

# **Auswirkung der Unsymmetrie von Kabeln und passiven Bauteilen auf die EMV der Busschnittstelle am Beispiel von Ethernet für Kfz Anwendungen**

Dr.-Ing. B. Körber<sup>1</sup>, Dipl.-Ing. (FH) S. Welzel<sup>1</sup>, Dipl.-Ing (FH) T. Wunderlich<sup>1</sup>

<sup>1</sup>FTZ e.V. an der Westsächsischen Hochschule Zwickau

Dr.-Ing. Lorena Díaz Ortega<sup>2</sup>, <sup>2</sup>Volkswagen AG Wolfsburg

## **1. Einleitung**

Zur störungsfreien Übertragung von Daten mit Datenraten größer 20 kbit/s dienen im Kfz symmetrische Bussysteme. Demensprechend müssen neben den EMV- optimierten Eigenschaften der Bustreiber alle Komponenten des Übertragungskanals zwischen den Bustreibern symmetrisch ausgelegt sein. Das betrifft Busfilter, Kabel, Stecker und Layout- Implementierung. Je höher die verwendete Datenrate für das Bussystem gewählt ist, umso höher sind die Anforderungen an die Symmetrie aller Teile des Übertragungskanals.

Die Randbedingungen bei der Produktion von Kfz erfordern jedoch kosteneffiziente Lösungen, so dass ein Optimum zwischen elektrischen Eigenschaften und den damit verbundenen Kosten gefunden werden muss. Das ist z.B. durch den Einsatz von einfachen, ungeschirmten verdrillten Leitungen in Kombination mit EMV- optimierten Transceivern und Busdrosseln für die Bussysteme CAN und FlexRay gelungen.

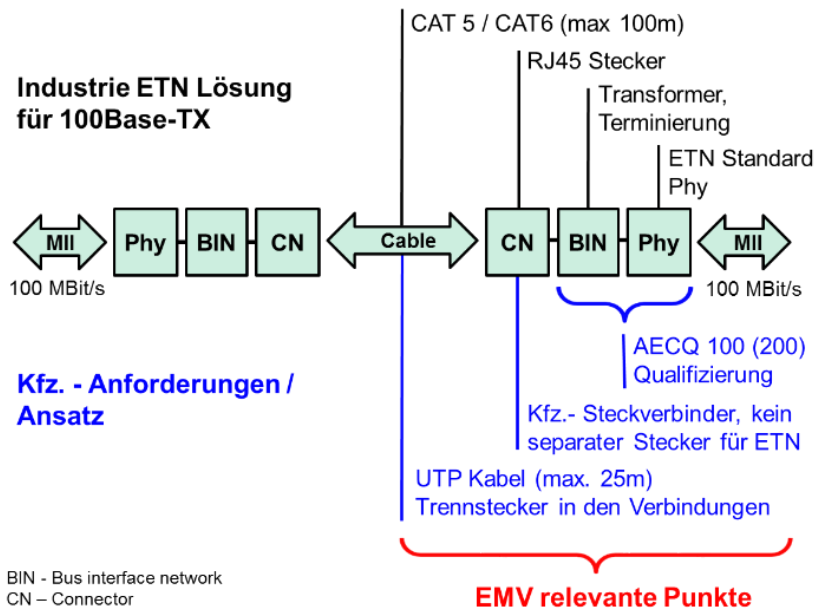
Mit „Automotive- Ethernet“ wird momentan an der Entwicklung eines weiteren Bussystems für den Einsatz im Kfz gearbeitet. Die Übertragungsrate liegt mit 100 Mbit/s zehnfach über der von FlexRay. Entsprechend sind höhere Analogbandbreiten für den Übertragungskanal gefordert. Wie bei den anderen bekannten Kfz- Bussystemen soll auch hier eine ungeschirmte Busleitung zum Einsatz kommen. Aufgrund der gewählten Übertragungstechnologie von „Automotive- Ethernet“ und der höheren notwendigen Analogbandbreite sind hier deutlich höhere Anforderungen an die Symmetrie sowie andere Übertragungseigenschaften des Kanals zu fordern.

## **2. Definition des Übertragungskanals für Ethernet im Kfz**

Unter Berücksichtigung der aktuellen Anforderungen an die notwendige Datenrate auf der einen Seite sowie die Robustheit und Kosten auf der anderen Seite wurde Fast Ethernet mit 100 Mbit/s (100Base-TX nach [1]) als Startpunkt für den Einsatz von Ethernet im Kfz ausgewählt. Bild 1 gibt einen Überblick zur Definition des Übertragungskanals nach [1]. Hier sind im oberen Bereich beginnend von der MII- Schnittstelle des Ethernet-Transceivers (Phy) zum Mikrokontroller mit MAC- Interface über den Transceiver selbst, die Interface- Schaltung mit Übertrager (BIN) und den Gerätestecker (CN) bis hin zum Buskabel alle Anforderungen an die Komponenten für Industrie- bzw. Konsumenten- anwendungen definiert.

Die im unteren Bereich aufgezeigten Anforderungen für den Einsatz im Kfz stehen jedoch dazu im Gegensatz bzw. bedürfen einer komplett neuen Bewertung des Systems. Alle hier aufgeführten Parameter stellen EMV- relevante Punkte dar, die zu einer Ver-

schärfung der Anforderungen an das Ethernet- System führen. Besonders die Forderung nach ungeschirmten Busleitungen (UTP – Unshielded Twisted Pair), die Verwendung von Kfz- Standardstecksystemen, die Leitungsführung über ein gemeinsamen Gerätestecker sowie der eventuell notwendige Verbau von mehreren Trennsteckern sind hier zu nennen.



**Bild 1:** Ethernet Übertragungskanal mit Definitionen und Anforderungen für Industrie- und Automobilanwendung

### 3. Ansatz zur Sicherstellung der EMV von „Automotive- Ethernet“

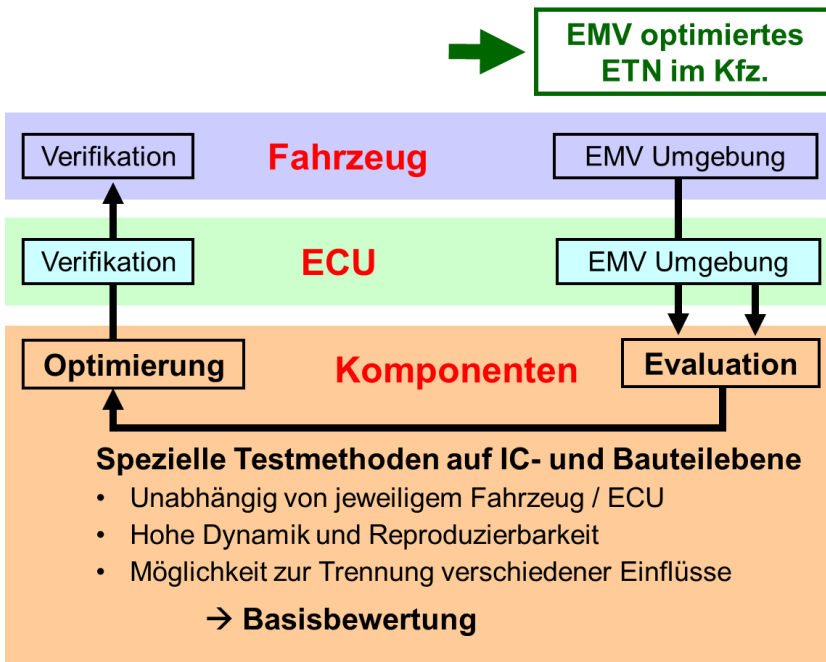
Bei der EMV- Absicherung zur Einführung der bekannten Bussysteme LIN, CAN und FlexRay im Kfz hat sich eine in verschiedenen Ebenen gestaffelte Vorgehensweise bewährt. Dieser erfolgreiche Ansatz wird auch bei der EMV-Optimierung der Ethernet-Schnittstelle für das Kfz verfolgt.

#### 3.1 Prinzipielle Vorgehensweise

Das prinzipielle Vorgehen ist in Bild 2 dargestellt. Den Kernpunkt stellt dabei eine Basisbewertung der einzelnen Komponenten des Übertragungskanals unter Verwendung spezieller Testmethoden auf IC- und Bauteilebene dar. Diese Bewertung erfolgt unter der Berücksichtigung der EMV-Randbedingungen des Einsatzes im späteren Steuergerät (ECU) bzw. Fahrzeuges. Entscheidend ist jedoch, dass diese Untersuchungen weit vor der endgültigen Definition von ECU und Fahrzeug stattfinden können.

Die angeführten Vorteile der Analyse auf der untersten Ebene ermöglichen eine zielgerichtete EMV- Optimierung der Komponenten, welche durch entsprechende Untersuchungen auf Steuergeräte- und Fahrzeugebene durch Messungen zu verifizieren ist.

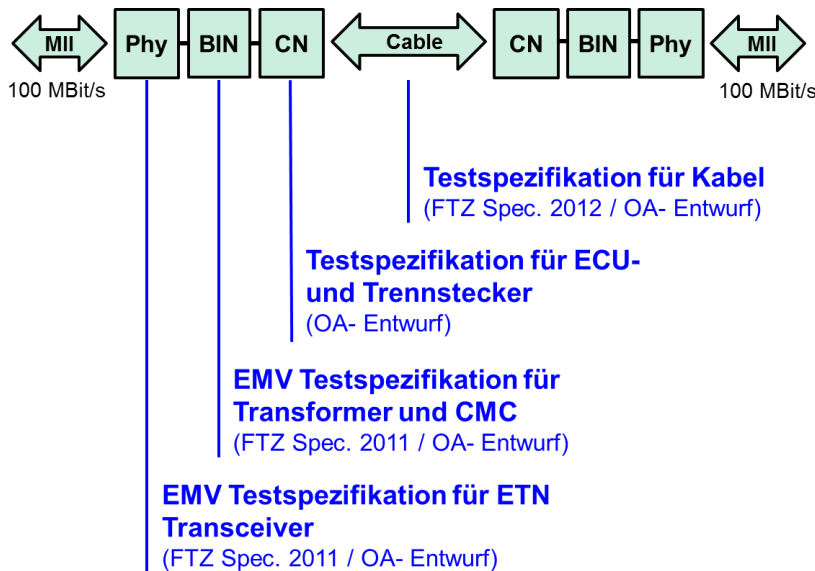
Die Untersuchungen auf der unteren Ebene sind durch zielgerichtet entwickelte, aufeinander abgestimmte Testspezifikationen für die einzelnen Komponenten des Ethernet-Übertragungskanals definiert.



**Bild 2:**  
Prinzipielle Vorgehensweise zur EMV-Optimierung der Ethernet- Schnittstelle im Kfz

### 3.2 Entwicklungswerkzeuge für die Komponenten des Ethernet-Übertragungskanal

Entsprechend Bild 1 teilt sich der Ethernet- Übertragungskanal in verschiedene Teilkomponenten auf. Bild 3 ergänzt diese Übersicht um die zugehörigen Testspezifikationen für die jeweiligen Teilkomponenten.



**Bild 3:**  
Übersicht zu Testspezifikationen für die Komponenten Ethernet- Schnittstelle im Kfz

Für die Komponenten Transceiver (Phy), Interface- Schaltung (BIN), Stecker bzw. Trennstecker (CN) sowie Buskabel existieren eigene Testspezifikationen. Diese definieren neben den notwendigen Tests und Testmethoden auch Limits und ermöglichen so die zielgerichtete Entwicklung von Komponenten mit abgestimmten und ausreichend guten EMV- Eigenschaften.

Für die Anwendung von Fast Ethernet [1] in der Diagnoseschnittstelle von Kfz sowie BroadR-Reach® [2] im aktiven Zustand des Fahrzeuges wurden in einem ersten Schritt

die Testspezifikationen in einer deutschen Arbeitsgruppe (FTZ Zwickau, AUDI AG, BMW AG, Daimler AG und Volkswagen AG) erarbeitet. Für weiterführende Arbeiten am BroadR-Reach®- System hat sich mit der OPEN ALLIANCE [3] eine internationale Arbeitsgruppe gebildet. Hier existieren momentan Entwürfe für Testspezifikationen (Bild 3: OA-Entwurf), die inhaltlich auf die FTZ- Dokumente aufsetzen. Diese Spezifikationen werden bis Ende 2013 veröffentlicht und stehen dann für die Entwicklung der einzelnen Komponenten für BroadR-Reach® im Kfz zur Verfügung.

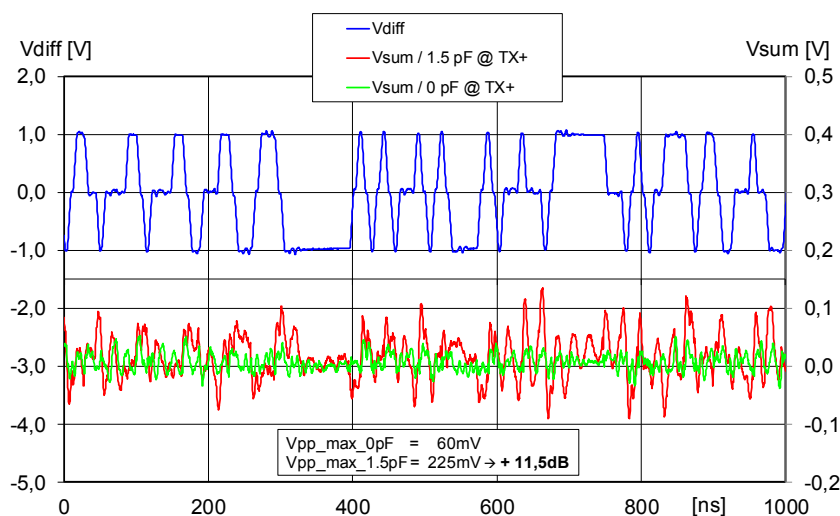
Durch die bisherigen Arbeiten zur Entwicklung dieser Testspezifikationen, deren Anwendung zur Optimierung der Einzelkomponenten des Ethernet- Übertragungskanal sowie den im Bild 2 aufgezeigten Verifikationen auf ECU- und Fahrzeugebene hat sich gezeigt, dass jede einzelne Komponente einen maßgeblichen Einfluss auf das EMV- Verhalten des Gesamtsystems hat. Dementsprechend müssen alle einzelnen Spezifikationen konsequent umgesetzt werden. Besonders im Vordergrund steht dabei die Einhaltung der Symmetrieeigenschaften von Busleitungen bzw. der Verkabelungsausführung sowie Elementen der Filterbeschaltung.

#### 4. Auswirkung von Unsymmetrien auf die EMV von Ethernet

Ethernet basiert auf einer symmetrischen Datenübertragung. Abhängig von der Implementierung ist dabei zwischen unidirektionalem und bidirektionalem Betrieb je Datenleitungspaar zu unterscheiden. Fast Ethernet nutzt eine unidirektionale Übertragung über zwei Datenleitungspaare bei einer notwendigen Analogbandbreite von  $f = 125$  MHz. Es kommt eine MLT3 Modulation mit den differentiellen Sendepiegeln  $\{-1\text{ V}, 0\text{ V}, +1\text{ V}\}$  zum Einsatz. Das BroadR-Reach®- System basiert auf der Gbit/s- Ethernet- Technologie und nutzt eine bidirektionale Kommunikation über ein Datenleitungspaar. Durch die verwendete PAM3 Modulation ist es gelungen, die notwendige Analogbandbreite für den Übertragungskanal auf  $f = 40$  MHz zu reduzieren.

Eine der Grundeigenschaften der symmetrischen Datenübertragung liegt im deutlich verbesserten EMV- Verhalten gegenüber einer asymmetrischen Lösung. Voraussetzung ist jedoch, dass es gelingt, die Symmetrieanforderungen über den gesamten Übertragungskanal einzuhalten.

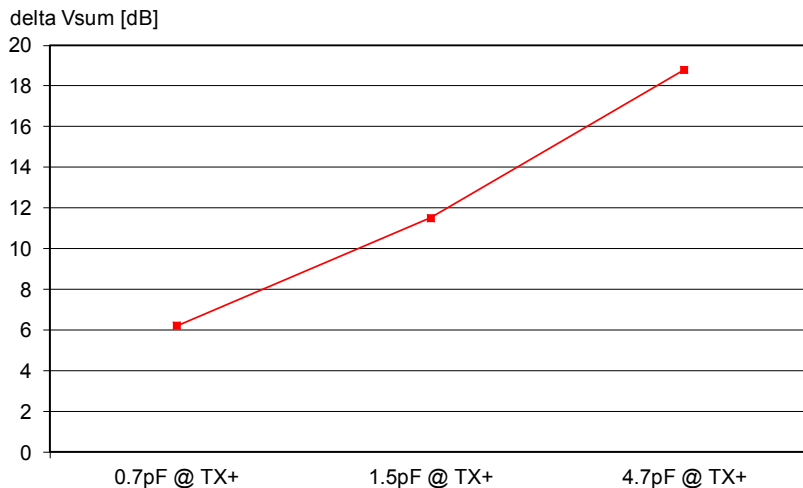
Bild 4 zeigt beispielhaft die Auswirkung einer sehr geringen kapazitiven Unsymmetrie von nur  $C = 1,5$  pF auf die MDI- Signale (MDI: Media Depended Interface).



**Bild 4:**  
Differenz- und Summensignal eines Fast Ethernet Transceivers unter Einfluss einer kapazitiven Unsymmetrie

Hier ist die Messungen der emissionsrelevanten Summe der MDI- Signale TX+ und TX- (Vsum) im Zeitbereich für eine Fast Ethernet- Verbindung ohne und mit eingebauter konzentrierter kapazitiven Unsymmetrie dargestellt.

Im Bild 5 ist ergänzend die Abhängigkeit der Erhöhung der Gleichtaktstörung vom Grad der kapazitiven Unsymmetrie angegeben. Deutlich wird dabei, dass schon Unsymmetrien im Bereich von  $C < 5 \text{ pF}$  zu einer Erhöhung der Gleichtaktstörung und der damit verbundenen Emission im Übertragungskanal von bis zu 20 dB führen.



**Bild 5:**  
Einfluss der kapazitiven Unsymmetrie auf das EMV-relevante Summensignal eines Fast Ethernet Transceivers

Der aufgezeigte Zusammenhang wirkt sich generell als Modenkonzersion zwischen Gleich- und Gegentaktsignalen aus. Die EMV- Relevanz liegt dabei für:

- die Emission in der Umwandlung des funktionsbedingten Differenzsignales in ein Gleichtaktsignal, welches über die Datenleitungen abstrahlt und
- die Störfestigkeit in der Umwandlung des durch externe Störungen (elektromagnetische Felder oder Transienten) in die Datenleitungen eingekoppelten Gleichtaktsignales in ein Differenzsignal, welches das Nutzsignal überlagert.

#### 4.1 Komponenten des Ethernet- Übertragungskanals mit Potential zur Modenkonzersion

Unter der Annahme eines auf Symmetrie der MDI- Signale optimierten Ethernet-Transceivers, tragen die folgenden Elemente des Übertragungskanals ein Potential zur Modenkonzersion in beide Richtungen und müssen entsprechend optimal hinsichtlich Symmetrie ausgelegt werden:

- Layout im MDI- Bereich,
- MDI- Anschaltung über Transformer oder Common Mode Chokes,
- eventuell zusätzliche Filter im MDI- Zweig,
- Gerätestecker,
- Kabel,
- Zwischenstecker und
- Kabelkonfektionierung, besonders im Steckerbereich.

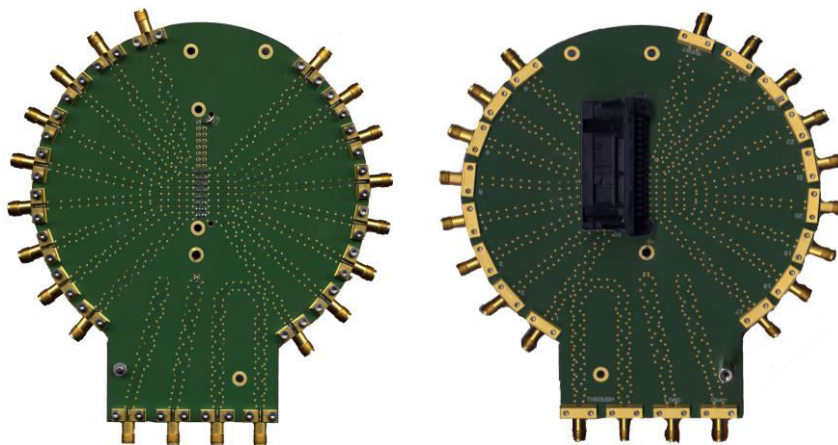
## 4.2 Messmethoden zur Überprüfung der Symmetrie

Alle Komponenten des Übertragungskanal stellen lineare passive Elemente dar. Dadurch kann durch Analyse des Kleinsignalverhaltens auf die Eigenschaften im Betrieb geschlossen werden.

Die Bewertung der Modenkonzersion kann durch Mixed-Mode S-Parameter-Messung an jeder einzelnen Komponente des Übertragungskanal selbst oder am Gesamtsystem erfolgen. Im Rahmen des im Abschnitt 3 aufgezeigten Entwicklungsprozess steht die Analyse und Optimierung der Einzelkomponenten selbst im Vordergrund. Dazu werden in erster Linie die folgenden Mixed-Mode S-Parameter verwendet (Kanal: Port 1 und Port 2, andere Systeme: Port 3...x):

Parameter	Bedeutung	Relevanz
$S_{cd11}, S_{cd22}$	TCL - Transverse Conversion Loss	Modenkonzersion im Kanal selbst
$S_{cd12} - S_{dd12}, S_{cd21} - S_{dd21}$	ELTCTL - Equal Level Transverse Conversion Transfer Loss	
$S_{dd31}, S_{ddx1}$	NEXT - Near End Crosstalk (pair to pair or single ended to pair)	Modenkonzersion im Kanal durch Überkopplung von anderen Systemen
ACR-F	Attenuation to Crosstalk Ratio at Far end	

Bei einem für Automotive- Ethernet relevanten Frequenzbereich von bis zu  $f = 200$  MHz und notwendigen sehr geringen Werten für die Modenkonzersion sind spezielle Messaufbauten zur Analyse der Einzelkomponenten notwendig. Hier kommen spezielle Adapterplatinen zu Einsatz, die selbst höchste Anforderungen an Symmetrie und Anpassung der Messpfade an das 50 Ohm- Messsystem erfüllen müssen. Ein Beispiel für eine Messplatine zur Analyse von Kfz- Stecksystemen ist im Bild 6 dargestellt.

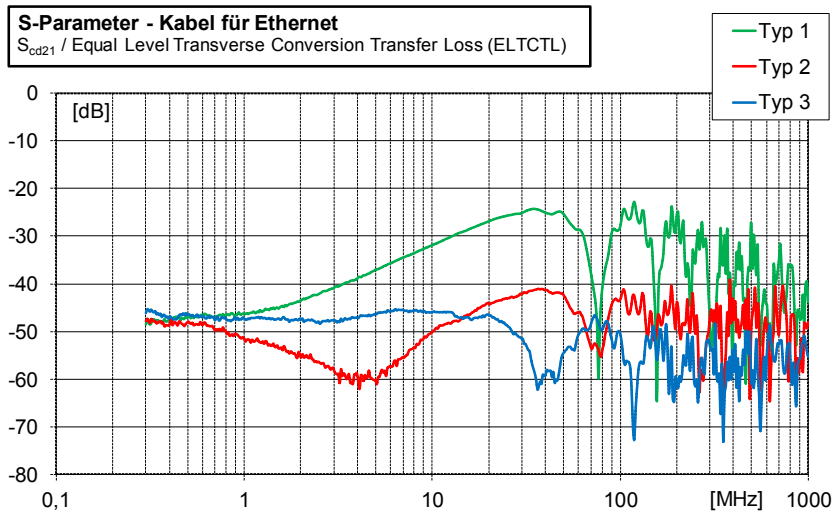


**Bild 6:**  
Beispiel für S-Parameter-Messplatine für ein Kfz-Stecksystem, Ober- und Unterseite

## 4.3 Analysebeispiel

Das Kabel sowie dessen Konfektionierung im Steckerbereich stellt einen zentralen Einflusspunkt bei der Modenkonzersion im Ethernet- Übertragungskanal dar. Bild 7 gibt ein Beispiel für die Eigenschaften von Kabeln hinsichtlich des für diese Komponenten besonders wichtigen S-Parameters ELTCTL. Alle drei Typen sind ungeschirmte verdrillte

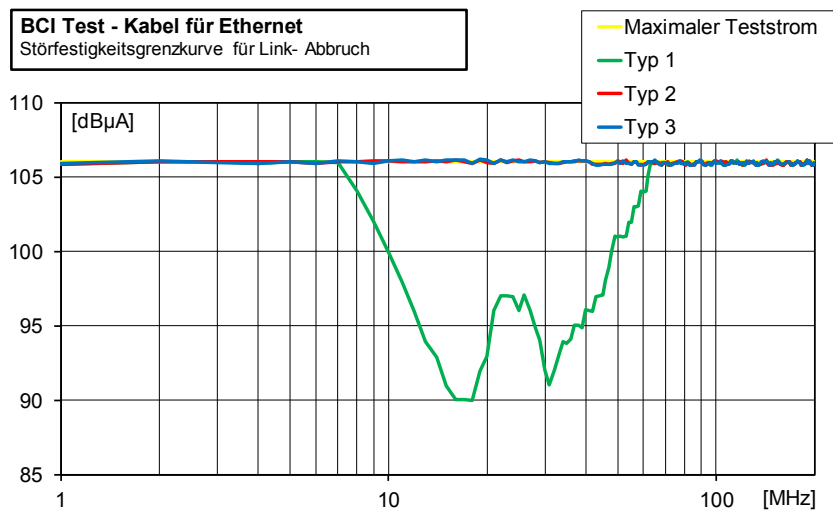
Doppelleitungen und vom jeweiligen Hersteller für den Einsatz bei Automotive- Ethernet vorgeschlagen. Der Kabeltyp 1 weist dabei deutlich höhere Werte für die Modenkonversion am fernen Ende des Kabels auf.



**Bild 7:** Gegenüberstellung der Ergebnisse der S-Parametermessung (S<sub>cd21</sub>) für 3 Typen von UTP-Kabeln, jeweils 10m Länge

Die beiden nachfolgenden Bilder 8 und 9 zeigen den Einfluss dieser drei Kabeltypen auf die EMV eines realen Automotive- Ethernet- Systems. Es handelt sich dabei um eine Punkt-zu-Punkt- Verbindung mit 10m Kabellänge. Beide Ethernet- Knoten sind aktive und kommunizieren mit maximaler Übertragungsrage.

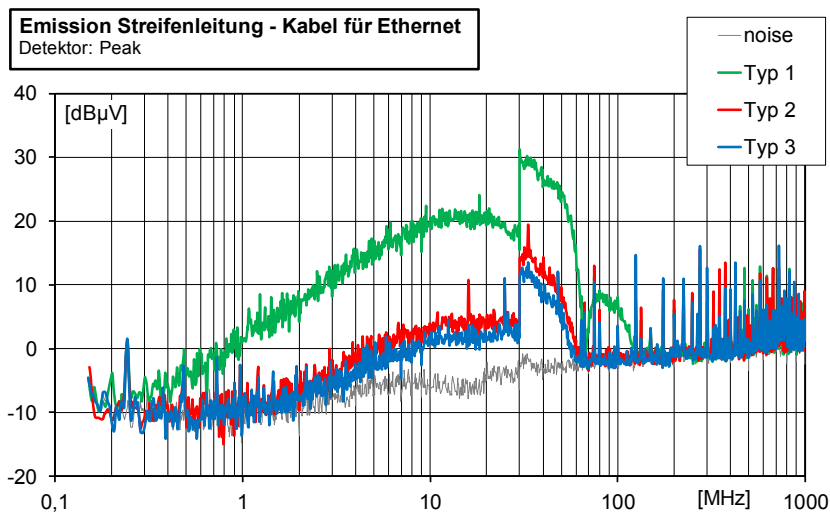
Zur Prüfung der Störfestigkeit gegenüber schmalbandigen gestrahlten Störungen kommt hier die BCI- Methode zu Einsatz. Als Kriterium für eine Funktionsstörung dient dabei ein Abbruch der Kommunikation (Status: LINK ERROR). Der maximale Prüfstrom liegt mit 106 dB $\mu$ A (entspricht 200 mA) im Bereich der Anforderungen der Fahrzeughersteller für Komponentenmessungen nach ISO11452-4. Zur Messung der Störaussendung am selben System dient eine Streifenleitungsanordnung nach CISPR25.



**Bild 8:** Störfestigkeitsgrenzkurve für BCI- Messung an einem Automotive- Ethernet- System, Fehlerbewertung: Link- Abbruch für die Kommunikation, Parameter: Kabeltyp (jeweils 10m)

Nur der Kabeltyp 1 führt zu einer Verringerung der Störfestigkeit (Bild 8). Bezogen auf den maximalen Testpegel und den Ergebnissen für die anderen beiden Testkabel (Typen 2 und 3) ist eine Reduzierung der Störfestigkeit von mindestens 16 dB festzustellen. Dieses Verhalten entspricht exakt den unterschiedlich gemessenen ELTCTL- Werten aus Bild 7. Das Ergebnis der Emissionsanalyse in Bild 9 bestätigt diesen

Zusammenhang. Hier ist sogar eine Abstufung zwischen dem Kabeltypen 2 und 3 erkennbar, die sich schon bei der Messung des ELTCTL- Wertes in Bild 7 angedeutet hat.



**Bild 9:**  
 Emissionsmessung mit  
 Streifenleitung nach  
 CISPR25 an einem Auto-  
 motive- Ethernet- System,  
 Parameter: Kabeltyp  
 (jeweils 10m)

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse der S-Parameter- Analysemessungen mit dem EMV- Verhalten von realen Ethernet- Systemen mit verschiedenen Implementierungen (in diesem Fall Kabeltyp als Parameter) ermöglicht somit die Definition bzw. Verifikation von Limits auf Komponentenebene. Diese Limits sind unter anderem fester Bestandteil der im Abschnitt 3.2 angeführten Testspezifikationen für Einzelkomponenten des Ethernet- Übertragungskanals.

## 5. Zusammenfassung

Mit „Automotive- Ethernet“ wird momentan an der Entwicklung eines weiteren symmetrischen Bussystems für den Einsatz im Kfz gearbeitet. Die Übertragungsrate liegt mit 100 Mbit/s zehnfach über der von FlexRay. Aufgrund der gewählten Übertragungstechnologie und der höheren notwendigen Analogbandbreite sind hier deutlich höhere Anforderungen an die Symmetrie sowie andere Übertragungseigenschaften des Kanals gefordert. Dabei stellt die Einhaltung der Symmetrieanforderungen einen zentralen EMV- relevanten Punkt für das System dar. Zu diesem Zweck wurden speziell angepasste Testspezifikationen für alle Einzelkomponenten des Übertragungskanals entwickelt und stehen für Entwicklungs- und Analysezwecke zur Verfügung.

Im Ergebnis der Anwendung dieser Analysemethoden können klare Mindestanforderungen an Symmetrie- und Hochfrequenzeigenschaften aller Komponenten des Übertragungskanals für „Automotive- Ethernet“ spezifiziert werden, die einen störungsfreien Einsatz im Kfz und den damit verbunden erhöhten EMV- Anforderungen ermöglichen.

## Literatur

- [1] IEEE 802.3 Section 2: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) access method and Physical Layer specifications, Fast Ethernet specification, 2008
- [2] Broadcom Corp: [www.broadcom.com](http://www.broadcom.com)
- [3] OPEN ALLIANCE: [www.opensig.org](http://www.opensig.org)