

Störfestigkeitsanalyse von 100BASE-T1 und 1000BASE-T1 Automotive Ethernet-Kommunikationssystemen mittels Direct Power Injection

M.Sc. Carina Austermann, Technische Universität Dortmund, Deutschland

M.Eng. Michael Kleinen, EMC Test NRW GmbH, Deutschland

M.Sc. Marcel Olbrich, EMC Test NRW GmbH, Deutschland

Dr.-Ing. Sebastian Jeschke, EMC Test NRW GmbH, Deutschland

Dr.-Ing. Christian Hangmann, SIL System Integration Laboratory GmbH, Deutschland

Dipl.-Ing. Ingo Wüllner, SIL System Integration Laboratory GmbH, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Stephan Frei, Technische Universität Dortmund, Deutschland

1 Einleitung

Die Notwendigkeit von schneller und zuverlässiger Datenübertragung im Fahrzeug hat zur Entwicklung von Automotive Ethernet-Kommunikationstechnologien geführt, die Übertragungsraten von 100 MBit/s (100BASE-T1) [1] und 1 GBit/s (1000BASE-T1) [2] über ein einzelnes, verdrehtes Leitungspaar (engl. Twisted Wire Pair, TWP) ermöglichen. Diese beiden Kommunikationsstandards werden als Punkt-zu-Punkt-Verbindung realisiert und die Daten werden im Vollduplexverfahren übertragen. Beide Standards verwenden eine dreistufige Pulsamplitudenmodulation (PAM 3) und dieselbe Struktur des Terminierungsnetzwerks [3]. Die hohen Übertragungsraten und kurzen Symbolauern können jedoch zu geringerer Immunität gegenüber elektromagnetischen Störeinkopplungen führen. Die Zuverlässigkeit der Übertragung ist im Hinblick auf sicherheitskritische Anwendungen in Elektrofahrzeugen mit vielen leistungselektronischen Systemen ein zentrales Kriterium für die Einsetzbarkeit der Kommunikationssysteme. Die Einkopplung von Common-Mode-Störungen (CM) durch elektromagnetische Felder kann bei der Verwendung von ungeschirmten Kommunikationsleitungen nicht vermieden werden. Aus diesem Grund ist eine genaue Kenntnis über die Störfestigkeit von Kommunikationstransceivern gegenüber diesen Störgrößen von großer Bedeutung. In z.B. [4] und [5] wurde die Störfestigkeit von 100BASE-T1 mit der Bulk-Current-Injection-Methode (BCI) untersucht und der Einfluss der Störungen auf die Kommunikationssignale dargestellt.

Das Ziel dieses Beitrags ist es, die Störfestigkeit von 100BASE-T1- und 1000BASE-T1-Kommunikationssystemen gegenüber sinusförmigen CM-Störungen zunächst mit Messungen zu quantifizieren, anschließend mittels Simulationen systematisch zu analysieren und damit die Vergleichbarkeit der elektromagnetischen Störfestigkeit der Systeme zu ermöglichen. In Kapitel 2 wird der verwendete Messaufbau zur Untersuchung der Störfestigkeit gegenüber Common-Mode-Störungen basierend auf der Methode der Direct Power Injection (DPI) und den entsprechenden Vorgaben der OPEN Alliance [6,7] erläutert und die Ergebnisse dargestellt. In Kapitel 3 wird ein Modellierungsansatz eingeführt, mit dem die Terminierungsnetzwerke der Kommunikationssysteme und die DPI-Störeinkopplung simuliert werden können. Die Simulation wird in Kapitel 4 für eine weiterführende systematische Untersuchung der Störfestigkeit verwendet. Es werden sowohl das methodische Vorgehen, als auch die kritischen Störpegel für die verschiedenen Kommunikationssysteme dargestellt und diskutiert. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse erfolgt in Kapitel 5.

2 Messtechnische Störfestigkeitsanalyse von 100BASE-T1- und 1000BASE-T1-Kommunikationstransceivern gegenüber sinusförmigen Störsignalen mittels DPI

Zur experimentellen Untersuchung der Störfestigkeit wird ein Prüfaufbau zur direkten Leistungseinspeisung (DPI) in Anlehnung an die OPEN Alliance [6] verwendet. Es wird eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung zweier Transceiver mit einer kurzen TWP-Leitung aufgebaut, in die mit einem Einspeisenetzwerk eine CM-Störung in die Kommunikationsstrecke eingekoppelt werden kann. Es werden zwei Kommunikationstransceiver verschiedener Hersteller untersucht und in den Messungen die entsprechenden Evaluationboards inklusive Medienkonverter verwendet. Einer der

Transceiver, welcher sowohl 100- als auch 1000BASE-T1 unterstützt, wird im Folgenden mit IC 1 bezeichnet und ein anderer 100BASE-T1 fähiger Transceiver mit IC 2. Eine schematische Darstellung des Messaufbaus ist in Bild 1 (links) abgebildet. In der verwendeten Messroutine wird die Ausgangsleistung des Signalgenerators für einzelne Frequenzen solange erhöht, bis ein definierter, kritischer Schwellwert von 50 % der im ungestörten Fall verfügbaren Datenrate erreicht wird. Hierzu wird die Datenrate mittels iPerf3 [8] pro Frequenz- und Leistungsschritt über einen Zeitraum von 5 s gemittelt und aufgezeichnet. Die Ansteuerung des Signalgenerators und der Kommunikationsstrecke erfolgt dabei zentral über einen Steuerrechner. Es werden Medienkonverter genutzt, um Daten vom Ethernetanschluss des PCs an die Automotive Ethernet Transceiver zu übertragen und empfangene Daten auszulesen. Die maximale Ausgangsleistung des verstärkten Generatorsignals $P_{DPI, Mess}$ wird dabei auf 36 dBm festgelegt.

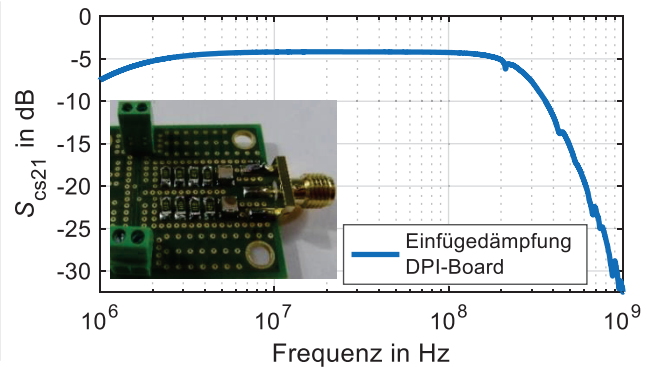
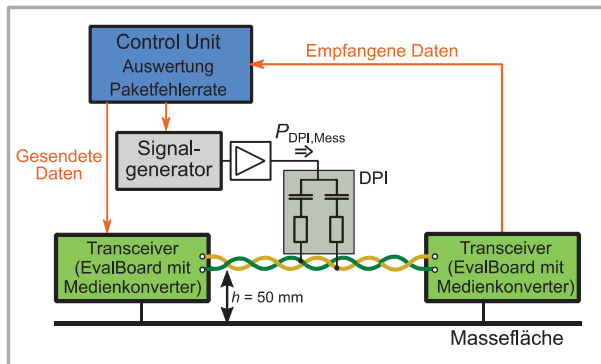


Bild 1: Schematischer DPI-Messaufbau (links) und Einfügedämpfung des DPI-Boards (rechts)

In dem hier untersuchten Setup werden die auf den Transceiver-Boards eingesetzten Gleichtaktrosseln (engl.: Common Mode Chokes, CMCs) am Frontend der Transceiver entfernt und gebückt. Dies erlaubt eine direkte Aussage über kritische Spannungspegel am Eingang der jeweiligen ICs ohne Einfluss zusätzlicher Bauteile und ermöglicht so eine bessere Vergleichbarkeit der verschiedenen Transceiver, da üblicherweise verschiedene CMCs für die Kommunikationssysteme eingesetzt werden.

Durch die anschließende simulative Untersuchung lassen sich die Einflüsse der CMCs nachbilden und bewerten. Die Einkopplung des Störsignals während der Messungen erfolgt als sinusförmige Common-Mode-Störgröße über ein symmetrisches Einspeisetzwerk mit je einem 470 pF Kondensator und einem 120 Ω Widerstand. Bild 1 (rechts) zeigt das realisierte Einkopplernetzwerk, sowie die Transmission S_{cs21} von 1 MHz bis 1 GHz des an der SMA-Buchse single-ended eingespeisten Störsignals, welches als Gleichtaktstörer symmetrisch auf die N- und P-Leitungen der Kommunikationsstrecke gekoppelt wird. Dabei ist ersichtlich, dass die Transmission für Frequenzen oberhalb von 300 MHz stark abnimmt. Aus diesem Grund wird der Frequenzbereich für die weitere Betrachtung der Messergebnisse, abweichend von der Spezifikation nach OPEN Alliance, auf maximal 400 MHz beschränkt. Die ermittelten Störschwellen $P_{DPI, Mess}^{SW}$ sind in Bild 2 gezeigt. Diese zeigen, dass das Störpotential für 1000BASE-T1, für Frequenzen über 40 MHz, deutlich größer ist, als für 100BASE-T1-Systeme. Die beiden 100BASE-T1-ICs zeigen über den Frequenzbereich ein leicht unterschiedliches Verhalten. Für IC 2 findet ab einer Frequenz von ca. 270 MHz keine signifikante Störbeeinflussung bei der betrachteten Störleistung mehr statt. Die Durchführung dieser Messungen mit den sich daraus erge-

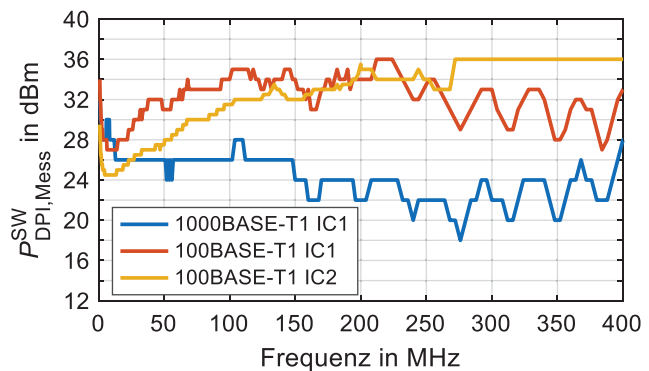


Bild 2: Ermittelte Störschwellen der DPI-Leistungen der verschiedenen Kommunikationssysteme ohne CMC

Die Durchföhrung dieser Messungen mit den sich daraus erge-

benden Schwellwerten, bildet die Basis für die im Folgenden beschriebene Ermittlung der kritischen Störspannungspegel am IC und des quantitativen Vergleichs der Automotive Ethernet Transceiver.

3 Modellierung der Kommunikationssysteme und Direct Power Injection

Der in Kapitel 2 beschriebene Messaufbau wird mit einer Netzwerksimulation in LTspice nachgebildet, um weiterführende Untersuchungen durchführen zu können. Die Modellierung des Kommunikationssystems und der Störeinkopplung mittels DPI ist in Bild 3 (links) dargestellt. Die Einkopplung wird mit einer idealen Spannungsquelle und einem symmetrischen Netzwerk aus Kondensator und Widerstand modelliert. Ein Vergleich zwischen Messung und Simulation hat gezeigt, dass in dem untersuchten Frequenzbereich bis 400 MHz ideales Verhalten des Koppelnetzwerks angenommen werden kann. Der Fokus ist auf der Modellierung der Terminierungsnetzwerke gelegt, um eine korrekte Nachbildung der Einkopplung zu ermöglichen und den Einfluss der Terminierung auf die Störfestigkeit bewerten zu können. Das Terminierungsnetzwerk der 100BASE-T1 bzw. 1000BASE-T1-Kommunikationsteilnehmer besteht aus einer Common-Mode-Terminierung, zwei DC-Blockkondensatoren und einer Common Mode Choke (CMC). Die Transceiver besitzen eine differentielle Eingangsimpedanz von 100 Ω. In dem hier untersuchten Setup wurde eine Split-Terminierung mit zwei Widerständen mit je 50 Ω betrachtet (vgl. Bild 3). Die IC-Eingänge werden hochohmig mit einem 1 MΩ Widerstand gegen Masse modelliert.

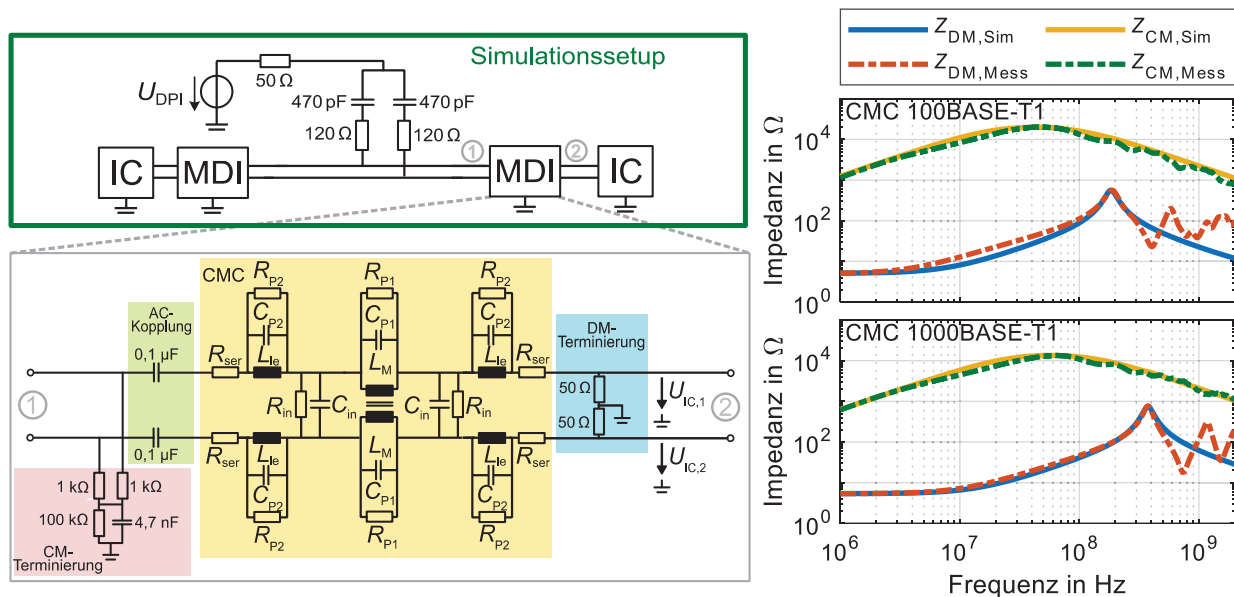


Bild 3: Simulationssetup und Modellierungsansatz Terminierungsnetzwerk (links); Verifikation der CMC-Modelle (rechts)

Die Terminierungsnetzwerke der Kommunikationssysteme unterscheiden sich durch die verwendeten CMCs. Als Grundlage für die Modellierung der CMCs werden die Komponenten DLW43MH201XK2L (100BASE-T1) [9] und DLW32MH101XT2 (1000BASE-T1) [10] von Murata verwendet. Diese CMCs sind für die Applikation in Automotive Ethernet-Systemen zugelassen. Das verwendete Ersatzschaltbild ist im linken Teil in Bild 3 dargestellt und die Modellparameter für die beiden CMCs können Tabelle 1 entnommen werden. Die Parametrierung der CMC-Modelle wurde auf Basis von S-Parameter-Messungen durchgeführt [11], die vom Hersteller bereitgestellt werden. Die Verifikation dieser Modelle erfolgt durch den Vergleich von Simulations- und Messergebnissen der CM- und DM-Impedanzen, wie in Bild 3 (rechts) dargestellt. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung.

CMC Modell	R_{ser} Ω	R_{P2} Ω	C_{P2} pF	L_{le} nH	R_{in} M Ω	C_{in} fF	R_{P1} k Ω	C_{P1} fF	L_M μ H	k 1
100BASE-T1	1,28	140	30	25	1	4,7	40	30,5	200	1
1000BASE-T1	1,34	185	12	15	1	6	27	38	100	1

Tabelle 1: Modellparameter der Common Mode Chokes

Für die weitere Betrachtung wird ein symmetrischer Aufbau des Terminierungsnetzwerks und eine symmetrische Störeinkopplung angenommen und ausschließlich die Common-Mode-Spannung an den Kommunikationstransceivern $U_{IC,CM}$ mit

$$U_{IC,CM} = 0,5 \cdot (U_{IC,1} + U_{IC,2}) \quad (1)$$

betrachtet (vgl. Bild 3 (links)).

Die Mixed-Mode-Parameter S_{cc12} der verschiedenen Terminierungsnetzwerke wurden simuliert (Portnummerierung entsprechend Bild 3) und sind in Bild 4 dargestellt. Der S_{cc12} -Parameter quantifiziert die Dämpfung des Common-Mode-Signals durch das Terminierungsnetzwerk.

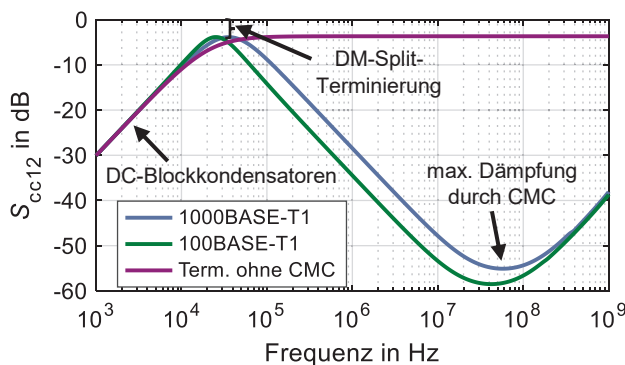


Bild 4: S_{cc12} -Parameter der Terminierungsnetzwerke

Bis zu einer Frequenz von 20 kHz ist der Einfluss der DC-Blockkondensatoren zu erkennen. Die als Split-Terminierung aufgebaute differentielle Eingangsimpedanz wirkt als 3 dB-Leistungsteiler über den gesamten Frequenzbereich. Ab einer Frequenz von 100 kHz führen die CMCs zu einer starken Dämpfung des CM-Signals. Die Darstellung der S_{cc12} -Parameter zeigt bereits einen signifikanten Unterschied zwischen der 100BASE-T1- und 1000BASE-T1-Terminierung, dessen Einfluss auf die Störpegel im

Folgenden untersucht wird. Entsprechend der Beschreibung in Kapitel 2 wurden die Messungen ohne CMCs im Terminierungsnetzwerk durchgeführt. Der Verlauf des entsprechenden S_{cc12} -Parameters zeigt, dass dieser im Bereich 40 kHz bis 100 MHz mit ca. - 3,5 dB konstant ist. Änderungen der ermittelten Störpegel sind demnach in diesem Frequenzbereich direkt auf den IC zurückzuführen und entstehen nicht durch eine Filterwirkung des Terminierungsnetzwerks.

4 Simulationsbasierte Analyse und Vergleich der 100BASE-T1- und 1000BASE-T1-Kommunikationssysteme

Auf Basis der Simulation können die Messdaten aus Kapitel 2 weitergehend ausgewertet werden. In diesem Kapitel wird dazu zunächst das methodische Vorgehen für die Auswertung der Messdaten und Untersuchungen von verschiedenen Koppelstrukturen vorgestellt. Zusätzlich zum DPI-Setup wird eine Leitungskopplungskonfiguration untersucht, um die Anwendungsmöglichkeiten der vorgestellten Methodik darzustellen.

4.1 Methodisches Vorgehen

Der Ablauf der simulationsbasierten Auswertung der Messung ist in Bild 5 dargestellt. Die Messdaten können zunächst dazu verwendet werden, die kritischen Störpegel am IC zu bestimmen. Dazu wird die zuvor beschriebene Modellierung des DPI-Setups genutzt und eine entsprechende Übertragungsfunktion ermittelt. Die berechneten kritischen Störpegel am IC ($U_{IC,CM}$) ermöglichen einen Vergleich der Kommunikationssysteme und bilden die Grundlage für alle weiteren Untersuchungen. Es können darauf basierend kritische Pegel von Störquellen beliebiger Koppelstrukturen bestimmt werden, wenn die Koppelstruktur in einer Simulation unter der Annahme von Linearität

nachgebildet werden kann oder eine Quantifizierung des Koppelpfads mit einer Übertragungsfunktion z.B. durch Messungen vorliegt. Dies ist in der Abbildung durch die Modelle 1 bis n und die berechneten Störpegel P_n dargestellt. Abhängig von der betrachteten Störquelle können auch Strom- bzw. Spannungspegel bestimmt werden, die zu kritischen Pegeln am IC führen.

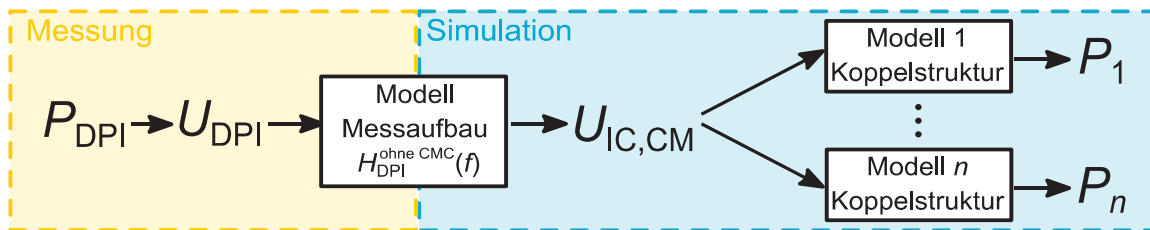


Bild 5: Schematische Darstellung der simulationsbasierten Auswertung der Messdaten

Für die Berechnungen werden simulativ Übertragungsfunktionen von der Spannung am IC zu der analysierten Störquelle bestimmt. Die allgemeine Beschreibung und das Benennungssystem der verwendeten Übertragungsfunktionen sind in (2) dargestellt.

$$H_{\text{Koppelstruktur}}^{\text{MDI-Konfiguration}}(f) = \frac{U_{\text{IC,CM}}(f)}{U_{\text{Störquelle}}(f)} \quad (2)$$

Es wird dabei zwischen verschiedenen Konfigurationen des Media Dependent Interface (MDI) für die unterschiedlichen Kommunikationssysteme (z.B. 100BASE-T1) und den Koppelstrukturen (z.B. DPI) unterschieden.

4.2 Bestimmung der kritischen CM-Störspannungen der Kommunikationstransceiver

Zunächst werden die kritischen Störpegel am IC auf Basis der DPI-Messungen ermittelt. Die Schwellenwerte, die zu einem Fehler in der Kommunikation führen, werden analog zu Kapitel 2 mit SW indiziert. Die Bestimmung der Übertragungsfunktion $H_{\text{DPI}}^{\text{ohne CMC}}(f)$ erfolgt mit dem in Bild 3 dargestellten Simulationssetup mit einem MDI-Netzwerk ohne CMC durch Berechnung von $U_{\text{IC,CM}}(f)/U_{\text{DPI}}(f)$. Mit Gleichung (3) können die kritischen Störspannungen $U_{\text{IC,CM}}^{\text{SW}}(f)$ am IC für die verschiedenen Kommunikationssysteme bestimmt werden.

$$U_{\text{IC,CM}}^{\text{SW}}(f) = H_{\text{DPI}}^{\text{ohne CMC}}(f) \cdot U_{\text{DPI,Mess}}^{\text{SW}}(f) \quad (3)$$

Die Ergebnisse sind in Bild 6 dargestellt. Bis zu einer Frequenz von 10 MHz liegt die Störschwelle für den IC 1 bei ca. 1,1 V und unterscheidet sich nur sehr geringfügig für die 100BASE-T1- und 1000BASE-T1-Datenübertragung. Für Frequenzen größer 10 MHz steigen die Störschwellen für die 100BASE-T1-Kommunikation deutlich an, wohingegen die Störspannung für die 1000BASE-T1-Kommunikation leicht abnimmt. Die Störschwellen des IC 2 zeigen einen ähnlichen Verlauf wie die Störschwellen der 100BASE-T1-Übertragung des IC 1, jedoch sind die Pegel ca. 0,2 V geringer. Die Schwankungen in den Spannungsverläufe entstehen durch die Verwendung der in Kapitel 2 vorgestellten Messdaten. Die gestrichelten Kurven zeigen die geglätteten Spannungsverläufe, die als Störschwellen für die weiteren Berechnungen verwendet werden.

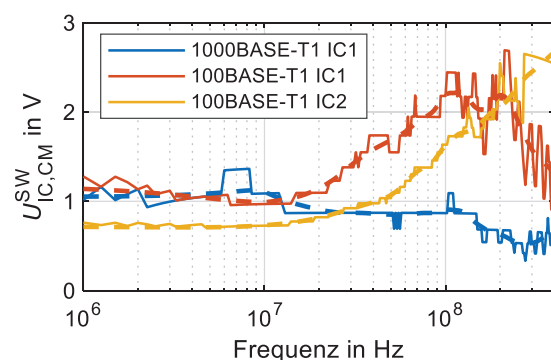


Bild 6: Kritischen CM-Spannungen an den Transceiver-ICs

4.3 Analyse und Bewertung von Störquellen und Koppelpfaden

In diesem Kapitel werden die bisherigen Ergebnisse genutzt, um die Störfestigkeit der Kommunikationssysteme und den Einfluss der MDI-Netzwerke in verschiedenen Konfigurationen zu analysieren. Es werden das bereits dargestellte DPI-Setup, sowie eine Leitungskopplungskonfiguration betrachtet und die kritischen Störpegel bestimmt.

4.3.1 Direct Power Injection

Da die DPI-Messungen mit einem modifizierten MDI-Netzwerk durchgeführt wurden, stellt sich die Frage nach den Leistungspegeln, die bei der Verwendung eines vollständigen MDI-Netzwerks für 100BASE-T1 bzw. 1000BASE-T1 zu einer beeinträchtigten Kommunikation führen. Es wird dazu jeweils ein Simulationssetup, entsprechend der OPEN Alliance [6], mit den Parametern aus Tabelle 2 für das MDI-Netzwerk aufgebaut. Die Schwellenwerte für die kritischen DPI-Spannungen können mit den simulierten Übertragungsfunktionen und (4) bestimmt werden. In (4) ist exemplarisch die Berechnung für 1000BASE-T1 dargestellt.

$$U_{\text{DPI},1000\text{BASE-T1}}^{\text{SW}}(f) = \left(H_{\text{DPI}}^{1000\text{BASE-T1}}(f) \right)^{-1} \cdot U_{\text{IC},1000\text{BASE-T1}}^{\text{SW}}(f) \quad (4)$$

Mit den berechneten Spannungen können die kritischen Leistungspegel $P_{\text{DPI}}^{\text{SW}}$ der Quelle einer DPI-Einkopplung bestimmt werden. Die Leistungsangabe der DPI-Quelle erfolgt für einen Bezugswiderstand von 50Ω , wie in dem in Kapitel 2 beschriebenen Messaufbau. Die Ergebnisse sind in Bild 7 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass auch in dieser Betrachtung die 1000BASE-T1-Kommunikationsstrecke die geringste Störfestigkeit aufweist. Der Schwellenwert der Spannung für IC 2 liegt unterhalb jener der 1000BASE-T1-Kommunikation des IC 1 (vgl. Bild 6). Der kritische Leistungspegel des IC 2 liegt oberhalb. Das ist durch den Einfluss der verwendeten CMC zu erklären, die die Störfestigkeit des 100BASE-T1-Systems deutlich verbessert. Die Dämpfungen der Störeinkopplung durch die CMCs sind in allen Kurvenverläufen durch den starken Anstieg der notwendigen Störleistung zu erkennen. Die ermittelten Leistungen liegen alle über dem Wert von 36 dBm, der in der OPEN Alliance [6] als Schwellenwert für die Störsicherheit in einem DPI-Test angegeben wird.

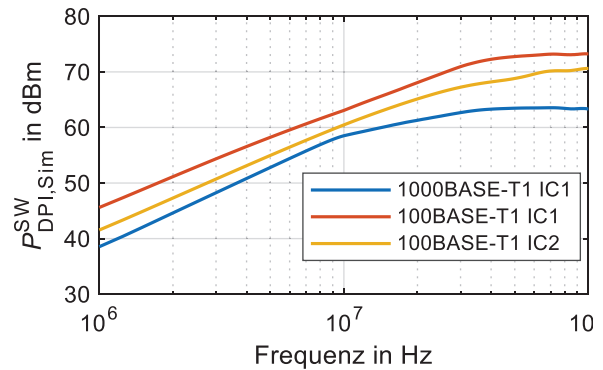


Bild 7: Simulationsergebnisse der kritischen Leistungspegel in einem DPI-Aufbau entsprechend OPEN Alliance [6]

4.3.2 Leitungskopplung

Die Verwendung von ungeschirmten TWP in Kommunikationssystemen ermöglicht die (feldgebundene) Einkopplung von Common-Mode-Störungen. Ein Koppelpfad der durch den Aufbau des Kabelbaums im Fahrzeug entsteht ist Leitungskopplung, der im Folgenden auf Basis der zuvor gezeigten Ergebnisse und eines Simulationssetups analysiert wird. Der untersuchte Koppelpfad ist in Bild 8 (a) dargestellt. Eine einfache Leitung eines störenden Kreises liegt parallel zum TWP des Kommunikationssystems in einer Höhe h über der Massefläche. Der Generatorkreis besteht aus einer idealen Quelle, einem Innenwiderstand und einer ohmschen Last. Der Querschnitt der Leitungskonfiguration ist in Bild 8 (b) dargestellt.

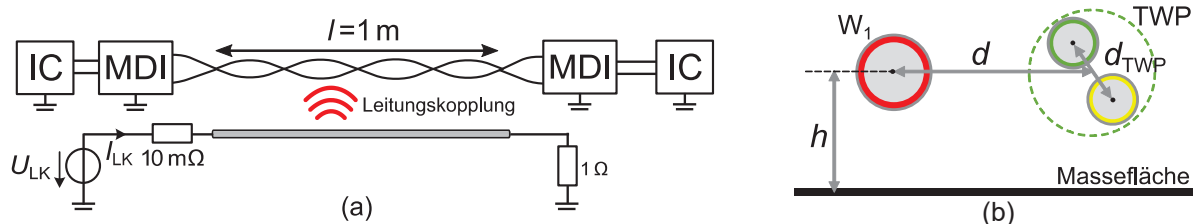


Bild 8: Gesamtaufbau (a) und Leitungsquerschnitt (b) der untersuchten Leitungskopplungskonfiguration

Die verwendeten Geometrieparameter der Leitungskonfiguration können Tabelle 2 entnommen werden. Diese Konfiguration wird ebenfalls in LTspice modelliert. Das Modell für die verkoppelten Leitungen wird mit dem Softwaretool SACAMOS [12] auf Basis der Geometrieparameter erstellt.

Parameter	r_{W1}	r_{TWP}	d_{TWP}	d	l	h
Wert in mm	0,6	0,3	0,8	1,5	1000	50

Tabelle 2: Geometrieparameter zur Erstellung des Leitungskopplungsmodells

Die Simulation wird entsprechend der in Bild 5 dargestellten Methodik verwendet, um die Parameter der Störquelle zu identifizieren, die zu kritischen Spannungspegeln am IC führen. Die Ergebnisse für den kritischen Strom I_{LK}^{SW} und die kritischen Störleistungen $P_{LK}^{SW} = \text{Re}(U_{LK} \cdot I_{LK}^*)$ im Generatorkreis sind für das untersuchte Setup in Bild 9 dargestellt. Die Ergebnisse spiegeln die bereits gezeigten Unterschiede der Störfestigkeit der verschiedenen Systeme wieder. Die größte Immunität besitzt die 100BASE-T1-Kommunikation des IC 1 und eine höhere Leistung im Störkreis ist notwendig, um die Kommunikation zu beeinträchtigen. In [13] wird eine Leitungskopplung eines HV-Kabels mit einer 100BASE-T1-Kommunikation untersucht und zeigt das Störpotential dieses Koppelpfades in einem realen Setup. Die hier gezeigten Ergebnisse können die Basis für die Analyse von solchen Koppelkonfigurationen sein und die ermittelten Störpegel für die Auslegung der Geometrien und potentiell notwendiger Filtermaßnahmen genutzt werden.

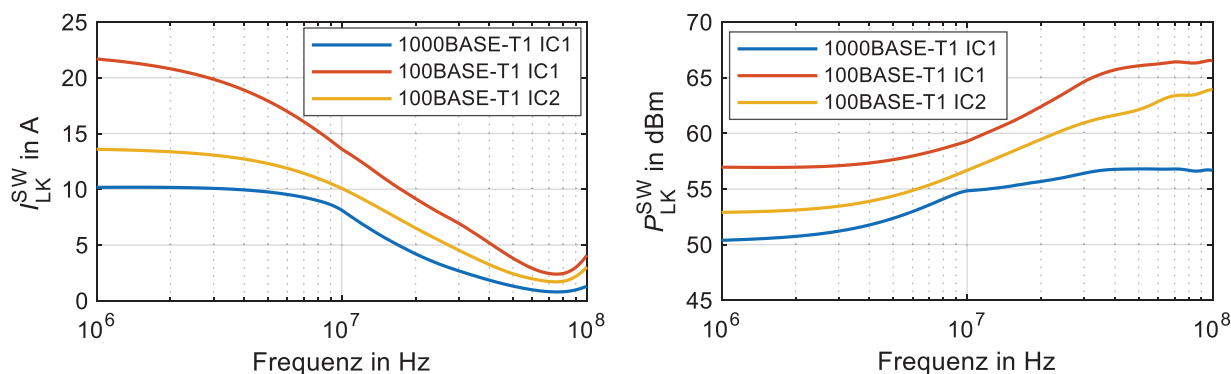


Bild 9: Simulationsergebnisse der Leitungskopplungskonfiguration für den Eingangsstrom I_{LK}^{SW} und die Eingangsleistung P_{LK}^{SW} des Störkreises

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde die Störfestigkeit von 100BASE-T1- und 1000BASE-T1-Kommunikationssystemen mit DPI-Messungen untersucht. Darauf basierend wurde ein Simulationssetup entwickelt, welches die DPI-Störeinkopplung in die Kommunikationssysteme nachbildet. Es wurde eine Methodik vorgestellt, mit der unter Verwendung der Simulationssetups die kritischen Spannungspegel am IC für die verschiedenen Kommunikationstransceiver und damit kritische Konfigurationen in beliebigen Koppelstrukturen ermittelt werden können, was einen direkten Vergleich der Kommunikationssysteme ermöglicht. Die Ergebnisse zeigen, dass bei den untersuchten Transceivern die 100BASE-T1-Kommunikation ab 40 MHz eine deutlich höhere Immunität gegenüber sinusförmigen CM-Störspannungen besitzt als die 1000BASE-T1-Kommunikation. Neben der umfassenden Analyse des DPI-Setups wurde ein Leitungskopplungssetup betrachtet und auf Basis von Simulationen und Messergebnissen die kritischen Leistungspegel bestimmt. Die Ergebnisse

dieses Beitrags können genutzt werden, um verschiedene Koppelstrukturen zu analysieren und schaffen somit eine Basis für die Auslegung von Kommunikationssystemen in direkter Nachbarschaft zu leistungselektronischen Systemen im Fahrzeug.

Danksagung

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Projekts RobKom (Robuste Kommunikation in autonomen Elektrofahrzeugen) und wurde durch das BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) unter dem Förderkennzeichen 16EMO0380 finanziell unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Beitrags liegt ausschließlich bei den Autoren.

Literaturangaben

- [1] IEEE Standard for Ethernet: Amendment 1: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 100 Mb/s Operation over a Single Balanced Twisted Pair Cable (100BASE-T1), IEEE Std 802.3bw-2015
- [2] IEEE Standard for Ethernet Amendment 4: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 1 Gb/s Operation over a Single Twisted-Pair Copper Cable, IEEE Std 802.3bp-2016
- [3] K. Matheus und T. Königseder, Automotive Ethernet, 3. Aufl. Cambridge: Cambridge University Press, 2021
- [4] P. DeRoy, N. Toscani, F. Grassi, W. Schulz, und C. Rostamzadeh, „Sensitivity Analysis of RF Current Injection Techniques for Immunity Testing of Automotive Ethernet“, in 2018 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal Integrity and Power Integrity, 2018
- [5] T. Kawauchi, A. Iwata, H. Urayama, T. Izumi, K. Takayama, und T. Hagihara, „Physical Layer Simulation Technology for Automotive Ethernet“, in 2019 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ), 2019
- [6] OPEN Alliance, EMC Test Specification for BroadR-Reach® Transceivers, Version 2.0, 2014
- [7] OPEN Alliance, IEEE 100Base-T1 System Implementation Specification, Version 1.0, 2017
- [8] J. Dugan, J. Estabrook, M. Gates, et al, iPerf3, Verfügbar unter: <https://iperf.fr/iperf-doc.php> (Zugriff: 07.02.2021)
- [9] Murata Electronics, „DLW43MH201XK2“, 2021, Verfügbar unter: <https://www.murata.com/en-global/api/pdfdownloadapi?cate=cgsubChipCommoModeChokeCoil&partno=DLW43MH201XK2%23> (Zugriff: 25.02.2022)
- [10] Murata Electronics, „DLW32MH101XT2“, 2022, Verfügbar unter: <https://www.murata.com/en-eu/api/pdfdownloadapi?cate=luNoiseSupprFilteChipCommoModeChokeCoil&partno=DLW32MH101XT2%23> (Zugriff 25.02.2022)
- [11] C. Austermann, S. Frei „Immunity of CAN, CAN FD and Automotive Ethernet 100/1000BASE-T1 to Crosstalk from Power Electronic Systems“, Transaction on Electromagnetic Compatibility, angenommen, Veröffentlichung ausstehend
- [12] C. Smart, D. Thomas, S. Greedy et al., SACAMOS: Theory Manual V1.2, University of Nottingham, 2018
- [13] S. Jeschke et al., „Susceptibility of 100Base-T1 Communication Lines to Coupled Fast Switching High-Voltage Pulses“, in 2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE, Sep. 2020