

# **Untersuchungen zur Störfestigkeit von 100Base-T1 Kommunikation für autonome Fahrfunktionen gegen puls- und sinusförmige Störsignale**

Dr.-Ing. Sebastian Jeschke, EMC Test NRW GmbH, Emil-Figge-Str.76, 44227 Dortmund, jeschke@emc-test.de

Jan Loos, B.Sc., EMC Test NRW GmbH, Emil-Figge-Str.76, 44227 Dortmund, loos@emc-test.de

Michael Kleinen, M.Eng., EMC Test NRW GmbH, Emil-Figge-Str.76, 44227 Dortmund, kleinen@emc-test.de

Dipl.-Ing. Jörg Bärenfänger, EMC Test NRW GmbH, Emil-Figge-Str.76, 44227 Dortmund, baerenfaenger@emc-test.de

Dr.-Ing. Christian Hangmann, SIL System Integration Laboratory GmbH, Technologiepark 18, 33100 Paderborn, christian.hangmann@silab.de

Dipl.-Ing. Ingo Wüllner, SIL System Integration Laboratory GmbH, Technologiepark 18, 33100 Paderborn, ingo.wuellner@silab.de

## **1 Einleitung**

In zukünftigen Fahrzeugarchitekturen werden zunehmend elektrifizierte Antriebssysteme und Kommunikationssysteme mit hohen Datenraten für hochautomatisierte Fahrfunktionen implementiert. Dies stellt insbesondere im Hinblick auf die EMV eine Herausforderung dar, weil eine störungsfreie Koexistenz der unterschiedlichen Bordnetzsysteme gewährleistet werden soll.

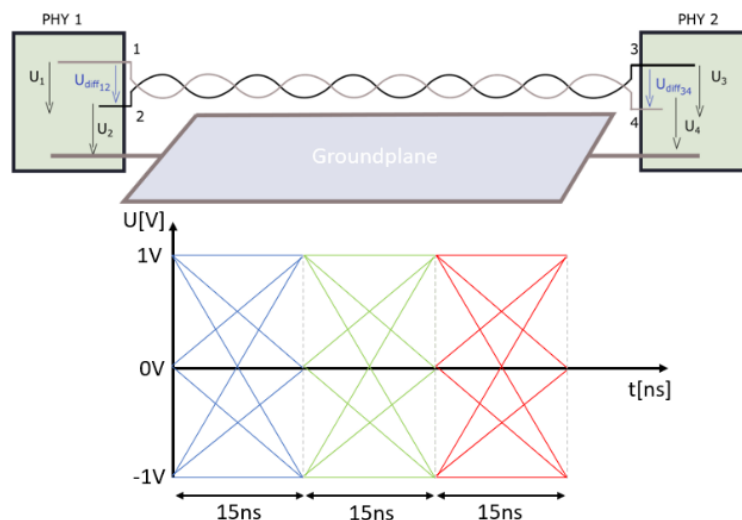
Für die Realisierung von hochautomatisierten Fahrfunktionen, wird eine umfassende Sensorik in die Fahrzeuge integriert, welche die Fahrzeugumgebung mit Hilfe von Daten aus Kamera- und Radarsystemen erfasst. Um die resultierenden Datenmengen beherrschen und entsprechend kommunizieren zu können, reichen herkömmliche fahrzeuginterne Kommunikationssysteme, wie beispielsweise der CAN-Bus, nicht mehr aus. Alternativ stellt eine Automotive Ethernet Kommunikation (100Base-T1) [1] eine leistungsfähige Option dar, mit der Datenraten von bis zu 100 Mbit/s realisiert werden können. Zwecks Kostenoptimierung wird die Kommunikation zwischen den angeschlossenen Teilnehmern, wie bei der klassischen CAN-Bus Kommunikation, über eine verdrehte und ungeschirmte Zweidrahtleitung (Unshielded Twisted Pair - UTP) realisiert. Dabei muss sichergestellt werden, dass die im Fahrzeug eingesetzten Hochvolt-Systeme (HV-Systeme) die Kommunikation nicht unzulässig beeinflussen. Hierzu muss die Störfestigkeit der Kommunikationsstrecke umfassend untersucht werden, damit im Rahmen der Standardisierung Testverfahren und Prüfpegel festgelegt werden können, die eine sichere Koexistenz der verschiedenen Systeme im Fahrzeug gewährleisten. Innerhalb eines Elektrofahrzeugs, welches im PKW-Bereich bei Spannungen von bis zu 950 V [2] betrieben wird, kommt es zu breitbandigen Störaussendungen, die etwa um einen 35 dB höher sind als im klassischen 12 V Bordnetz. Durch die Verdrehung der ungeschirmten Kommunikationsleitung, wird unter idealen Bedingungen der in die Leitung induktiv eingekoppelte differentielle Störpegel kompensiert. Das Schalten der Zwischenkreisspannung durch den Inverter im Hochvoltsystem führt jedoch dazu, dass

steilflankige Spannungspulse erzeugt werden, die kapazitiv in die Kommunikationsleitung einkoppeln können und durch die Verdrillung nicht kompensiert werden können.

In dieser Arbeit wird die Störfestigkeit einer 100Base-T1 Kommunikationstrecke hinsichtlich beispielhafter kapazitiven und induktiven Kopplungen untersucht. Messungen in [4] haben gezeigt, dass sich durch Schalthandlungen in HV-Komponenten auf der Systemschirmung Impulse ausbreiten, weshalb hier eine kapazitive Koppelzange (Capacitive Coupling Clamp, CCC) verwendet wird. Mit dem CCC Verfahren nach ISO 7637-3 [3] werden Pulse kapazitiv auf die ungeschirmte Kommunikationsleitung eingekoppelt, um den Störer der HV-Seite nachzubilden. Neben pulsförmigen Störern, können auch sinusförmige Störer auftreten, die etwa durch On-board Transmitter hervorgerufen werden. Zur Untersuchung der Störfestigkeit gegen schmalbandige, induktiv eingekoppelte Störgrößen wird in dieser Arbeit das Bulk Current Injection (BCI) Verfahren eingesetzt, um Schwachstellen der Kommunikationsstrecke zu identifizieren.

## 2 Eigenschaften des Physical-Layer von 100Base-T1

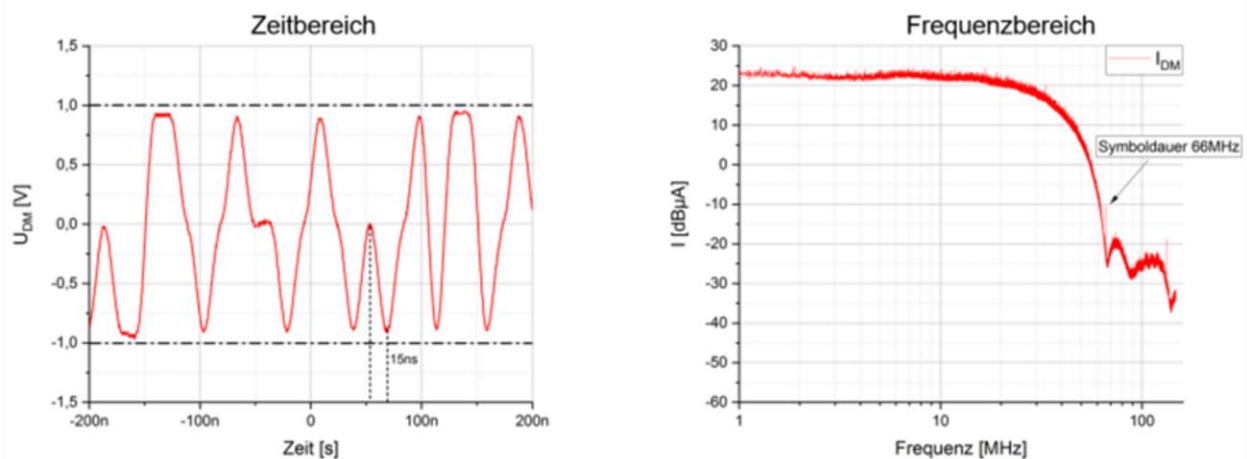
Bei der Zweidraht Ethernet Kommunikation wird mit einer dreistufigen Pulsamplitudenmodulation (PAM-3) gearbeitet [5]. Abbildung 1 zeigt schematisch den Aufbau einer solchen Kommunikationsstrecke, sowie das Prinzip der PAM-3. Das Signal wird differentiell zwischen den beiden Leitungen kommuniziert und arbeitet mit Signalpegeln von  $[-1\text{ V}, 0\text{ V}, +1\text{ V}]$ . Die Änderungen der Spannungspegel ergeben jeweils ein Symbol für die Kommunikation. Damit resultieren insgesamt  $3^2$  mögliche Symbole, wobei das Symbol  $0\text{ V}$  auf  $0\text{ V}$  für den Start bzw. das Ende eines Nutzdatenpakets reserviert ist.



**Abbildung 1** Schematischer Aufbau einer Zweidraht Ethernet Kommunikation und Prinzipdarstellung einer PAM-3

Zur Anpassung der Bandbreite des Informationssignals an die Kanalbandbreite, wird ein Raised-Cosine Filter [6] eingesetzt. Abbildung 2 zeigt links das differentielle Halbduplex Spannungssignal im Zeitbereich. Rechts im Bild ist der Strom des differentiellem Nutzsignals im Frequenzbereich dargestellt. Charakteristisch für 100Base-T1 ist zum

einen die belegte Bandbreite von  $33\frac{1}{3}$  MHz und zum anderen die Symbolrate von  $66\frac{2}{3}$  MHz, die eine Übertragungsrate von 100 MBit/s ermöglicht.



**Abbildung 2** Signal einer 100Base-T1 Kommunikation im Zeitbereich (links) und im Frequenzbereich (rechts)

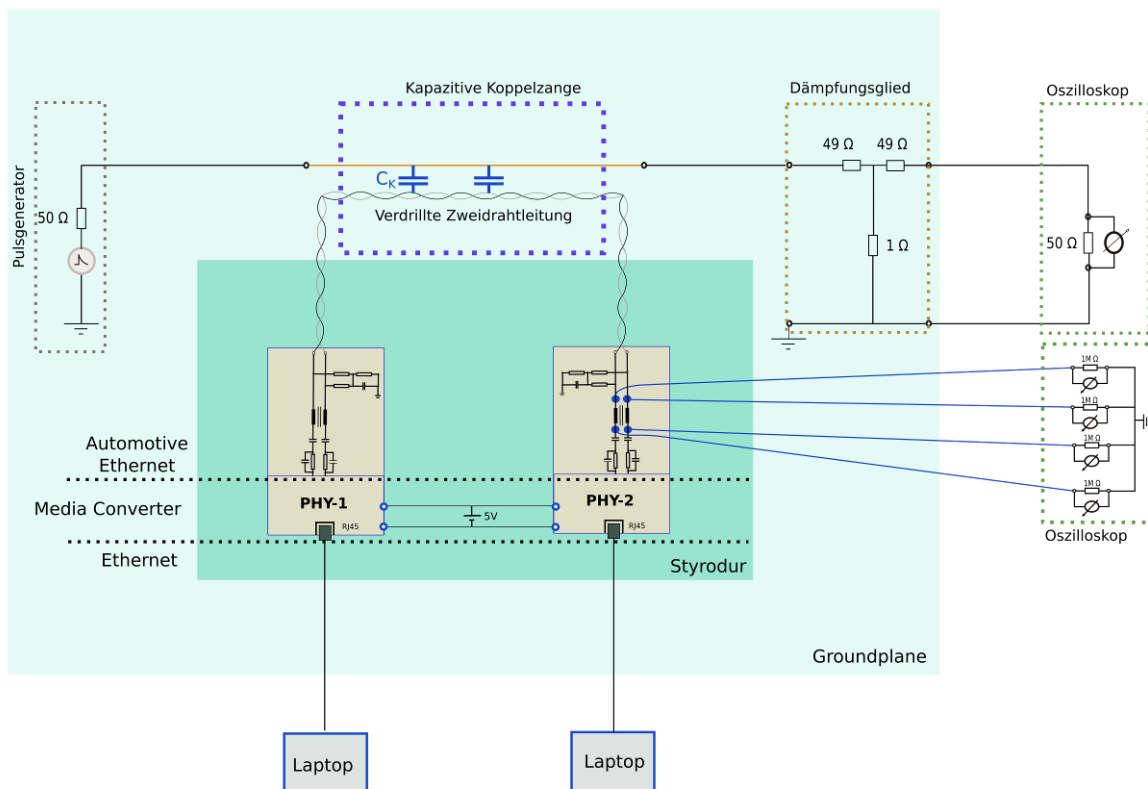
Im Folgenden wird die Störfestigkeit gegenüber steiflankigen Gleichtaktstörern mit großer Amplitude im Zeitbereich und deren Einfluss auf das differentielle Kommunikationssignal betrachtet. Darüber hinaus wird exemplarisch das Verhalten einer 100Base-T1 Kommunikation unter Störeinfluss durch induktiv eingekoppelte, sinusförmige Signale untersucht.

### 3 Einfluss impulsförmiger Störgrößen auf die 100Base-T1 Kommunikation

Eine typische Störgröße, die sowohl in herkömmlichen als auch in Elektrofahrzeugen auftreten kann, ist eine pulsartige Spannung. Insbesondere die durch leistungselektronische Schaltungen im elektrischen Antriebsstrang eines Fahrzeugs hervorgerufenen Spannungspulse sind durch steile Flanken und hohe Amplituden gekennzeichnet. Um den Einfluss von Spannungspulsen auf eine 100Base-T1 Kommunikation zu bestimmen, wird in dieser Arbeit die kapazitive Kopplung mit Hilfe des in Abbildung 3 schematisch dargestellten Aufbaus untersucht. Um verschiedene Flankensteilheiten zu simulieren, wird der Ausgangspegel des Pulsgenerators erhöht, während die Steigzeit des Pulses konstant bleibt. Die Amplitude wird sukzessive von 100 V bis 900 V um jeweils 100 V erhöht.

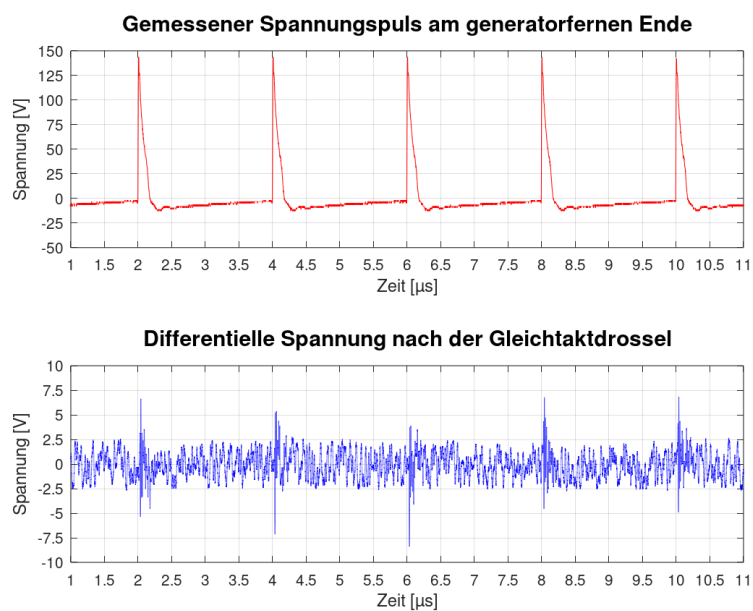
Gemessen werden die Single-Ended Spannungen vor und hinter der Gleichakttdrossel am Analog-Front-End des Automotive Ethernet PHYs, woraus das differentielle Nutzsignal berechnet wird. Mit Hilfe eines weiteren Oszilloskops wird gleichzeitig der kapazitiv eingekoppelte Spannungspuls als Triggerereignis erfasst und dem Kommunikationssignal überlagert. Durch die Überlagerung von Puls und Kommunikationssignal soll dessen Einfluss auf die Kommunikationsqualität beobachtet werden. Als wesentliches Merkmal hierfür wird die resultierende Datenrate über die Media Converter betrachtet. Die eingesetzten Media Converter übersetzen das Ethernet Signal am MII (Media Independent Interface) auf das Automotive Ethernet Signal. Über ein

lokales Netz werden Daten zwischen den beiden Automotive Ethernet PHYs ausgetauscht und auf einer grafischen Oberfläche ausgewertet.



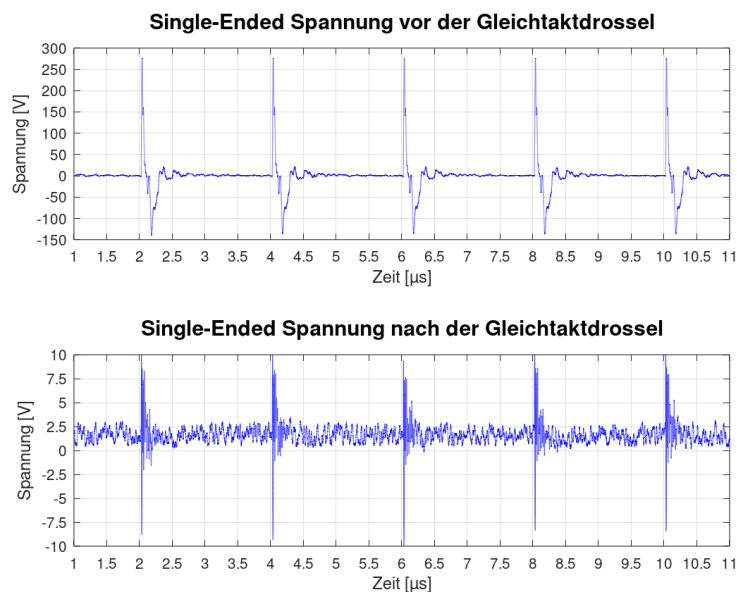
**Abbildung 3** Testaufbau zur Störfestigkeitsuntersuchung mittels CCC Verfahren

Die in Abbildung 4 dargestellten Störpulse (rot), zeigen die am generatorfernen Ende der Koppelzange gemessene Spannung in einem 50 Ω-System bei einer Pulsamplitude von 900 V.



**Abbildung 4** Einfluss eines kapazitiv eingekoppelten Spannungspulses auf das differentielle Ethernet Kommunikationssignal

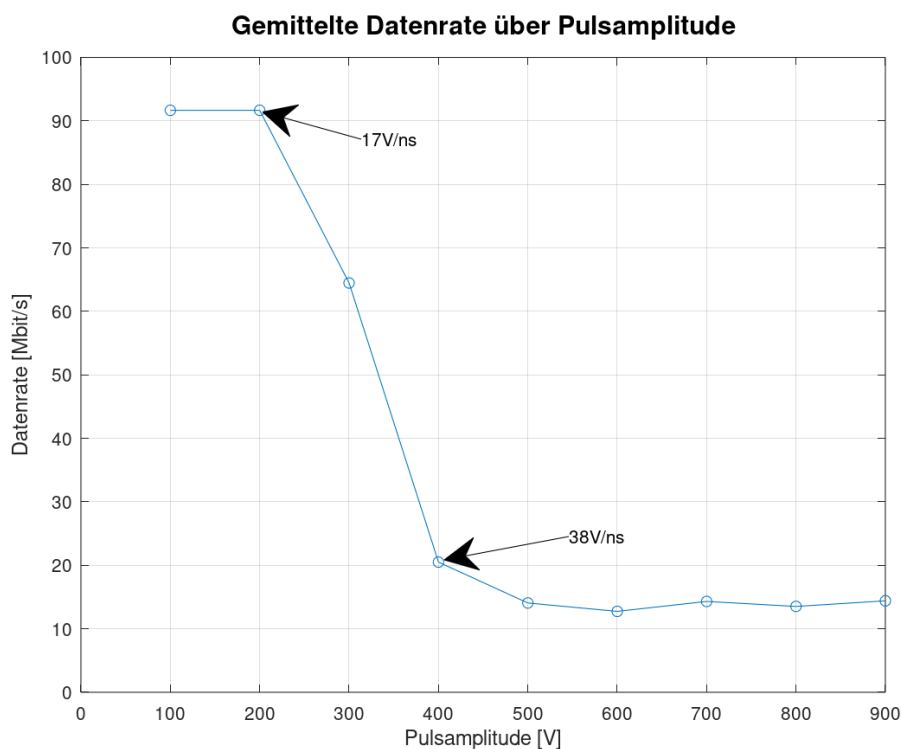
Um das Kommunikationssignal mit relativ geringen Spannungspegeln von  $\pm 2$  V zusammen mit der sehr viel größeren Pulsstörspannung messen zu können, wird die differentielle Spannung durch Subtraktion von zwei Single-Ended-Messungen der einzelnen Leitungen gegen Masse berechnet. In ersten Messungen hat sich die maximale Messdynamik von breitbandigen differentiellen Tastköpfen als limitierender Faktor für das Erfassen von hohen Pulsamplituden ergeben. Der Einfluss des eingekoppelten Störpulses auf das gemessene Kommunikationssignal (blau) hinter der Eingangsbeschaltung des PHYs auf dem Automotive Ethernet Board ist ebenfalls in Abbildung 4 dargestellt. Deutlich zu sehen ist eine Spannungserhöhung des Signals während eines Pulsevents. In Abbildung 5 ist beispielhaft die Single-Ended Störspannung vor und hinter der Gleichtaktdrossel des verwendeten Automotive Ethernet Media Converters abgebildet.



**Abbildung 5** Vergleich der gemessenen Single-Ended Spannungen vor und hinter der Gleichtaktdrossel der verwendeten 100Base-T1 Media Converter

Hieran lässt sich deutlich die Wirksamkeit der Gleichtaktunterdrückung erkennen. Die zwischen Signalleitung und Masse eingespeisten Spannungspulse werden durch die gekoppelten Induktivitäten der Gleichtaktdrossel deutlich in ihrer Amplitude um nahezu 30 dB gedämpft.

Um den Einfluss der gemessenen Störungen auf die Übertragungsqualität der differentiellen Kommunikationsstrecke abschätzen zu können, wird während der Pulsbeaufschlagung ein Datenstrom zwischen den Media Converters erzeugt. Die Datenrate der Verbindung zwischen den Media Converters wird für unterschiedliche Störampplituden ermittelt. Abbildung 6 zeigt die über 60 Sekunden resultierende, gemittelte Datenrate in Abhängigkeit der aus der zeitlichen Änderung des Störpulses berechneten Flankensteilheit. Da die Steigzeit des Pulses näherungsweise konstant ist, ändert sich die Flankensteilheit maßgeblich in Abhängigkeit von der gewählten Amplitude.



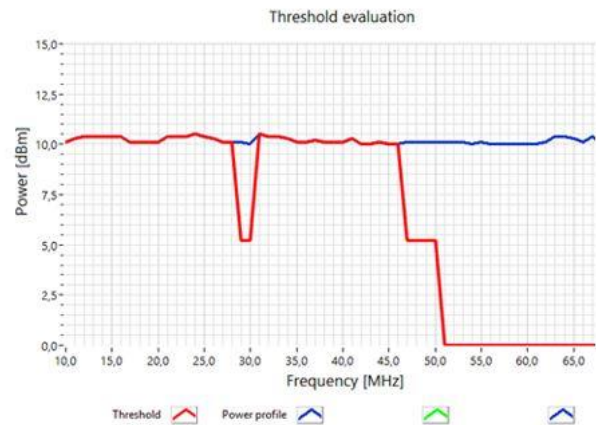
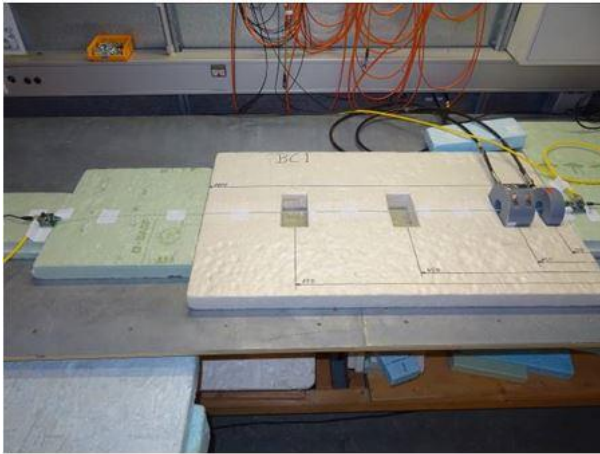
**Abbildung 6** Resultierende Datenrate (gemittelt) der Kommunikationsstrecke in Abhängigkeit der Amplitude des Störpulses

#### 4 Einfluss sinusförmiger Störgrößen auf die 100Base-T1 Kommunikation

Neben pulsförmigen treten sinusförmige Signale, beispielsweise durch schmalbandige On-Board Transmitter hervorgerufen, als Störgrößen im Fahrzeug auf. Zur Untersuchung der Störfestigkeit einer 100Base-T1 Kommunikationsstrecke gegen sinusförmige Störsignale wird, wie in Abbildung 7 links gezeigt, ein Störstrom mit dem BCI Verfahren auf die Kommunikationsleitung eingekoppelt. Hierbei wird der Frequenzbereich von 10 MHz bis 70 MHz im Closed-Loop Verfahren betrachtet, um potentielle Schwachstellen der Kommunikationsstrecke zu ermitteln.

Während der Beaufschlagung wird dabei die Kommunikationsqualität auf Basis der Paketverlustrate (Packet Error Rate – PER) zwischen den beiden Teilnehmern ausgewertet. Im Fehlerfall wird die über die Stromzange eingespeiste Störleistung reduziert, bis das Kommunikationssystem in einen fehlerfreien Zustand zurückkehrt. Die Störleistung, bei der das System noch fehlerfrei arbeitet, wird als Störschwelle bezeichnet. Abbildung 7 zeigt rechts einen exemplarisch aufgezeichneten Verlauf der resultierenden Störschwelle für die Automotive Ethernet Kommunikation. Im gesamten Frequenzbereich zwischen 10 MHz und 70 MHz wird ein Störleistungspegel von 10 dBm vorgehalten (blau). Wird die Kommunikation durch die eingepreiste Störleistung beeinflusst, wird die Störleistung abgesenkt (rot).





**Abbildung 7** links: Testaufbau für die Einkopplung sinusförmiger Störer mittels BCI Verfahren; rechts: Vergleich zwischen Sollpegel und eingespeistem Istpegel

Das Ergebnis zeigt, dass zwischen 28 MHz und 30 MHz das System in Form von Paketverlusten beeinflusst wird. Eine Absenkung der Störleistung führt jedoch dazu, dass eine fehlerfreie Kommunikation möglich ist. Bei einem sinusförmigen Störsignal im Frequenzbereich von 46 MHz bis 70 MHz zeigt die Kommunikationsstrecke hingegen ein anderes Verhalten. Der Link zwischen den beiden Teilnehmern der Automotive Ethernetstrecke wird unterbrochen und kann bei Abschalten der Störleistung nicht wiederhergestellt werden. Um hier für jede Frequenz der Störgröße eine entsprechende Störschwelle zu ermitteln, müsste, anstatt eines Frequenzsweeps, ein separater Test bei der jeweiligen Frequenz erfolgen. Darüber hinaus muss die Kommunikationsstrecke im Falle des Linkabbruchs einem Hardwarereset unterzogen werden, um den Ausgangszustand wiederherzustellen.

## 5 Zusammenfassung

Durch die Einführung von hochautomatisierten Fahrfunktionen in aktuellen und zukünftigen Fahrzeugen werden, um die anfallenden Datenmengen zu beherrschen, neue leistungsfähige Kommunikationssysteme in die Fahrzeuge integriert. Zusammen mit der Sensorik für eine genaue Umgebungserfassung wird ein zusätzliches Bordnetz in die Fahrzeuge integriert, welches sowohl im Bereich der EMV als auch der funktionalen Sicherheit hohe Anforderungen erfüllen muss. In Elektrofahrzeugen ist die Anzahl der auftretenden Störimpulse im Hochvoltkreis, aufgrund der Schaltfrequenz des Inverters von bis zu 100 kHz und Spannungen von bis zu 950 V, ein wesentlicher Beitrag zum Störpotential für das koexistierende Kommunikationsbordnetz.

Die kapazitive Kopplung zwischen Hochvoltbordnetz und Kommunikationsstrecke wird insbesondere durch die Flankensteilheit der Hochvoltspannungspulse charakterisiert.

Die Untersuchungen bzgl. der Störfestigkeit gegen pulsförmige Störer zeigen, dass in Abhängigkeit der Pulscharakteristik die 100Base-T1 Kommunikation beeinflusst wird. Unter Variation der Pulsamplitude zeigt sich, dass ab einer Flankensteilheit von  $17 \frac{\text{V}}{\text{ns}}$  die verfügbare Datenrate sinkt und die Kommunikation dadurch gestört wird. Unter Berücksichtigung des aktuellen Trends hinsichtlich der verwendeten Leistungselektronik in elektrischen Antrieben, lässt sich zeigen, dass hocheffiziente Leistungshalbleiter die Fahrzeugkommunikation stören können. Um eine allgemeingültige Aussage über die

Störfestigkeit gegen entsprechend steiflankige Hochvoltpulse zu erhalten, muss in weiteren Untersuchungen neben dem Einfluss der eingesetzten Media Converter auch die Parametrierung des Protokolls für die Datenübertragung betrachtet werden. Eine Analyse des Signals auf physikalischer Ebene erfordert eine Decodierung der bidirektional ausgetauschten Symbole [7].

Um das Systemverhalten bei Störeinfluss durch sinusförmige Signale zu untersuchen, kann das standardisierte BCI Verfahren eingesetzt werden. Die induktive Einkopplung führt dabei zu frequenzselektivem Verhalten der Kommunikationsstrecke und wird durch die Beaufschlagung in seiner Funktion gestört. Dabei wird in dieser Arbeit gezeigt, dass eine detaillierte Beurteilung der Störfestigkeit gegen schmalbandige Störer mit erhöhtem Aufwand verbunden ist. Neben dem BCI Verfahren wird durch die OPEN Alliance zusätzlich das sogenannte DPI Verfahren (Direct Power Injection) beschrieben [8]. Dabei wird ein schmalbandiger Störer über ein spezielles Koppelnetzwerk auf die Kommunikationsleitungen gespeist. Ausblickend kann der Vergleich zwischen BCI und DPI Verfahren genutzt werden, um das Verhalten einer Automotive Ethernet Kommunikation unter schmalbandigem Störeinfluss detaillierter zu untersuchen.

## Literaturangaben

- [1] IEEE Std 802.3bw™-2015 (Amendment to IEEE Std 802.3™-2015) Amendment 1: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 100 Mb/s Operation over a Single Balanced Twisted Pair Cable (100BASE-T1)
- [2] A.Engstle, M.Dieml, A.Angermaier, W.Schelter: 800V for electric vehicles - Voltage level suitable for calibration, ATZ vol. 115, 09.2013
- [3] ISO 7637-3: Road vehicles — Electrical disturbances from conduction and coupling — Part 3:Electrical transient transmission by capacitive and inductive coupling via lines other than supply lines, 3<sup>rd</sup> Edition, 01.07.2016
- [4] S.Jeschke: Grundlegende Untersuchungen von Elektrofahrzeugen im Bezug auf Energieeffizienz und EMV mit einer skalierbaren Power-HiL-Umgebung, Dissertation Universität Duisburg-Essen, 2016
- [5] Lambert M Surhone, Mariam T Tennoe, Susan F Henssonow: Pulse-Amplitude Modulation, Betascript Publishing, 2011
- [6] John B. Anderson: Digital Transmission Engineering. 2. Auflage. Wiley Interscience, Lund, Schweden 2005
- [7] Ricardo Sappia: BroadR-Reach Interoperability Test Suite, Version 2.0, OPEN Alliance November 2014
- [8] Dr. Bernd Körber: EMC Measurement Specification for BroadR-Reach Transceivers, Version 2.0, OPEN Alliance, November 2014