

# Charakterisierung der Gleichtaktdrossel für Multi-Gig-Kommunikation in Automotive-Ethernet-Netzwerken

M.Sc. Sanaz Mortazavi, Volkswagen AG, EMV-Abteilung  
Dr.-Ing. Detlef Schleicher, Volkswagen AG, EMV-Abteilung  
Dipl.-Ing. Frank Schade, Volkswagen AG, EMV-Abteilung  
Prof. Dr.-Ing. Friedel Gerfers, Technische Universität Berlin, Mixed Signal Circuit Design

## 1 Abstract

In diesem Artikel wird eine SMD-Gleichtaktdrossel für Kommunikationssysteme (wie 100Base-T1) untersucht. Zusätzlich werden zwei weitere Drosseln von verschiedenen Herstellern für Multi-Gig Ethernet Kommunikation im Automobil (wie 1000Base-T1) hinsichtlich ihrer Hochfrequenzeigenschaften im Detail charakterisiert.

Zunächst werden die relevanten Automotive Ethernet Standards gegenübergestellt.

Anschließend wird ein geeignetes SPICE-Schaltungsmodell für die Gleichtaktdrossel vorgeschlagen. Dieses Modell enthält alle parasitären Effekte einschließlich Gehäuse-, Aufbau- und Löteteffekten.

Als nächstes wird die Gleichtakt- (CM) und Gegentakt- (DM) Impedanz der Drossel mit einem Impedanz-Analysator gemessen, welcher einen Frequenzbereich von bis zu 120 MHz abdeckt.

Im Weiteren werden die Streuparameter (S-Parameter) und die Mixed-Mode S-Parameter der erwähnten Drosseln mit einem 4-Port-Vektornetzwerkanalysator in einem Frequenzbereich von 1 MHz bis 1 GHz gemessen. Die S-Parameter der Drossel mit Gleichtakt-Terminierung werden auf die gleiche Weise untersucht. Eine 3-Port Konfiguration wird für die Bewertung der Unterdrückung der Gleichtaktströme aufgebaut. Zur Charakterisierung der CMC, wird ein Satz von Breitband-Leiterplatten mit 3-Port- und 4-Port-Konfigurationen entworfen und hergestellt. Diese dienen als Halterplatte für die CMC-Messungen. Um die Effekte solcher einer Test-Fixture zu entfernen, wird die De-Embedding-Methode angewendet.

Der Vergleich zwischen den gemessenen Parametern und den Simulationsergebnissen zeigt eine gute Übereinstimmung.

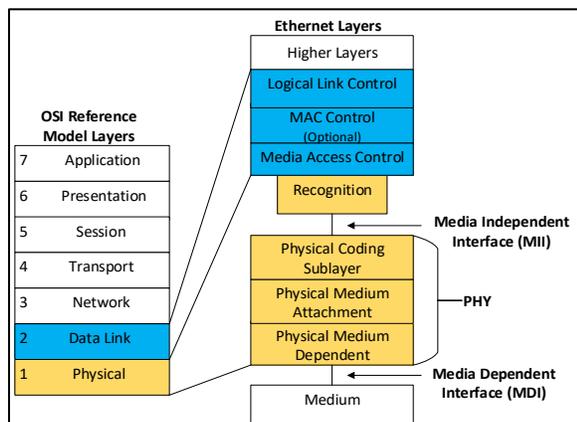
## 2 Einleitung

Die zukünftigen Breitbandanforderungen im Automobil stellen die Kraftfahrzeughersteller weltweit vor neue Herausforderungen. Die Automobilindustrie bereitet sich auf die komplette Umsetzung des autonomen Fahrens (künstliche Intelligenz), neue 5G-Kommunikationsstandards und car-2-car bzw. car-2-x Technologie vor. Insbesondere der steigende Bedarf an Videodatenübertragung im Kraftfahrzeug setzt sehr schnelle Datenkommunikation voraus. In der nächsten Generation der Ethernet-Kommunikation wird die Erhöhung der Datenraten auf 1 Gbit/s angestrebt. Allerdings wird auch schon heute über Datenraten von bis zu 20 Gbit/s, mit höheren Puls-Amplituden-Modulations (PAM)-Stufen, diskutiert.

In den meisten Hochgeschwindigkeits-Telekommunikationssystemen, wie sie beispielsweise in Fahrzeugen eingesetzt werden sollen, werden Twisted-Pair-Datenleitungen (TP) als Medium verwendet. Mit steigenden Frequenzen werden die Datenleitungen gegen Störungen anfälliger. Das mittlerweile etablierte 100 Mbit-Ethernet über ungeschirmte verdrehte Datenleitungen (UTP) kann die Anforderungen der Multi-Gig Kommunikation aber nicht ganz erfüllen. Geschirmte verdrehte Leitungen (STP), geschirmte Parallelleitungen (SPP) und Koaxialleitungen scheinen die geeigneten Alternativen zu sein, da diese Leitungen bessere Hochfrequenzeigenschaften aufweisen. Sowohl bei UTP- als auch bei STP-Leitungen kommen differentielle Datenübertragungsverfahren (DM) zum Einsatz. Das DM-Verfahren hat den gravierenden Vorteil, dass es gegen das Umgebungsrauschen relativ gut geschützt ist [1]. Während der Übertragung des DM-Signals durch die erwähnte Datenleitung, wird jedoch dem Nutzsignal unerwünschtes CM-Rauschen überlagert. Diese Störung ist das Ergebnis der Modenkonversion aufgrund der Asymmetrie der Kabeladern, Adapterleitungen [2] und von extern eingekoppelten Störungen auf dem Kanal. Um die CM-Störungen zu unterdrücken, wird eine Gleichtakt-Drossel (Common Mode Choke / CMC) zwischen dem Kanal und der physischen Schicht (PHY) platziert, so dass nur die gewünschten DM-Signale durchgelassen werden. Die Funktion von CMCs hat eine starke Auswirkung auf die Gesamtsystemleistung. Daher sollten die CMCs für die gewünschte Anwendung optimiert werden.

### 3 Definition des Automotive Ethernet Standards

Die High-speed Datenübertragung über Ethernet als Voraussetzung für die Implementation von BigData im Fahrzeug erfordert eine große Bandbreite im Frequenzspektrum, was zu Interferenzen durch elektromagnetische Emissionen und zu einer Verschlechterung der Immunität führen kann.



Die in IEEE 802.3 standardisierte IP-basierte Ethernet-Technologie definiert die Anforderungen der ersten und zweiten Schicht des OSI-Schichtenmodells. Der genannte Standard soll für den Einsatz im Fahrzeug angepasst und optimiert werden [3]. Bild 1 zeigt das Referenzmodell (OSI-Modell) für Netzwerkprotokolle als Schichtenarchitektur.

**Bild 1:** Referenzmodell (OSI-Modell) für Ethernet-Architektur [4]

Die etablierten Automotive Ethernet Standards sind a) IEEE 802.3bw für 100BASE-T1 und b) IEEE 802.3bp für 1000BASE-T1. In Tabelle 1 sind die Details bezüglich der beiden erwähnten Standards dargestellt.



## 4 Modellierung und Charakterisierung der CMC

Wie bereits erwähnt, wird die differenzielle Datenübertragung der Ethernet-Kommunikation eingesetzt. In Wirklichkeit wird jedoch aufgrund von Asymmetrien Rauschen auftreten. Ein effizienter Weg, dieses Rauschen zu minimieren, besteht darin, einen Filter einzufügen, der dieses unterdrückt. Dies kann durch Verwendung einer Gleichtaktdrossel erreicht werden, die in den Übertragungskanal eingefügt ist.

### 4.1. Funktion der Gleichtaktdrossel für Common Mode Unterdrückung

Der Common Mode Filter basiert auf zwei gekoppelten Induktivitäten. Er enthält zwei Spulen mit mehreren Wicklungen. Die Wicklungen sind so angeschlossen, dass sich Gleichtaktströme aufheben, während Gegentaktströme idealerweise nicht beeinflusst werden [6]. Gleichtaktdrosseln zeigen eine niedrige Impedanz für differentielle Signale. Dies geschieht, weil die Magnetflüsse der beiden Spulen sich gegenseitig aufheben. Bei CM-Signalen fließen die magnetischen Flüsse in die gleiche Richtung. Demzufolge wird eine hohe Impedanz innerhalb des Ferritkerns der CMC erzeugt. Somit wirkt die Drossel als ein Filter gegen den Gleichtaktstrom.

### 4.2. Ersatzschaltbild der Gleichtaktdrossel

Um das allgemeine äquivalente Schaltungsmodell der CMC zu entwickeln, werden die Gleichtakt- und Gegentakt Schaltungen getrennt entworfen. Die detaillierten Schritte können aus [7] entnommen werden. Das vollständige äquivalente Schaltungsmodell der CMC ist in Bild 3 dargestellt. Der mittlere Teil des Modells basiert auf dem CM-Modell,

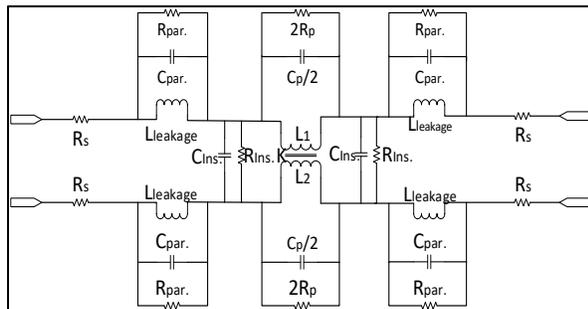


Bild 3: Äquivalente Schaltung der CM-Drossel

das die Selbstinduktivität, die Wicklungskapazität und den Widerstand der Spule enthält. Der linke und der rechte Teil der Schaltung repräsentieren die parasitären Parameter der CMC, die vom Differential Mode beigetragen werden. Um die Isolation zwischen den beiden gekoppelten Induktivitäten zu gewährleisten, werden  $R_{Ins.}$  und  $C_{Ins.}$  als Isolationsparameter eingefügt.

Die Parameter des Simulationsmodells sind aus Messergebnissen extrahiert worden. Das vorgeschlagene Modell wird im nächsten Abschnitt für Impedanz- bzw. S-Parameter-Simulationen eingesetzt.

## 5 Simulation und Messergebnisse

In diesem Abschnitt werden drei SMD-Gleichtaktdrosseln, wie sie für 100BASE-T1 bzw. 1000BASE-T1 Ethernet Kommunikation im Automobil vorgesehen sind, unter Verwendung von Mixed-Mode-S-Parametern (bis 1 GHz) bzw. CM- und DM-Impedanz (bis 120 MHz) untersucht und charakterisiert.

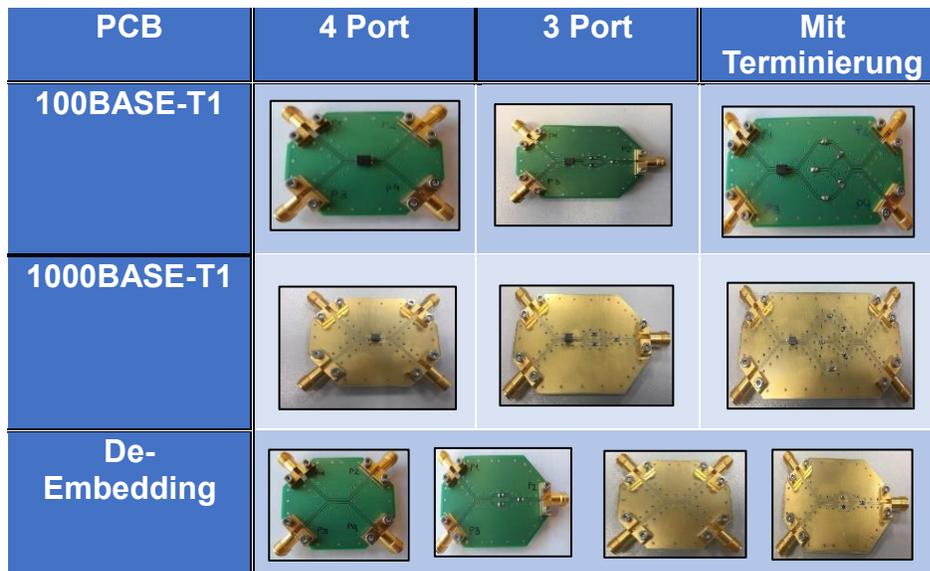
## 5.1. PCB-Design für CMC-Messung

Zur Charakterisierung der Gesamteigenschaften der CMC, wurde ein Satz 4-Port bzw. 3-Port Platinen als Test-Fixture aufgebaut. Die beste Messmethode zur Bestimmung der Modenkonzersion zwischen CM und DM ist das 3-Port-Messverfahren [8].

Die CMC ist in der Mitte zwischen den Differenzsignalleitungen aufgelötet.

Um die CMC geeignet für 100BASE-T1 zu messen, wurden passende Layouts für FR4-PCBs mit  $\tan \delta$  0,01 und einer Dicke von 1,5 mm entworfen und hergestellt. Da es sich bei dem 1000BASE-T1 Standard um höhere Frequenzbereiche handelt, wurden für die Test-Fixtures Leiterplatten mit sehr guten Hochfrequenzeigenschaften ausgewählt. Hierfür wurde RO4350B mit  $\tan \delta$  0.0037 und einer Permittivität  $\epsilon_r = 3,48$  (bis 10 GHz) eingesetzt.

Als Übertragungsleitungen werden koplanare Wellenleiter (CPW) verwendet. Die Breite der Mikrostreifenleitungen (Traces) und der Abstand zur Massefläche wurde für eine Impedanz von  $50 \Omega$  berechnet.



In den folgenden Schritten werden die Impedanz- bzw. S-Parameter-Messungen der CMC mit der beschriebenen Test-Fixture erläutert.

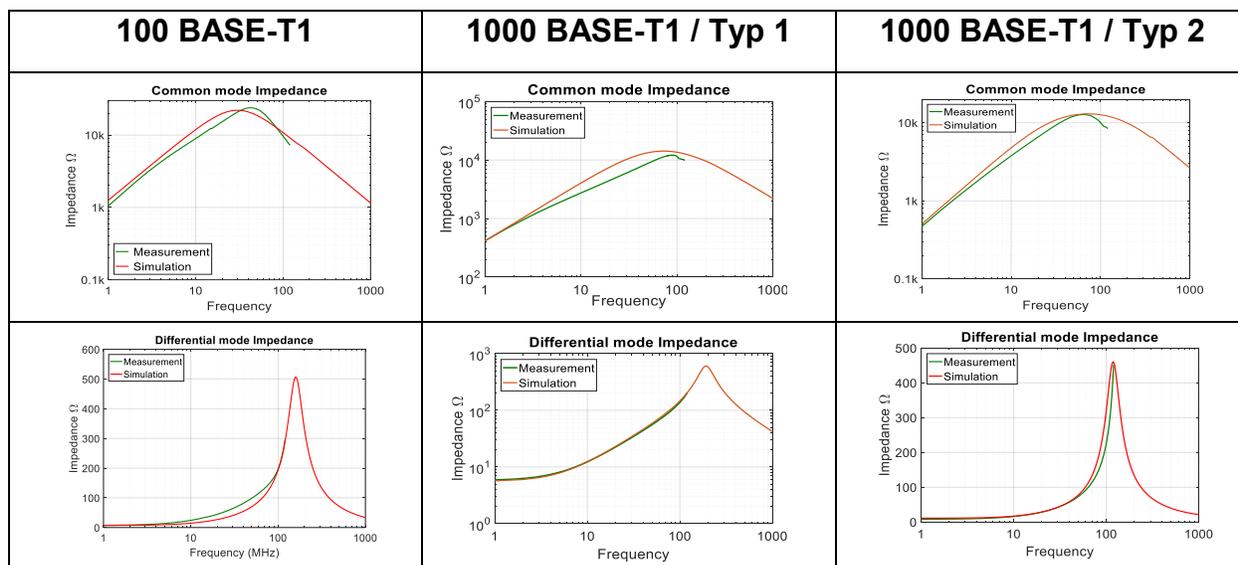
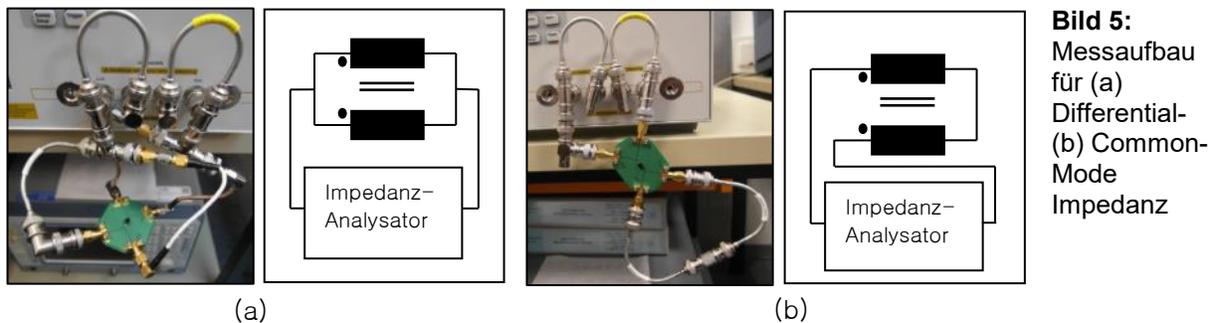
**Bild 4:** Test-Fixtures mit montierter CM Drossel und De-Embedding-PCBs

Um die Einflüsse der Testplatine zu entfernen und damit die Genauigkeit der CMC-Messungen zu verbessern, wurden die Messergebnisse unter Verwendung der De-Embedding Boards aus den DUT- („Device under test“) Messergebnissen extrahiert. In Bild 4 sind die aufgebauten PCBs zu sehen.

## 5.2. Impedanz-Messung

Häufig beschreiben die Hersteller ihre CMC-Eigenschaften, indem sie die CM- und DM-Impedanz spezifizieren. Je höher die Gleichtaktimpedanz, desto kleiner ist das Gleichtaktsignal, das durch die CMC gelangen kann [9].

Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Messaufbauten für die DM- und CM-Impedanz wird das äquivalente Schaltungsmodell simuliert. Der Messaufbau ist in Bild 5 zu sehen. Die Simulations- bzw. Messergebnisse sind in Bild 6 dargestellt.



**Bild 6:** Differential- und Common Mode Impedanz, Messung und Simulation

Wie erwartet, zeigen die untersuchten Drosseln bei Differential Mode eine niedrige Impedanz und sind für CM-Störungen dementsprechend hochohmig. Die oben dargestellten Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung.

### 5.3. Mixed-Mode S-Parameter-Messung

S-Parameter sind die geeigneten Parameter zur Bestimmung der allgemeinen DUT-Eigenschaften wie Reflexion und Transmission.

Zur Beurteilung der differentiellen Übertragungseigenschaften wie Einfügedämpfung, Rückflussdämpfung und Modenkonzessions-Unterdrückung kommen Mixed-Mode S-Parameter zum Einsatz.

#### 5.3.1. Common Mode Termination

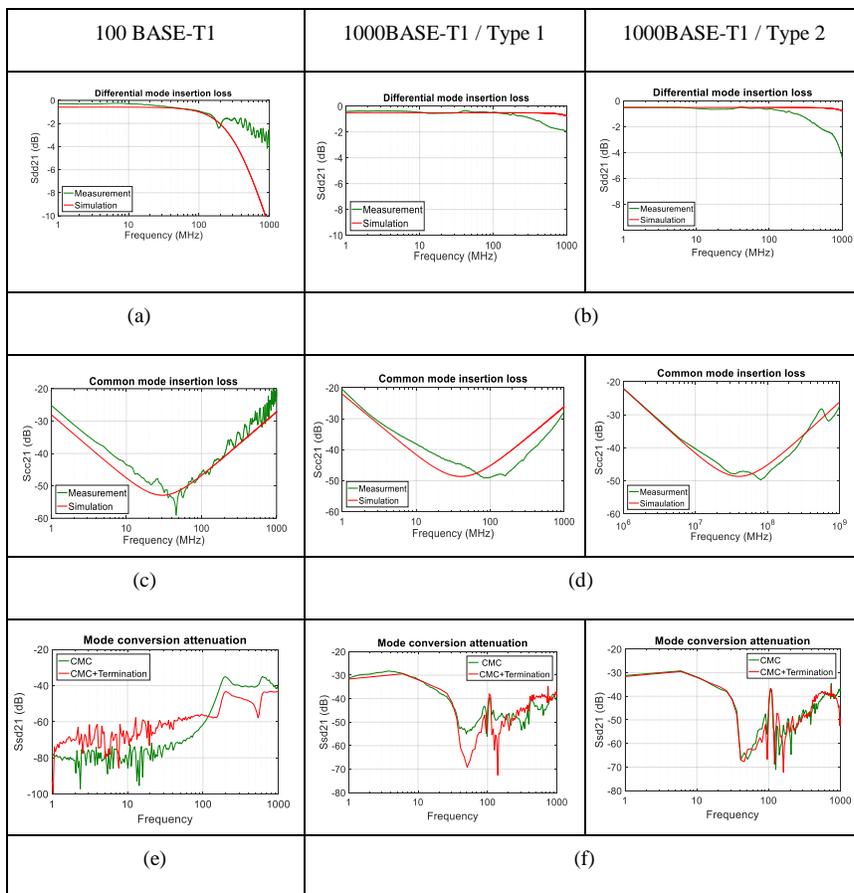
Um die elektromagnetische Interferenz (EMI) und die Empfindlichkeit gegenüber Gleichtaktstörungen in vordefinierten Frequenzbereichen zu reduzieren, sollte eine CM-Terminierung vorgesehen werden. Gleichtaktstörungen, die in einer TP-Datenleitung

vorhanden sein können, werden durch eine geeignete CM-Terminierung reduziert. Die hochohmige Terminierung besteht aus zwei einzelnen 1 kΩ Widerständen, welche über einen 4,7 nF Kondensator mit Masse verbunden sind. In die differentiellen Signalleitungen sind zwei 100 nF DC-Entkoppelkondensatoren eingesetzt. Sie stellen sicher, dass kein Gleichstrom vom PHY in den Kanal gelangt.

### 5.3.2. Messergebnisse der Mixed-Mode S-Parameter

Die auf der 4-port-PCB montierte Drossel wird mit einem differentiellen Signal eines VNA im differentiellen Eingangs-Port gespeist und an den gegenüberliegenden Anschlüssen gemessen. Mit dieser Konfiguration wird die Einfügedämpfung des Systems gemessen. Um die Modenkonzessions-Unterdrückung der Drossel zu untersuchen, wird die 3-Port Platine benutzt. An den zwei Anschlüssen werden differentiale Signale eingespeist und auf der anderen Seite der Platine wird das single-ended-Signal gemessen.

Die Simulationsdiagramme, die in den folgenden Abbildungen dargestellt sind, sind die Ergebnisse der S-Parameter-Simulation des vorgeschlagenen äquivalenten Schaltungsmodells. Die Messergebnisse der Drossel mit und ohne Terminierung werden ebenfalls dargestellt.



Die gemessenen Parameter sind:

- Sdd21 definiert die Bandbreite des Filters. Die Fähigkeit des Filters, das Nutzsignal ohne Verzerrung durchzulassen.

- Scc21 definiert die Gleichtaktdämpfung. Der Filter unterdrückt das unerwünschte Rauschen in einem bestimmten Frequenzbereich.

- Sds12, definiert die Gegentakt- zu Gleichtaktumwandlung (Modenkonzersion).

**Bild 7:** Mess- und Simulations-Ergebnisse, Differential mode insertion loss (a,b), Comon mode insertion loss (c,d), Mode conversion attenuation (e,f)

## 6 Zusammenfassung

Diese Arbeit stellt die Charakterisierung zweier Gleichtaktdrosseln vor, die in Fahrzeugen für schnelle Kommunikationstechnologien mit einer hohen Datenrate (100 Mbit/s und 1000 Mbit/s) eingesetzt werden sollen. Die S-Parameter und die Impedanz der erwähnten CMCs wurden in Bezug auf Gleichtakt- und Gegentakt-Signalisierung gemessen. Um die Fähigkeit der CMC zur Unterdrückung von Gleichtaktstörungen zu untersuchen, wurden auch Mixed-Mode S-Parameter gemessen. Diese Parameter geben auch Aufschluss über den auftretenden Grad von Modenkonzersion. Die präsentierten Ergebnisse wurden de-embedded, um die Test-Fixture-Effekte zu entfernen und die Genauigkeit der CMC-Messungen zu verbessern. Es wurde ein HF-Ersatzschaltbild für die gemessene CMC entwickelt. Der Gleichtaktunterdrückungseffekt der CMC wurde unter Verwendung des vorgeschlagenen äquivalenten Modells simuliert. Die Simulationsergebnisse wurden mit den Messergebnissen verglichen und die Genauigkeit des vorgeschlagenen Modells der CMC wurde verifiziert.

### Literaturangaben

- [1] V. Zwillich, W. Menzel and H. Leier, "Worst case signal integrity analysis for in-vehicle data transmission via UTP cables," IEEE Electromagnetic Compatibility, 2007. EMC Zurich 2007. 18th International Zurich Symposium on, DOI: 10.1109/EMCZUR.2007.4388220
- [2] M. Spägele, F. Wagner, S. Buntz, H. Leier, S. Lindenmeier, L. Reiter and R. Münzner, "Radiated Emission of automotive communication bus systems caused by mode-conversion of common-mode chokes and in-line-connectors," Proc. of the 2013 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2013), Brugge, Belgium, September 2-6, 2013
- [3] B. Körber, R. Kunz, N. Müller, L. Diaz Ortega, H. Wiechmann, „Ethernet für Kfz-Anwendungen-Randbedingungen und EMV-optimierte Lösungen“, GMM-Fachbericht 77, Stuttgart, Germany 26.-27.09.2013
- [4] D. Reynders, Practical TCP/IP and Ethernet Networking for Industry, 2003, Elsevier Science
- [5] OPEN ALLIANCE, "EMC Test Specification for BroadR-Reach Transceivers"
- [6] Ji-Kwang Lee, Woo-Seok Kim, Ji Hoon Kim, Seungwook Lee, Guesoo Cha and Song-Yop Hahn, "Experimental result of transport current loss in bifilar winding solenoid type HTS coil," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 11, no. 1, pp. 2228-2231, Mar 2001.
- [7] S. Mortazavi, D. Schleicher and F. Gerfers, "Characterization of common-mode choke for automotive ethernet networks enabling 100 Mbit/s" in EMCEurope.2017. IEEE
- [8] M. Spägele, S. Buntz, H. Leier, L. Reiter and S. Lindenmeier, "Reduction of differential-mode to common-mode conversion by means of analytic description in common-mode chokes used for an automotive communication bus system," IET Sci. Meas. Technol., 2014, Vol. 8, Iss. 2, pp. 74–80 doi: 10.1049/iet-smt.2013.0055
- [9] Z. Li, D. Pommerenke and Y. Shirnoshio, "Common-mode and Differential-mode Analysis of Common Mode Chokes," 0-7803-7835-0/03/\$17.00 IEEE.