

Anforderungen an Datenleitungen für Automotive Ethernet:

Jedes Detail zählt

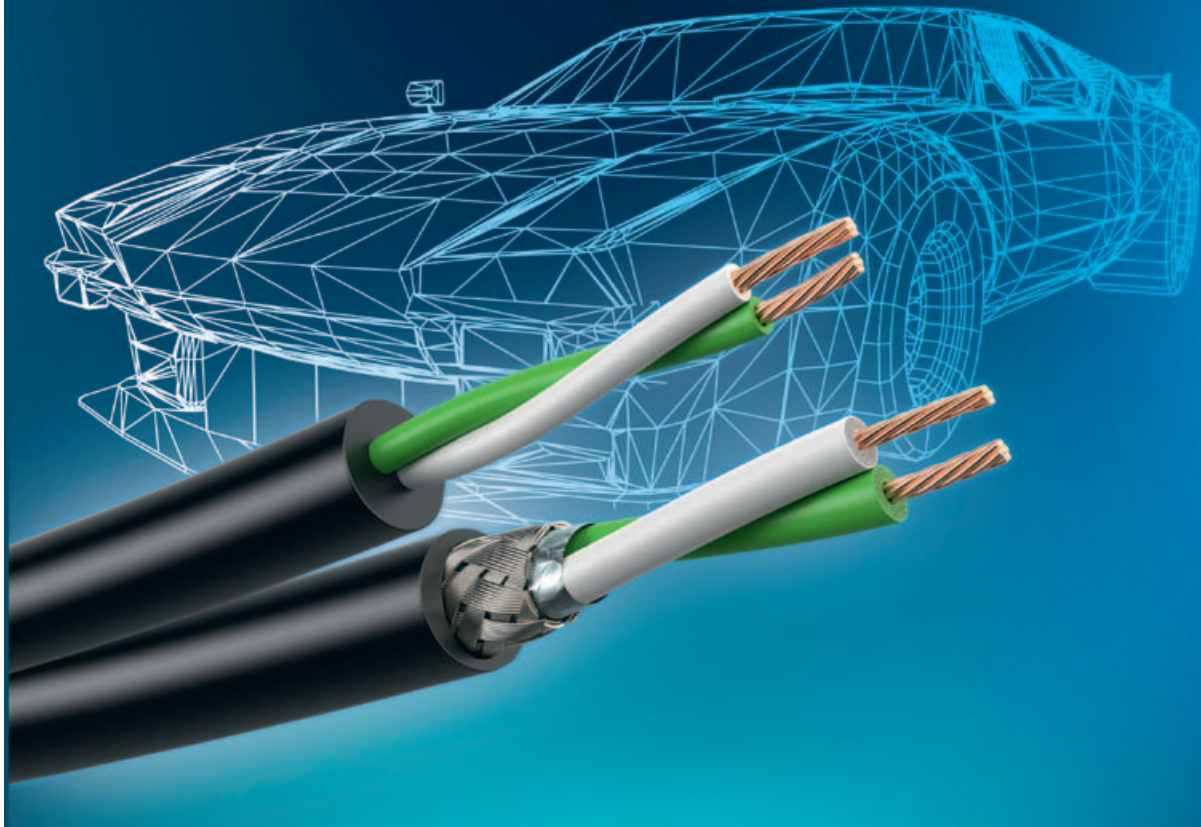


Bild: Leoni, Shutterstock

Die Verwendung von qualitativ hochwertigen Kabeln ist eine notwendige, aber keine hinreichende Bedingung für die erfolgreiche Implementierung von Automotive Ethernet. So lassen sich damit zwar viele äußere Einflüsse in den Griff bekommen, doch es bleiben Risiken. Nur eine Betrachtung des Gesamtsystems stellt sicher, dass alle Vorgaben eingehalten werden.

Von Dr. Johannes Nachtrab

Der Standard 100BASE-T1 für Automotive Ethernet ermöglicht eine bidirektionale Datenübertragung mit 100 Mbit/s über eine einzelne, ungeschirmte Twisted-Pair-Leitung. Dieser Standard spezifiziert auch die technischen Anforderungen an die Verdrahtung zwischen zwei Steuergeräten mit Ethernet-Schnittstelle. Die Spezifikation erfolgt auf zwei Ebenen:

auf der Ebene einzelner Komponenten wie Leitung und Stecker (Standalone Communication Channel, SCC) sowie auf der Ebene des fertig konfektionierten Bordnetzelementes (Whole Communication Channel, WCC).

Zu den elektromagnetischen Wechselwirkungen eines Automotive-Ethernet-Systems mit seiner Umwelt (Environmental System, ES) gehören beispiels-

weise das Nebensprechen in mehrpaarigen Steckern oder in anderen Leitungen im selben Leitungsbündel. Die maximale Leitungslänge ist nicht streng limitiert – typisch für Automotive-Anwendungen sind Längen von 15 m.

Prüfvorschriften und weitere Vorgaben

Alle Meterware-bezogenen Messungen erfolgen weitestgehend nach ISO/IEC 11801 (Ausgabe 2). Die Prüflingslänge ist auf 10 m \pm 0,05 m und in Spezialfällen auf 25 m festgelegt. Der Prüfling wird auf einen leitfähigen, geerdeten Zylinder mit 10 mm dicker Isolationsschicht ($\epsilon_r \leq 1,4$) im lateralen Abstand von 30 mm aufgewickelt. Alle Paare der Leitung müssen an die charakteristische Impedanz angepasst werden: $Z_{diff} = 100 \Omega$ und $Z_{com} = 200 \Omega$. Für mehrpaarige Leitungen ist eine Terminierungsvor-

Testparameter	Grenzwert
Wellenwiderstand (CIDM)	100 $\Omega \pm 10 \%$
Einfügedämpfung (IL)	Maximallänge des SCC = 15 m
	1 MHz: 0,06 dB/m
	10 MHz: 0,16 dB/m
	33 MHz: 0,31 dB/m
	66 MHz: 0,45 dB/m
	Maximallänge des SCC = 10 m
1 MHz: 0,09 dB/m	
10 MHz: 0,24 dB/m	
33 MHz: 0,46 dB/m	
66 MHz: 0,68 dB/m	
Rückflusdämpfung (RL)	1 MHz: 20,0 dB 20 MHz: 20,0 dB 66 MHz: 14,8 dB
Modenkonzensionsdämpfung (LCL/LCTL)	1 MHz: 46,0 dB
	50 MHz: 46,0 dB
	200 MHz: 34,0 dB

Elektrische Anforderungen an einpaarige, Ethernet-taugliche Fahrzeugleitungen

schrift für alle Paare vorgesehen, die gerade nicht vermessen werden.

Durch die Angabe von SCC-Eigenschaften ist eine Prüfung der Eigenschaften auf Komponenten-Ebene möglich. Für Leitungen sind die Eigenschaften Wellenwiderstand, Einfügedämpfung, Rückflusdämpfung und Modenkonzensionsdämpfung im Frequenzbereich 1 MHz bis 200 MHz festgelegt. Einzelheiten dazu sind in der **Tabelle** aufgeführt.

In ähnlicher Weise sind elektrische Anforderungen für zweipolige Stecker definiert. Ausgehend von den in der Tabelle dargestellten Komponentengrenzwerten gibt die Spezifikation die Anforderungen an die vollständige Verdrahtung an. Die Grenzwerte für die Einfügedämpfung ergeben sich dabei aus den Grenzwerten für die Leitung unter Annahme der Verwendung von vier Steckern im Bordnetzelement (Assembly).

Schließlich behandeln die ES-Anforderungen Aspekte, die mit dem Betrieb des Systems in der elektrischen Umgebung zu tun haben. Typisches Beispiel ist die gegenseitige Beeinflussung zweier Datenübertragungen, die entweder in einer mehrpaarigen Leitung bzw. einem Stecker oder zwischen zwei ein- oder mehrpaarigen Leitungen im selben Leitungsbündel auftreten können. Für die reine Meterware ist hier keine Anforderung definiert. Lediglich für die Stecker und das fertige Assembly sind weitere Werte (Cross Talk) spezifiziert.

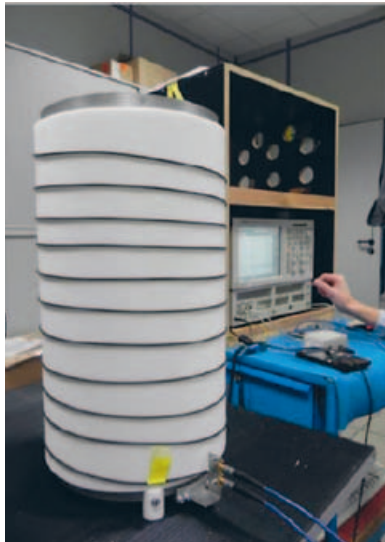


Bild 1. Versuchsaufbau zur Ermittlung des Einflusses von Umgebungsbedingungen auf Ethernet-Leitungen. (Bilder: Leoni)

Randbedingungen für die Leitungsentwicklung

Aufgabe eines Leitungsherstellers ist es, sowohl die Hochfrequenzeigenschaften

der Meterware als auch übliche Leistungsanforderungen zur Konstruktion einer geeigneten Leitung heranzuziehen. Zu den wichtigsten Randbedingungen für die Leitungsentwicklung gehören die folgenden Punkte:

→ **Wellenwiderstand, Einfügedämpfung und Rückflusdämpfung** sind in erster Linie von Material- und Geometrievorgaben sowie von Fertigungstoleranzen abhängig.

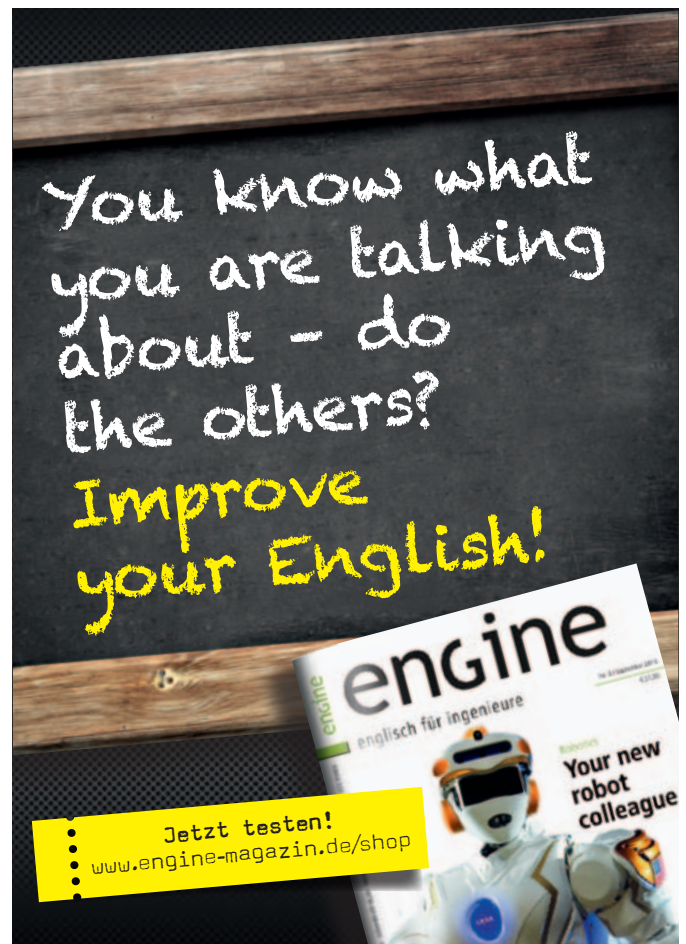
→ **Modenkonzensionsdämpfungen** werden zusätzlich noch vom Grad der Symmetrie des Aufbaus – bedingt sowohl durch Design als auch durch Fertigung – beeinflusst.

→ Das vom Konfektionär nach den skizzierten Anforderungen ausgewählte **Steckerkonzept** hat Auswirkungen sowohl auf geometrische als auch mechanische Eigenschaften der Leitung.

→ Die **Verbausituation** wirkt sich auf thermische, mechanische und chemische Anforderungen aus, beispielsweise hinsichtlich der Temperatur- oder Chemikalienbeständigkeit sowie auf die Forderung nach Flammwidrigkeit, beispielsweise nach ISO 14572.

→ Die **Bordnetzarchitektur** bestimmt die notwendigen Link-Längen und schränkt dadurch die möglichen Litzenquerschnitte ein.

→ Kundenseitige **EMV-Anforderungen** machen gegebenenfalls ein Schirmkonzept aus Folien- und/oder Geflechschirm erforderlich und erlauben als Konsequenz nur noch eine Spezifikation der Leitungen in Anlehnung an die OPEN-Alliance-Spezifikation („ungeschirmte zweiadrigte Leitungen“).



→ Für den Einbau von Ethernet-Leitungen in **hybride Leitungsaufbauten** gibt es maßgeschneiderte Spezialanforderungen.

Diese zahlreichen Anforderungen und Randbedingungen machen deutlich, wie komplex die Leitungsentwicklung ist.

Die Wirkung äußerer Einflüsse

Ein Teil der Attraktivität von Automotive Ethernet liegt in der Verwendung von möglichst einfachen und damit kostengünstigen Komponenten. Für die Meterware bedeutet das, dass sich idealerweise zweiadrige Leitungen ohne Mantel und ohne Schirm einsetzen lassen. Allerdings können äußere Einflüsse die Eigenschaften der Leitungen verändern – gerade bei nicht ummantelten Leitungen.

Belegen lässt sich dies durch einen Laborversuch (**Bild 1**): Die Einfügedämpfung einer ungemantelten Leitung wird im trockenen und zweimal mit zeitlichem Versatz im benetzten Zustand betrachtet (**Bild 2**). Das Ergebnis zeigt, dass diese im automobilen Umfeld typische Einwirkung von Feuchtigkeit die Einfügedämpfung der Leitung stark beeinträchtigt. Im Falle einer Mantelleitung ergibt sich bei diesem Experiment keine vergleichbare Auswirkung auf die Einfügedämpfung. Um die für die Systemfunktion wichtigen HF-Eigenschaften auch in widrigen Umgebungsbedingungen sicherstellen zu können, empfiehlt Leoni für Automotive-Ethernet-Anwendungen den Einsatz von Mantelleitungen. Leonis ungeschirmte Mantelleitungen halten die von der OPEN Alliance vorgeschlagenen HF-Eigenschaften ein.

Mit Werkstoffen Reserven schaffen

Bei der Werkstoffauswahl gibt es drei wichtige Vorgaben: möglichst temperaturunabhängige HF-Eigenschaften, eine hohe thermische Stabilität sowie die vom Anwender geforderte Flammwidrigkeit. Besonders das Zusammenspiel der dielektrischen Eigenschaften des Werkstoffes und der Flammwidrigkeit ist eine technische Herausforderung. Viele Flammschutzsysteme beruhen auf polaren Substanzen, die sich nachteilig auf die anspruchsvollen Hochfrequenzeigenschaften auswirken.

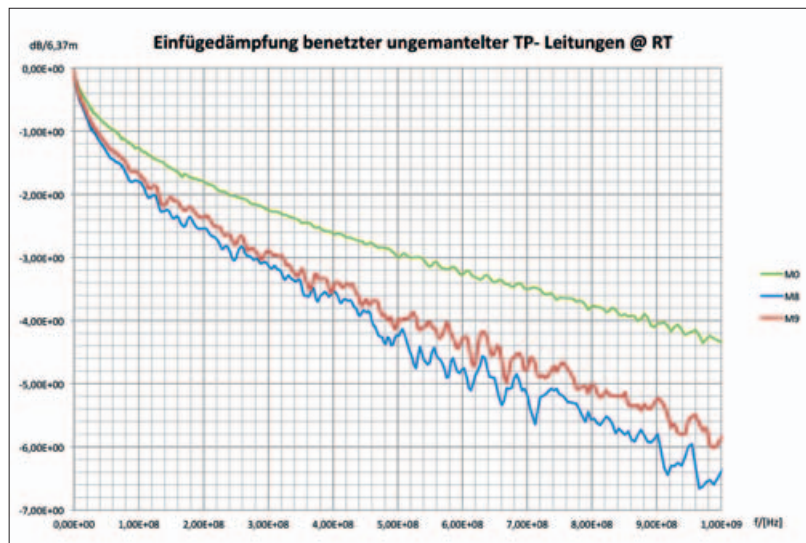


Bild 2. Einfügedämpfung einer ungemantelten Twisted-Pair-Leitung bei Raumtemperatur (RT). Die Abkürzungen M0, M8 und M9 bezeichnen Prüflinge mit unterschiedlichen Alterungszuständen, wobei sich M0 im Neuzustand befindet. Die Prüflinge M8 und M9 sind mit Feuchtigkeit benetzt, M0 ist trocken.

Durch den im Basiszustand nicht vorhandenen Geflechtschirm fehlt zudem der Effekt der Temperaturenniedrigung durch die hohe Wärmeleitfähigkeit des Kupfers, was die Herausforderung erhöht. Leoni hat dieses Problem durch die hausinterne Entwicklung eines geeigneten Werkstoffes gelöst, der zur Extrusion von Ethernet-tauglichen Adern verwendet wird.

Wie die Messwerte solcher Leitungen normkonform ermittelt aussehen, ist in **Bild 3** am Beispiel der Modenkonzessionsdämpfung dargestellt. Die Messresultate zeigen, dass die vorgegebenen Grenzwerte deutlich unterschritten

werden. Die Leitungen können folglich auch unter anderen Bedingungen wie erhöhter Temperatur, Feuchtigkeit oder dynamischer Belastung erfolgreich eingesetzt werden. Beispielhaft für eine ausreichende Reserve ist die Darstellung der Rückflussdämpfung einer Leitung nach Lagerung bei 150 °C für 240 h (typische, normierte Lagerung zur Simulation der thermischen Degradation über der Lebensdauer), gemessen bei 125 °C, in **Bild 4**. Vergleichbare Ergebnisse lassen sich auch bei Leitungen mit anderen Querschnitten oder Leitermaterialien (meist Cu-ETP oder Cu-Legierungen) erzielen.

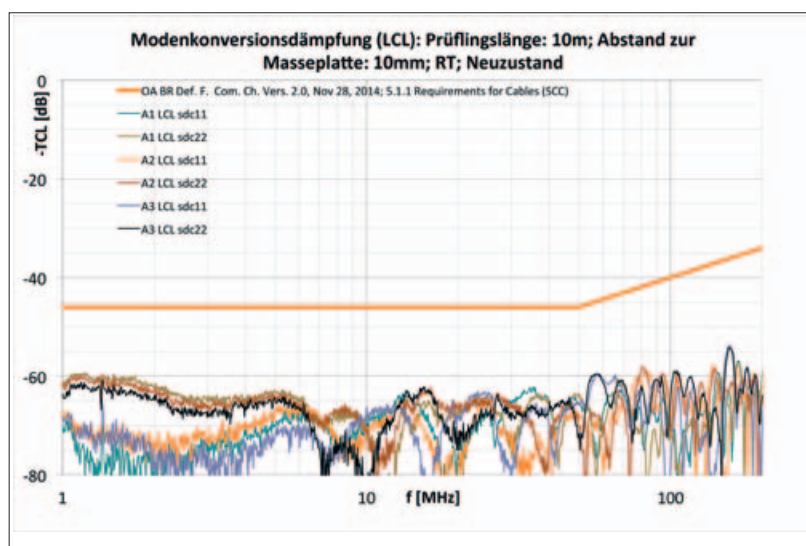


Bild 3. Modenkonzessionsdämpfung (LCL) einer Ethernet-Leitung am Beispiel Leoni Dacar 547 mit Litzen aus der üblichen Kupferzinnlegierung CuSn0₃ nach ISO 13388. Die Messresultate zeigen, dass die vorgegebenen Grenzwerte deutlich unterschritten werden. Um die Streuung der Messwerte zu verdeutlichen, wurden mehrere Prüflinge (A1, A2 und A3) getestet.

Umgang mit Störeinflüssen

In EMV-kritischen Bauräumen – etwa in der Umgebung von Antennen – ist die Störunterdrückung durch Leitungssymmetrie möglicherweise nicht ausreichend. Aus Sicht eines Kabelherstellers gibt es zwei Möglichkeiten, mit diesen Störeinflüssen umzugehen: Eine Option ist die Anpassung der Architektur des Kabelsatzes, sodass die Leitungen ausreichend weit von solchen Störern entfernt liegen. Eine andere Möglichkeit besteht darin, das oben beschriebene Leitungskonzept durch Schirmelemente (Folie mit oder ohne Beilitze zur vereinfachten Kontaktierung oder Geflechschirm) zu erweitern.

Adern zueinander und insbesondere der Merkmale Wellenwiderstand und Modenkonzersion. Die spezifizierten Eigenschaften gelten für die Meterware. Prozessseitige Anforderungen, wie die zum Anschlagen der Adern an die Kontakte notwendige Entdrillung der Adern, können zu einer Veränderung der Meterware ähnlich dem vorher beschriebenen Fehlerbild führen.

Auch andere äußere Einwirkungen haben Einfluss auf die Übertragungseigenschaften. Interne Untersuchungen bei Leoni haben zu folgender Erkenntnis geführt: Bei falsch eingesetzten Befestigungselementen (etwa bei zu fester Bandagierung), Schmutz, Staub oder Feuchtigkeit insbesondere im Aderbereich oder ruckartigem Ziehen an der

rate – von 100 Mbit/s auf 1 Gbit/s. Vermutlich werden hier Frequenzen bis in eine Größenordnung von 1 GHz genutzt. Gigabit-Ethernet wird daher definitiv dem Kanal als solchem mehr abverlangt als der 100-Mbit/s-Standard. Dies wird sich sicherlich zu einer erweiterten Prozesskontrolle bei der Herstellung der Meterware führen. Folglich ist der gegenüber dem 100-Mbit/s-Ethernet deutlich vergrößerte Frequenzbereich eine neue Herausforderung bei der gegenseitigen Beeinflussung zweier über eine kritische Länge hinweg nahe nebeneinander laufender Leitungen.

Heikel wird es insbesondere innerhalb eines Leitungsbündels werden, bei dem mehrere Einzelstränge im ungünstigsten Fall mit verschwindendem Abstand nebeneinander verlaufen. Mit zunehmender Frequenz steigt das sogenannte Fremdnübersprechen (Alien Crosstalk). Bei konstanter differentieller Sendeleistung in Leitung 1 nimmt der eingekoppelte differentielle Störpegel in Leitung 2 zu. Man unterscheidet dabei zwischen Nahfremdnübersprechen (Alien-NEXT: die Anschlüsse der störenden und der gestörten Leitung liegen auf derselben Seite des Leitungsbündels) und Fernfremdnübersprechen (Alien-FEXT: die Anschlüsse der störenden und der gestörten Leitung liegen auf entgegengesetzten Seiten des Leitungsbündels).

Die für die Gigabit-Ethernet-Anwendung diskutierten Übertragungsfrequenzen können hier bereits zu unzulässig hohen Fremdnübersprechwerten führen. Derzeit steckt Leoni mitten in der Entwicklung von passenden Lösungen für die wachsenden Herausforderungen und untersucht mechanische sowie elektrische Strategien, die dann für den Großserieneinsatz bewertet werden. *ku*

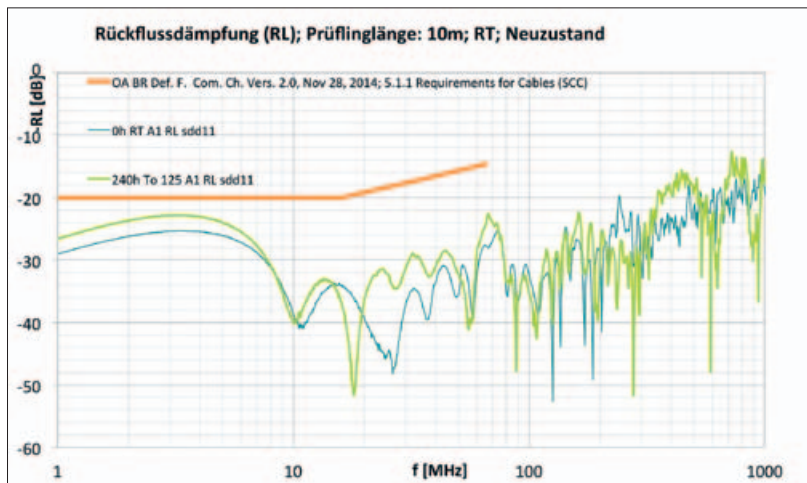


Bild 4. Rückflussdämpfung der gemantelten Ethernet-Leitung Leoni Dacar 547 vor (0 h) und nach einer Kurzzeitalterung (240 h).

Die Einführung eines solchen Schirmes führt jedoch zu einer veränderten Symmetriesituation. Somit ist die Einhaltung der für die ungeschirmten Leitungen spezifizierten Modenkonzersionsparameter kaum möglich. Es empfiehlt sich, die Notwendigkeit der Spezifizierung dieser Parameter für geschirmte Leitungskonzepte zwischen allen beteiligten Partnern abzustimmen. Erfahrungswerte von Kabelherstellern und die OPEN-Alliance-Spezifikationen weisen darauf hin, dass es sinnvoll ist, auch die Auswirkungen des Konfektionsprozesses auf die Hochfrequenzeigenschaften des Endprodukts zu bewerten. So können eventuelle ungünstig angreifende Zugbelastungen die Leitungseigenschaften signifikant verändern.

Der Fehlermechanismus beruht dabei auf einer Veränderung der Lage der

Leitung können sich die konstruktiven und damit elektrischen Eigenschaften der Komponente verändern.

Zusammenfassend ergibt sich daraus, dass eine „gute Meterware“ zwar eine notwendige, aber keinesfalls eine hinreichende Bedingung für den Einsatz als Automotive Ethernet Link ist. An dieser Stelle setzt die OPEN-Spezifikation an und legt für andere Komponenten sowie den Gesamt-Link Vorgabewerte wie den Whole Communication Channel fest.

Herausforderungen Gigabit-Ethernet

Bereits heute arbeiten die Ingenieure an der Entwicklung des Nachfolgestandards unter dem Arbeitstitel „Gigabit-Ethernet“. Ziel ist bei einer möglichst geringfügigen Änderung der Komponenten eine Verzehnfachung der Daten-



Dr. Johannes Nachtrab

hat nach einem Physikstudium und Promotion in Erlangen bereits mehrere Stationen in der Leoni-Gruppe durchlaufen und verantwortet derzeit das Produktmanagement von Automotive-Datenleitungen in der Business Unit Automotive Special Cables. Neben Ethernet- und Bussystemleitungen gehören LVDS-Leitungen zu seinem Portfoliobereich.