

Modellierung von LIN-Transceivern für EMV-Simulationen im Kraftfahrzeug

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

1. Einleitung

Um eine sichere Datenkommunikation im Kraftfahrzeug zwischen den einzelnen Baugruppen zu gewährleisten und gleichzeitig Kosten zu reduzieren, kommen speziell entwickelte Bussysteme zum Einsatz. Als eine besonders kostengünstige Variante hat sich der LIN-Bus (Local Interconnect Network) im Fahrzeug etabliert. Hierbei handelt es sich um einen Einleiterbus mit Übertragungsraten von bis zu 20 kBit/s [1] und einer relativ hohen Störsicherheit aufgrund besonderer Maßnahmen in den Bustransceivern. Gerade bei ausgedehnteren LIN-Netzwerken ist die Störfestigkeit gegenüber hochfrequenten, Störgrößen zum Teil nur schwer zu erreichen. Eine Aussage zur EMV war bislang nur mit Hilfe von Messungen an Prototypen zu späten Entwicklungsphasen möglich. Um bereits in der Konzeptphase Informationen zum EMV-Verhalten zu bekommen, sind Simulationen notwendig. Hierfür sind gute Modelle der verwendeten Bustransceiver und Leitungen unerlässlich. Bereits veröffentlichte Untersuchungen zur Modellierung von CAN-Transceivern konzentrieren sich auf die Signalintegrität [2], [3]. Im Hinblick auf die Störfestigkeitssimulation von Bustransceivern sind bisher keine Modelle bekannt. Daher wurden im Rahmen des hier beschriebenen Projekts Modelle für Bustransceiver und Verfahren für die Parameterbestimmung entwickelt, die anhand von zwei typischen LIN-Transceivern verifiziert wurden. Simulationsergebnisse aus verschiedenen Konfigurationen wurden mit den Messungen an realen Aufbauten verglichen.

2. Modellparameterbestimmung

Viele Störfestigkeitsprobleme mit Bussystemen im Kfz treten bei Frequenzen unterhalb von 30 MHz auf. Daher war es das Ziel, messtechnisch abgesicherte Ersatzimpedanzmodelle zu entwickeln, mit denen anhand gewonnener Kennlinien Aussagen zur Störsicherheit der Transceiver in unterschiedlichen Anschlusskonfigurationen bis zu einer Frequenz von 30 MHz sicher möglich sind, und Trendaussagen bis 100 MHz getroffen werden können.

Aufgrund des nichtlinearen Eingangsverhaltens des Transceivers kann die Messung nicht stationär erfolgen. Die Bestimmung der frequenzabhängigen Impedanz erfolgt dynamisch direkt im Arbeitspunkt des Transceivers, in dem ein Ausfall beobachtet werden kann. Anhand einer für Messungen optimierten Transceiverplatine werden mit Stromsensoren und Oszilloskopstastköpfen Ströme und Spannungen im Zeitbereich erfasst und daraus Impedanzen bestimmt. Die für die Stimulierung notwendige sinusförmige Störspannung wird durch einen HF-Generator erzeugt, verstärkt und kapazitiv auf die LIN-Busleitung eingekoppelt (Abbildung 1).

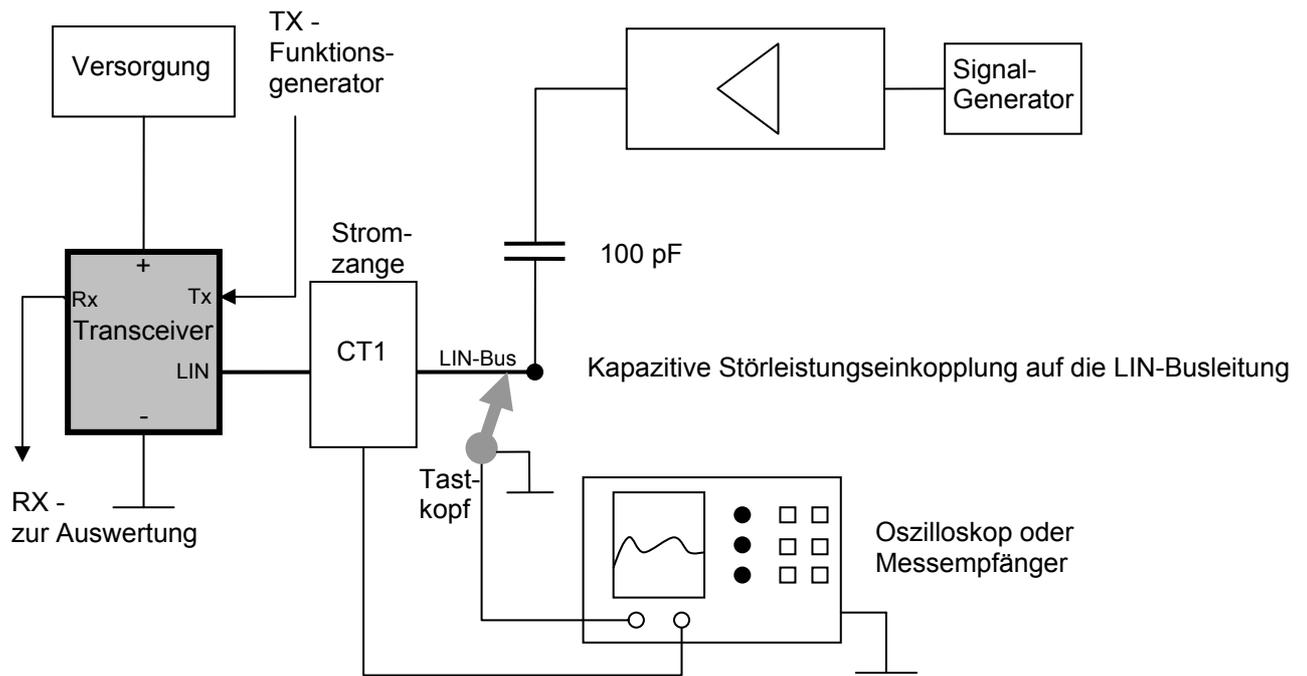


Abbildung 1: Schematischer Aufbau für die Messung der Transceiver-Parameter über direkte Leistungseinspeisung

Dabei wird an diskreten Frequenzen die Störspannung schrittweise erhöht und der aufgenommene Strom betrachtet. Beim Ansprechen transceiverinterner EMV-Schutzmaßnahmen erfolgt ein sprunghafter Anstieg des eingekoppelten Störstroms im rezessiven und/oder dominanten Signalanteil. Dieses Verhalten muss noch keinen negativen Einfluss auf die microcontrollerseitige Signalintegrität haben, sodass bei stetiger Erhöhung der Störspannung der Transceiver weitere innere Zustände oder Ausfallstufen bis hin zum Totalausfall annehmen kann. Die gewonnenen Kennlinien erlauben die Bestimmung von Ersatzimpedanzen in den Modellen. Damit ist eine Abschätzung des EMV-Verhaltens von LIN-Transceivern im Gesamtfahrzeugverbund anhand simulatorisch ermittelter Störspannungen und –ströme am Busleitungseingang des Transceivers möglich.

2.1 Ersatzschaltbilder

Ausführliche Untersuchungen, in denen verschiedene Frequenzabhängigkeiten überprüft wurden, zeigten, dass für simulatorische Untersuchungen der Störfestigkeit die Transceiver durch eine einfache Ersatzimpedanz nachgebildet werden können. Diese besteht aus einem ohmschen Widerstand mit einer dazu parallel geschalteten Kapazität. Einfache Halbleiterschaltungsmodelle erwiesen sich als ungeeignet, um die Komplexität eines Transceivers abzubilden.

2.2 IBIS-Modell

IBIS (Input/Output Buffer Information Spezifikation) wurde 1993 von Intel eingeführt und bietet ein standardisiertes Format das analoge Verhalten digitaler Treiberaus-

und -eingänge darzustellen [4]. Bei diesen Verhaltensmodellen wird die Charakteristik des Treiberbausteins als I/U- und U/t-Kennlinie in Tabellenform abgelegt. Dabei werden alle Lastfälle, Schaltflanken und -zustände sowie Überspannungen berücksichtigt. Des Weiteren enthalten die Modelle Informationen über die R, L, C Ersatzschaltungen. Abbildung 2 zeigt das vereinfachte IBIS Modell eines LIN-Transceivers. Die Kennlinien in Abbildung 3 für den rezessiven Transceiver (Receive-Modus) wurden gemäß [4] messtechnisch ermittelt. Laut Spezifikation des LIN-Transceivers befindet sich im Pull-Up-Zweig eine Reihenschaltung aus einem 30 k Ω Widerstand und einer Diode, was anhand der U/I-Kennlinie eines 28 k Ω Widerstandes gut nachzuvollziehen ist. Im rezessiven Fall sperrt ein D-MOS Transistor den Pull-Down-Zweig, sodass hier nur geringe Leckströme auftreten. Schaltungstechnisch bedingt fließen bei der Messung des Pull-Down-Zweiges Ausgleichsströme durch den Pull-Up-Zweig, sodass dieser Teil der Kennlinie verworfen werden musste.

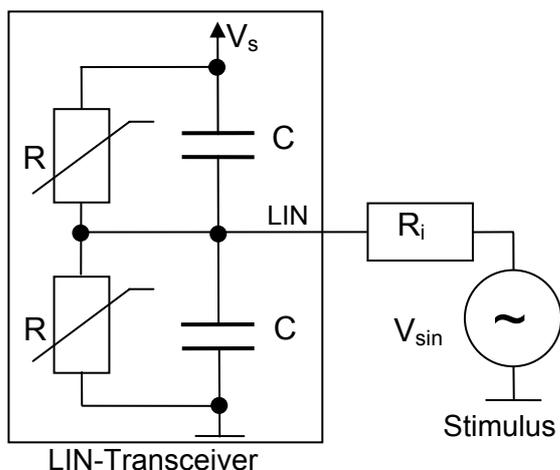


Abbildung 2: IBIS-Modell des rezessiven Transceivers mit Prüfstimulus

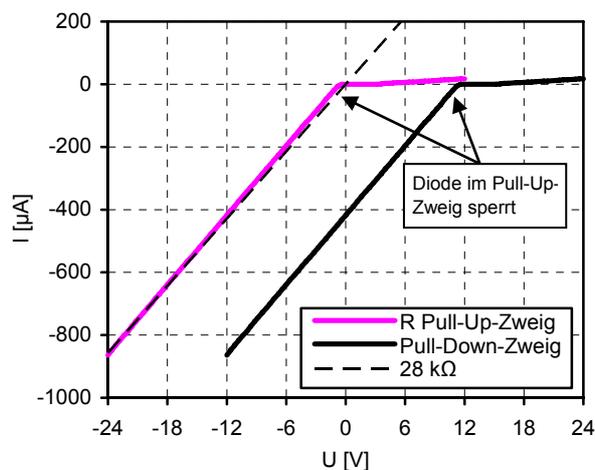


Abbildung 3: Messtechnisch ermittelte Pull-Up- und Pull-Down-Kennlinie des rezessiven TJA1020

Die Modelle können mit einem Stimulus angeregt und das Verhalten näher untersucht werden. Auf diese Weise ist es Herstellern möglich, Simulationsmodelle für EMV-Untersuchungen zu generieren, ohne genauere Informationen über interne Beschaltungen ihrer Treiberbausteine oder Steuergeräte preiszugeben. Hierbei werden keine exakten Modelle sondern eine praxistaugliche Annäherung angestrebt.

2.3 Spice-Modelle

Die erzeugten IBIS-Modelle können in äquivalente Spice-Modelle umgewandelt werden [5]. Die Realisierung nicht linearer Widerstände erfolgt hier mit Hilfe spannungsgesteuerter Stromquellen in den „Sub-Circuit-Files“. Die simulatorisch oder messtechnisch bestimmten Kennlinien der Pull-Up- und Pull-Down-Zweige werden in Spice in Tabellen abgelegt. Abbildung 4 zeigt einen Vergleich der einfachen Ersatzimpedanz (Parallelschaltung einer Kapazität und einem Widerstand) mit dem IBIS-Spice-Modell aus Abbildung 2. Der Stimulus wird über eine 12 V AC-Spannungsquelle mit einem Innenwiderstand von 50 Ω realisiert und gemäß Abbildung 1 über einen 100 pF Kondensator auf die Busleitung eingekoppelt. Durch einen

AC-Sweep wird der Frequenzbereich von 1 – 100 MHz durchlaufen. Obgleich im einfachen Ersatzimpedanzmodell der Pull-Up-Zweig zur Spannungsversorgung vernachlässigt wurde, ist die Übereinstimmung beider Kennlinien nahezu identisch, da die Kapazität von 5 pF im Pull-Down-Zweig dominant ist. Daher kann in diesem Fall davon ausgegangen werden, dass das vereinfachte IBIS-Modell und das einfache Ersatzimpedanzmodell gleichwertig angewendet werden können.

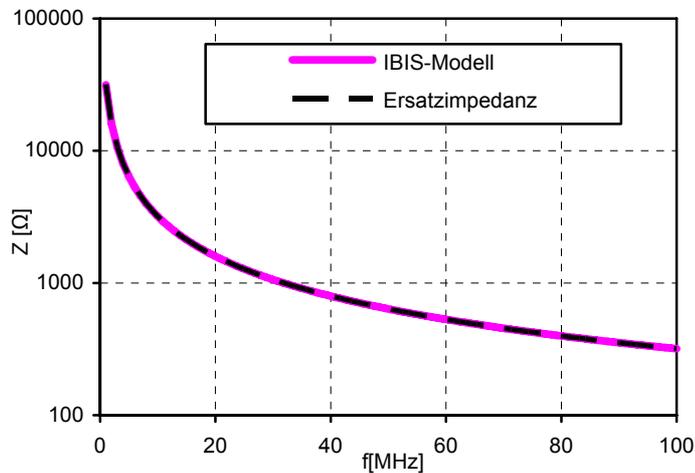


Abbildung 4: Vergleich der Impedanz des RC-Gliedes mit der Impedanz des vereinfachten IBIS-Modells

2.3.1 BCI-Modell in Spice

Die Einkopplung hochfrequenter Störströme mit der BCI Methode ist ein etabliertes Verfahren um EMV-Tests durchzuführen. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieses Projektes unter anderem eine BCI-Simulationsumgebung in Spice geschaffen. Die notwendigen Modelle konnten mit Hilfe gekoppelter Induktivitäten [6] oder anhand von S-Parameter-Messungen realisiert werden [7]. Abbildung 5 zeigt das Spice-Modell mit zwei durch einfache Ersatzimpedanzen modellierte LIN-Knoten.

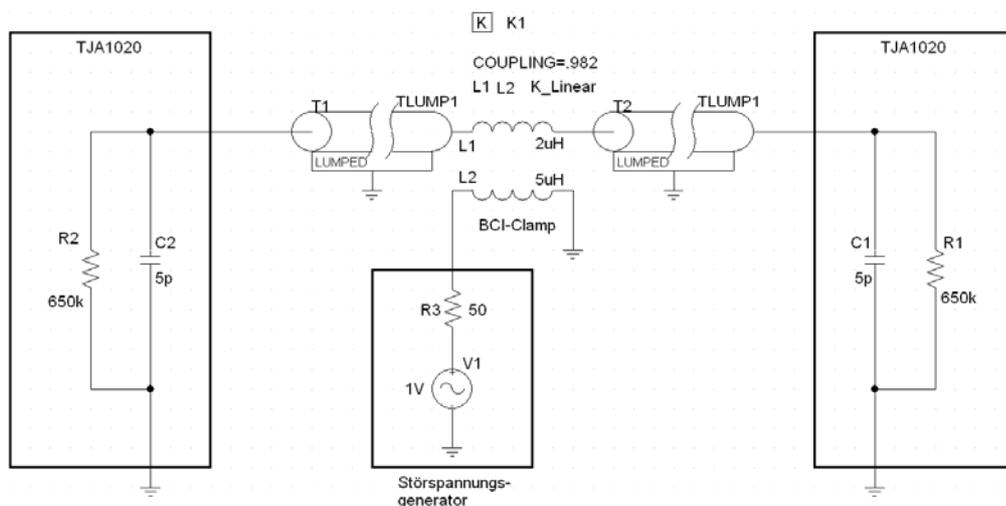


Abbildung 5: Spice BCI-Modell mit zwei LIN-Knoten modelliert durch Ersatzimpedanzen

Die verlustbehaftete Bus-Leitung wurde entsprechend berücksichtigt. Vergleichende Messungen an realen Aufbauten erzielten eine gute Übereinstimmung mit der Simulation.

3. Messergebnisse

3.1 Modellparameter

Verschiedene Methoden zur Modellparameterbestimmung der Transceiver wurden getestet. Hierbei wurde insbesondere die Möglichkeit der Antenneneinkopplung untersucht. Die notwendige Speiseleistung einer Monopolantenne im Abstand von 50 cm zur Busleitung liegt bei mehreren 100 W um eine Störung hervorzurufen, sodass diese Variante fallen gelassen wurde. Vorversuche zeigten, dass BCI als Möglichkeit zur Störeinkopplung und Charakterisierung die erreichte Genauigkeit negativ beeinflusst, weshalb BCI zur Modellparameterbestimmung nicht weiter verfolgt wurde. Durch die kapazitive Direkteinkopplung auf nur eine Platine ist es möglich eine gute Näherung gesuchten Parameter zu erhalten und eine frequenzabhängige Impedanz zu modellieren. Dieses Vorgehen reduziert parasitäre Effekte durch Stecker, Busleitung und Prüfumgebung auf ein Minimum.

Die Messungen wurden an LIN-Transceivern von Philips (TJA1020) und Infineon (TLE7259) durchgeführt. Auffällig ist ein nichtlineares Verhalten der Transceiver bei der sukzessiven Erhöhung der Störspannung, welches auf ein stufenweises Eingreifen interner Schutzbeschaltungen oder einen Teilausfall bzw. Durchbruch der im Transceiver implementierten aktiven Bauelemente zurückzuführen ist.

3.1.1 Messung der Impedanz und Ausfallspannung am Philips TJA1020

Es wird die frequenzabhängige Impedanz für den rezessiven Zustand (Empfangsfall) gemessen und daraus ein Modell erstellt. Da immer nur ein Transceiver senden darf und alle anderen Teilnehmer rezessiv bleiben, erscheint die Betrachtung für den rezessiven Zustand sinnvoll. Folgende Ausfallstufen konnten beim TJA1020 gefunden werden:

- Stufe 0: Maximale Effektivspannung, bei der noch keine Beeinflussung des Transceivers durch die aufgekoppelte Störspannung ersichtlich ist. Das Tastverhältnis des Bussignals kann minimal ($< 10\%$) beeinflusst sein.
- Stufe 1: Maximale Effektivspannung, bei der der Transceiver noch funktionsfähig, aber die Signalintegrität schon deutlich beeinträchtigt ist ($< 20\%$). Ein sprunghafter Anstieg des Stromes im dominanten Zustand bei Überschreiten der Maximalspannung aus Stufe 0 deutet auf einen möglichen Durchbruch interner Schutzbeschaltungen oder Transistoren hin.
- Stufe 2: Maximale Effektivspannung, bei der der Transceiver gerade noch funktionstüchtig oder bereits ausgefallen ist. Auf einen Offsetverlust der rezessiven Störspannung um etwa $8 V_{\text{eff}}$ folgt entweder unmittelbar oder aber nach geringer Erhöhung ($< 1\text{ dB}$) der aufgeprägten Störspannung der Totalausfall des Transceivers. Aufgrund intern greifender Schutzbeschaltungen wird der Transceiver niederohmig und Buspegel liegt im dominanten Spannungsbereich, sodass keine Buskommunikation unter den anderen Teilneh-

mern mehr möglich ist. Der Rx-Ausgang des Transceiver geht auf „Low“.

In Abbildung 6 ist die am TJA1020 gemessene Ausfallspannung dargestellt. Aus Abbildung 7 ergeben sich die gemessenen Impedanzen im Vergleich zu der daraus hergeleiteten Ersatzimpedanz für die einzelnen Stufen. Da die IBIS-Kennlinien aufgrund der Dominanz der Kapazitäten im Pull-Down-Zweig mit denen des einfachen Ersatzimpedanzmodells identisch sind, wird in Abbildung 7 auf die zusätzliche Darstellung verzichtet.

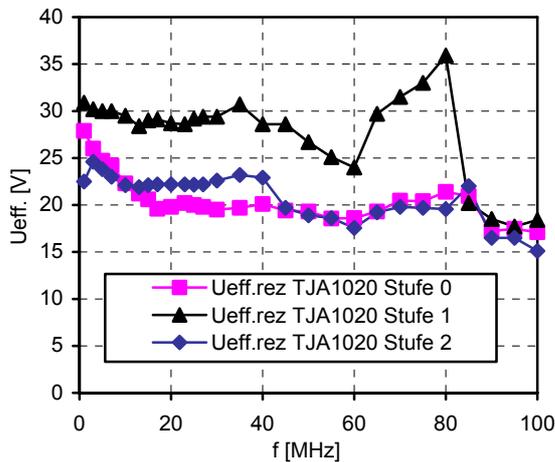


Abbildung 6: TJA1020 – Ausfallspannung bei Direkteinkopplung

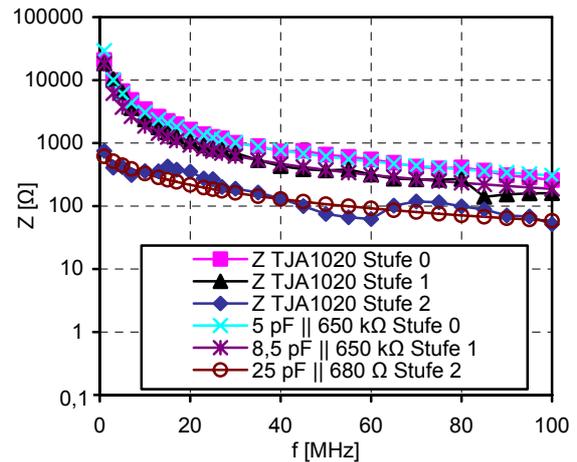


Abbildung 7: TJA1020 – Transceiverimpedanzen vs. Ersatzimpedanzen

3.1.2 Messung der Impedanz und Ausfallspannung am Infineon TLE7259

Der Infineon Transceiver zeigt aufgrund anderer, leider nicht bekannter interner Beschaltungen ein anderes Ausfallverhalten. Dieses kann in nur 2 Stufen unterteilt werden:

- Stufe 0: Maximale Effektivspannung, bei der noch keine Beeinflussung des Transceivers durch die aufgekoppelte Störspannung ersichtlich ist. Das Tastverhältnis des Bussignals kann minimal (< 10 %) beeinflusst sein.
- Stufe 1A: Maximale Effektivspannung, bei der der Transceiver noch funktionsfähig, aber die Signalintegrität schon deutlich beeinträchtigt ist (< 20 %). Ein sprunghafter Anstieg des Stromes im dominanten Zustand bei Überschreiten der Maximalspannung aus Stufe 0 deutet auf einen möglichen Durchbruch interner Schutzbeschaltungen oder Transistoren hin. Beim Überschreiten der maximalen Störspannung bricht die Buskommunikation langsam zusammen und der Rx-Ausgang am TLE7259 nimmt ein „High“ Potential an. Ein Offsetverlust wie beim TJA1020 tritt nicht ein.

In Abbildung 8 ist die am TLE7259 gemessene Ausfallspannung dargestellt. Aus Abbildung 9 ergeben sich die gemessenen Impedanzen im Vergleich zu der daraus hergeleiteten Ersatzimpedanz von 8 pF || 650 kΩ für beide Stufen.

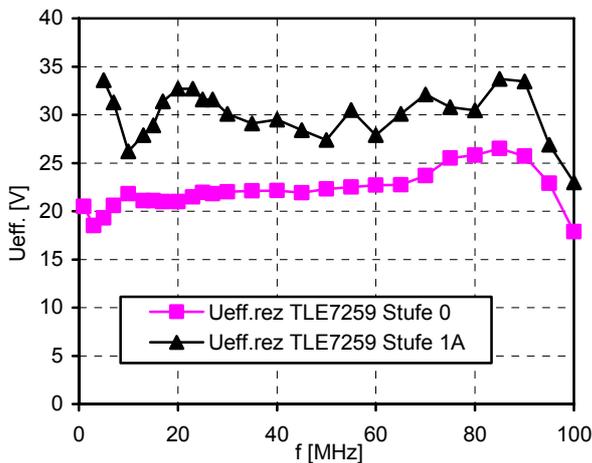


Abbildung 8: TLE7259 – Ausfallspannung bei Direkteinkopplung

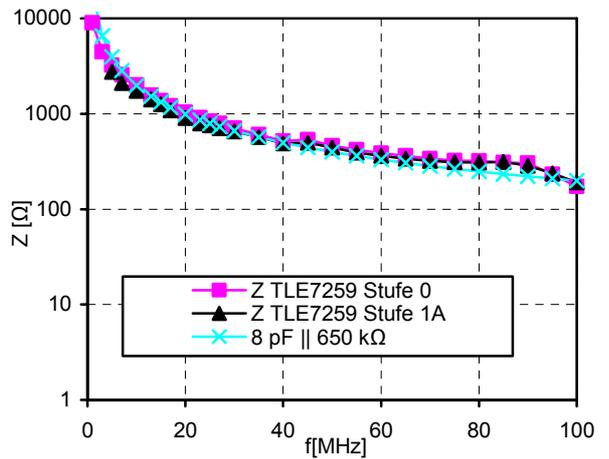


Abbildung 9: TLE7259 – Transceiverimpedanzen vs. Ersatzimpedanzen

3.2 Verifikation der Modelle an einem LIN-Labora Aufbau

Untersucht wurden zwei verschiedene LIN-Transceiver in mehreren Topologien. Dabei zeigten sich teilweise deutliche Unterschiede bei der Definition und Modellierung der diversen inneren Zustände und Störschwellen. Die entwickelten Ersatzimpedanzmodelle der Transceiver wurden in Kombination mit verschiedenen Leitungskonfigurationen sowohl mit der Momentenmethode als auch mit SPICE simuliert. Dabei wurden Bustopologien mit zwei und drei Knoten berücksichtigt. Abbildung 9 zeigt einen Vergleich zwischen der in eine Streifenleitung einzuspeisenden gemessenen und der durch Simulation bestimmten notwendigen Leistung, um einen Ausfall zu erzeugen. Der Aufbau in Abbildung 10 wurde gemäß ISO11452-5 mit zwei LIN-Platinen realisiert und die Störeinkopplung erfolgte auf die Busleitung.

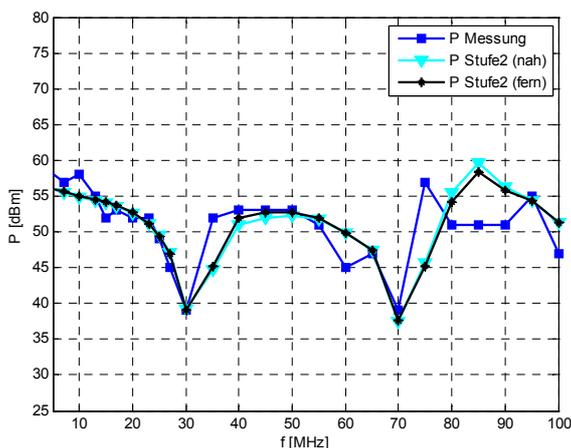


Abbildung 9: Vergleich der in die Streifenleitung simulierten und der gemessenen eingespeisten Leistung für einen Ausfall mit zwei Philips TJA1020 LIN-Transceivern; Modellierung angenähert mit RC-Impedanz Ausfallstufe 2



Abbildung 10: Laboraufbau eines LIN-Systems unter der Streifenleitung der EMC Test NRW GmbH in Dortmund

Die verwendeten Modellparameter wurden in umfangreichen Untersuchungen zuvor messtechnisch verifiziert. Der Vergleich zeigt eine gute Übereinstimmung der errechneten und gemessenen Ausfallschwelle.

Es ist also möglich, mit den entwickelten Transceiver- und Leitungsmodellen verschiedene realitätsnahe Bustopologien mit ausreichender Genauigkeit zu simulieren und so in frühen Entwicklungsphasen eine Aussage über die Störsicherheit eines bestimmten Konzeptes zu erhalten

4. Zusammenfassung

In dem Projekt wurden unterschiedliche Ansätze zur Transceivermodellierung verfolgt. Es zeigte sich, dass sich bereits mit einfachen Modellen der Transceiver gute Simulationsergebnisse mit den Programmen SPICE und EMC-Studio gewinnen lassen. Transceiver von Philips und Infineon wurden messtechnisch untersucht und Simulationsmodelle für das Ausfallverhalten bestimmt. Die Simulationsmodelle wurden mit Hilfe von BCI, verkoppelten Leitungen und in der Streifenleitung getestet. In allen Fällen konnte eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung erreicht werden.

Die Definition einzelner Ausfallstufen der Transceiver ermöglicht differenzierte Störfestigkeitssimulationen bis an die Grenzen des sicheren Arbeitsbereichs bzw. bis in den gestörten oder Ausfallbereich hinein.

5. Danksagung

Wir danken der Audi AG für die Unterstützung bei der Durchführung dieses Projektes.

6. Literatur

- [1] LIN Specification Package Revision 2.0; September 2003
- [2] Donnelly, M., Automotive CAN Bus Signal Integrity Design, Application Note, Mentor Graphics, 2005
- [3] Diaz Ortega, L., Physical Layer Modellierung der Bussysteme CAN und Flex-Ray im Kraftfahrzeug, Dissertation, Shaker, 2005
- [4] <http://www.eigroup.org/ibis/specs.htm>
- [5] Ying Wang, Hang Ngee Tan, The Development Of Analog Spice Behavioural model based on IBIS model, Ninth Great Lake Symposium, S.101-104, VLSI, 1999
- [6] Sultan, M. F., Modeling Of A Bulk Current Injection Setup For Susceptibility Threshold Measurement, IEEE EMC-Symposium 1986, Session 3B, S.188 – 194
- [7] Weber, L., Dickmann, S., Spice Simulation Method For BCI Component Tests, EMC-Zurich 2007, Kongressband S.265 – 268