



TU Clausthal

Clausthal University of Technology

Elektronik und Datenkommunikation im Automobil

Harald Richter

IfI Technical Report Series

IfI-09-05



IfI



Department of Informatics
Clausthal University of Technology

Impressum

Publisher: Institut für Informatik, Technische Universität Clausthal
Julius-Albert Str. 4, 38678 Clausthal-Zellerfeld, Germany

Editor of the series: Jürgen Dix

Technical editor: Wojciech Jamroga

Contact: wjamroga@in.tu-clausthal.de

URL: <http://www.in.tu-clausthal.de/forschung/technical-reports/>

ISSN: 1860-8477

The IfI Review Board

Prof. Dr. Jürgen Dix (Theoretical Computer Science/Computational Intelligence)

Prof. Dr. Klaus Ecker (Applied Computer Science)

Prof. Dr. Barbara Hammer (Theoretical Foundations of Computer Science)

Prof. Dr. Sven Hartmann (Databases and Information Systems)

Prof. Dr. Kai Hormann (Computer Graphics)

Prof. Dr. Gerhard R. Joubert (Practical Computer Science)

apl. Prof. Dr. Günter Kemnitz (Hardware and Robotics)

Prof. Dr. Ingbert Kupka (Theoretical Computer Science)

Prof. Dr. Wilfried Lex (Mathematical Foundations of Computer Science)

Prof. Dr. Jörg Müller (Business Information Technology)

Prof. Dr. Niels Pinkwart (Business Information Technology)

Prof. Dr. Andreas Rausch (Software Systems Engineering)

apl. Prof. Dr. Matthias Reuter (Modeling and Simulation)

Prof. Dr. Harald Richter (Technical Computer Science)

Prof. Dr. Gabriel Zachmann (Computer Graphics)

Elektronik und Datenkommunikation im Automobil

Harald Richter

Institute of Computer Science,
Clausthal University of Technology, Germany
richter@in.tu-clausthal.de

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird zu Beginn der Stand der Technik bei der Automobilelektronik und deren Software beschrieben, mit Schwerpunkt auf der Datenübertragung im Auto-Inneren und im Hinblick auf die Ziele Innovation und Qualität. Danach folgt eine ausführliche Darstellung der Probleme, die sich durch den Einsatz von Feldbustechnologien, die zum Teil noch aus den 1980er-Jahren stammen, ergeben. Es wird ein worst-case und ein best case-Szenario entwickelt, wie es mit dem Kabelbaum im Auto in Zukunft weitergehen könnte.

1 Einleitung

Die IT-Technologie hat seit Beginn der 1980er Jahre einen starken Aufschwung im ehemals von der Mechanik dominierten Automobilbau durchlaufen und dabei die junge Disziplin der Mechatronik zum Leben erweckt und viele neue Funktionen für das Auto bereitgestellt, auf die heute niemand mehr verzichten will. Bekannte Beispiele dafür sind der Airbag, ABS/ESP, Motorsteuerung und Navigationssystem. Damit ist aber noch lange nicht das Ende der Innovation im Automobilbau erreicht. Vielmehr wird auch in Zukunft die Informations- und zunehmend auch die Kommunikationstechnologie der Motor für die KFZ-Industrie sein und durch derzeit noch unbekannt Funktionen neue Anreize für den Verkauf und den Wert eines Automobils erzielen. In allen Labors der Hersteller und Zulieferer wird an dieser Zukunft gearbeitet.

In diesem Beitrag wird anhand des Beispiels der Vernetzung von Elektronikkomponenten im Automobil erläutert, welche Fortschritte die IT auf diesem Gebiet durchlaufen hat, und wie die Qualität des Autos durch den Einsatz einer neuen Art der Datenkommunikation gesteigert werden kann. Die Datenkommunikation ist ein Beispiel für IT als Innovationsmotor im Automobil. Sie hat mittlerweile durch die stark gestiegene Zahl von Steuergeräten, Sensoren und Stellgliedern eine hohe Bedeutung erlangt.

Im heutigen Automobilbau hat die Qualität zwei Felder, auf denen sie sich manifestieren muss: Diese Felder sind Hardware und Software. Hinzu kommen zwei Aspekte, die in beiden Feldern auftreten und gleichermaßen beachtet werden müssen. Diese Aspekte sind Prozessqualität und Produktqualität. Im Hardware-Feld ist die Reduzierung der Zahl der Komponenten ein allseits anerkannter Faktor zur Qualitätsoptimierung und zur Kostenkontrolle. Je weniger Teile vorhanden sind, desto seltener kann das Produkt defekt werden. Nichtsdestotrotz geht der Trend seit Beginn des Automobilbaus in die gegenteilige Richtung: Autos bestehen aus immer mehr Teilen, so dass der notwendige Aufwand zur Qualitätssicherung bei gleichbleibender Qualität der Einzelteile aus Gründen der Fehlerausfallswahrscheinlichkeit immer mehr ansteigt.

Im Software-Bereich steigt i.d.R. mit dem Abstraktionsniveau, das dem Anwendungsprogrammierer vom Betriebssystem und der darüber liegenden Middleware angeboten wird, auch die Qualität der von ihm produzierten Software, da er sich um viel weniger Details kümmern muss. Leider ist auch hier festzustellen, dass das Abstraktionsniveau seit Aufkommen der ersten Motorsteuergeräte und damit der ersten Software im Automobil nur einmal einen Quantensprung im Abstraktionsgrad gemacht, nämlich beim Übergang von Assembler auf Hochsprachen-Programmierung. Seitdem steigt der Abstraktionsgrad nicht mehr in dem Maße an, wie die Komplexität der eingesetzten Software, d.h. die Programme werden immer größer. Bessere Tools zur Software-Entwicklung und -Wartung lindern nur diesen Umstand, beheben ihn aber nicht.

Hohe Prozessqualität bei der Autoproduktion entsteht unter anderem durch die Qualität, die beim Testen der eingebauten Komponenten und der damit hergestellten Fahrzeuge angewandt wird. Hohe Produktqualität hingegen erfordert unter anderem die Klärung der Frage, ob sich nach der Vernetzung einer Komponente mit anderen Komponenten nicht neue Fehler durch die Interaktion der Komponenten eingeschlichen haben, die außerhalb des Verbundes nicht zu Tage getreten wären. In einem Auto mit beispielsweise 90 Steuergeräten, wie es z.B. bei einem BMW der 7er-Serie in Maximalausstattung im Jahre 2009 der Fall sein kann, und seiner noch größeren Zahl von Sensoren und Aktoren, ist die Zahl der Kombinationsfehler, die potentiell auftreten können, bereits astronomisch hoch. Ein solches System kann nicht mehr vollständig getestet werden. Andere Teststrategien müssen angewandt werden, was auch der Fall ist.

In Zukunft ist es denkbar, dass die Qualitätsoptimierung und die Kostenkontrolle durch die Anwendung neuartiger Konstruktionsprinzipien wieder etwas einfacher wird. Solche Konstruktionsprinzipien sind z.B. der Einbau von Komponenten mit self-X-Eigenschaften. Dabei steht self-X für self-initialization, self-configuration, self-organizing, self-repair und self-documenting. Der Stand der Technik im Automobilbau ist freilich noch weit von self-X-Komponenten entfernt.

2 Der Stand der Technik

Nach einer ADAC-Pannenstatistik aus dem Jahre 2004 waren im Jahr davor 40% der

Autopannen in Oberklassenlimousinen auf Fehler in der Elektronik und der Software zurückzuführen. Diese Zahl mag übertrieben erscheinen, aber sie zeigt doch, mit welchen Qualitätsproblemen die Automobilindustrie vor einigen Jahren zu kämpfen hatte. Seitdem ist die Situation durch eine Reihe von organisatorischen und technischen Maßnahmen, wie z.B. dass nicht mehr alles, was machbar ist, auch tatsächlich ins Auto eingebaut wird, und durch den konsequenten Einsatz von Software-Engineering-Werkzeugen besser geworden. Die Zahl der Elektronik- und Software-Fehler ist zurückgegangen. Die Grenzen des Machbaren werden aber durch diese Maßnahmen nur hinausgeschoben.

Grundlegend neue Paradigmen kamen in der durch Tradition geprägten Autobranche bislang nur verhalten zum Einsatz, mit der Folge, dass z.B. der seit Jahrzehnten eingesetzte Kabelbaum zur Vernetzung der Elektronikkomponenten aufgrund steigender Kosten bei seiner Erstellung, Montage und Test, sowie aufgrund von zunehmenden Bandbreiteanforderungen bei der Datenkommunikation zunehmend als Problem wahrgenommen wird. Man kann sich als Autoentwickler deshalb fragen, warum das so ist, wie es dazu kam, und wie man es eventuell besser machen könnte. In Tabelle 1 ist dazu die Entwicklung der Kabelbäume und der Steuergeräte in Automobilen seit den 1950er Jahren stichwortartig zusammengefasst.

Die in Tabelle 1 erfolgte Auflistung der Kabelbäume und Steuergeräte zeigt, dass beide Kategorien zunehmend Ressourcen-verschlingend sind. Eine Analyse der Steuergeräte und deren Verkabelung im VW Phaeton aus dem Jahre 2004 beispielsweise zeigt exemplarisch den Stand der Technik, wie er im Jahr 2009 auch im unteren Preissegment angekommen ist. In figure 1 sind die Elektronikkomponenten und ihre Verkabelung im Phaeton in rot dargestellt. Von den Fahrern und Autobesitzern meistens unerkannt verrichten zahlreiche Sensoren, Aktoren und Steuergeräte ihren Dienst, verborgen unter der Motorhaube und im Chassis und verbunden durch kilometerlange Kupferkabel.

Jahr	Innovation
1950	Mercedes 170V: die einzigen Elektrikkomponenten sind Lichtmaschine, Batterie, Lampen, Blinker und Zündung. 40 Kupferkabel reichen für die Verkabelung des ganzen Fahrzeugs aus. Die einzige Elektronikkomponente ist das Autoradio. Das anspruchsvollste Kabel im Auto ist das Antennenkabel.
1970	Erste elektronische Zündanlagen in Serienfahrzeugen. Die aufkommenden Autotelefone erfordern die ersten hochwertigen Koaxialkabel und Antennen im Auto.

Table 1: Entwicklung der Automobilelektrik und -Elektronik von 1950-2010.

Jahr	Innovation
1980	Elektrische Punkt-zu-Punkt-Verbindungen über Kabel, Blinkgeber und Relais werden zunehmend durch Steuergeräte und durch den CAN-Feldbus abgelöst. Andere Feldbusse wie z. B. LIN folgen. Die Zahl der Steuergeräte wächst rasant. Die Bosch-Motorsteuerung setzt Maßstäbe.
1990	Elektronische Steuergeräte für das Motormanagement und für ABS sind in allen Autoklassen Standard. Software spielt im Auto eine signifikante Rolle. Der Kabelbaum tritt als Komponente und als Kostenfaktor immer mehr in Erscheinung.
2000	Die Mercedes S-Klasse hat bis 80 Steuergeräten und 1900 Kabeln mit entsprechend vielen Steckern eingebaut; BMWs der 7er-Serie enthalten einige Glasfaser im Kabelbaum. Oberklassefahrzeuge beginnen, Fahrerassistenz- und Informationssysteme wie z.B. Abstandsradar und GPS-Navigationssystem serienmäßig vorzusehen. Ca. 4 km Kupferkabel sind notwendig, um alle Elektronikkomponenten zu koppeln. Probleme entstehen bei der aufwendigen Verkabelung und bei der Software durch die Interaktion der Steuergeräte untereinander. Die Qualität erleidet einen Einbruch.
2004	ESP und Airbag sind in allen Automobilklassen Stand der Technik. Für Fahrzeuge wie Audi A8, VW-Phaeton, BMW 7er-Serie und Mercedes S-Klasse werden immer aufwendigere Fahrerassistenz- und Informationssysteme angeboten.
2007	Audi Q7 und Porsche Cayenne haben 6 km Kabellänge erreicht. Aus Bandbreitegründen sind zusätzlich Koaxialkabel für Kameras und Head-Up Display im Kabelbaum integriert.
2008	BMWs der 7er-Serie haben bis zu 90 Steuergeräte. Es ist eine Rezentralisierung der Steuergeräte beabsichtigt, so dass deren Zahl wieder auf ca. 60 sinkt, wodurch u.a. der Kabelbaum kürzer wird und die Kosten für Elektronik und Software sinken.
2010	Serienfahrzeuge mit Elektroantrieb gehen in Produktion. Der Kabelbaum steigt durch die zusätzlich notwendige Energieverkabelung nochmal in Gewicht und Volumen erheblich an. Die Preise für Kupfer, Kabel und Stecker und deren Einbau werden zu einem wichtigen Kostenfaktor.

Table 1: Entwicklung der Automobilelektrik und -Elektronik von 1950-2010.

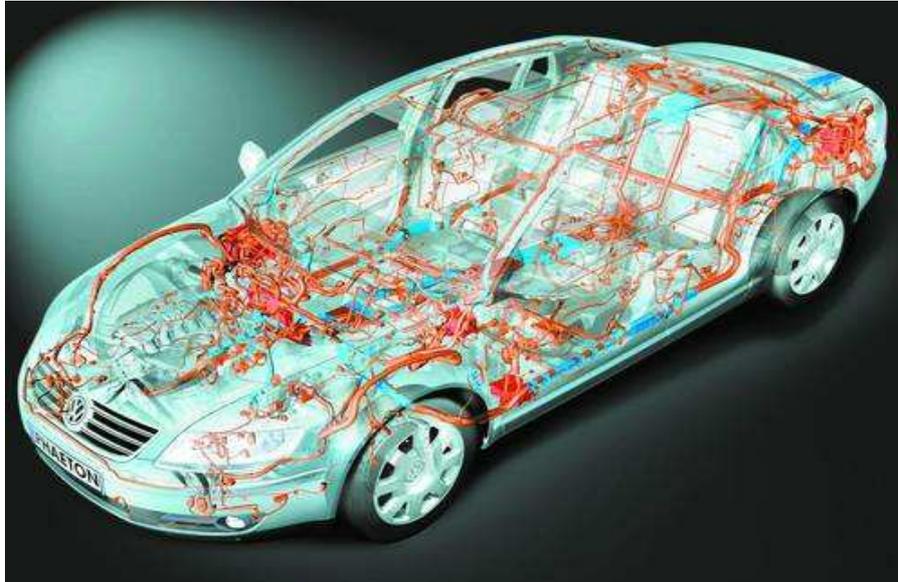


Fig. 1: Elektronikkomponenten und Verkabelung im VW Phaeton in rot.

Ohne die neuere Feldbustechnologie Flexray, die beim Phaeton noch nicht verwendet wurde, stellt sich das Blockschaltbild der Verkabelung des Phaeton gemäß figure 2 dar. Im Wesentlichen gibt es je einen CAN-Bus (CAN = Controller Automation Network) für den Antriebsstrang, den Insassen-Komfort und das Infotainment (=Fahrerinformationssystem). Im Antriebs-CAN sind zusätzlich die wichtigen Fahrerassistenzfunktionen ESP, Servolenkung und Airbag untergebracht. Der Komfort-CAN ist, je nach Ausstattungsgrad des Fahrzeugs, in weitere CAN-Unterbusse unterteilt.

Trotz des mäßigen Verkaufserfolgs ist der Phaeton aus technischer Sicht ein gutes Fahrzeug mit hoher Funktionalität und hoher Qualität auch bei der Vernetzung der Elektronikkomponenten, der sog. Intra-Auto-Kommunikation. Aber es zeigen sich gerade bei der Intra-Auto-Kommunikation die für die Oberklasse typischen Probleme der Verkabelung und der Software der Steuergeräte. So sind bis 6 Feldbusse der Typen CAN, LIN (Local Interconnect Network) und MOST (Media Oriented Systems Transport) nötig, um alle Steuergeräte untereinander und mit Sensoren und Aktoren zu koppeln. Ca. 4 km Kupferkabel sind in diesem Auto, das keine 5 m lang ist, für den Informationstransfer zuständig. An jedem Kabelende sitzt ein individueller Stecker, so dass sich in der Summe Hunderte von Steckverbindern ergeben. Kupfer ist jedoch schwer und teuer. Im Phaeton bedeutet der Kabelbaum ein Mehrgewicht von 30-40 kg, was einem halben Passagier entspricht und einen Mehrverbrauch von ca. einem halben Liter Kraftstoff pro 100 km bedeutet. Hinzu kommen ca. 100-200 € nur für das Halbedelmetall Kupfer,

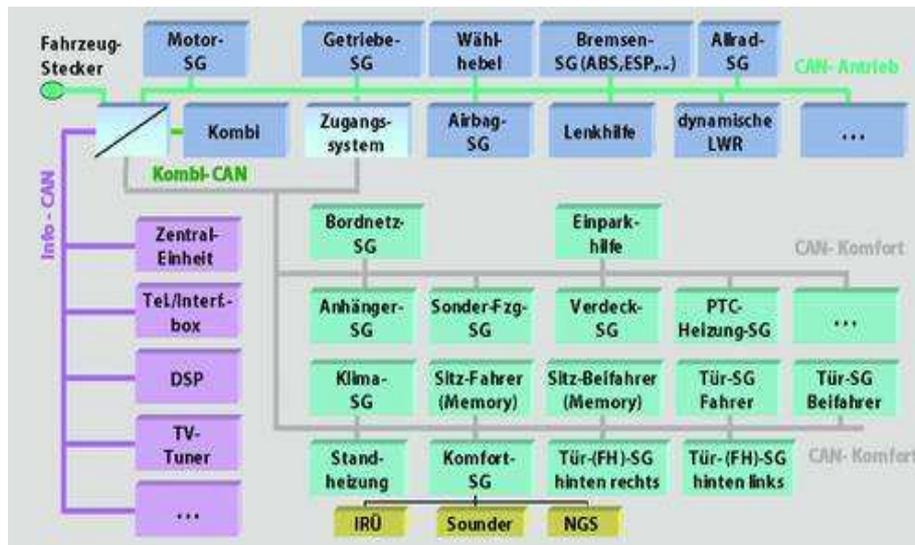


Fig. 2: Steuergeräte und deren CAN-Busverkabelung im Phaeton.

sowie erhebliche Kosten für die Kabel und deren Steckverbinder. Eine hohe Zahl von Steckern bedeutet aber auch ein erhöhtes Potential für Fehler, z.B. aufgrund von Korrosion der Steckerkontakte. Weitere Kosten entstehen durch die Montage der Einzelkabel zum Kabelbaum, durch den Einbau des Baums ins Fahrzeug, und durch den stets notwendigen Abschlusstest nach der Montage. Diese Kosten sind bis zu einer gewissen Kabelbaumkomplexität, ab der die Handhabbarkeit des Kabelbaums unverhältnismäßig aufwendig wird, ungefähr proportional zur Kabelbaumgesamtlänge und zur Zahl der darin enthaltenen Kabel. Soll wie im Phaeton ein hohes Qualitätsniveau erreicht werden, fallen zusätzliche Kosten für die Qualitätssicherung an. Am teuersten sind jedoch Nutzungsausfälle durch Werkstattaufenthalte, da sie die Kunden verprellen können.

Bei den Phaeton-Steuergeräten können wie bei jedem eingebetteten System Software-Fehler auftreten. Der Phaeton enthält bis 80 Steuergeräte, heutige Oberklasse-Limousinen bis zu 90. Alleine aufgrund dieser hohen Zahl von zum Teil komplex programmierten ECUs (Electronic Controller Units) sind Software-Fehler häufiger. Hinzu kommen systembedingte Schwächen, wie z.B.:

- 1.) Diverse Hersteller liefern unterschiedliche Elektronik inklusive deren Software für ein- und dasselbe Auto. Der Autohersteller tritt nur noch als Systemintegrator von Zulieferkomponenten auf. Dabei können Schwierigkeiten z.B. aufgrund von Abstimmungsproblemen auftreten.
- 2.) Die Software beruht auf unterschiedlichen Technologien, Philosophien und Programmierungswerkzeugen. Zwar sind die Steuergeräte von jedem Zulieferer

sorgfältig getestet, und die Schnittstellen (Interfaces) zwischen den Komponenten der Hersteller wurden präzise festgelegt, doch können Unvollständigkeiten in der Spezifikation und inkomplette Tests in eingebautem Zustand zu neuen, vormals unentdeckten Fehlern führen.

- 3.) Die verwendeten Busse (CAN-, LIN-, FlexRay- und MOST) sind völlig inkompatibel zueinander. Teilweise sind sogar die zu Grunde liegenden Übertragungsprinzipien der Busse grundverschieden. CAN beispielsweise ist ein ereignisgesteuertes Übertragungssystem, während Flexray zeitgesteuert ist. Sehr oft müssen aber inkompatible Busse untereinander Daten austauschen. Unzulänglichkeiten bis hin zu Fehlern sind damit vorprogrammiert. Die entsprechenden Abteilungen in den Automobilfirmen haben entsprechende leidvolle Erfahrungen gemacht bzw. machen sie gerade bei der Kopplung von CAN mit Flexray über Gateways.
- 4.) Selbst Steuergeräte, die auf derselben Feldbustechik beruhen, können inkompatibel sein, z.B. wenn sie von verschiedenen Hersteller stammen, oder im Falle desselben Herstellers, wenn sie einen unterschiedlichen Software-Revisionsstand haben. Das Stichwort, das hier Probleme macht, lautet Versionen- und Variantverwaltung. Solche Fehler sind besonders schwer zu finden, weil z.B. die eine Protokollsoftware bei anderer Hardware-Konstellation oder anderer Betriebssystem-Version funktioniert oder in der Vergangenheit funktioniert hat, die andere aber nicht.
- 5.) Ein weiteres Problem resultiert aus folgender Tatsache, dass die Kommunikation mit der Peripherie und mit anderen Steuergeräten eine wichtige Komponente innerhalb jeder Steuergeräte-Software darstellt. Die notwendigen Systemaufrufe und Protokolle sind ein integraler Bestandteil aller Steuergeräte, verkomplizieren diese aber dadurch. Bei der Systemintegration stets derselben Funktionalität können Fehler z.B. aufgrund von Routine auftreten, oder weil der Systemintegrator Änderungen oder Neuerungen übersehen hat.
- 6.) Last-but-not-least, verlangen Kunden und Marketingstrategen immer mehr Funktionalität von den Autoentwicklern, die eine immer größere Vielfalt an Elektronik und zunehmende Software-Komplexität bewirken. Aber gerade bei fortgeschrittenen Fahrerinformations- und -assistenzsystemen sehen die Premium-Hersteller ihre Zukunft, da nur dort hohe Gewinnmargen locken und damit auch die Chance, sich - zumindest für eine gewisse Zeit - von der Konkurrenz abzuheben. Dies übt einen immer höheren Druck auf die Steuergeräteentwickler aus, was der Qualität abträglich ist.

Die geschilderten systemimmanenten Probleme und Unzulänglichkeiten sind lösbar, so dass das Auto auch in Zukunft ein alltagstauglicher Gegenstand bleibt. Aber dies wird durch erheblichen Einsatz von Ressourcen und durch hohe Kosten erkauft.

Hinzu kommt, dass eine Umstellung der Intra-Auto-Kommunikation auf einfache, einheitliche Standards - oder eventuell sogar auf ein ganz neues Kommunikationssystem, abseits der ausgetretenen „Bus-Pfade“ - in der traditionsbewussten Automobilindustrie auf Barrieren stößt. Das Generalargument gegen Quantensprünge in der Vernetzung-

technik, neben den hohen Investitionen, die für die erprobten Feldbustechniken in der Vergangenheit getätigt wurde, ist die folgende Aussage: "Wozu soll das gut sein, es geht doch auch so?" Dasselbe Argument haben vor 25 Jahren die Entwickler von CAN gehört, als sie vorschlugen, Relais und Punkt-zu-Punkt-Verkabelungen im Auto durch CAN und Elektronik zu ersetzen. Es ist bekannt, was mit den Relais und den Punkt-zu-Punkt-Verkabelungen geschehen ist: das Bus-Konzept und die Elektronik haben sich durchgesetzt.

Man kann sich fragen, wie der Stand der Technik bei anderen Fahrzeugen ist, die aktueller als der VW Phaeton sind. Die Antwort lautet: Genauso! Der Audi Q7 oder der Porsche Cayenne zum Beispiel haben einen sehr hohen Stand der Technik erreicht, fahren aber mit 6 km Kupferkabel und u.a. 25 Jahre alter Feldbustechnologie (CAN). Exemplarisch belegt am VW Phaeton kann man deshalb das folgende Resümee ziehen: Automobile haben bei der Kopplung der Steuergeräte untereinander und mit Sensoren und Stellgliedern zwar einen hohen Stand in der Qualität erreicht, aber es geht Tradition über Innovation, und es gilt Ressourcenverbrauch vor „Green IT“. Green IT im Automobil mit Hilfe effizienterer Technik findet eher auf der Verbrauchs- und Schadstoffseite Gehör als bei der Intra-Auto-Kommunikation. In Zukunft steht nach 25 Jahren CAN-Bus wieder ein Umschwung der verwendeten Technologie bei der Intra-Auto-Kommunikation an, um zukünftige Probleme zu vermeiden.

3 Was ist die Zukunft?

Es sind in naher Zukunft viele Innovationen bei Mechatronik, bei Fahrerassistenz- und bei Fahrerinformationssystemen absehbar. Automatisches Einparken im Parkhaus und autonomes Fahren sind die bereits jetzt größtenteils erreichten Ziele in den Entwicklungslabors. Insgesamt ist noch mehr Mechatronik nötig, um höheren Komfort, mehr Sicherheit und weniger Verbrauch und Emission zu erzielen.

Fortgeschrittene Assistenz und -informationssysteme brauchen aber mehr und bessere Kabel mit höherer Bandbreite. Extrapoliert man die sich heute in den Entwicklungspipelines von Automobilindustrie und Zulieferern befindlichen IT-Innovationen, ergibt sich für die Entwicklung der Kabelbäume und Steuergeräte der folgende mittelfristige Trend (2010-2015) in der Intra-Auto-Kommunikation:

- 1.) Autos werden bis 100 Steuergeräte und Hunderte von Sensoren/Aktoren haben
- 2.) Ereignisgesteuerte Datenübertragung (CAN) wird zunehmend durch zeitgesteuerte Übertragung (Flexray) abgelöst werden
- 3.) Das Programmieren der Steuergeräte wird zunehmend komplexer, das Abstraktionsniveau der Programmierung wird hingegen auf dem erreichten Level verharren
- 4.) Die Kommunikation und Interoperabilität in der Software werden immer wichtiger. AUTOSAR-Kompatibilität wird deshalb zunehmend wichtiger
- 5.) Die Kosten und Aufwand für Kabelbäume werden steigen, während deren Handhabbarkeit bei Einbau und Test sinkt, da Kabelbäume in absehbarer Zeit sehr groß,

schwer und unhandlich werden

- 6.) Die Kosten für Stecker und deren Qualitätssicherung werden steigen. Insbesondere gibt es im Automobilbau immer mehr Stecker mit sehr vielen Kontakten (>100).
- 7.) Die Kosten für Kommunikations-Software, Systemintegration und Test werden zunehmen

Aus dieser Auflistung kann man schliessen, dass bereits in naher Zukunft Handlungsbedarf besteht, um die vorhandene Technologie noch ein paar Jahre weiterführen zu können. Wagt man eine langfristige (2015-2030) Prognose über die in der Intra-Auto-Kommunikation erforderlich werdenden Funktionalitäten, kann man folgende Trends erkennen:

- 1.) Die Kommunikationsanforderungen der Fahrerinformationssysteme, die auf Kameras und Radar beruhen und graphische Benutzerschnittstellen auf großen Displays haben, werden stark zunehmen. Dies gilt in Bezug auf Bandbreite, Latenz und Anwenderfreundlichkeit (=Abstraktionsniveau).
- 2.) Es wird bei allen Fahrerassistenzfunktionen sog. „X-by-wire“ geben, d.h. Schaltung, Lenkung, Bremsen, Kupplung, Gas, Scheinwerfer, Bremslichter, Blinker u.s.w. werden rechnergestützt sein

Aufgrund dieser Trends gilt es festzustellen, dass in Zukunft für die Intra-Auto-Kommunikation höhere Zuverlässigkeit, Skalierbarkeit, Flexibilität, Interoperabilität, Datenraten und niedrigere Latenz zunehmend wichtiger werden.

Welche Konsequenzen wird dies für die Quantität und Qualität von Verkabelung und Software im Auto haben? Hier kann man ein worst-case und ein best-case Szenario entwerfen, das versucht, die Zukunft durch Modellierung zweier Extremsituationen vorherzusagen. Beim worst-case-Szenario wird davon ausgegangen, dass die bereits bestehenden Datenübertragungstechnologien im Auto, d.h. CAN, LIN, MOST, Flexray und Industrial Ethernet entweder unverändert oder in einer Upgrade-Version weiterverwendet werden, d.h., dass sich substantiell nichts ändert. Die Konsequenzen dieses Szenarios sind in Table 1 über der Zeit aufgelistet. Beim best-case-Szenario wird angenom-

Jahr	Innovation
ca. 2015	Die Fahrerassistenzsysteme für automatisches Spurhalten, Spurwechseln, Kolonnenfahren, Einparken in Parklücken finden zunehmend Verbreitung. Das Auto ist zum mobilen Parallelrechner mit bereits sehr aufwendiger Verkabelung bis 10 km Länge geworden.

Table 1: Worst-Case Szenario der Entwicklung der Elektronik im Auto.

Jahr	Innovation
ca. 2020	Das automatische Einparken im Parkhaus ist in der Serienreife. Kameras im Auto werden zum Standard. Der Bandbreitebedarf kann nur durch Hinzunahme von LAN-Technologien aus der Computerindustrie, wie z.B. Gigabit-Industrial Ethernet, gestillt werden. Alle Kabeltechnologien sind im Fahrzeug gleichzeitig vertreten, d.h. Shielded Twisted Pair, Koaxialkabel, Glasfaser, Standard-Signalkabel und Starkstromkabel sind erforderlich und machen den Kabelbaum heterogen und teuer.
ca. 2030	Autonomes Fahren ist in der Serienreife. Das Auto ist nach den Maßstäben von 2009 ein mobiler Supercomputer, der von einem Elektroantrieb auf telematisch kontrollierten Strassen bewegt wird. Der Kabelbaum ist hinsichtlich Länge, Volumen, Gewicht und Preis ein bedeutsamer Faktor im Automobilbau. Massive Kabelschächte durchziehen das gesamte Automobil und verändern Design und nutzbares Platzangebot im Auto signifikant.

Table 1: Worst-Case Szenario der Entwicklung der Elektronik im Auto.

men, dass ein technologischer Sprung einsetzt, der bewirkt, dass bei gleichbleibender Funktionalität die erforderliche Komplexität der Verkabelung und der Software der Steuergeräte - und damit die Kosten der Intra-Auto-Kommunikation - wieder sinken können. Für dieses Szenario wird darüber hinaus angenommen, dass die Qualität der Steuergeräte-Software gleich bleibt oder sogar ansteigt, und dass es bei gleicher Komplexität und gleichen Kosten wie heute ganz neue Funktionen im Auto geben wird. Die Wahrheit dürfte irgendwo zwischen dem best-case- und dem worst-case-Szenario liegen.

Fakt ist: Ereignisbasierte Feldbusse wie CAN haben einen begrenzten Funktionsumfang, ein begrenztes Abstraktionsniveau und begrenzte Skalierbarkeit, da ihre Technologie vor 25 Jahren entwickelt wurde, als Funktionsvielfalt, Abstraktionsniveau und Skalierbarkeit noch keine Fragestellungen waren. CAN sollte damals nur die vielen Punkt-zu-Punkt-Strecken im Auto durch ein Buskonzept ersetzen, was bekanntlich auch geglückt ist und zu einem großen Fortschritt in der Automobiltechnik geführt hat. Begrenzte Funktionalität und begrenztes Abstraktionsniveau heißt: falls mehr als nur Bits, Bytes oder Worte übertragen werden sollen, muss die Software in den Steuergeräten selber dafür sorgen. CAN alleine arbeitet nur auf Schicht 1 und 2a im ISO-7-Schichten Modell für geschichtete Kommunikation, kümmert sich also nur um die Bitübertragung und den Zugang zum Feldbus. Für höhere Funktionen wurde extra Software wie z.B. CANOpen geschaffen, die in jedem Steuergerät installiert sein muss, aber leider das Abstraktionsniveau eines Rechnernetzes nicht erreicht.

Begrenzte Skalierbarkeit heißt, dass die jeweils verwendete Technologie nicht ohne Änderungen oder Zusätze zugleich in kleinen und in grossen PKWs eingesetzt werden

kann. Da die Datenrate von CAN auf unter 1 Mb/s beschränkt ist, kann man damit nur eingeschränkt die modernen mechatronische Systeme von Oberklasse-Limousinen ansteuern. Was bei einem Kleinwagen noch funktioniert, ist bei einem S-Klasse-Mercedes mit CAN alleine nicht mehr möglich, Flexray ist zusätzlich nötig. Da aber praktisch alle Autohersteller eine Modellpalette von klein bis groß im Angebot haben, ist die Skalierbarkeit ein wichtiger Punkt für die Wiederverwendbarkeit einmal entwickelter Komponenten und Technologien. U.a. dadurch werden die Kosten und die Qualität des Autos bestimmt.

Fakt ist weiterhin: Der größte Teil des Datenverkehrs im Automobil ist mittlerweile zeitgesteuert, da viele Steuergeräte ihre Sensoren in konstanten Zeitabständen abfragen (Abtasttheorem!). Zeitgesteuerte Feldbusse wie Flexray sind technologisch neuer, weisen aber dieselben Mängel in Punkto Funktionalität und Skalierbarkeit auf, da sie ebenfalls nur die Schicht 1 und 2a im ISO-7-Schichten-Modell abdecken. Feldbusse werden deshalb zunehmend negativen Einfluss auf Qualität und Kosten der Kommunikations-Software in den Steuergeräten haben.

Man muss sich fragen, wie die Automobilindustrie auf diese Herausforderungen bei Qualität, Funktionalität, Abstraktionsgrad und Skalierbarkeit in der Intra-Auto-Kommunikation reagiert bzw. reagiert hat. Ein wichtiger Schritt von Industrie und Zulieferfirmen bestand seinerzeit in der breiten Markteinführung des Feldbusses FlexRay, der mit 10 MBit/s arbeitet (CAN hat max. 1 Mbit/s) und des Multimediabusses MOST, der in einer Variante bis zu 150 MBit/s Datenrate aufweist. MOST basiert auf einer Ringtopologie und deckt bereits die ISO-Schichten 1,2,4,5 und 7 ab. Die Schichten 3 (Routing) und 6 (Data Representation Layer) sind nicht oder nur schwach ausgeprägt. MOST unterstützt hauptsächlich die zeitsynchrone Übertragung von Audio- und Video-Streams, kann aber auch asynchrone Datenpakete übermitteln. Flexray unterstützt die synchrone Übertragung für Echtzeitanwendungen gemäß des Zeitscheibenverfahrens TDMA (Time Division Multiple Access) und kann wie MOST ungenutzte Bandbreite zur asynchronen Übertragung verwenden.

Flexray implementiert im Gegensatz zu MOST nur die Schichten 1-2a. Fehlende Funktionalität und Abstraktion bei der Kommunikation werden durch Anwenderprogramme in jedem Steuergerät bewerkstelligt. Insgesamt ist FlexRay ein guter erster Schritt zur schnellen Echtzeitkommunikation, aber dieser Feldbus hat wie CAN niedrige Skalierbarkeit und eine niedrige Datenrate und keine a priori mitgelieferten höheren Protokollschichten. Langfristig reicht deshalb FlexRay für die steigenden Kommunikationsanforderungen nicht aus. MOST weist insgesamt mehr Funktionalität, Abstraktion und Ähnlichkeit zu einem Rechnernetz auf und ist die interessantere Technologie. Sein Einsatzbereich bleibt allerdings auf Fahrerinformationssysteme und Infotainment begrenzt. Für harte oder weiche Echtzeitanwendungen und hohe Qualitätsanforderungen ist MOST nicht geeignet.

Ein weiterer Schritt von Industrie und Zulieferfirmen bestand in der Standardisierung der Software durch AUTOSAR (AUTomotive Open System ARchitecture). AUTOSAR ist ein wichtiger Schritt zu wiederverwendbarer Auto-Software, aber die Erstellung und Konfiguration von Software-Komponenten, die gemäß des AUTOSAR-

Woher könnte ein technologischer Quantensprung kommen?

Standards vorgenommen wurde, erfordert aufgrund des umfangreichen AUTOSAR-Regelwerks Expertenwissen, Zeit und Geld. Trotz seines Umfangs und seiner Komplexität, oder vielleicht gerade deswegen, ist AUTOSAR der kleinste gemeinsame Nenner der Autohersteller und Zulieferer, auf den man sich einigen konnte. Darüber hinaus ist die breite Akzeptanz von AUTOSAR noch nicht gesichert. Hinzu kommt, dass viele AUTOSAR-Spezifikationen gemäß den Prinzipien des Software-Engineerings gemacht wurden. Praktische Fragen nach Einfachheit, Robustheit, Speicherbedarf und Laufzeit, die im Auto wichtig sind, wurden dabei nicht immer in vollem Umfang berücksichtigt. Nichtsdestotrotz ist es richtig, dass ein Kommunikationsparadigma, das in AUTOSAR integrierbar ist, und das bessere Funktionalität für alle Steuergeräte auf höherem Abstraktionsniveau bietet, die Qualität der Software steigern kann.

Neben den geschilderten technischen Maßnahmen haben Autoindustrie und Zulieferfirmen flankierend organisatorische Maßnahmen ergriffen, um die Herausforderungen bei Qualität, Funktionalität, Abstraktion und Skalierbarkeit in der Automobilelektronik zu meistern. So wurde mehr und besseres Personal für die Hardware-/Software-Entwicklung und für den Komponententest eingestellt, und die Einführung von Software-Engineering für alle Phasen eines Software-Projekts ist üblich geworden. Schließlich hat sich die Automobilindustrie selber gewandelt. Aus traditionellen Maschinenbauunternehmen wurden und werden Mechatronik- und Software-Produzenten. Erst wenn diese Wandlung abgeschlossen ist, kann man jedoch von der Autoindustrie erwarten, dass sie aus eigener Kraft einen technologischen Quantensprung in der Intra-Auto-Kommunikation erzielen wird.

4 Woher könnte ein technologischer Quantensprung kommen?

Die Frage ist deshalb, welche Technologien wir von benachbarten Gebieten, d.h. aus der Prozessautomatisierungstechnik, der Rechnertechnik und der Luftfahrt übernehmen können, um sie im Auto einzusetzen. BMW beispielsweise macht ernsthafte Anstrengungen, Industrial Ethernet, das aus der Rechner- und Prozessautomatisierungstechnik stammt, im Auto einzusetzen. Es wird deshalb im folgenden die Frage diskutiert, ob Industrial Ethernet ein guter Kandidat für die ISO-Schichten 1-2a ist.

Die Punkte, die dafür sprechen, sind seine weite Verbreitung und sein niedriger Preis. Ethernet ist ein de-facto Standard und wird es noch lange bleiben. Der Trend in der Automobilindustrie dahin geht, bevorzugt Standards einzusetzen. Die Gründe dafür sind unter anderem die hohen Investitionen für Mitarbeiterausbildung, Qualitätssicherung usw., die mit der Einführung einer neuen Technologie verbunden sind, sowie die hohen Folgekosten für Ersatzteilhaltung etc. Bei der Verwendung von Standards sind diese Investitionen am besten geschützt, da Standards in der Regel eine lange Gültigkeit haben.

Andererseits gibt es technische Gründe, die gegen Industrial Ethernet sprechen: Auf der Schicht 1 hat man es mit Kabeln zu tun, die bei 1 Gbit/s Datenrate aus 4 Doppeladern

bestehen, also ziemlich dick sind (ca. 0,4 cm). Rel. groß sind auch die erlaubten minimalen Biegeradien. Beides macht die Verlegung im Auto schwieriger als bei den derzeit verwendeten Signalkabeln. Grundsätzlich gilt, dass Kabel im Auto möglichst dünn sein sollten, um jeden Winkel in der Karosserie erreichen zu können. Das ist bei Industrial Ethernet nicht der Fall. Hinzu kommen die voluminösen Ethernet-Steckverbinder. Ein Kabelbaum nur aus Ethernet-Kabeln ist deshalb auch in einem voll digitalisierten Auto des Jahres 2020 nicht denkbar.

Schwerer noch wiegt die Tatsache, dass Ethernet nicht echtzeitfähig ist, da die Schicht 2a (Medium Access Layer, MAC) zufallsgesteuert arbeitet. Bei einem gleichzeitigen Zugriff zweier Sender auf denselben Bus entscheidet der Zufall, wer gewinnt. Der übliche Ausweg besteht darin, auf die Buseigenschaften von Ethernet zu verzichten und es nur als Punkt-zu-Punkt-Verbindung einzusetzen. Damit hätte man aber den technologischen Stand erreicht, wie er vor der Einführung von CAN herrschte. Um das zu vermeiden, und weil auch nicht darauf verzichtet werden kann, dass mehrere Sender an denselben Empfänger Daten senden, werden Ethernet-Switches eingesetzt. Ein Switch arbeitet auf Schicht 2 im ISO-Modell. Er stellt im Auto aber leider einen sog. single-point-of-failure dar, wenn aller Verkehr über ihn abgewickelt wird. Fällt der Switch aus, ist das Fahrzeug im schlimmsten Fall nicht mehr lenkbar und nicht mehr bremsbar. Es müssen deshalb besondere Qualitätssicherungsmaßnahmen getroffen werden, um einen Switch-Ausfall zu vermeiden. Abgesehen vom Platzbedarf, den der Switch hat, bedeutet dies den Einbau von Backup-Switches, die on-the-fly, d.h. mitten im Betrieb zuschaltbar sind. Das ist aufwendig. Die Luftfahrt-Industrie hat vorgemacht, dass dies machbar ist, allerdings gelten im Flugzeugbau auch andere Kostenrechnungen und Wartungsintervalle als im KFZ-Bereich. Das heisst, existierende Lösungen aus der Luftfahrt sind im Auto nicht einsetzbar. Dasselbe gilt für Lösungen aus der Raumfahrt.

Ein anderer Punkt, der für Ethernet spricht, ist, dass es für keine andere LAN-Technik (LAN = Local Area Network) so viele Protokolle gibt, wie für Ethernet. Die allein für Industrial Ethernet definierten Protokolle sind Profinet (PNO/Siemens), EtherNet/IP, (ODVA/Rockwell Automation), EtherCAT (ETG/Beckhoff), Powerlink (EPG/B&R), Modbus-TCP (Modbus-IDA/Schneider), Sercos-III (Sercos/Rexroth), Foundation Fieldbus HSE (FF, Rosemount) und FLNet (JEMA/Mitsubishi). Diese Systeme unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Echtzeiteigenschaften deutlich voneinander und sind völlig inkompatibel zueinander. Bei weitem nicht alle dieser Systeme sind echtzeitfähig, da sie oft auf TCP/IP beruhen. Echtzeitfähige Systeme benutzen aber immer eigene Echtzeitprotokolle und verzichten auf TCP/IP. Dazu zählen Profinet IO, Powerlink, EtherCAT und SERCOS III. Sie stellen dem Anwender isochrone Zykluszeiten auch auf höherem Abstraktionsniveau zur Verfügung. Zykluszeiten von rund 100 μ s sind erreichbar, was für viele Echtzeitanwendungen im Auto ausreicht. Die zuletzt genannten vier Protokolle sind somit für das Auto geeignet, auch wenn sie nicht alle ISO-Schichten abdecken. Grundsätzlich gilt jedoch, dass es keinen allgemein anerkannten Protokollstandard gibt, so dass die geforderte Interoperabilität zwischen den Steuergeräten nicht automatisch gewährleistet ist.

Die Luftfahrt hat mit AFDX (Avionics Full Duplexed Switched Ethernet) eine eigene

Version von Industrial Ethernet geschaffen, die eine Reihe von Erweiterungen aufweist. AFDX hat zwar 100 Mbit/s Datenrate, verwendet aber leider TCP/IP und ist damit auf der Protokollseite nicht einsetzbar. Darüber hinaus würde AFDX als Schicht 1 und 2 im Auto den Kostenrahmen sprengen. Die älteren und billigeren Avionic-Lösungen sind dagegen allesamt zu langsam: ARINC 429 hat 100 Kb/s, Avionic CAN und MIL Std. 1553 haben 1 Mb/s und ARINC 629 hat 2 Mb/s. Sie stellen gegenüber CAN keinen Quantensprung dar.

Grundsätzlich ist Industrial Ethernet aber für bestimmte Anwendungen im Auto geeignet. Will man hohe Datenraten bei einigermaßen hoher Zuverlässigkeit haben, ist es als Datenübertragungstechnologie momentan unverzichtbar. Aufgrund der geschilderten Probleme wird es aber niemals Flexray und MOST ganz ersetzen können. Das eingangs geschilderte worst-case-Szenario ist mit Industrial Ethernet allein somit nicht abwendbar.

Wie steht es um die aus der Rechner- und Unterhaltungselektronik allseits bekannte USB- und FireWire-LANs? Sie haben hohe Bandbreiten und einen sehr günstigen Preis. Das Problem ist hier die Zuverlässigkeit. Sie haben eine interne Auslegung, die für ein Consumer-Elektronik-Umfeld und nicht für den industriellen Einsatz geschaffen ist. Es besteht aber dennoch kein Zweifel, dass USB und FireWire zusammen mit Bluetooth mehr und mehr im Bereich des Infotainment und der Fahrerinformationssysteme eingesetzt werden wird. Hier treffen sie auf den MOST-Bus, der sich bzgl. seiner Datenrate ebenfalls stetig weiterentwickelt hat.

Alt bekannte lokale Netze aus der Computerindustrie wie Token Ring, Token Bus und FDDI (Fibre Distributed Data Interface) wären aus Echtzeitsicht und aus Zuverlässigkeitsgründen als Schicht 1-2 im Auto geeignet. Deren Weiterentwicklung wurde aber vor längerem bereits abgeschlossen, und ihre Komponenten sind aufgrund ihres Alters zu wenig miniaturisiert. FDDI ist darüber hinaus nur Glasfaser-basiert, da es ein Metropolitan Area Netzwerk (MAN) ist. Die Prinzipien, nach denen sie funktionieren, bleiben jedoch höchst aktuell.

5 Resumee

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass es derzeit keine wirklich überzeugende ISO-Schicht 1 und 2 gibt, die alle Einsatzfälle im Auto abdeckt. Darüber hinaus existieren zwar höhere Echtzeit-Protokollschichten, die für das Auto geeignet sind, sie implementieren aber nicht alle ISO-Schichten 3-7. Gegenwärtige lokale Netze sind deshalb nur für spezielle Anwendungsfälle im Auto geeignet. Ein technologischer Quantensprung kann dennoch in den nächsten Jahren von der Prozessautomatisierungs- und Rechner- oder der Luftfahrt ausgehen. Absehbar ist er derzeit jedoch nicht.

Insgesamt ist die IT-Technologie der Innovationsmotor in der Automobilbranche und generiert immer neue Funktionen im Fahrzeug, die werthaltig sind. Dieser Trend wird sich langfristig fortsetzen. Green IT-Lösungen sind derzeit bei der Datenübertra-

gung im Auto noch kein Thema, vielmehr werden Funktionsvielfalt und Qualität durch hohen Ressourcenverbrauch und damit einen hohen Preis realisiert. Eine Qualitätssteigerung bei der Software und der effizienterer Einsatz von Hardware-Ressourcen können jedoch bei der Intra-Auto-Kommunikation durch innovative IT-Lösungen zur gleichen Zeit erreicht werden.