

## Kassieren Sie die Schirmungsdividende 1000BASE-T1 in der Fahrzeugimplementierung

Im Gegensatz zu 100BASE-T1 wird 1000BASE-T1 über ungeschirmte Übertragungskanäle derzeit nicht allen EMV Situationen auf Gesamtfahrzeugebene gerecht. Daher werden für Gigabit Ethernet vorwiegend geschirmte Verkabelungssysteme eingesetzt. Während geschirmte Systeme in OPEN Alliance (OA) TC9 für die Verkabelung (Link Segment) ergänzt wurden, ist eine Anpassung der Beschaltung auf der Leiterplatte (Media Dependent Interface, MDI) in TC12 jedoch noch nicht erfolgt. Ist der Einsatz geschirmter Systeme temporär befristet? Falls nicht, besteht vielfach ungenutztes Potential für Kosten- und Platzeinsparungen.

## Bestandsaufnahme

Das Ziel der Standardisierung von 1000BASE-T1 innerhalb der IEEE 802.3bp [1] war es, ungeschirmte Verkabelungssysteme (Unshielded Twisted Pair, UTP) mit Mantelleitungen zu verwenden. Diese sollten Kosten, Gewicht und elektrischen Eigenschaften in einer kosteneffizienten Lösung kombinieren – so die Vision. Um ein ausreichendes EMV Verhalten sicherzustellen, wurden Messungen auf System-Ebene auf Basis von Baugruppen erfolgreich durchgeführt. In der Folge hat sich jedoch gezeigt, dass bestandene System-Tests wie CISPR25 Antennenmessung nach ALSE Methode oder Stripline keine Garantie dafür sind, EMV Messungen auf Fahrzeugebene ebenfalls zu bestehen, wie Abbildung 1 zeigt.

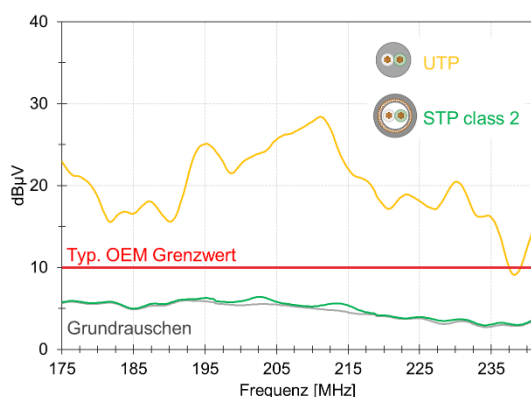


Abbildung 1: Emissionen eines 1000BASE-T1 Links in fahrzeuginterne DAB-Antennen

Dort sind exemplarisch die gemessenen HF Emissionen einer 1000BASE-T1 Datenverbindung in eine fahrzeuginterne DAB-Antenne gezeigt. Um die Emissionen eindeutig dieser einen Ethernet-Verbindung zuzuordnen, sind während dieses Standardtests sämtliche anderen aktiven Elektroniksystem im Fahrzeug deaktiviert. Das vollständig geschirmte STP-System hält den Grenzwert des Fahrzeugherstellers im gesamten Frequenzbereich ein und ragt nur geringfügig aus dem messbaren Grundrauschen heraus. Im Gegensatz dazu überschreitet der nach IEEE/OA als „compliant“ qualifizierter UTP-Übertragungskanal mit bestmöglicher Unsymmetriedämpfung (Balance/Gleichtaktunterdrückung) den Grenzwert um bis zu 15 dB und kann nicht implementiert werden. Dass dieses Beispiel keine Ausnahme ist, belegen aktuelle Publikationen [2] und [3]. Da die Gleichtaktunterdrückung bei UTP-Systemen, die dem Stand der Technik entsprechen, als de-facto ausgereizt gilt und andere Optimierungsansätze nicht bestehen, bleibt in der Praxis nur der Wechsel auf geschirmte Systeme. Hier sieht die OA TC9 [4] zwei Schirmungsklassen vor: STP class 1 für ursprünglich ungeschirmte Stecksysteme, die nachträglich mit meist nur zwei Kontaktpunkten ergänzt wurden in Verbindung mit speziellen Modenkonzersionsoptimierten STP-Leitungen, sowie STP class 2 für 360° vollgeschirmte Stecksysteme und konventionellen STP-Leitungen. Durch den Wechsel von UTP auf STP class 2 wird die Situation sicher gelöst, ob damit aber das beste Kosten-Nutzen-Verhältnis gefunden ist, wird im Folgenden näher betrachtet.

## Ursachenanalyse

Da ein grundlegendes Verständnis für die Entstehung und die Vermeidung von Gleichtaktstörungen unerlässlich ist, um die Unterschiede zwischen UTP und STP sowie die Ursachen für die EMV-Effekte auf Fahrzeugebene zu verstehen, zunächst ein paar Grundlageninformationen zur differentiellen Datenübertragung. Diese nutzt den Gegentakt (Differential Mode, DM), bei dem die beiden Leiter eines differentiellen Paares jeweils das Signal mit gleicher Amplitude aber entgegengesetzter Phase aufweisen. Einkoppelnde Störsignale wirken auf beide Leiter vorwiegend gleichphasig, also im Gleichtakt (Common Mode, CM). Durch Differenzbildung am Empfänger werden Störungen im Gleichtakt weitgehend ausgeblendet, was die Störfestigkeit verbessert. Ein anderes Bild ergibt sich bei der Störaussendung. Gleichtakt-Störungen auf einer differentiellen Übertragungsstrecke können in Abhängigkeit von Frequenz, Leitungslänge und der Verbau-Situation zu EMV-Problemen führen. Eine häufige Maßnahme, um Gleichtaktstörungen zu reduzieren, ist die Verwendung von Gleichtaktstrossel, auf Englisch Common Mode Choke (CMC). Dabei handelt es sich um ein Bauteil auf der Leiterplatte, welches Gleichtaktsignale bedämpft (

Abbildung 2). Ergänzend wird die CMC in der Regel durch die Common Mode Termination (CMT), einem Filternetzwerk, das zwischen CMC und Steckverbinder platziert wird und einen angepassten Abschluss für Gleichtaktstörungen bildet. Da eine CMT sowohl impuls- als auch leistungsfest sein muss geht sie mit großem Platzbedarf einher und stellt wie die CMC einen nicht zu vernachlässigenden Kostenfaktor dar.

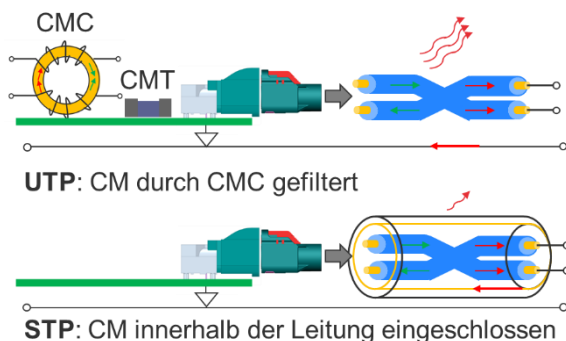


Abbildung 2: Quellen von Gleichtaktstörungen und Lösungen zur Reduktion

CMCs sind bei Verwendung von UTP essenziell und fester Bestandteil der 1000BASE-T1 Referenz-Beschaltung gemäß OA TC12 [5]. Bauteilkosten und Platzbedarf für CMCs summieren sich bei einem Switch entsprechend der Anzahl der Ports. CMCs bringen jedoch auch elektrische Nachteile wie Dämpfung des differentiellen Nutzsignals und zusätzliche Unsymmetrie mit sich. Sie besitzen einen typischen Frequenzgang mit abnehmender Wirkung der Gleichtaktunterdrückung zu hohen Frequenzen hin. Wie später im Artikel noch gezeigt wird, können im vom Transceiver-IC emittierten Spektrum ggf. Gleichtaktstörungen bis in den GHz Bereich beobachtet werden. Die gemäß [6] geforderte Gleichtaktunterdrückung für CMCs liegt beträgt 32.5 dB bei 600 MHz. Für Frequenzen darüber hinaus sind jedoch keine Werte spezifiziert und das Verhalten daher nicht vorhersehbar.

Grundsätzlich gilt: Sind Gleichtaktsignale erst einmal auf der UTP Leitung, verkoppeln sie weitgehend ungehindert in fahrzeuginterne Antennen. Aufgrund des geringen Abstands zu Antennen oder ungünstiger Ausrichtung der Empfangscharakteristik der Antenne zum verbauten Link können diese fahrzeuginternen Verkopplungen zu deutlich schärferen Störemissionsanforderungen führen als standardisierte Messungen auf Systemebene. Eine bewährte Lösung, um diese Verkopplung mit umgebenden Systemen zu verhindern ist die Schirmung. Gleichtaktsignale sind zwar innerhalb der Leitung vorhanden, werden aber durch entsprechend hohe Schirmdämpfung bis zu sehr hohen Frequenzen effektiv daran gehindert mit der Umgebung zu verkoppeln (

Abbildung 2). Gleichtaktunterdrückung durch CMCs und Schirmung sind also sich ergänzende Effekte. Bei ohnehin vorhandener sehr guter 360° Schirmung sollte sich demnach der Aufwand bei der Gleichtaktunterdrückung reduzieren lassen, was Einsparungen bei CMC/CMT auf der Leiterplatte zuließe.

## Modularen Testplattform und Absicherungsstrategie

Um verschiedene Leitungs- und MDI-Konfigurationen effizient untersuchen zu können, hat Rosenberger eine modulare Evalboard-Plattform für Automotive-Datenprotokolle entwickelt. Das Basismodul kommuniziert mit einem PHY Board, das einen 1000BASE-T1 Chipsatz eines etablierten Herstellers aufweist. Auf einem abgesetzten MDI Board befinden sich die passiven Komponenten ab PHY Ausgang bis zum PCB Steckverbinder. Das MDI Board ist über einen Board-to-Board Steckverbinder mit dem Basismodul verbunden und ermöglicht es so, das EMV Verhalten bei verschiedenen Beschaltungsvarianten des MDIs schnell und reproduzierbar zu bestimmen.

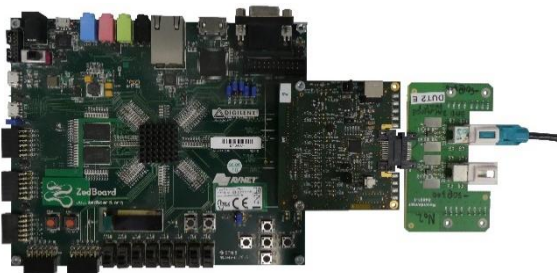


Abbildung 3: Mehrteiliger Aufbau der modularen Testplattform

Abbildung 3 zeigt den grundlegenden Aufbau der modularen Testplattform. Während der Durchführung von EMV Messungen wurde die Elektronik in einem geschirmten Gehäuse platziert. Die Evalboard-Plattform wurde gemäß den gängigen Geräte-Spezifikationen nach OA TC8 [7] und TC12 [8] erfolgreich auf Compliance getestet (Abbildung 4). Die Verkabelung erfüllt die Anforderungen an den Übertragungskanal sowie die Einzelkomponenten entsprechend OA TC9 gemäß [4] bzw. [9].

	Standard	Spezifikation	Parameter	Ergebnis
ECU	TC8	ECU test specification	Mandatory and additional	✓
	TC12	PMA test suite	Layer 1 mandatory	✓
Link segment	TC9	Channel and components		✓
EMV	CISPR25	Antenna Emissions (ALSE)	30 - 3000 MHz	✓
	ISO 11452-4	Bulk current injection (BCI)	1 - 400 MHz, 200 mA	✓

Abbildung 4: Modulare Testplattform erfolgreich qualifiziert

Um zu bestätigen, dass bei Verwendung von Rosenberger H-MTD® auf CMC und CMT verzichtet werden kann wurden Messungen nach verschiedenen Verfahren durchgeführt. Die Störfestigkeit durch Bulk Current Injection (BCI) Verfahren nach ISO 11452-4 in der Variante Substitutionsmethode durchgeführt. Die Koppelzange beaufschlagt dabei den Prüfling mit einem Störstrom von 200 mA im Frequenzbereich 1-400 MHz. Alle drei Konfigurationen, also auch STP-System ohne CMC, haben diesen Test bestanden.

Angelehnt an die Messung der Schirm- und Koppeldämpfung wurden die Beschaltungsvarianten der Leiterplatte in der triaxialen Zelle nach IEC 62153-4-7 vermessen. In EMV Messungen mit aktiver Elektronik erhält man als Ergebnis stets eine Mischung aus Gegen- und Gleichtaktanteilen, da beide bereits im erzeugten Spektrum der Quelle vorhanden sind. Die Messung in der triaxialen Zelle mittels Netzwerk-Analysator ermöglicht es, Gegen-- und Gleichtaktanteile sauber zu trennen. Die CMC verringert dabei die Verkopplung im Gleichtakt, analog einer verbesserten Schirmdämpfung, während sich die Verkopplung für den Gegentakt kaum ändert. Die triaxiale Messung von Baugruppen ist daher dazu geeignet, die Auswirkung von Änderungen an der Beschaltung der Leiterplatte auf das EMV Verhalten zu untersuchen.

## Antennennahfeldmessung erhöht die Messdynamik

Wie kann die Korrelation zwischen System- und Fahrzeugebene verbessert werden, damit sich zukünftig eine Situation, dass zur Integration ins Fahrzeug alle EMV-Bewertung auf „grün“ waren und erst, wie in Abb. 1 dargestellt, die Fahrzeugmessung auf „rot“ springt? Hierzu wurde eine auf den Anwendungsfall angepasste Antennennahfeldmessmethode in Anlehnung an [10] verwendet. Der Testaufbau besteht aus einem 1000BASE-T1 Evalboard und einer konfektionierten Leitung (Abbildung 5). Auf der gegenüberliegenden Seite der Verbindung ist die Leitung mit 2 x 50  $\Omega$  gegen Masse abgeschlossen. Als Abschlussimpedanz ergeben sich 100  $\Omega$  im Gegentakt und 25  $\Omega$  im Gleichtakt.

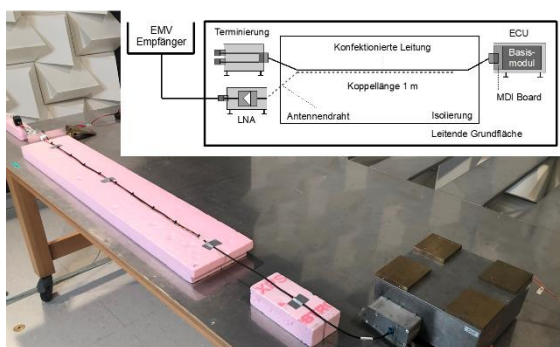


Abbildung 5: Antennennahfeldmessung

Während der Messung sendet der Ethernet-Transceiver in einem genormten Testmodus fortwährend Datenpakete. An der konfektionierten Leitung ist ein Draht angebracht, der als Antenne dient und Emissionen entlang der Leitung aufnimmt und über einen rauscharmen Vorverstärker zum Messempfänger leitet. In diesem Messaufbau können verschiedene Leitungs- und Beschaltungs-Konfigurationen reproduzierbar mit guter Messdynamik und -empfindlichkeit miteinander verglichen werden. Die Anwesenheit des Antennendrahtes beeinflusste die Umsymmetriedämpfung der Leitungen selbst im ungünstigen Falle von UTP

nur unwesentlich mit weniger als 1 dB. Es wurde jeweils STP mit und ohne CMC gegenüber UTP mit CMC als Referenz verglichen.

In der Antennennahfeldmessung sind je nach Frequenzbereich die gemessenen Emissionen von STP bis zu 40 dB geringer als bei UTP (Abbildung 6). Bei Verzicht auf eine CMC ergibt sich über weite Bereiche lediglich eine geringfügige Zunahme der Emissionen um wenige dB. Bei 750 MHz ergibt sich aufgrund der Symbolrate eine Nullstelle im Datenspektrum, so dass selbst die UTP-Emission punktuell in Richtung des Rauschpegels absinken. Das spezifizierte Leitungsdichtespektrum für das vom Chipsatz erzeugte Nutzsignal im Gegentakt reicht bis 600 MHz. In der Praxis endet dies jedoch dort nicht abrupt. Zusammen mit schmalbandigen Emissionen durch den Transceiver-IC, bspw. als Vielfache der Clock-Frequenzen, ergeben sich – insbesondere im UTP-Fall – deutlich messbare Störemissionen über einen Großteil der TV/Mobilfunk Bänder oberhalb von 600 MHz.

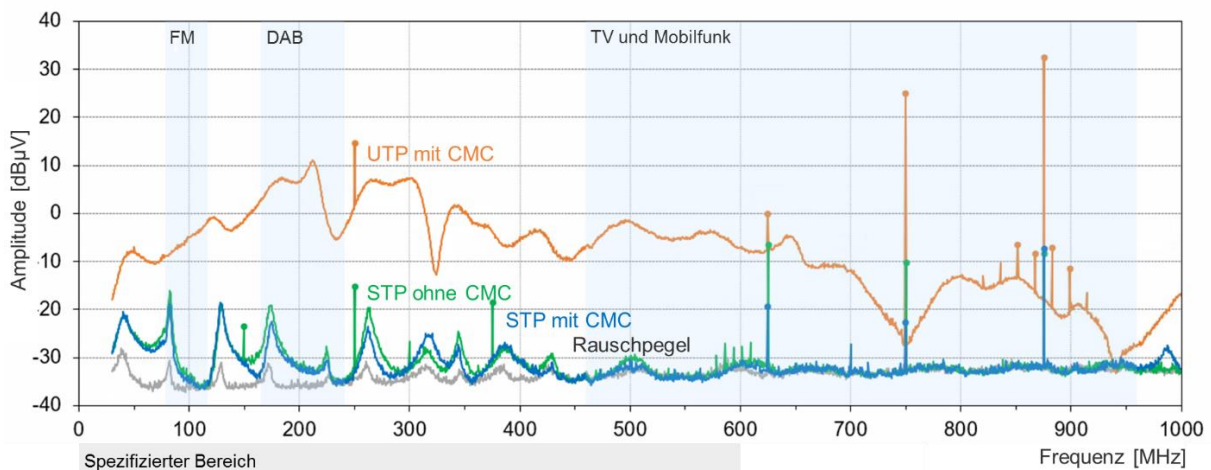


Abbildung 6: Vergleich von UTP sowie STP mit und ohne CMC/CMT im modifizierten Antennennahfeldmessverfahren im Vergleich zum Rauschpegel innerhalb und auch oberhalb des in IEEE/OA spezifizierten Spektralbereichs

Der Unterschied mit und ohne CMC bei der Gleichtaktverkopplung liegt im relevanten Frequenzbereich bis 300 MHz bei ca. 20 dB, was in etwa der Transmissionsdämpfung der CMC im Gleichtakt entspricht. Der Unterschied mit und ohne CMC bei der Gegentaktverkopplung ist gering, da die CMC das Nutzsignal mit geringer Transmissionsdämpfung durchlässt. Im Gegensatz zu einer ungeschirmten Lösung verringert STP auch ohne CMC die Verkopplung von Gleichtakt mit der Umgebung um bis zu 40 dB. Die Impedanz der CMT ist in den Referenzbeschaltungen auf die hohe Gleichtaktimpedanz von nominal 200  $\Omega$  der CMC in Verbindung mit einer UTP Leitung angepasst. Entsprechend der Einbausituation der UTP Leitung in einem Fahrzeug kann die Gleichtaktimpedanz je nach Abstand zur Bezugsmasse stark schwanken. Im Gegensatz dazu liegt die Gleichtaktimpedanz einer STP Leitung bei 25 - 45  $\Omega$  mit sehr geringer Schwankung. Eine auf diese niedrige Impedanz angepasste CMT würde das Nutzsignal zu stark bedämpfen. Somit ist es sinnvoll und konsequent sowohl auf CMC als auch CMT zu verzichten. Der Platzbedarf auf der Platine kann je nach Layout um bis zu 30 % reduziert werden (Abbildung 7), was den Trend hin zu bauraumoptimierten Multi-Header Steckverbindern unterstützt.

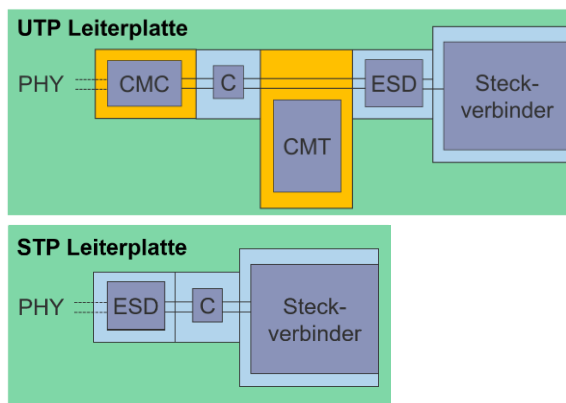


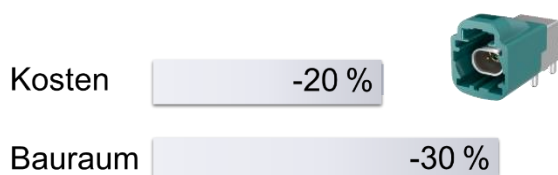
Abbildung 7: Platzersparnis auf der Leiterplatte durch Verzicht auf CMC/CMT

Bei Verzicht auf CMC und CMT ist eine Kompatibilität zu UTP nicht mehr gegeben. Ein Wechsel von STP zu UTP auf der Kabelseite ist ohne Anpassung der Beschaltung der Leiterplatte leider nicht mehr möglich. Zu beachten ist, dass bei Verzicht auf CMC und CMT das ESD-Schutzkonzept überprüft werden sollte, welches sich aus der internen Absicherung des Transceiver-IC und sowie optionalen externen ESD-Schutzdioden zusammensetzt. Durch den Wegfall der hohen Induktivität der CMC ist die Anordnung einer optionalen externen ESD-Diode und deren Auslösecharakteristik gegebenenfalls anzupassen. Erste Untersuchungen zeigen sich vielversprechend - es bietet sich jedoch an detailliertere Untersuchungen durchzuführen.

## Fazit: Sichere EMV-Qualifikation bei reduzierten Gesamtkosten

Wird aus der UTP-Vision bei 1000BASE-T1 u.U. eine UTP-Illusion? Aus der Bordnetz-EMV-Perspektive gibt es derzeit keinen fundamentalen Grund zu hoffen, dass sich die eingangs gezeigte Situation, die den Einsatz von STP für Gigabit Ethernet erforderlich macht, in zukünftigen Fahrzeugplattformen grundlegend ändern wird, da sämtliche UTP-Komponenten bestehend aus MDI, Steckerverbindungen und Leitungen als ausoptimiert gelten.

Daher wurde in diesem Beitrag anhand von detaillierten Untersuchungen gezeigt, dass durch die Verwendung von 360° vollgeschirmten OA TC9 STP class 2 Kanälen (wie z.B. Rosenberger H-MTD®) Einsparungen auf Geräteseite möglich werden. Dieses Potential entsteht in erster Linie durch Verzicht auf CMC und CMT auf beiden Seiten einer Datenverbindung. Es ergibt sich eine funktionsfähige und sicher EMV qualifizierbare Lösung, die unmittelbar den Platzbedarf auf der Leiterplatte um ca. 30 % und die relativen Kosten einer STP class 2 Lösung um ca. 20 % reduziert (Abbildung 8). Als Referenz dienen die CMC/CMT Bauteilkosten in Verbindung mit einer konfektionierten Leitung der Länge ein Meter.



Kosten -20 %



Bauraum -30 %

Abbildung 8: STP class 2 ermöglicht Einsparungen auf der Leiterplatte als eine Art Schirmungsdividende

Darum raten wir dazu, das Potential dieser Kosten- und Platzersparnis durch detaillierte Untersuchungen (z.B. ESD-Schutz) abzusichern und, wenn möglich, in Neuprojekten die Schirmungsdividende in Form von reduzierten Bauteilkosten durch Verzicht auf CMC und CMT zu kassieren.

## QUELLEN

- [1] IEEE 802.3bp-2016: Amendment 4: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 1 Gb/s Operation over a Single Twisted-Pair Copper Cable
- [2] Automotive Ethernet Congress, 2018 (Dr. Stefan Buntz und Dr. Matthias Spägele, Daimler AG): Automotive Gigabit Ethernet -Physical-Layer Challenges and Further Functional Requirements
- [3] GMM Fachtagung, 2022 (M. Sc. Emanuel Panholzer, Prof. Dr.-Ing., Stefan Lindenmeier, Universität der Bundeswehr München), (Dr.-Ing. Martin Aidam, Dipl.-Ing. Andreas Ludwig, Dr.-Ing. Xiaofeng Pan, Dipl.-Ing. (FH) Vadim Kobelski, Mercedes-Benz AG Sindelfingen): Korrelationsoptimierung der Störemission zwischen System- und Fahrzeugebene für Automotive Ethernet 100BASE-T1 Anwendungen
- [4] OPEN Alliance SIG, Channel and Component Requirements for 1000BASE-T1 Link Segment Type A (STP), Version 2.0
- [5] OPEN Alliance SIG, 1000BASE-T1 System Implementation Specification, Version 1.5.1
- [6] OPEN Alliance SIG, IEEE 1000BASE-T1 EMC Test Specification for Common Mode Chokes, Version 2.0
- [7] OPEN Alliance SIG, OPEN Alliance Automotive Ethernet ECU Test Specification Layer 1, Version 3.0
- [8] OPEN Alliance SIG, IEEE 1000BASE-T1 Physical Media Attachment Test Suite, Version 1.0
- [9] OPEN Alliance SIG, Channel and Components Requirements for 1000BASE-T1 Link Segment Type A (UTP), Version 2.3
- [10] Daimler AG, MBN\_10284-2: EMV-Anforderungen–Komponentenprüfungen (PKW und Transporter), Ausgabe 2019-10

## AUTOREN



Dipl.-Ing. (FH) Thomas Müller  
Research Group Automotive  
Rosenberger Hochfrequenztechnik GmbH & Co. KG



B.Eng. Christoph Huber  
Electronic Circuits and Systems  
Rosenberger Hochfrequenztechnik GmbH & Co. KG



Dr.-Ing. Gunnar Armbrecht  
Director Research Group Automotive  
Rosenberger Hochfrequenztechnik GmbH & Co. KG