

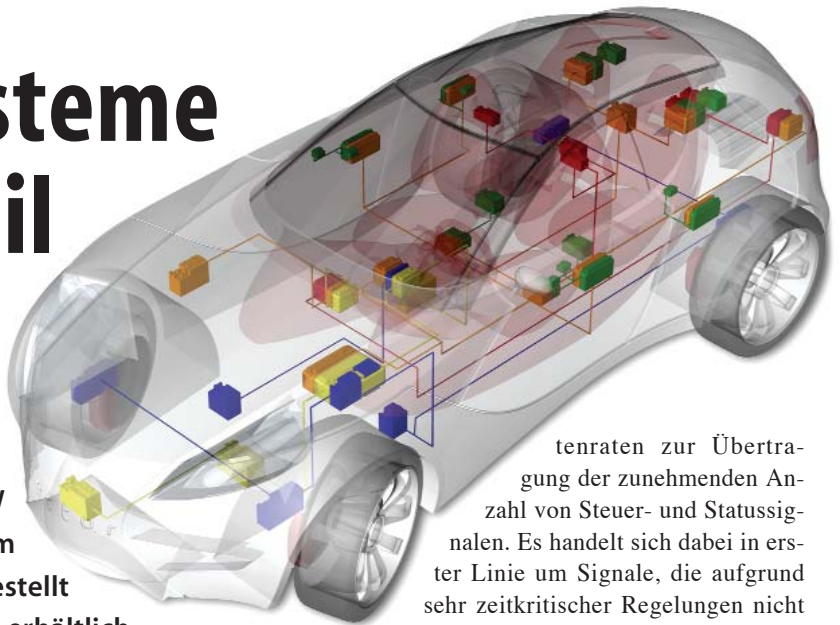
# Serielle Bussysteme im Automobil

## Teil 4: FlexRay für den Datenaustausch in sicherheitskritischen Anwendungen

FlexRay geht zum ersten Mal mit dem BMW X5 in Serie. Er wurde im August 2006 auf dem Pariser Autosalon der Öffentlichkeit vorgestellt und ist ab März dieses Jahres in Deutschland erhältlich.

FlexRay sorgt dabei innerhalb des aktiven Fahrwerksystems für die sichere und zuverlässige Datenübertragung zwischen dem zentralen Steuergerät und den vier jeweils einem Stoßdämpfer zugeordneten Satellitensteuergeräte. Der Beitrag zeichnet den Weg von FlexRay ins Automobil nach und erläutert die wichtigsten Prinzipien des FlexRay-Bussystems.

Von Eugen Mayer



tenraten zur Übertragung der zunehmenden Anzahl von Steuer- und Statussignalen. Es handelt sich dabei in erster Linie um Signale, die aufgrund sehr zeitkritischer Regelungen nicht nur äußerst schnell, sondern auch absolut deterministisch zu übertragen sind. Folglich wächst die Bedeutung von Kommunikationssystemen im Automobil, die schnelle und deterministische Datenübertragung garantieren. Wegen des potentiellen Einsatzes von By-Wire-Systemen sind sie zudem mit fehlertoleranten Strukturen und Mechanismen auszuliegen. Denn so vielfältig das Potential und die Vorteile von By-Wire-Systemen durch neue konstruktive Freiheiten, vereinfachte Montage oder einer Personalisierung des Fahrzeugs auch sein mögen, sie erhöhen die Anforderungen an die Datenübertragung in erheblichem Maße, weil sie zur Klasse der Fail-Operational-Systeme gehören. Diese müssen auch im Falle eines auftretenden Fehlers noch einwandfrei funktionieren.

Diesen Anforderungen wird CAN mit seinem ereignis- und prioritätengesteuerten Buszugriff der durch physikalische Randbedingungen im Automobil hervorgerufenen beschränkten Übertragungsrate von 500 Kbit/s sowie dem Mangel an fehlertoleranten Strukturen und Mechanismen nicht gerecht [3].

Laut Statistischem Bundesamt [1] war das Fahren auf Deutschlands Straßen noch nie so sicher wie im Jahr 2005. Bei beträchtlichem Zuwachs des Kraftfahrzeugbestandes ereigneten sich im Vergleich zum Vorjahr fast ein Prozent weniger Unfälle mit Personenschäden (336 619). Stark zurückgegangen ist dabei die Zahl der im Straßenverkehr Getöteten (5361, -8,2 %), Schwerverletzten (76 952, -4,6 %) und Leichtverletzten (356 491, -1 %). 2006 setzte sich dieser Trend fort: Zwischen Januar und August wurden 3260 Verkehrsteilnehmer getötet, was einem Rückgang um 7,8 % im Vergleich zum Vorjahreszeitraum entspricht. Die Zahl der Verletzten sank im gleichen Zeitraum um 5,8 %.

Entscheidend zur Reduzierung der Unfälle und Minderung der Unfallfolgen tragen aktive Sicherheitssysteme beziehungsweise Assistenzsysteme bei, die den Fahrer beim Führen seines Fahrzeugs unterstützen. Eine Studienamhafter Fahrzeughersteller zeigt zum Beispiel, dass ESP die Anzahl der Schleuderunfälle um bis zu 80 % verringert [2]. Einen ebenso wichtigen

Beitrag zur Minderung der Unfallfolgen leisten die immer sichereren Fahrgastzellen und optimierten Rückhaltesysteme.

Mit dem Ziel, bis 2010 die Zahl der Verkehrstoten zu halbieren, forciert die Kfz-Branche vor allem die Weiter- und Neuentwicklung von innovativen aktiven Sicherheits- und Fahrerassistenzsystemen. Da es in diesem Zusammenhang nicht nur um das Informieren und Anweisen geht, sondern vielmehr um korrigierendes Eingreifen und Übernehmen von Fahraufgaben, kommt man ohne elektronische Schnittstellen zum Fahrwerk und zum Antrieb nicht mehr aus. Großes Potential wird der Kombination aus Brake-by-Wire- und Steer-by-Wire-Systemen zugeschrieben.

### ■ Erhöhte Anforderungen durch steigende Vernetzung

Die Realisierung von immer anspruchsvolleren Sicherheits- und Fahrerassistenzfunktionen geht einher mit einer immer intensiveren Kopplung der elektronischen Steuergeräte und erfordert deshalb sehr hohe Da-

### ■ FlexRay beantwortet die Frage nach Determinismus und Fehlertoleranz

Die Gewissheit, dass CAN den wachsenden Anforderungen an die Datenübertragung im Automobil mittelfristig kaum mehr gerecht werden kann, führte zur Entwicklung mehrerer de-

terministischer und fehlertoleranter serieller Bussysteme mit höheren Datenraten. Dazu gehören zum Beispiel TTP (Time Triggered Protocol) [4], Byteflight [5] oder auch TTCAN (Time Triggered CAN) [6].

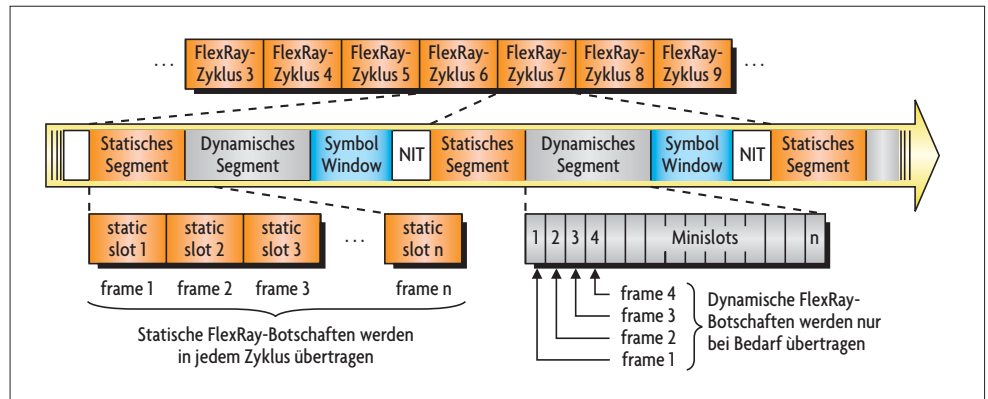
Ein wesentlicher Grund für den Erfolg von FlexRay war die Gründung des FlexRay-Konsortiums [8], in dessen Rahmen sich im Jahre 2000 die beiden Kfz-Hersteller DaimlerChrysler und BMW sowie die beiden Chiphersteller Motorola und Philips zusammenschlossen. Basierend auf dem ursprünglich von BMW entwickelten Byteflight-Bussystem schuf das FlexRay-Konsortium den herstellerübergreifenden, deterministischen und fehlertoleranten Kommunikationsstandard FlexRay mit einer Datenrate von 10 Mbit/s für äußerst sicherheits- und zeitkritische Anwendungen im Automobil.

Heute setzt sich das FlexRay-Konsortium aus sieben Core-Partnern zusammen: BMW, Bosch, DaimlerChrysler, Freescale, General Motors, Philips und Volkswagen. Nach und nach schloss sich dem FlexRay-Konsortium eine Reihe von Premium Associate Members an, wie beispielsweise Vector Informatik [7] und Associate Members.

Einen wichtigen Beitrag zum Erfolg von FlexRay leistet die detaillierte Dokumentation der FlexRay-Spezifikation. Die beiden wichtigsten Spezifikationen, das Kommunikationsprotokoll und der Physical Layer, liegen im Moment in der Version 2.1 vor. Diese und weitere Spezifikationen der FlexRay-Bustechnologie stehen auf der Homepage des FlexRay-Konsortiums zum Abruf bereit [8].

## ■ Definierter Kommunikationszyklus verbietet unkontrollierten Buszugriff

Ebenso wie bei der Datenkommunikation in einem CAN-Cluster liegt auch der Datenkommunikation in einem FlexRay-Cluster eine Multi-Master-Kommunikationsstruktur zugrunde. Allerdings dürfen die FlexRay-Knoten nicht wie bei CAN im Zuge von anwendungsbezogenen Ereignissen unkontrolliert auf den Bus zugreifen. Sie müssen sich vielmehr an einen exakt



**Bild 1.** Die Übertragung von Nachrichten kann bei FlexRay im statischen oder dynamischen Segment erfolgen. Während des „Symbol Window“ wird die Funktion des Buswächters überprüft; die „Network Idle Time“ (NIT) wird zur Uhrensynchronisation genutzt. (Quelle aller Bilder: Vector Informatik)

definierten Kommunikationszyklus halten, der jeder FlexRay-Botschaft ein bestimmter Zeitschlitz zuordnet (Time Division Multiple Access, TDMA) und dadurch die Sendezeitpunkte sämtlicher FlexRay-Botschaften vorgibt (Bild 1).

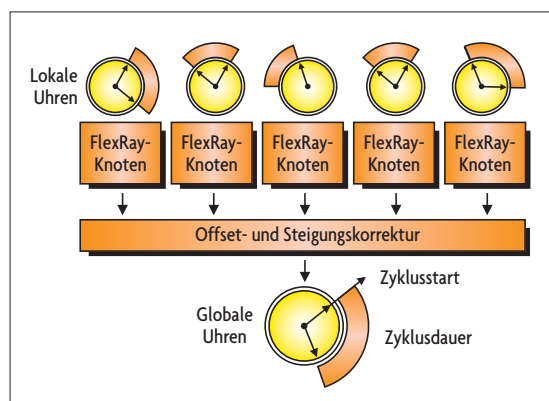
Die zeitgesteuerte Kommunikation sorgt nicht nur für deterministische Datenkommunikation, sondern auch dafür, dass alle Knoten eines FlexRay-Clusters unabhängig voneinander entwickelt und getestet werden können. Zudem wirkt sich das Entfernen oder die Integration von FlexRay-Knoten in ein bestehendes Cluster nicht auf den Kommunikationsablauf aus, was der in der Automobilentwicklung häufig propagierten Wiederverwendung entgegenkommt.

Dem Paradigma zeitgesteuerter Kommunikationsarchitekturen folgend, besteht die grundlegende Logik der FlexRay-Kommunikation in der Auslösung aller Systemaktivitäten

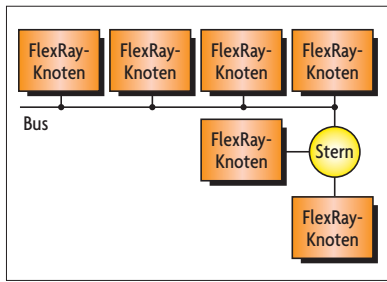
durch das Erreichen bestimmter Punkte im Zeitablauf. Den dazu erforderlichen netzwerkweiten Gleichlauf der FlexRay-Knoten wird mittels verteiltem, fehlertolerantem Uhrensynchronisationsmechanismus sichergestellt: Alle FlexRay-Knoten korrigieren mittels regelmäßig übertragener Synchronisationsbotschaften nicht nur laufend den Beginn (Offsetkorrektur), sondern auch die Dauer (Steigungskorrektur) der Kommunikationszyklen (Bild 2). Dadurch erhöht sich sowohl die Bandbreiteneffizienz als auch die Robustheit der Synchronisation.

Der FlexRay-Kommunikation kann entweder ein elektrischer oder ein optischer Physical Layer zugrunde gelegt werden. Für die elektrische Signalübertragung spricht die Einfachheit, woraus sich Kostenvorteile ergeben. Die vergleichsweise kostenintensive optische Signalübertragung zeichnet sich durch eine im Vergleich zur elektrischen Signalübertragung deutlich bessere elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) aus.

Die FlexRay-Kommunikation ist nicht an eine bestimmte Topologie gebunden. Eine einfache passive Busstruktur ist genauso möglich wie eine aktive Stern- oder eine Kombination aus beidem (Bild 3). Die Vorteile der aktiven Stern- oder einer Kombination aus beidem bestehen primär in der Mög-



**Bild 2.** Die FlexRay-Knoten führen während des Kommunikationszyklus eine Steigungskorrektur durch, eine Offsetkorrektur erfolgt bei Bedarf am Ende der „Network Idle Time“.



**Bild 3.** FlexRay erlaubt Bus- und Sternstrukturen, oder wie in diesem Beispiel eine kombinierte Topologie aus passivem Bus und aktivem Stern.

lichkeit zum Abschalten von fehlerhaften Kommunikationszweigen beziehungsweise von FlexRay-Knoten sowie im Aufbau größerer Cluster mit idealen Busabschlüssen, wenn die physikalische Signalübertragung elektrisch erfolgt.

Zur Minimierung des Ausfallrisiko sieht FlexRay die redundante Auslegung des Kommunikationskanals vor (Bild 4). Dieser redundante Kommunikationskanal kann allerdings auch zur Erhöhung der Datenrate auf bis zu 20 Mbit/s herangezogen werden. Die Wahl zwischen Fehlertoleranz und erhöhter Übertragungsrate lässt sich für jede einzelne FlexRay-Botschaft treffen.

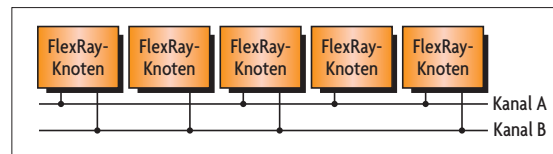
Schließlich sorgt ein unabhängiger Kontrollmechanismus (Buswächter – Bus Guardian) dafür, dass ein FlexRay-Knoten nur dann Zugang zum Bus erhält, wenn er laut Kommunikationszyklus an der Reihe ist. Dadurch wird die Busmonopolisierung durch einen defekten FlexRay-Knoten (Babbling Idiot) verhindert.

**Statisches Segment überträgt echtzeit-relevante Daten**

Jeder Kommunikationszyklus ist gleich lang und prinzipiell gegliedert

in ein statisches und ein dynamisches Zeitsegment (Bild 1). Von zentraler Bedeutung ist das statische Segment, mit dem jeder Kommunikationszyklus beginnt. Es ist in eine frei definierbare Anzahl von maximal 1023 gleich langen statischen Zeitschlitz (static slots) unterteilt.

Jedem statischen Zeitschlitz ist eine FlexRay-Botschaft zugeordnet, die von einem FlexRay-Knoten übertragen wird. Die Zuordnung von statischem Zeitschlitz, FlexRay-Botschaft und FlexRay-Knoten erfolgt mittels Slotnummer, Botschaftskennung (Identifizier, ID) und dem Wert des auf jedem FlexRay-Knoten implementierten Slot-Counters. Damit pro Zyklus alle FlexRay-Botschaften in der richtigen Reihenfolge zeitlich korrekt übertragen werden, werden die Slot-Counter zu Beginn eines jeden statischen Zeitschlitzes auf allen FlexRay-Knoten



**Bild 4.** Um das Ausfallrisiko zu minimieren, arbeitet FlexRay wahlweise mit zwei getrennten Kommunikationskanälen.

synchron inkrementiert. Wegen der garantierten äquidistanten und somit deterministischen Datenübertragung ist das statische Segment prädestiniert für die Übertragung von echtzeit-relevanten Botschaften.

Im Anschluss an das statische Segment folgt optional das je Kommunikationszyklus gleich lange dynamische Segment. Auch dieses Segment ist in Zeitschlitzes gegliedert, aber nicht in statische Zeitschlitzes, sondern in Minislots (Bild 1). Die Kommunikation im dynamischen Segment (Minislottung) basiert ebenfalls auf Zuord-

nungen und dem synchronen Inkrementieren der Slot-Counter.

Allerdings werden die den Minislots zugewiesenen FlexRay-Botschaften nicht zwangsläufig in jedem Kommunikationszyklus übertragen, sondern lediglich bei Bedarf. Wenn kein Bedarf vorliegt, werden die Slot-Counter nach der definierten Zeit eines Minislots inkrementiert. Bei der Übertragung einer dynamischen FlexRay-Botschaft verzögert sich die Inkrementierung der Slot-Counter um die Zeit der Botschaftsübertragung (Bild 5).

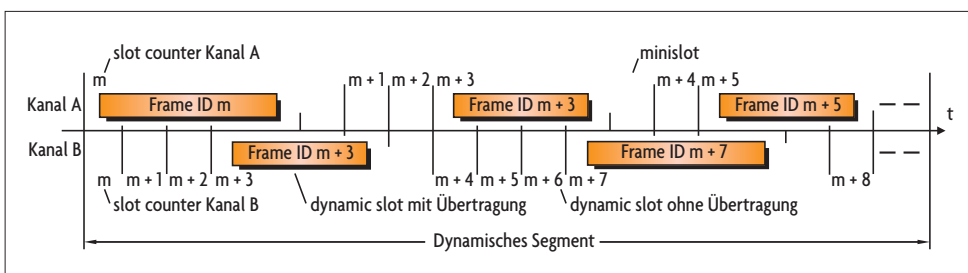
Die Zuordnung einer dynamischen FlexRay-Botschaft zu einem Minislots legt implizit die Priorität der FlexRay-Botschaft fest: Je niedriger die Nummer des Minislots, desto höher ist die Priorität der dynamischen FlexRay-Botschaft, dementsprechend früher erfolgt die Übertragung und folglich ist vor dem Hintergrund eines begrenzten

dynamischen Zeitsegments auch die Übertragungswahrscheinlichkeit höher. Diejenige dynamische FlexRay-Botschaft, die dem ersten Minislots zugeordnet ist, wird bei Bedarf auf

jeden Fall übertragen, wenn man von einem ausreichend langen dynamischen Zeitsegment ausgeht.

Beim Kommunikationsdesign muss man sicherstellen, dass auch die dynamische FlexRay-Botschaft mit der niedrigsten Priorität übertragen werden kann – zumindest, wenn sonst kein anderer Bedarf mit höherer Priorität vorliegt. Der Designer eines FlexRay-Clusters hat auch darauf zu achten, dass die Übertragung der längsten dynamischen FlexRay-Botschaft möglich ist.

Der Kommunikationszyklus wird durch zwei weitere Zeitsegmente komplettiert (Bild 1). Das Segment „Symbol Window“ dient zur Überprüfung der Funktion des Buswächters und das Zeitsegment „Network Idle Time“ (NIT) schließt den Kommunikationszyklus ab. Während der NIT berechnen die FlexRay-Knoten die zur Synchronisation der lokalen Uhren erforderlichen Korrekturfaktoren. Am Ende der NIT wird im Bedarfsfall die Offsetkorrektur durchgeführt (die Stei-



**Bild 5.** Im dynamischen Segment arbeitet FlexRay mit Minislots. Dabei ist jedem Minislots genau eine Botschaft zugewiesen, die jedoch nicht zwangsläufig in jedem Kommunikationszyklus übertragen werden muss.

gungskorrektur findet stets über den ganzen Kommunikationszyklus verteilt statt). Eine Datenübertragung findet während der NIT nicht statt.

### ■ Sichere Datenübertragung durch CRC

Die Übertragung von Signalen in einem FlexRay-Cluster erfolgt mittels der exakt definierten FlexRay-Botschaft, wobei es zwischen der im statischen Segment und der im dynamischen Segment übertragenen FlexRay-

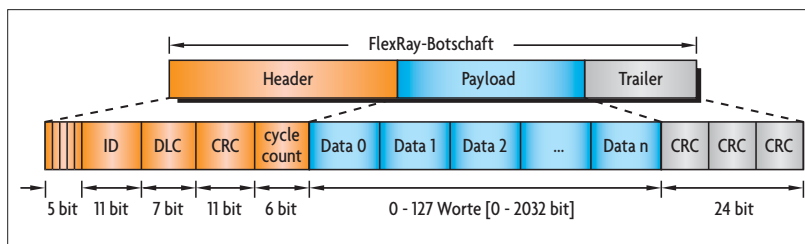
### ■ Durchgängige Lösung für Entwicklung, Simulation und Verifikation

Bereits im Jahr 2001 bot die Vector Informatik die erste Lösung für die Entwicklung von FlexRay-Systemen an. In der Zwischenzeit erhält der Entwickler ein umfassendes Portfolio [9]. Dazu gehören Werkzeuge für Design, Entwicklung, Simulation, Analyse, Test und Kalibrierung von Steuergeräten und verteilten Netzwerken. Mit dem DaVinci Network Designer

sende Businterfaces für die USB-, PCI- und PCMCIA-Schnittstelle eines PC oder Notebooks.

Das notwendige Basiswissen, um sich mit den vielfältigen Entwicklungstätigkeiten rund um die Steuergerätekommunikation im Automobil vertraut zu machen, werden von der Vector Academy [10] im Rahmen von Seminaren zu CAN, LIN, FlexRay und MOST vermittelt.

Die bisher erschienenen drei Teile dieser Beitragsreihe befassten sich allgemein mit dem seriellen Datenaustausch im Automobil, mit CAN und LIN. Im letzten Beitrag wird auf die Übertragung von Multimediadaten mit MOST eingegangen. Der interessierte Leser findet zu den bereits veröffentlichten Themen auf der Internetseite der Vector Academy ergänzende und vertiefende Informationen, unter anderem in Form von E-Books. *sj*



! Bild 6. Eine FlexRay-Botschaft besteht aus Header, Payload und Trailer. Pro Nachricht können bis zu 254 Bytes an Nutzdaten übertragen werden.

Botschaft im Aufbau prinzipiell keinen Unterschied gibt. Sie setzt sich stets aus einem Header, der Payload und dem Trailer zusammen (Bild 6).

Der Header umfasst das 5 bit breite Statusfeld, die ID, die Payload Length und den Cycle Counter. Die Header-CRC (11 bit) sichert Teile des Statusfeldes, die ID und die Payload Length mit einer Hamming-Distanz von sechs. Die ID kennzeichnet die FlexRay-Botschaft und korrespondiert mit einem Zeitschlitz im statischen oder dynamischen Segment. Im dynamischen Segment entspricht die ID der Priorität der FlexRay-Botschaft. Die einzelnen Bits des Statusfeldes spezifizieren die FlexRay-Botschaft genauer. Beispielsweise zeigt das „Sync Frame Indicator Bit“ an, ob die FlexRay-Botschaft zur Uhrensynchronisation verwendet werden darf.

Im Anschluss an den Header folgt die Payload. Insgesamt lassen sich mit einer FlexRay-Botschaft bis zu 254 byte an Nutzdaten transportieren. Der Trailer umfasst die den Header und die Payload sichernde CRC (24 bit). Bei einer Payload bis zu 248 byte garantiert die CRC eine Hamming-Distanz von sechs, für eine größere Payload liegt die Hamming-Distanz bei vier [8].

FlexRay existiert eine Umgebung zum effizienten Design der Vernetzungsarchitektur und der Kommunikationsbeziehungen. Simulation, Analyse und Test von FlexRay-Systemen erfolgen mit CANoe.FlexRay, dessen Multi-bus-Konzept den gleichzeitigen Betrieb der Bussysteme FlexRay, CAN, LIN und MOST ermöglicht. Um das Systemverhalten des FlexRay-Netzwerkes bei Fehlern und Störungen genau zu untersuchen, generiert FRstress diese auf einem Kanal im FlexRay-Cluster.

Für den direkten Zugriff auf Steuergeräte-interne Größen benötigt der Entwickler ein spezielles Mess- und Verstellprotokoll: XCP on FlexRay. Im Rahmen der Entwicklung des aktiven Fahrwerksystems des neuen BMW X5 setzten die BMW-Ingenieure das Mess-, Kalibrier- und Diagnose-Tool CANape ein. Als XCP on FlexRay Master misst und verstellt CANape einzelne Steuergeräteparameter direkt über FlexRay. Neben Software entwickelt Vector Informatik auch Stacks für Steuergeräte. Mit den FlexRay-Softwarekomponenten lassen sich Applikationen unkompliziert an verschiedene Bus- oder Betriebssysteme anbinden. Für den hardwareseitigen Zugang zu FlexRay-Bussen sorgen pas-

### Literatur und Links

- [1] [www.destatis.de](http://www.destatis.de)
- [2] [www.bosch.de](http://www.bosch.de)
- [3] Mayer, E.: Datenkommunikation im Automobil. Teil 2: Sicherer Datenaustausch mit CAN. *Elektronik automotive* 2006, H. 8, S. 34ff.
- [4] [www.tttech.com](http://www.tttech.com)
- [5] [www.byteflight.com](http://www.byteflight.com)
- [6] [www.can-cia.org/can/ttcan](http://www.can-cia.org/can/ttcan)
- [7] [www.vector-informatik.de](http://www.vector-informatik.de)
- [8] [www.flexray.com](http://www.flexray.com)
- [9] [www.flexray-solutions.de](http://www.flexray-solutions.de)
- [10] [www.vector-academy.de](http://www.vector-academy.de)



**Dipl.-Ing., Dipl.-Techpaed. Eugen Mayer**

hat nach der Berufsausbildung zum Kommunikationselektroniker an der FH Ravensburg/Weingarten Elektronik und an der Universität Stuttgart Elektrotechnik und Berufspädagogik studiert. Er arbeitet seit 1999 bei der Vector Informatik und ist dort als Senior Trainer tätig. [eugen.mayer@vector-informatik.de](mailto:eugen.mayer@vector-informatik.de)