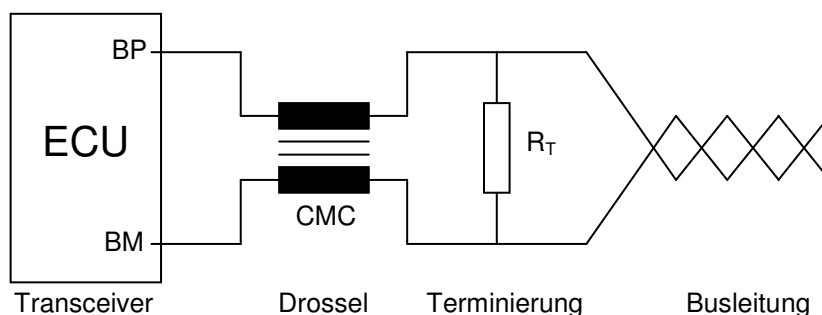


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Komponenten eines Bussystems

Es kommen Modelle für Bustransceiver, Entstördrossel, Terminierung und Busleitung zum Einsatz, die im Folgenden näher vorgestellt werden.

2.1 Transceiver

Der zur Untersuchung der Signalintegrität wichtige Teil des Transceiver-Modells ist der Ausgangstreiber. Dem Modell liegt ein physikalischer Ansatz zugrunde, der schematisch in Abbildung 2 dargestellt ist. Die zu den drei Buszuständen *idle*, *active high* und *active low* gehörenden möglichen Buspegel werden durch eine Zusammenschaltung von zwei MOSFET-Transistoren realisiert. Diese fungieren als Schalter und ziehen je nach Zustand des Transceivers die Busleitung gegen Versorgungsspannung oder Masse. Die Anpassung des genauen Flankenverlaufs und der Buspegel wird durch eine differenzierbare Steuerfunktion und der Reihenschaltung zweier Dioden erreicht. Im *idle* Zustand sperren beide Transistoren, und der Transceiver ist empfangsbereit. Hier sorgt ein zusätzlicher resistiver Spannungsteiler für das korrekte Impedanzverhalten. Um auch bei unterschiedlichen Lastfällen ein realistisches Verhalten wiederzugeben sind kapazitive Effekte des Bausteins mit Hilfe von Ausgangskapazitäten modelliert.

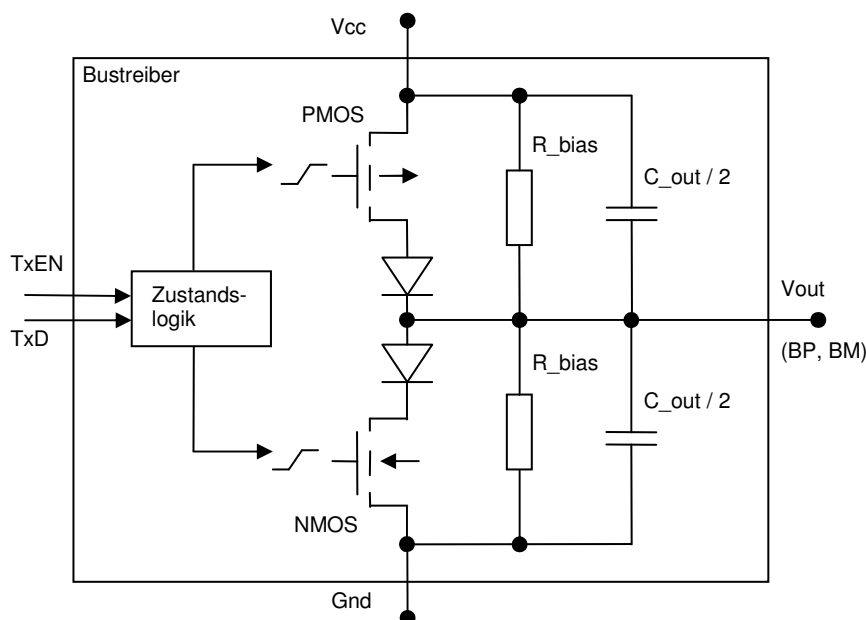


Abbildung 2: Schematischer Aufbau des Ausgangstreibers des Transceiver-Modells

Durch verschiedene Parameter, wie etwa Schaltspannungen der MOSFETs und Dioden sowie Parameter der Steuerfunktion, lassen sich Details im Verhalten des Modells in der Signalintegrität an das Verhalten eines realen Transceiver-Bausteins anpassen. Hier wird auf Datenblattinformationen sowie Messungen zurückgegriffen. Ein Vorteil des physikalischen Ansatzes im Vergleich zu einer Modellierung mit gemessenen Kennlinien ([1]) ist die leichte Integration von beispielsweise Temperatur- und Versorgungsspannungsabhängigkeiten des Transceiver-Bausteins in das Modell. Durch die verwendeten physikalischen Gleichungen besteht eine einfache Möglichkeit, die Abhängigkeiten verschiedener verwendeter Größen direkt umzusetzen.

2.2 Sonstige Buskomponenten

Zur Repräsentation der Busleitung wird das in [2] vorgestellte Modell verwendet. Die Berücksichtigung der externen Störungen erfolgt durch Erweiterung des Modells mit Strom- und Spannungsquellen welche die Wirkung des elektromagnetischen Feldes repräsentieren (siehe [3]).

Modelle für die Entstördrossel werden zum Teil von den Herstellern zur Verfügung gestellt. Hier wurde ein Epcos B82789C0104H001-Modell verwendet.

Die Terminierungen der Busleitungen wurden nach [5] durch Zusammenschaltung idealer Widerstands- und Kondensatormodelle abgebildet.

2.3 Vergleich von Simulations- und Messdaten

Die Modelle für die Buskomponenten wurden einzeln mit Messergebnissen abgesichert. So wurde das Signalintegritätsverhalten des Transceiver- und des Leitungsmodells anhand verschiedener Lastsituationen messtechnisch überprüft. Es zeigen sich gute Übereinstimmungen zwischen Simulations- und Messergebnissen.

In den Folgenden werden exemplarisch Simulationsergebnisse von zwei Bustopologien vorgestellt und mit Messergebnissen verglichen. Es wird gezeigt, dass mit Hilfe simulatorischer Untersuchungen Aussagen über das reale Verhalten von Bussystemen gemacht werden können.

Topologie 1 ist eine Kettenschaltung von 5 Busteilnehmern die mit Busleitungen einer Länge von jeweils 2 m verbunden sind. Teilnehmer 1 fungiert als Sender. Abbildung 3 zeigt den Vergleich zwischen Simulations- und Messdaten an Teilnehmer 4.

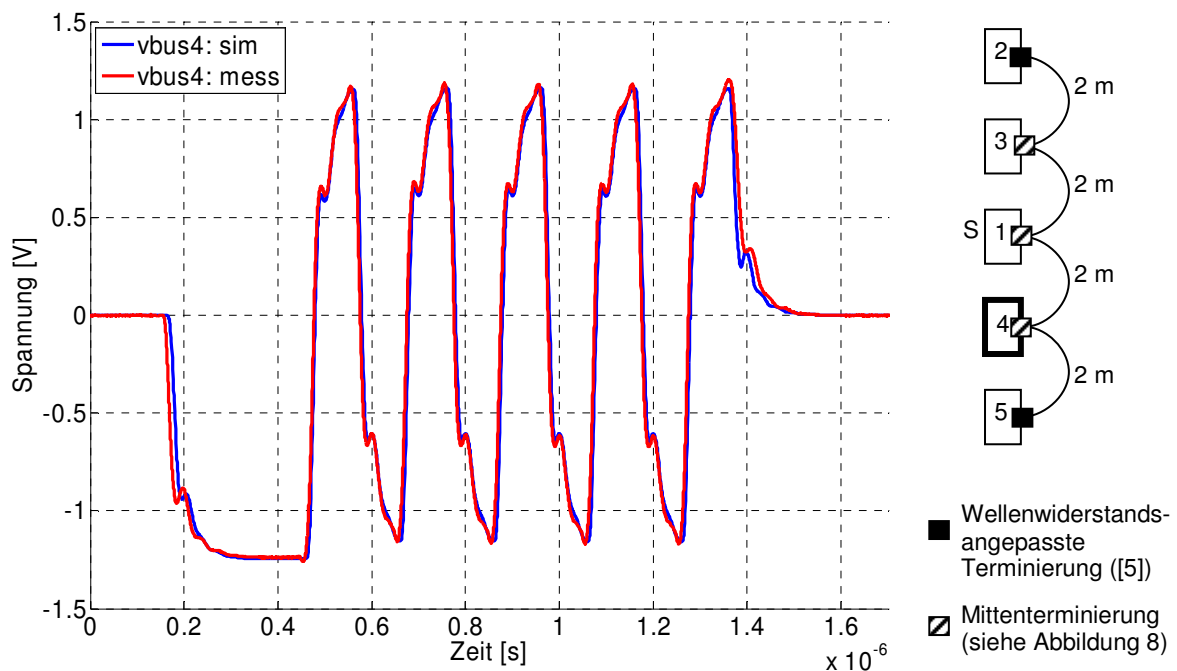


Abbildung 3: Vergleich von Simulations- und Messdaten bei Topologie 1

Die Übereinstimmung zwischen Modellverhalten und den Messwerten ist sehr gut.

Topologie 2 beinhaltet ebenfalls 5 Teilnehmer, die durch ein Netzwerk mit verschiedenen Leitungslängen miteinander verbunden sind. Teilnehmer 1 sendet Daten auf

den Bus. Abbildung 4 zeigt den Signalverlauf aus Simulation und Messung an Teilnehmer 3.

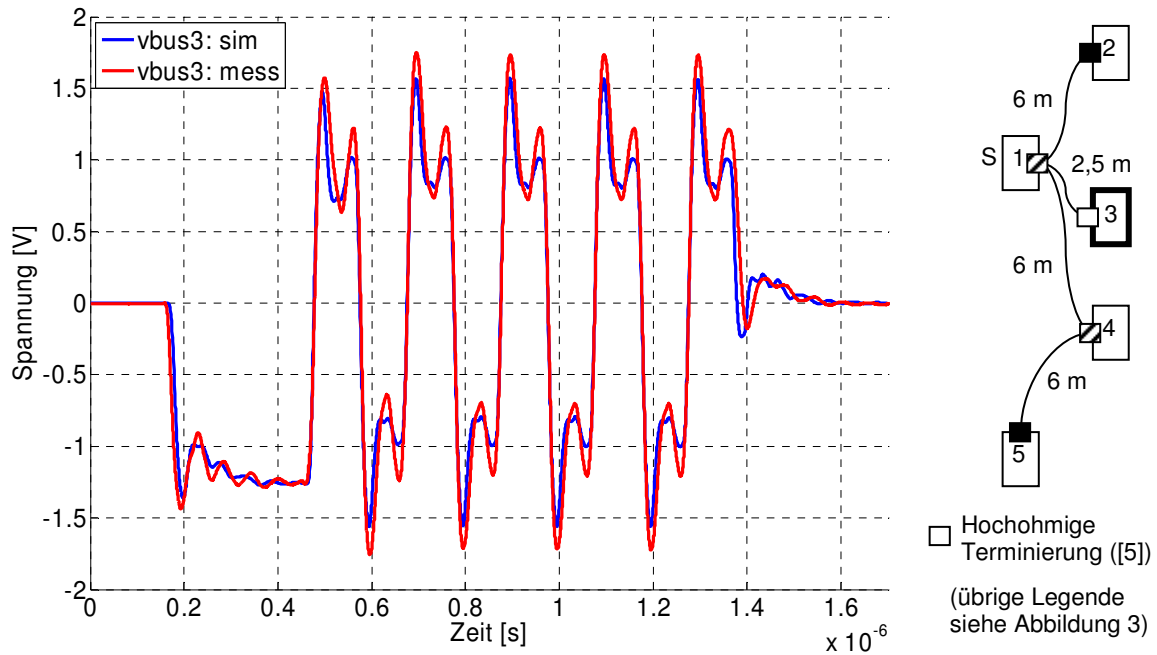


Abbildung 4: Vergleich zwischen Mess- und Simulationsdaten bei Topologie 2

Auch in diesem Fall ist eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulations- und Messdaten zu erkennen.

3 Automatisierte Bussystemuntersuchungen

Um einfach eine große Zahl an Simulationen durchführen zu können muss der Simulationsablauf automatisiert werden. Dann erlaubt der Einsatz von parametrisierten Modellen eine automatisierte Untersuchung der Einflüsse von Parametern.

3.1 Funktion und Ablauf

Ein Simulationslauf mit anschließender Analyse umfasst mehrere Arbeitsschritte, die in angegebener Reihenfolge durchlaufen werden:

1. Bilden eines Gesamtmodells für den zu untersuchenden Busaufbau
2. Einsetzen der Werte für die Modellparameter
3. Durchführen der Simulation
4. Analyse der Ergebnisse

Die einzelnen Schritte wurden automatisiert und ermöglichen so automatisierte Untersuchungen verschiedener Parameterwerte. Eine schematische Darstellung des Ablaufs zeigt Abbildung 5.

Zunächst wird aus den Modellen der einzelnen Komponenten nach den Informationen aus einer Strukturdatei ein Gesamtmodell aufgebaut. Daraufhin werden die im Modell enthaltenen Parameter mit Werten belegt. Das simulationsbereite Gesamtmodell wird dem Simulationsprogramm übergeben, welches die Simulation durchführt und die Ergebnisse exportiert. Diese werden nach erfolgreichem Abschluss der

Simulation eingelesen und ausgewertet. Aus den Analyseergebnissen der untersuchten Signale ergibt sich dann eine Bewertung des gesamten betrachteten Aufbaus.

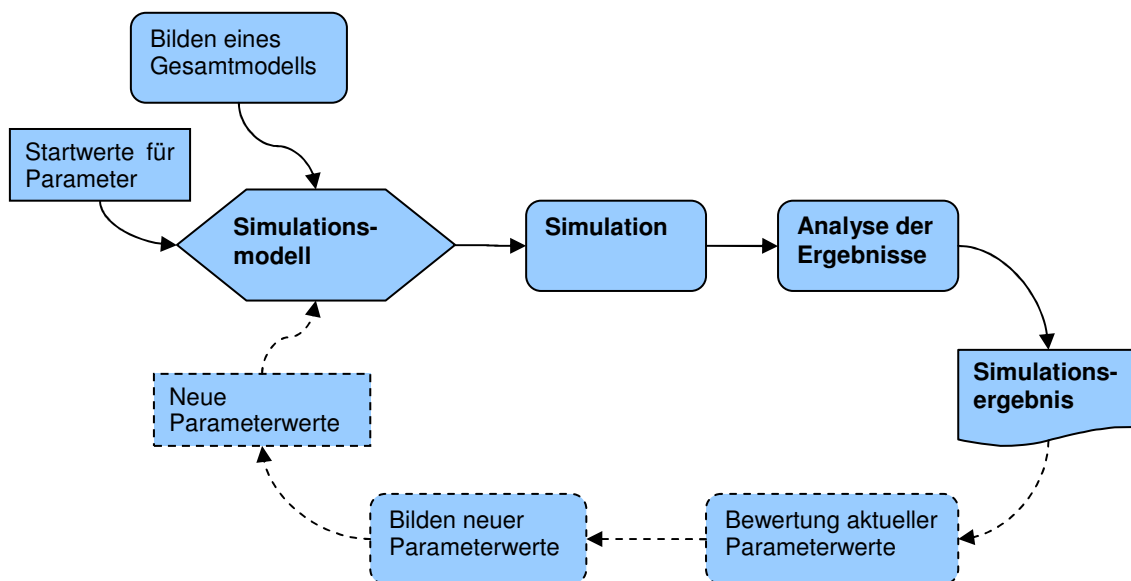


Abbildung 5: Ablauf der automatisierten Simulationsumgebung mit Optimierung

Zur Untersuchung verschiedener Parameterwerte können dann neue Werte erzeugt und erneut simuliert werden.

3.1.1 Automatisierte Signalanalyse mittels Augendiagramm

Für die Auswertung der aus den Bussimulationen gewonnenen Signalverläufe sind Kriterien notwendig. Das Augendiagramm ist hierfür gut geeignet. Um den Öffnungsgrad des Auges bestimmen zu können wird eine Maske definiert, die eine Grenze im Signalverlauf spezifiziert ([4]). Wird die Maske von einzelnen Signalabschnitten geschnitten, so wird die Größe der Überschneidung als Fehlermaß genommen. Dazu werden an den Messpunkten der Signale die Abstände zwischen Signal und Maske bestimmt. Die so berechneten Überschneidungen werden über den gesamten Signalverlauf summiert und bilden so ein Maß für die Größe der Gesamtüberschneidung zwischen den Signalen und der vorgegebenen Augenmaske.

3.2 Optimierung von Bussystemen

Mit Hilfe automatischer Gesamtbussimulationen können Optimierungen durchgeführt werden. Ausfallsicherheit spielt eine große Rolle, und es ist wichtig zu wissen, unter welchen Randbedingungen ein Bussystem korrekt funktioniert und wann eine korrekte Nachrichtenübertragung unter Umständen nicht mehr möglich ist. Eine interessante Frage ist also der Einfluss verschiedener Parameter auf die Signalintegrität des Systems. Hier ergeben sich allerdings bereits bei relativ wenigen freien Parametern sehr viele Kombinationen, so dass eine Berechnung aller Möglichkeiten praktisch meist nicht möglich ist. Es bietet sich der Einsatz von automatischen Optimierungsverfahren zur Bestimmung von Extremfällen an.

Die in der Schaltungsanalyse verbreiteten Verfahren Monte Carlo und Sensitivitätsanalyse liefern generell gute praktische Ergebnisse ([6],[7],[8]). Allerdings wurden in den letzten Jahren viele andere Optimierungsverfahren entwickelt, die das Potential

haben, gute Ergebnisse in weniger Optimierungsschritten zu erreichen ([9],[10]). Daher wird hier die Anwendbarkeit verschiedener moderner Verfahren auf Signalintegritäts- und Störfestigkeitsanalysen bei Bussystemen untersucht. Folgende Verfahren werden näher betrachtet: Tabu Suche, Simulated Annealing (SA), Genetische Algorithmen (GA) und Partikel-Schwarm-Optimierung (PSO). Für eine Beschreibung der Verfahren und Erweiterungs- und Anpassungsmöglichkeiten siehe [11].

3.3 Vergleich der Verfahren

Tabu-Suche ist ein sehr lokales Verfahren, das heißt, die Suche verläuft die meiste Zeit in einem sehr stark begrenzten Teilbereich des Suchraumes. Somit kann es mit großer Wahrscheinlichkeit sein, dass interessante Teile des Suchraumes nicht betrachtet werden und nur Ergebnisse gefunden werden, die nicht dem globalen Optimum nahe kommen ([11]). Aus diesem Grund wird Tabu-Suche im Folgenden nicht weiter betrachtet. Tabelle 1 stellt Ergebnisse der drei übrigen Verfahren für zwei Beispieltopologien dar: Topologie 1 ist geringer Komplexität mit 5 Teilnehmern und 16 Variationsparametern, Topologie 2 höherer Komplexität mit 11 Teilnehmern und 41 Variationsparametern.

	Topologie 1			Topologie 2		
Fehlerwert mit Startwerten	0,514			0,112		
Eingesetztes Verfahren	<i>SA</i>	<i>GA</i>	<i>PSO</i>	<i>SA</i>	<i>GA</i>	<i>PSO</i>
Maximaler Fehlerwert	0,753	0,741	0,749	0,158	0,141	0,157
Durchschn. Simulationsanzahl	269	2020	1486	744	2020	1864

Tabelle 1: Ergebniswerte der Optimierungsverfahren bei Topologie 1 und 2

Die ermittelten maximalen Fehlerwerte bei SA und PSO sind vergleichbar, bei Topologie 1 schneidet PSO ein wenig schlechter als SA ab. Die Ergebnisse des GA allerdings reichen bei beiden Topologien nicht an die Ergebniswerte der beiden anderen Verfahren heran. Bei Topologie 2 fällt der Unterschied sogar recht deutlich aus. Der Abstand zwischen den Resultaten von GA und den beiden anderen Verfahren wächst mit zunehmender Anzahl freier Parameter anscheinend an. Ein möglicher Grund dafür ist die Komplexität des Verfahrens. GA beinhaltet mehrere Operationen, wie Selektion, Mutation und Kreuzung einzelner Individuen, die eine Anpassung an das konkrete Problem erfordern. Trotz detaillierten Voruntersuchungen zu möglichen Adaptionen liefert GA hier schlechtere Ergebnisse. Der Anpassungsaufwand bei SA und PSO ist deutlich geringer, was sich durch die Qualität der Ergebnisse zeigt. Diese beiden Verfahren sind somit für einen praktischen Einsatz besser geeignet.

Da GA und PSO auf Populationen basieren, benötigen diese beiden Verfahren mehr Simulationen zur Berechnung des maximalen Fehlerwertes als SA. Bei der geringen Komplexität von Topologie 1 können die populationsbasierten Algorithmen das Potential ihres parallelen Suchansatzes nicht ausnutzen. Hier liefert SA die besten Er-

gebnisse bei gleichzeitig kürzester Suchzeit. Bei der komplexeren Topologie 2 steigt die Anzahl der Simulationen bei SA allerdings drastisch an, bei PSO zeigt sich der relative Anstieg deutlich geringer. Tendenziell ist zu erkennen, dass sich die Laufzeiten bei steigender Parameteranzahl zwischen dem populationsbasierten, parallelen Suchansatz bei PSO und dem sequentiellen Suchansatz bei SA offensichtlich annähern.

Zum besseren Vergleich zwischen SA und PSO werden im Folgenden die genauen Verläufe der Optimierungen betrachtet. Abbildung 6 zeigt die Konvergenzverläufe der beiden Verfahren, also nach wie vielen Simulationen welcher Fehlerwert gefunden wurde. Bei Topologie 1 zeigen sich nur geringe Unterschiede im Konvergenzverlauf, SA ist hier nur im letzten Abschnitt vor Erreichen des endgültigen Fehlerwertes schneller. Ein anderes Bild zeigt sich bei Topologie 2. Es ist zu erkennen, dass PSO zu Beginn deutlich größere Fortschritte bei der Suche des größten Fehlerwertes macht.

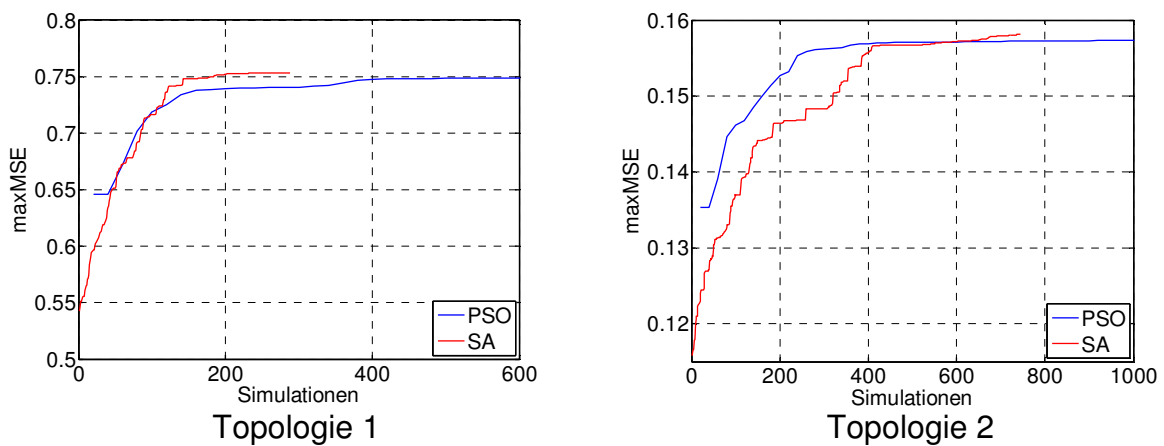


Abbildung 6: Verlauf der Optimierungen von GA und PSO bei Topologie 1 und 2

Bei Topologien mit geringer Komplexität ist der parallele Suchansatz von PSO offenbar zu komplex, da für die einzelnen Schritte immer die komplette Population mit p Individuen zu bewerten ist, also nur alle p Simulationen ein höherer Fehlerwert gefunden werden kann. In dieser Zeit hat SA insgesamt p Mal die Möglichkeit, einen höheren Fehlerwert zu bestimmen und von dort aus weiter zu suchen. Bei komplexeren Modellen zeigt sich zunehmend die Stärke des populationsbasierten Verfahrens. Durch den parallelen Ansatz kann bei PSO der Suchraum gleichzeitig an mehreren Stellen durchsucht werden und durch diese großflächigere Abtastung die ungefähre Lage des gesuchten größten Fehlerwertes schneller bestimmt werden. SA benötigt hingegen eine gewisse Zahl an Simulationen bis sich die Suche schrittweise in die Nähe des gesuchten Wertes bewegt hat und verbringt so bei komplexen Topologien vergleichsweise viel Zeit in uninteressanteren Bereichen des Suchraumes. Es ist also anzunehmen, dass PSO bei Topologien mit einer hohen Anzahl freier Parameter kritische Fälle im Busbetrieb schneller als SA findet.

Zusätzlich lässt sich das grundlegende Prinzip der populationsbasierten, parallelen Abdeckung des Suchraumes von Partikel-Schwarm-Optimierung einfach durch den Einsatz mehrpfadiger Programmausführung auf parallelen Recheneinheiten beschleunigen. Dies macht Untersuchungen sehr komplexer Topologien bei akzeptabler Laufzeit möglich.

4 Einfluss von Parameterschwankungen auf die Störfestigkeit

Abschließend soll der Einfluss von Parameterschwankungen auf die Signalintegrität und Störfestigkeit eines Bussystems an einem praktischen Beispiel demonstriert werden. Hierzu wird eine einfache Topologie, wie sie in Abbildung 7 dargestellt ist, untersucht. Teilnehmer 1 agiert als Sender und ist, wie Teilnehmer 3, wellenwiderstandsrichtig abgeschlossen. Der Mittenknoten Teilnehmer 2 ist mit der Terminierung aus Abbildung 8 abgeschlossen.

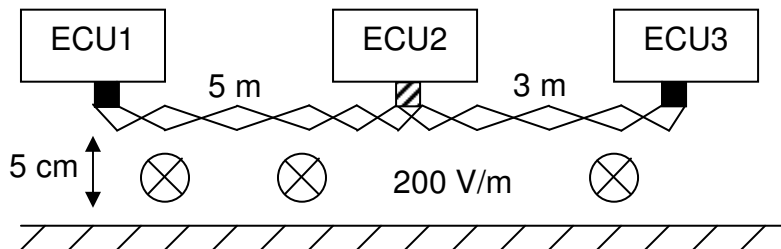


Abbildung 7: Untersuchte Topologie

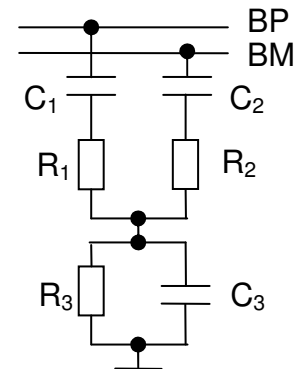


Abbildung 8: Mitterterminierung an Teilnehmer 2

In die ideal verdrillte Busleitung koppelt eine sinusförmige Störung mit einer Frequenz von 10 MHz und einer Feldstärke von 200 V/m ein. Diese beeinflusst das Differenzsignal bei idealen Parameterwerten nicht, wie im Augendiagramm in Abbildung 9 (links) zu sehen ist. Werden allerdings Bauelementschwankungen in Betracht gezogen und angenommen, dass die Elemente der Terminierungen eine Ungenauigkeit von jeweils 10% aufweisen können, kann sich in einem ungünstigen Fall die Situation in Abbildung 9 (rechts) ergeben.

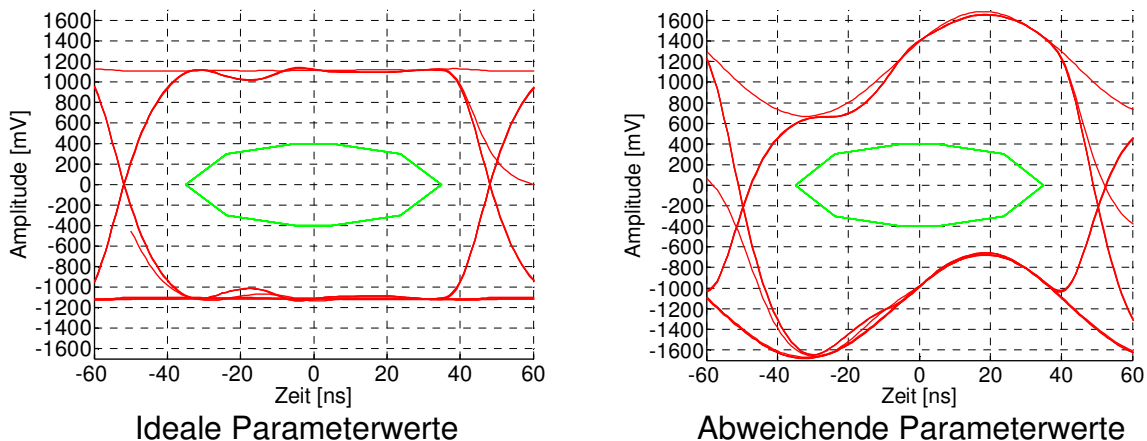


Abbildung 9: Augendiagramme an Teilnehmer 2

Hier ist deutlich zu erkennen, dass die Störeinkopplung die Signalintegrität beeinflusst. Dies kann in Extremfällen soweit führen, dass der Empfang von Daten gestört und somit die Sicherheit des gesamten Systems nicht mehr gegeben ist. Tabelle 2 zeigt die Abweichungen der Parameter in der kritischsten gefundenen Konfiguration.

	Teilnehmer 2					
Parameter	R ₁	C ₁	R ₂	C ₂	R ₃	C ₃
Idealer Wert	24 Ω	100 pF	24 Ω	100 pF	48 Ω	4,7 nF
Kritischste Konfiguration	27 Ω	91 pF	21 Ω	105 pF	42 Ω	4,0 nF

Tabelle 2: Ideale und kritischste Parameterwerte

Insbesondere Abweichungen bei den Widerständen R₁ und R₂ sowie den Kondensatoren C₁ und C₂ in der Mittenterminierung am empfangenden Teilnehmer haben offensichtlich deutliche Einflüsse auf die Qualität der Signale. Da diese Elemente möglichst symmetrisch ausgelegt sein sollten zeigen hier Asymmetrien starke Auswirkungen auf das Differenzsignal zwischen BP und BM.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Viele Bussysteme werden an den Grenzen ihrer Spezifikation betrieben. Unter diesen Umständen ist eine Absicherung sicherheitskritischer Funktionen besonders wichtig. Da viele Parameter die Signalintegrität beeinflussen, ist eine Überprüfung messtechnisch nicht mehr zu leisten. In diesem Beitrag werden Methoden zur automatisierten, simulationsbasierten Absicherung von Bussystemen vorgestellt. Dazu werden zunächst die verwendeten Modelle beschrieben und gezeigt, dass durch Simulation Aussagen über das reale Verhalten von Bussystemen getroffen werden können. Desweiteren wird eine automatisierte Analyseumgebung präsentiert, die es möglich macht, kritische Parameterkombination herauszufiltern. Damit werden verschiedene Suchverfahren evaluiert und verglichen. Besonders geeignet für die Analyse komplexer Bussysteme scheint das Verfahren der Partikel-Schwarm-Optimierung zu sein. Ein praktisches Beispiel zeigt den Einfluss von Bauelementschwankungen auf die Störfestigkeit von Bussystemen.

Ausgehend von den vorgestellten Ergebnissen können durch Anwendung von Parallelisierungskonzepten Simulations- und Optimierungszeiten verkürzt werden und so praktische Aussagen über Signalintegrität und Störfestigkeit selbst sehr komplexer Bussysteme innerhalb von kurzer Zeit getroffen werden.

Referenzen

- [1] IBIS Open Forum (I/O Buffer Information Specification), www.eigroup.org/ibis, 2009.
- [2] K. Siebert, H. Günther, S. Frei, W. Mickisch: „Modelling of Frequency Dependent Losses of Transmission Lines with VHDL-AMS in Time Domain“, Internationla Zurich EMC Symposium, 2009.
- [3] C.R. Paul: „Analysis of Multiconductor Transmission Lines“, J. Wiley & Sons, New York, 1994.

- [4] FlexRay Consortium: "FlexRay Communications System Electrical Physical Layer Specification Version 2.1 Revision B", Nov. 2006, erhältlich unter www.flexray.com
- [5] FlexRay Consortium: "FlexRay Communications System Electrical Physical Layer Application Notes Version 2.1 Revision B", Nov. 2006, erhältlich unter www.flexray.com
- [6] J. G. Amar: „The Monte Carlo Method in Science and Engineering“, Computing in Science and Engineering March/April 2006 Vol. 8 No. 2 pp. 9-19.
- [7] A. Singhee, R. A. Rutenbar: „From Finance to Flip Flops: A Study of Fast Quasi-Monte-Carlo Methods from Computational Finance Applied to Statistical Circuit Analysis“, ISQED 2007.
- [8] J. Ogrodzki: „Circuit Simulation Methods and Algorithms“, CRC Press 1994.
- [9] I. Wegener: „Simulated Annealing Beats Metropolis in Combinatorial Optimization“, ICALP 2005.
- [10] F. Neumann, I. Wegener: „Randomized Search, Evolutionary Algorithms, and the Minimum Spanning Tree Problem“, GECCO 2004.
- [11] E. K. Burke, G. Kendall (Hrgs.): „Search Methodologies“, Springer, 2005.