

# Asymmetrien eines Ethernet-Systems und deren Auswirkungen auf die Störaussendung im automobilen Umfeld

Dipl.-Ing. (FH), M.Eng. Matthias Spägele, Dr.-Ing. Stefan Buntz, Dr.-rer.-nat. Helmut Leier, Daimler AG, Vernetzung und Standard Software

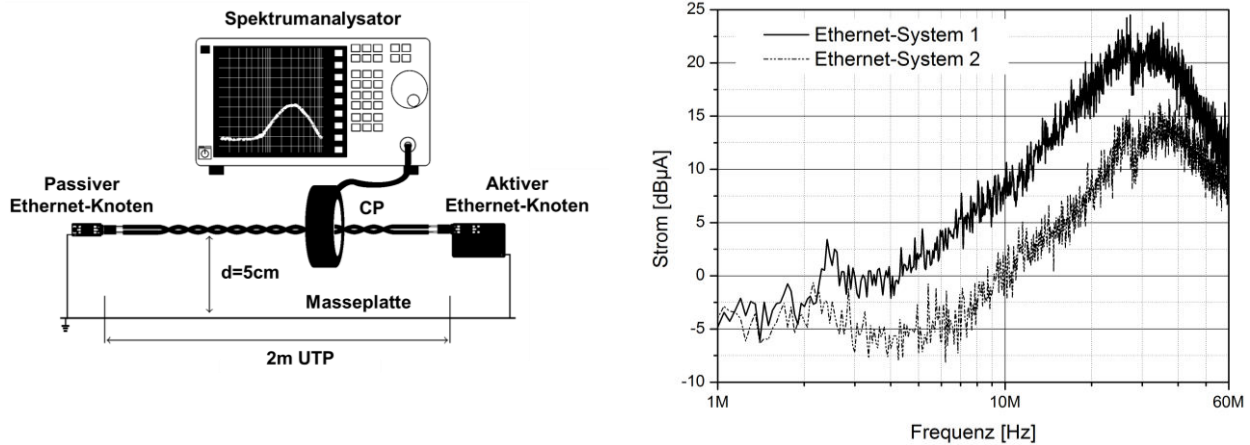
Prof. Dr.-Ing. Stefan Lindenmeier, Prof. Dr.-Ing. Leopold Reiter, Bundeswehr Universität München, Institut für Hoch- und Höchstfrequenztechnik

## 1. Einleitung

Seit Jahren ist ein Zuwachs von elektronischen Komponenten im Fahrzeug zu beobachten. Der Wunsch nach mehr Komfort und Sicherheit trägt hier maßgeblich dazu bei. Um den Anforderungen gerecht zu werden, sind schnelle Übertragungssysteme im Fahrzeug erforderlich, die die großen Datenmengen verteilen und verarbeiten können. Ein solches System ist zum Beispiel Ethernet, mit dem periphere Komponenten mit hohen Datenraten vernetzt werden können. Eine spezielle Variante für den automobilen Einsatz stellt dabei das OABR-Ethernet (Open-Alliance-BroadR-Reach) dar. Dieses Kommunikationssystem nutzt eine bi-direktionale Übertragungstechnik um 100MBit/s über eine ungeschirmte Zweidrahtleitung (UTP) zu übertragen. Eine weitere Besonderheit ist die Begrenzung des Nutzspektrums durch einen Tiefpassfilter auf ca. 70MHz. Dadurch wird das Risiko einer Störung im UKW-Bereich minimiert. Der Einsatz dieses schnellen Übertragungssystems im Fahrzeug stellt jedoch eine große Herausforderung an die Elektromagnetische-Verträglichkeit (EMV) dar. Bereits kleine Asymmetrien im Übertragungspfad führen dazu, dass ein Teil des Nutzspektrums (Gegentaktsignal) durch Modenkonzersion in ein Störsignal (Gleichtaktstörung) umgewandelt wird – nachfolgend Modenkonzersion genannt. Diese Gleichtaktstörungen können über die UTP-Leitung abstrahlen und zu Grenzwertüberschreitungen bei Störaussendungsmessungen führen. Jede Komponente im Übertragungspfad trägt maßgeblich zur Modenkonzersion und somit zur Störaussendung bei. Diese Arbeit soll eine Übersicht über die Modenkonzersion der einzelnen Elemente der physikalischen OABR-Schnittstelle geben. Diese Elemente sind im Einzelnen der Tiefpassfilter (LPF), die Common-Mode-Choke (CMC), die differentiellen Mikrostreifenleitungen (DML) sowie die Platinen- und In-Line-Stecker.

## 2. Störaussendung des Ethernet-Systems und Background

Zur Ermittlung der Störaussendung des OABR-Ethernet-Systems wird die Stromzangenmessmethode nach CISPR-25:2008 verwendet. Der zugehörige Messaufbau ist in Bild 1 (links) dargestellt. Bei den verwendeten Ethernet-Boards handelt es sich um Test-Steuergeräte, die für den Einsatz im Automobil (vor allem im Hinblick auf die Einhaltung der EMV Grenzwerte) entwickelt wurden. Für die Analyse wird ein aktives Ethernet-Board als Sender und ein passives Ethernet-Board als Empfänger eingesetzt. Bei der verdrehten Zweidrahtleitung handelt es sich um FLR9Y 2x0.35 mm<sup>2</sup>.



**Bild 1:** Links: Messaufbau der Stromzangenmessung (CP-Test) nach CISPR-25:2008. Rechts: CP-Test Emissionsmessergebnis

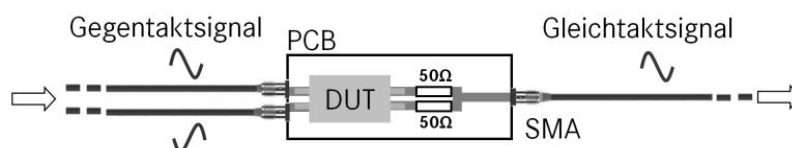
Die Störaussendung im Nutzsinalbereich ( $\leq 70\text{MHz}$ ) des OABR-Ethernet-Systems ist in Bild 1 (rechts) zu sehen. Es handelt sich bei den Ethernet-Systemen 1 und 2 um zwei identische Systeme. Die Leiterplatten wurden maschinell bestückt und es wurden Bauteile der gleichen Charge aufgebracht. Trotzdem ist bei der Emission zwischen den Systemen ein deutlicher Unterschied zu erkennen. Die Abweichungen betragen bis zu  $10\text{dB}\mu\text{A}$  vor allem im Frequenzbereich von  $5\text{MHz}$  bis  $30\text{MHz}$  [1,3,4].

Weitere Untersuchungen führten zu der Erkenntnis, dass die Ursache für die unterschiedliche Störaussendung in der Modenkonzersion des Übertragungspfades liegt. Die Ursache für die Differenzen der Störaussendung in Bild 1 (rechts) liegt vor allem in den Asymmetrien der Gleichakttdrossel (Details sind Abschnitt 4.3.2 zu entnehmen). Die Untersuchungen zeigen weiter, dass die Modenkonzersion einen signifikanten Einfluss auf die Störaussendung hat und neben der Gleichakttdrossel auch die anderen Elemente des Ethernet-Signalfads auf Modenkonzersion hin untersucht werden müssen.

### 3. Asymmetrien im Übertragungspfad

#### 3.1 Messtechnische Ermittlung von Asymmetrien

Asymmetrien im Übertragungspfad eines OABR-Ethernet-Systems messtechnisch zu ermitteln stellt eine Herausforderung dar. Bei der durch Asymmetrien entstehenden Modenkonzersion handelt es sich um Signale mit sehr niedrigen Pegeln, die sich in der Nähe der Messgrenze befinden. Aus diesem Grund ist es erforderlich, hochpräzises Messsequipment zu verwenden und darauf abgestimmte hochsymmetrische Messaufbauten zu entwickeln. Eine gute Methode zur messtechnischen Ermittlung von Modenkonzersion stellt dabei die 3-Port-Messmethode dar. Als Beispiel ist in Bild 2 der 3-Port-Messaufbau für die Ermittlung der Modenkonzersion von Gleichakttdrosseln zu sehen [1,2].



**Bild 2:** 3-Port-Messmethode zur Ermittlung der Modenkonzersion von Gleichakttdrosseln.

Für die Modenkonzessionsmessung von DMLs sowie PCB- und In-Line-Steckern [3] kann ein modifizierter Messaufbau nach Bild 2 verwendet werden. Mithilfe dieser Messergebnisse können die Simulationen und die analytische Beschreibung verifiziert werden.

### 3.2 Analytische Beschreibung von Asymmetrien

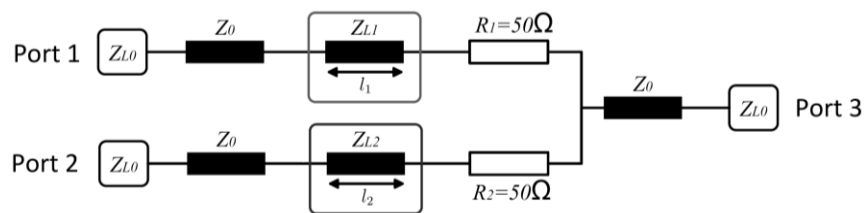
Für Simulationen und auch für das Verständnis der zugrundeliegenden Effekte ist es hilfreich, die Asymmetrien der Komponenten analytisch zu beschreiben. Hiermit ist es möglich, die Ursachen für die Modenkonzersion zu ermitteln und zu bewerten. Der folgende Abschnitt dient als Übersicht der analytischen Beschreibung. In einer früheren Arbeit [4] wurde vom Autor die analytische Beschreibung anhand einer Gleichtaktdrossel im Detail ausgeführt und beschrieben.

Untersucht man die Komponenten auf ihre Asymmetrien, so erkennt man, dass alle Asymmetrien auf die grundsätzliche Problematik von unterschiedlichen Längen und Wellenwiderstände zurück zu führen sind (mit Ausnahme des Tiefpassfilters). Das bedeutet, dass die Asymmetrien mittels zweier verkoppelter oder nicht verkoppelter, verlustloser bzw. schwach verlustbehafteter Leitungen abgebildet werden können. Dies ist sowohl bei einer Gleichtaktdrossel, als auch bei differentiellen Mikrostreifenleitungen und Steckern möglich. Eine Ausnahme stellt dabei der Tiefpassfilter dar, der ausschließlich aus passiven Bauteilen besteht und dessen Asymmetrien hauptsächlich auf Toleranzen und parasitäre Elemente zurück zu führen ist.

Auf Grund der messtechnischen Ermittlung mittels der 3-Port-Messmethode, erfolgt auch die analytische Beschreibung auf Basis der 3-Port-Messmethode und wird im Anschluss auf 4-Port-Systeme umgerechnet. Für die Berechnung der Modenkonzersion bei Verwendung der 3-Port-Messmethode gilt Gleichung (1),

$$\underline{S}_{sd21}|_{3-port} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\underline{S}_{31} - \underline{S}_{32}) \quad (1)$$

wobei Port 1 und 2 den differentiellen Port abbilden und Port 3 den single-ended-Port darstellt (vgl. Bild 3).



**Bild 3:** Darstellung der 3-Port-Messmethode mit zwei verlustlosen bzw. schwach verlustbehafteten Leitungen mit unterschiedlichen Leitungslängen ( $l_1$ ,  $l_2$ ) und Wellenwiderständen ( $Z_{L1}$ ,  $Z_{L2}$ ) als Asymmetrie. 50Ω-Leitungen ( $Z_0$ ) sowie 50Ω-Terminierungen ( $Z_{L0}$ ) bilden Mikrostreifenleitungen, SMA-Kabel und NWA nach. Port 1 und 2 stellen den differentiellen Port dar und Port 3 den single-ended-Port. Die Widerstände  $R_1$  und  $R_2$  dienen als Terminierungswiderstände für das Device-Under-Test (DUT).

Nach einigen mathematischen Umrechnungen und Umformungen erhält man Gleichung (2), die die Modenkonzersion von Komponenten (nicht verkoppelte Leitungen) bei der Verwendung der 3-Port-Messmethode nach Bild 3 darstellt. Der Fehler durch die Vereinfachungen ist dabei sehr gering. Dabei ist  $f$  die Frequenz und  $c$  die Vakuumlichtgeschwindigkeit.

$$|\underline{S}_{sd-Term}|[dB] = 20 \log_{10} \left( \frac{1}{2 \cdot \sqrt{2}} \left[ \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{c} \right) \cdot \left[ l_1 \cdot \left( \frac{Z_{L1} + Z_{L0}}{2} \right) - l_2 \cdot \left( \frac{Z_{L2} + Z_{L0}}{2} \right) \right] \right] \right) \quad (2)$$

Die daraus ermittelte Modenkonzersion gilt allerdings nur bei 3-Port-Messanordnungen nach Bild 3. Betrachtet man die Komponenten im Ethernet-System, so liegen sie hier als 4-Port-Anordnung vor. Durch eine Korrektur erhält man die tatsächliche (im System) auftretende Modenkonzersion  $\underline{S}_{cd21}$  der Komponente (vgl. Gl. (3)):

$$|\underline{S}_{cd21}|[dB] = 20 \log_{10} \left( \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{c} \right) \cdot \left[ l_1 \cdot \left( \frac{Z_{L1} + Z_{L0}}{2} \right) - l_2 \cdot \left( \frac{Z_{L2} + Z_{L0}}{2} \right) \right] \right] \right) \quad (3)$$

Des Weiteren kann diese Betrachtung auch für verkoppelte Leitungen angewandt werden. Das ist zum Beispiel bei der Betrachtung spezieller Anordnungen von Asymmetrien bei verkoppelten Mikrostreifenleitungen erforderlich. Durch entsprechendes Einbinden der Verkopplung ergibt sich für die 3-Port-Messungen mit verkoppelten Elementen Gleichung (4). Mit  $Z_V = \sqrt{Z_{even} \cdot Z_{odd}}$ , wobei  $Z_{even}$  und  $Z_{odd}$  für die Wellenwiderstände der Gleich- und Gegentaktmode stehen.

$$|\underline{S}_{sd-Term-verkoppelt}|[dB] = 20 \log_{10} \left( \frac{1}{2 \cdot \sqrt{2}} \left[ \left( \frac{2 \cdot \pi}{\left( \frac{c}{f} \right) / \sqrt{\epsilon_{reff}}} \right) \cdot \left( \frac{Z_V + Z_{L0}}{2} \right) \cdot (l_1 - l_2) \right] \right) \quad (4)$$

Nach entsprechender Umformung ergibt sich für die Modenkonzersion verkoppelter Elemente in einem 4-Port-System Gleichung (5).

$$|\underline{S}_{cd21-verkoppelt}|[dB] = 20 \log_{10} \left( \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{2 \cdot \pi}{\left( \frac{c}{f} \right) / \sqrt{\epsilon_{reff}}} \right) \cdot \left( \frac{Z_V + Z_{L0}}{2} \right) \cdot (l_1 - l_2) \right] \right) \quad (5)$$

Aus diesen Berechnungen ist nun ersichtlich, welche Einflussfaktoren vorliegen und wie hoch deren Einfluss auf die Modenkonzersion ist. Wertet man die Formeln aus, so erhält man nachfolgende Priorisierungstabelle (Tabelle 1).

Priorität / Gewichtung			
1 $\Delta l$	2 min. $l_1, l_2$	3 min. $Z_{l1}, Z_{l2}$	4 $\Delta Z_l$
Einfluss durch den Längenunterschied zwischen den Adern	Einfluss durch die Gesamtlänge der Leitungen	Einfluss durch den Leitungswellenwiderstand	Einfluss durch die Leitungswellenwiderstandsdifferenz zwischen den Adern

**Tabelle 1:** Priorisierung und Gewichtung der Einflussfaktoren bei längen- und impedanzabhängigen Asymmetrien, wie zum Beispiel bei einer CMC.

Aus den Formeln (und Messungen) wird ersichtlich, dass es sich bei der Modenkonzersion um einen linearen Verlauf mit einer Steigung von 20dB/dec handelt.

### 3.3 Modenkonzersion der Ethernet-Komponenten

In den nachfolgenden Abschnitten wird die Modenkonzersion anhand von Simulationsergebnissen dargestellt. Alle Simulationsergebnisse wurden anhand von Messungen, wie auch von analytischen Berechnungen verifiziert. Für eine solche Simulation eignet sich die Monte-Carlo-Analyse (MCA) [5]. Hierbei werden die Asymmetrien nach der Gaußverteilung variiert und das Ergebnis der Konzersion ausgegeben. Man erhält dadurch eine Vielzahl von Kurven (hier 10000 Iterationen) mit einem linearen Verlauf und einer Steigung von 20dB/dec, die zusammen eine Fläche aufspannen. Daraus wird ersichtlich, wie groß die zu erwartende Modenkonzersion der Komponente ist und in welchem Bereich sich diese bewegt.

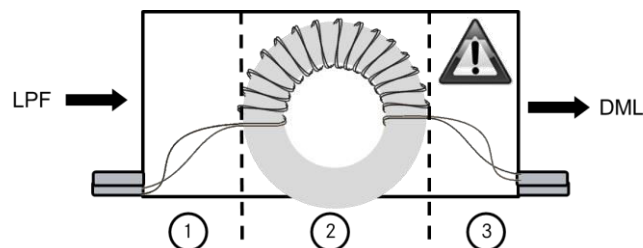
#### 3.3.1 Tiefpassfilter LPF

Der Tiefpassfilter hat, was, was die Ursache der Modenkonzersion betrifft, eine Sonderstellung. Die Modenkonzersion des LPF 2-ter Ordnung [6] wird im Unterschied zu den anderen Komponenten durch Toleranzen und unterschiedliche parasitäre Effekte der Bauteile hervorgerufen. Für die Störaussendung ist die Modenkonzersion des Tiefpassfilters jedoch bei einer hohen Gleichtaktunterdrückung der Drossel zu vernachlässigen, da diese nach dem LPF im Signalpfad liegt. In diesem Fall wird keine signifikante Störaussendung durch den Tiefpassfilter sichtbar.

Für die Modellierung der Modenkonzersion von passiven Bauteilen werden reale Ersatzschaltbilder verwendet. Die Werte der Bauteile (inklusive parasitären Elementen) können mittels eines Impedanzanalysators ermittelt werden.

#### 3.3.2 Gleichtaktdrossel CMC

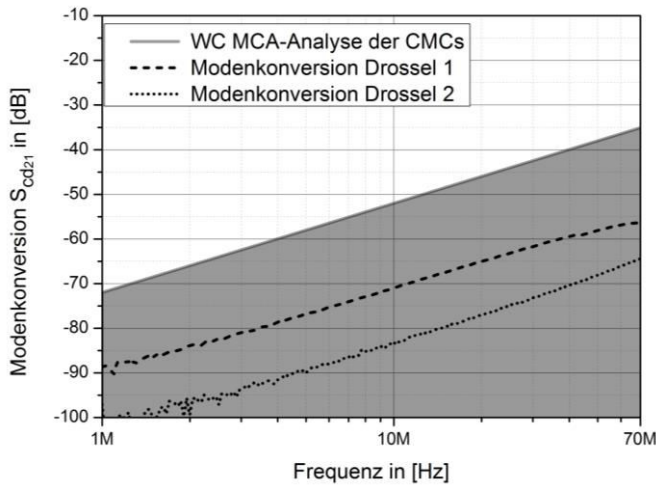
Die Gleichtaktdrossel ist ein zentrales Element in Bezug auf die EMV-Eigenschaften eines Ethernet-Systems. Die Drossel hat die Aufgabe Gleichtaktstörungen zu unterdrücken (z.B. die Modenkonzersion des LPF) und das Gegentaktsignal, möglichst mit wenig Beeinflussung, passieren zu lassen. Zusätzlich ist sie aber auch eine Quelle für Gleichtaktstörungen. Durch den asymmetrischen Anschluss der Einzeladern an die Pins des Drosselgehäuses können Längen- und Impedanzunterschiede zwischen den zwei Anschlussleitungen auftreten (vgl. Bild 4).



**Bild 4:** Beispiel für Asymmetrien anhand einer Ringkerndrossel. In Bereich 3 sind die Anschlussleitungen zu sehen, die durch ihre Längen- und Impedanzunterschiede zu Modenkonzersion führen.

Die dadurch erzeugte Gleichtaktstörung wandert ohne weitere Beeinflussung auf die Leitung und wird dort als Störaussendung erkennbar. Details zur Modenkonzersion von Gleichtaktdrosseln sind den Veröffentlichungen [1,4] zu entnehmen. Für die nachfolgen-

de Betrachtung wird angenommen (aus Praxiserfahrung), dass die in Bild 5 (rechts) auf-  
gezeigten Längen- und Impedanzunterschiede der Einzeladern vorliegen.



Asymmetrie	Wertebereich
Länge der Adern	$1\text{mm} \leq l_1, l_2 \leq 5\text{mm}$
Impedanz der Adern	$50\Omega \leq Z_{L1}, Z_{L2} \leq 290\Omega$

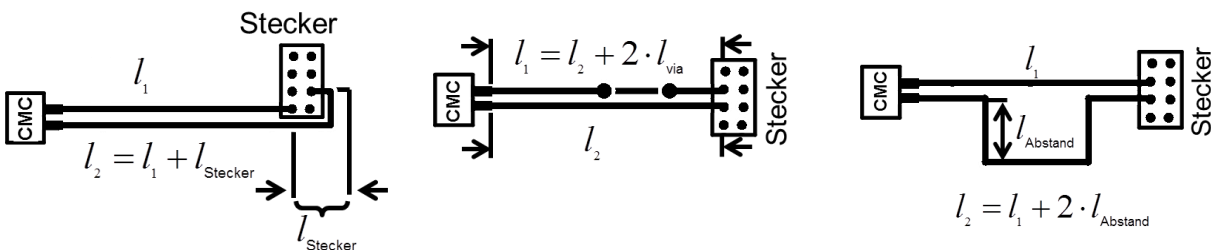
**Bild 5:** Links: MCA-Ergebnis der Modenkonzersion der CMC-Analyse. Rechts: Wertebereich, der für die Simulation angenommen wurde (abgeleitet aus Praxiserfahrungen).

In Bild 5 (links) ist die Monte-Carlo-Analyse der Modenkonzersion von Gleichtaktdrosseln zu sehen sowie die Modenkonzersion der Drosseln, die in Bild 1 (rechts) für die Emission des Ethernet-Systems 1 bzw. 2 verantwortlich sind. Vergleicht man diese Kurven, so wird ersichtlich, dass im worst-case-Fall (WC) die Emission des Ethernet-Systems nochmals um ca. 18dB ansteigen kann.

Die Modellierung der Asymmetrie von Gleichtaktdrosseln kann mittels zwei voneinander entkoppelten oder verkoppelten Leitungsstücken (abhängig von der CMC Bauweise) für die beiden Enden der Gleichtaktdrossel modelliert werden. Die Modellierung ist mit dieser Methode bis zu einer Frequenz von ungefähr 100MHz möglich und somit für das OABR System ausreichend (Nutzsignal  $\leq 70\text{MHz}$ ).

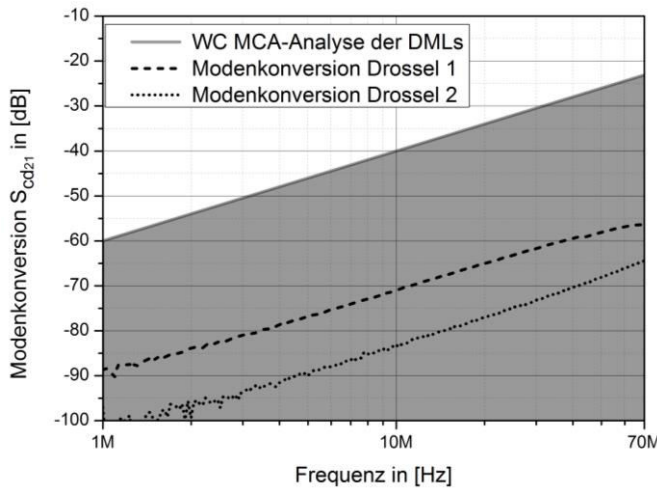
### 3.3.3 Differentielle Mikrostreifenleitung DML

Eine weitere Quelle für Gleichtaktstörungen können DMLs sein. Je nach Design der Leitungen können zwischen den Einzeladern der DML Asymmetrien entstehen, die zur Modenkonzersion führen können. Hierbei sind vor allem Asymmetrien auf Grund von Leitungslängenunterschieden entscheidend. Effekte durch Impedanzunterschiede zwischen den einzelnen Mikrostreifenleitungen durch Höhen- und Breitenunterschiede können im Vergleich dazu auf Grund der exakten Fertigungstechnik vernachlässigt werden. Drei Beispiele für mögliche Asymmetrien bei DML sind in Bild 6 dargestellt.



**Bild 6:** Links: Längenunterschied durch Anschluss eines Platinensteckers. Mitte: Längenunterschied durch einseitiges Einbringen von Vias. Rechts: Längenunterschied durch das „Auftrennen“ der DML.

Die Modenkonzersion und die angenommenen Längendifferenzen für die Simulation sind Bild 7 (rechts) zu entnehmen. Der gewählte Längendifferenzbereich entspricht den in der Praxis auf Steuergeräten vorkommenden Längendifferenzen.



Asymmetrie	Wertebereich
Länge der Adern	$0\text{mm} \leq l_1, l_2 \leq 30\text{mm}$

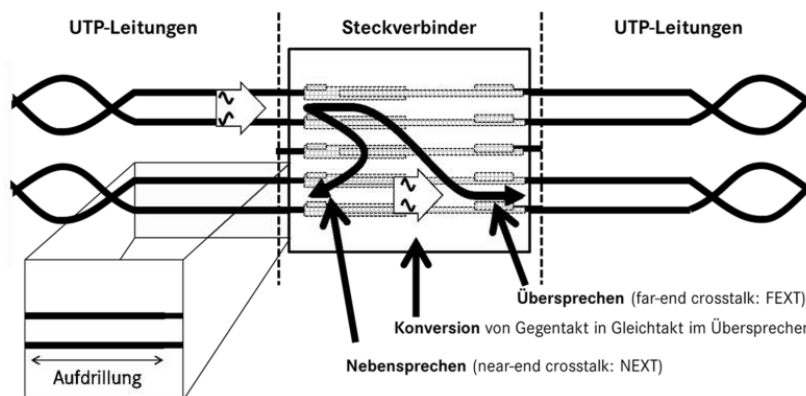
**Bild 7:** Links: MCA-Ergebnis der Modenkonzersion der DML-Analyse. Rechts: Wertebereich, der für die Simulation angenommen wurde (abgeleitet aus Praxiserfahrungen).

Betrachtet man das Ergebnis in Bild 7 (links), so wird ersichtlich, dass die Modenkonzersion von Mikrostreifenleitungen bei herkömmlichem PCB-Routing eine Modenkonzersion von bis zu -60dB bei 1MHz im WC-Fall verursachen kann. Vergleicht man diese wiederum mit der Drossel 1, so wird deutlich, dass im worst-case-Fall die Emission des Systems aus Bild 1 (rechts) um ca. 30dB zunehmen kann.

Modelliert werden können diese Asymmetrien mittels Mikrostreifenleitungsmodellen.

### 3.3.4 Platinen- und In-Line-Stecker

Stecker sind mitunter eine der komplexesten Komponenten in Bezug auf die Modenkonzersion. Neben den reinen Längen- und Impedanzunterschiede gibt eine Vielzahl von weiteren Stecker-Parametern (z.B.  $\epsilon_r$ , Gehäusetoleranzen, Crimpkontakt,...), die die Konversionseigenschaften beeinflussen (vgl. In-Line-Stecker in Bild 8).



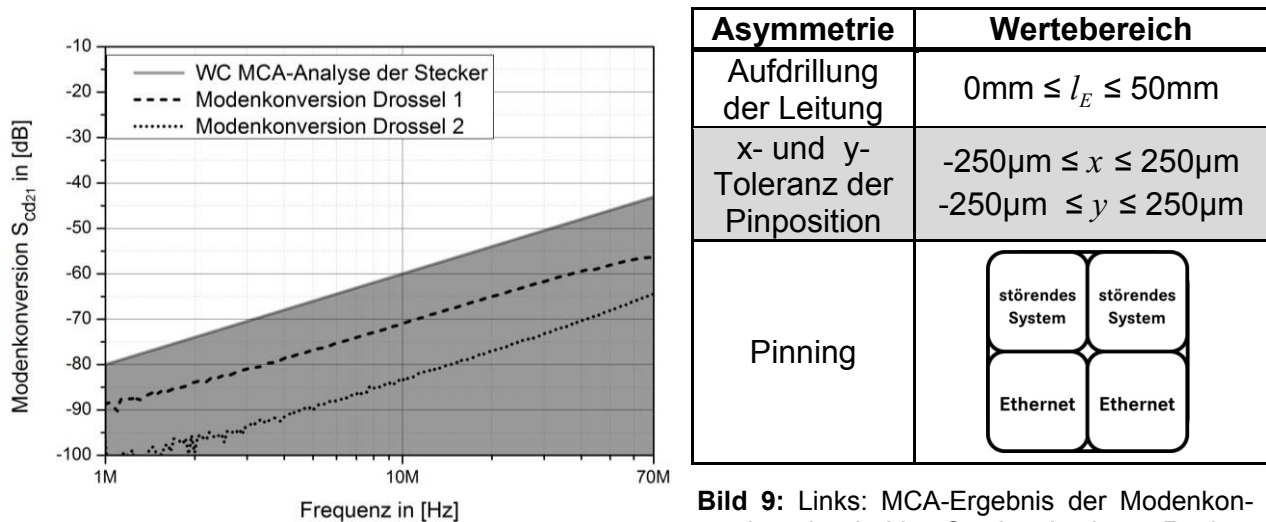
**Bild 8:** Darstellung der verschiedenen Asymmetrien, die bei einem In-Line-Steckverbinder vorliegen können.

Weiter gibt es nicht nur die Modenkonzersion, die durch die eigentliche Ethernet-Übertragung entsteht, sondern auch Übersprechen im Stecker (Gleichtakt- wie auch Gegentaktsignale) von benachbarten Leitungen (z.B. CAN, FlexRay,...) auf die Ethernet-



Leitung. Weiter liegt im Fall der Verwendung von einfachen Steckverbindern (z.B. MQS-Steckern) vor und nach In-Line-Steckern eine Aufdrillung der UTP Leitung vor (fertigungsbedingt), die mögliche Überkopplungen vereinfachen. Bei Steckern ist zudem zu beachten, dass auch das Pinning und die umgebenen Pins einen signifikanten Einfluss auf die Konversion haben.

All diese Parameter werden in der Simulation berücksichtigt. Details zur Modenkonzersion und der Modellierung von Steckern, ist den Arbeiten [3] sowie [7] zu entnehmen. Die Modellierung basiert dabei auf der Theorie der verkoppelten Leitungen.



**Bild 9:** Links: MCA-Ergebnis der Modenkonzersion der In-Line-Stecker-Analyse. Rechts: Wertebereich, der für die Simulation angenommen wurde (abgeleitet aus Praxiserfahrungen).

Aus Bild 9 ist ersichtlich, dass im worst-case-Fall eine Modenkonzersion des In-Line-Steckers von -80dB bei 1MHz vorliegt. Die Konversion eines Platinensteckers liegt in der gleichen Größenordnung, wobei hier vor allem bei 90°-gewinkelten Platinensteckern eine Asymmetrie durch Längenunterschiede der Pins als Ursache auszumachen ist. Vergleicht man dieses Ergebnis mit der Drossel 1, die für die Emission des Ethernet-Systems 1 in Bild 1 (rechts) verantwortlich ist, so wird deutlich, dass durch einen Stecker die Emission aus Bild 1 (rechts) um ca. 10dB ansteigen kann.

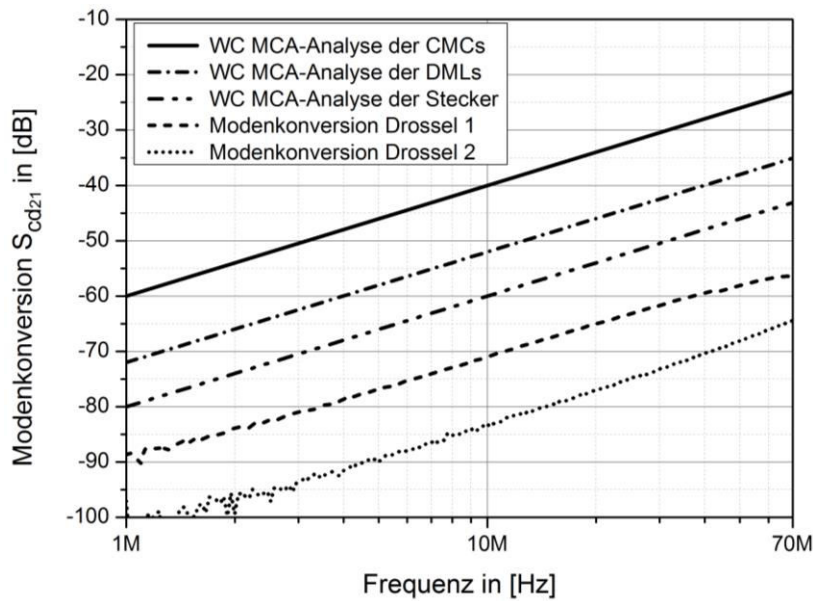
#### 4. Zusammenfassung

Aus den Ausführungen wird ersichtlich, dass die Komponenten CMC, DML und Stecker einen signifikanten Einfluss auf die Modenkonzersion und somit auf die Störaussendung eines Ethernet-Systems haben. Weiter wird deutlich, dass der LPF durch die hier vorliegende hohe Gleichtaktunterdrückung der CMC nicht signifikant zur Emission des Systems beiträgt und vernachlässigt werden kann.

Asymmetrien in Form von Längen- und Impedanzunterschieden sind vor allem bei der CMC und der DML die primären Ursachen für die Modenkonzersion. Bei den PCB- und In-Line-Steckverbindern ist es eine deutlich größere Anzahl an Effekten, die zur Konversion beitragen. Hier ist hauptsächlich die Wechselwirkung mit benachbarten Pins von großer Relevanz.

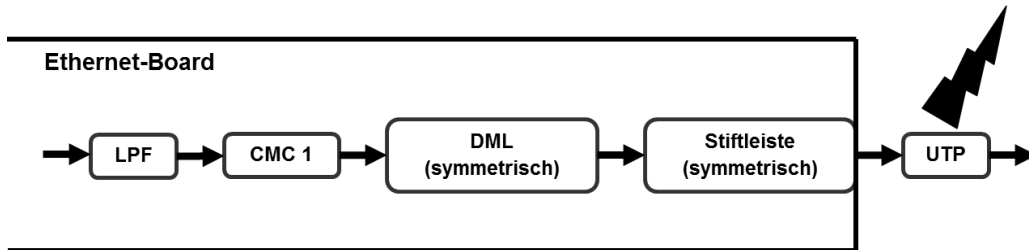


Die worst-case Modenkonzersion der Komponenten CMC, DML und PCB- und In-Line-Stecker sowie der Drosseln 1 und 2 sind in Bild 10 dargestellt.



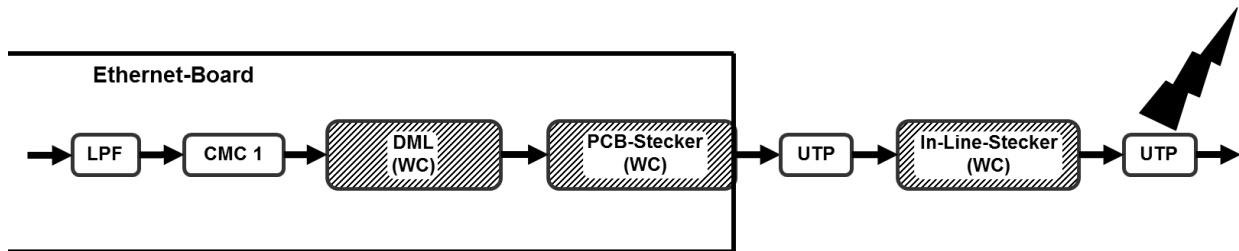
**Bild 10:** Darstellung der WC-Modenkonzersion aller Komponenten und Modenkonzersion der Drossel 1 und 2.

In Bild 11 ist das Ethernet-System als Blockschaftbild zu sehen, so wie es auch in Bild 1 (links) vermessen wurde. Betrachtet man die Komponenten im Pfad, so kann man feststellen, dass der LPF keinen Einfluss auf die Emission hat und lediglich die CMC 1 als Hauptverursacher der Störaussendung in Erscheinung tritt (vgl. Bild 1).



**Bild 11:** Blockschaftbild des Ethernet-Systems, das für die Emissionsmessung (Bild 1) verwendet wurde.

Unter der Annahme, dass das Ethernet-System aus Bild 1 bzw. Bild 11 angepasst und erweitert wird (vgl. Bild 12), ergeben sich zusätzliche Konversionen durch die Komponenten DML, PCB- und In-Line-Steckverbinder.



**Bild 12:** Neues Szenario: Erweiterung des Ethernet-Systems und Einbringen neuer Komponenten inklusive ihrer Modenkonzersionseigenschaften.

Legt man den Komponenten die worst-case Konversion zu Grunde, so ergibt sich eine deutliche Zunahme von Gleichtaktstörungen und somit der Emission.

Angenommen wird:

- WC DML +30dB
- WC Platinen Stecker +10dB
- WC In-Line-Stecker +10dB

Daraus ergibt sich eine Erhöhung der Konversion von 50dB, was wiederum zu einer deutlichen Zunahme der Störaussendung führt. Dadurch ist eine mögliche Grenzwertüberschreitung des Ethernet-Systems zu erwarten.

Es ist daher wichtig, alle Komponenten zu prüfen und möglichst symmetrisch auszulegen, sodass die Konversionen der Komponenten möglichst gering gehalten werden können.

Mit Hilfe dieser Erkenntnisse ist es nun möglich, die Ethernet-Komponenten auf Ihre Modenkonzersion hin zu untersuchen und zu analysieren (messtechnisch, analytisch und simulatorisch) und schließlich zu optimieren sowie ein Ethernet-System zu entwerfen, dass die geforderten EMV-Grenzwerte einhalten kann.

## 5. Literatur

- [1] Spägele, M.: 'Ursachenanalyse der Störemission eines EMV-optimierten Ethernet-Kommunikationssystems für automobiler Anwendung', Master Thesis, University of Applied Sciences Ulm, 2011
- [2] Körber, B.: 'Fast Ethernet physical layer – EMC measurement specification for transformers and common-mode chokes', 2011
- [3] Spägele, M., Wagner, F., Buntz, S., Leier, H., Lindenmeier, S., Reiter, L., Münzner, R.: 'Radiated Emission of automotive communication bus systems caused by mode-conversion of common-mode chokes and in-line-connectors', EMC Europe, Brugge, Belgien, 2013
- [4] Spägele, M., Buntz, S., Leier, H., Lindenmeier, S., Reiter, L.: '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-Science Measurement and Technology, September 2013
- [5] Theis, C., Kernbichler, W.: 'Grundlagen der Monte Carlo Methoden', TU Graz, 2002
- [6] BroadCom: 'BroadR-Reach specification v2.0', September 2013
- [7] Wagner, F.: 'Modellierung von mehr-pinnigen, ungeschirmten Steckverbindungen für schnelle Bussysteme und Analyse ihrer EMV Eigenschaften im automobilen Umfeld' University of Applied Sciences Ulm, Germany, Master-Thesis, 2013