

Das Netzwerk für das Auto von morgen

Ringtopologie bietet Skalierbarkeit, Zuverlässigkeit und Echtzeit-Fähigkeit

Für die Kommunikation zwischen den mechatronischen Komponenten eines Automobils werden in Zukunft höhere Datenübertragungsraten und Echtzeit-Fähigkeit bei gleichbleibenden oder geringeren Kosten gefordert. Der Prototyp eines neuen Verbindungsnetzwerkes erreicht dies durch Ringtopologie, ein effizientes Protokoll und die Verwendung von Kunststoff-Lichtwellenleitern.

Von Marcel Wille und Prof. Dr. Harald Richter

Bereits heute sind 90 Prozent aller Innovationen im Auto mit dem Einsatz von Elektronik und Software verbunden. Viele dieser neuen Entwicklungen lassen sich in den Bereich der Mechatronik einordnen. Die Anzahl der Steuergeräte ist in den letzten Jahren deutlich gestiegen. Waren Mitte der 90iger Jahre noch einige wenige Steuergeräte ausreichend, enthalten heutige Oberklassewagen bereits mehr als 80. Dementsprechend

hat sich der finanzielle Wert der Elektronik im Auto in nur zehn Jahren fast verdoppelt – Tendenz steigend. Das Auto als fahrender Parallelrechner – diese Vision stellt eine enorme Herausforderung für die Automobilbranche dar (**Bild 1**). Der zunehmende Einsatz von Elektronik sorgt zwar einerseits für mehr Komfort und Sicherheit, andererseits sind Elektrik und Elektronik für mehr als 50 % aller Pannen verantwortlich.

Während die Zahl der mechatronischen Systeme und die damit verbundenen Anforderungen an die Kommunikationseinrichtungen ständig gestiegen sind – und weiter steigen werden –, werden die Systeme immer noch über konventionelle Bussysteme miteinander gekoppelt. Ferner sind unterschiedliche Netzwerke und Software erforderlich, um die mechatronischen Komponenten im Auto zu verbinden. Stand der Technik sind hier CAN, LIN, MOST und FlexRay. Ein einheitlicher Standard für ein Netzwerk im Automobil ist bisher nicht in Sicht. Aufgrund dieser Entwicklungen haben heutzutage viele namhafte Automobilhersteller massive Qualitäts- und Leistungs-Probleme. Das Auto der Zukunft wird aber ein einheitliches Kommunikationsnetzwerk mit hohen Geschwindigkeiten erfordern. Außerdem muss ein solches Netzwerk extrem zuverlässig, sicher und echtzeitfähig sein.

Aus diesen Gründen wurde durch das Informationstechnische Zentrum (ITZ) der TU Clausthal [1] im Jahr 2004 das interdisziplinäre Forschungsprojekt „Steer by Wire“ gestartet. Das Ziel von „Steer by Wire“ ist die Entwicklung einer elektronischen Lenkung, die ohne eine mechanische Verbindung zwischen Lenkrad und Rädern auskommt. Die Abteilung „Technische Informatik und Rechnersysteme“ [2] wurde im Rahmen dieses Projekts mit der Entwicklung eines neuen Netzwerkes für das Automobil beauftragt: „CarRing II“. Es handelt sich hierbei um ein ringbasiertes, hoch zuverlässiges und echtzeitfähiges Netzwerk für Automobile, das eine sichere Verbindung zwischen allen Komponenten von „Steer by Wire“ bereitstellen soll.

Die Anforderungen an CarRing II sind mit denen von FlexRay vergleichbar. Allerdings ist CarRing II weniger in Konkurrenz zu FlexRay zu sehen, sondern vielmehr als Nachfolger von FlexRay in der nächsten Generation von Automobilen (**Bild 2**). Sicherlich war und ist FlexRay ein wichtiger Schritt in Richtung zuverlässige und echtzeitfähige Kommunikation im Auto, aber auf Dauer wird auch FlexRay den Anforderungen nicht genügen. Ziel bei der Entwicklung von CarRing II ist es, ein einheitliches Kommunikationsnetzwerk im Automobil zur Verfügung zu stellen. CarRing II soll die Probleme von Netzwerken mit Bustopologie lösen, dazu gehören etwa die begrenzte Skalierbarkeit und eine eingeschränkte Zuverlässigkeit.

■ Highlights von CarRing II

CarRing II erreicht Datenübertragungsraten von 200 Mbit/s bis 1 Gbit/s. Es bietet eine zuverlässige Verbindung von Sensoren, Aktoren und Steuergeräten. Statt der herkömmlichen Bustopologie verwendet CarRing II eine Ringtopologie, damit lassen sich Ska-

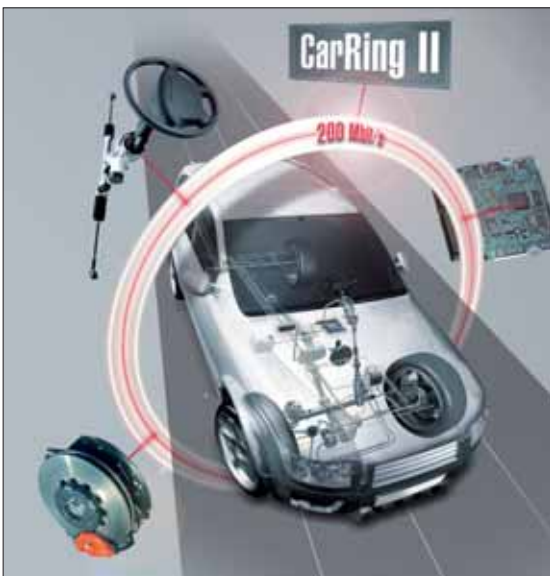


Bild 1. Im Auto der Zukunft werden bisher elementare mechanische Funktionen, wie z.B. Bremsen oder Lenken, nach und nach durch mechatronische Systeme ersetzt. Bei diesen so genannten „X by Wire“-Funktionen reichen die Ideen bis hin zum Fahren mit Autopilot.

lierbarkeit, Zuverlässigkeit und Effektivität steigern, eine Kommunikation in Echtzeit wird möglich. Bei CarRing II wird unterschieden zwischen „Knoten“ und „Attachments“; dabei teilen sich bis zu 15 Attachments einen einzigen Knoten. Bei den Knoten handelt es sich um ICs, die das CarRing-II-Protokoll umsetzen. Als Attachments werden Sensoren, Aktoren und Steuergeräte bezeichnet. Die Basisstruktur ist ein unidirektionaler Ring. Innerhalb eines einzelnen Rings können bis zu 16 Knoten unter Verwendung von handelsüblichen HOTLink-II-Transceivern und optischen Punkt-zu-Punkt-Verbindungen vernetzt werden. Über entsprechende Switch-Knoten lassen sich insgesamt 255 Ringe verbinden (Bild 3).

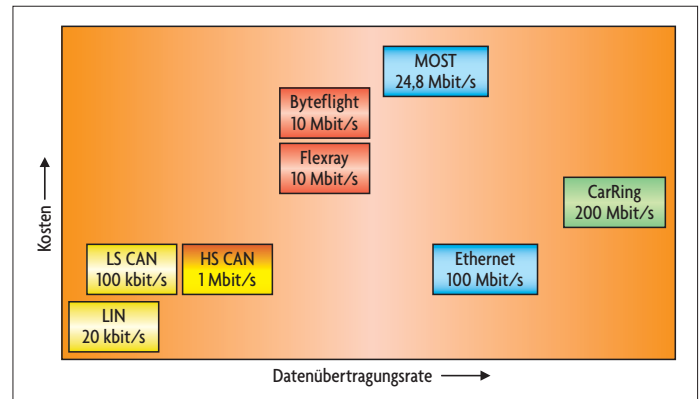
Das „CarRing II“-Netzwerk wurde so entworfen, dass es sich mit möglichst geringen Kosten realisieren lässt. Dies wurde beispielsweise durch eine einfache Knotenstruktur und die Verwendung kostengünstiger Kunststoff-Lichtwellenleiter erreicht. Da jeder Knoten als Sender und Empfänger arbeitet, ist eine Vollduplex-Kommunikation über den unidirektionalen Ring möglich. Da die Kunststoff-Lichtwellenleiter unempfindlich gegenüber elektromagnetischen Störungen sind, wird das Netzwerk zuverlässiger und sicherer. Bei Verbindungen unter 100 m Länge sind Datenraten bis 10 Gbit/s möglich. Kunststoff-Lichtwellenleiter sind flexibel und lassen sich auf einfache Weise handhaben. Zudem sind sie viel leichter als Kupferkabel; der Preis ist in etwa gleich.

8B/10B-Codierung:

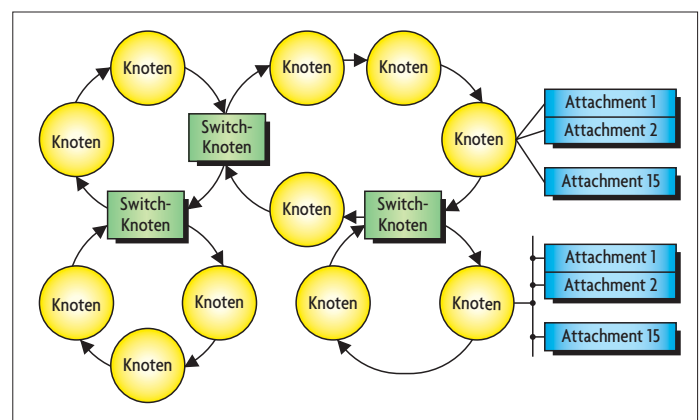
Hierbei handelt es sich um einen Leitungscode. Dabei werden 8-bit-Daten mit 10 Bits codiert. Damit wird verhindert, dass sich lange Folgen von Nullen oder Einsen bilden (Gleichspannungsausgleich). Für die Synchronisation ist leicht eine Taktrückgewinnung aus dem Datensignal möglich. Die Steigerung der Taktrate rechtfertigt die zusätzlich investierten Bits. Zudem können zahlreiche Übertragungsfehler auf Hardware-Ebene erkannt und korrigiert werden.

Ein weiteres Entwicklungsziel beim „CarRing II“-Netzwerk war die Kommunikation in Echtzeit. Das hier verwendete Medienzugangsverfahren kombiniert eine erweiterte Variante des „Time Division Multiple Access“-Verfahrens (TDMA) mit dem „Register Insertion“ (RI). Dieses neue Verfahren wird mit „Time Slot Access with Acknowledge Insertion“ (TA²I) bezeichnet. Das wichtigste Kriterium für Echtzeit besteht darin, dass eine maximale Datenpaket-Zustellzeit garantiert werden kann. Dieses ist gewährleistet, weil jeder Knoten wenigstens einmal pro TDMA-Zyklus Daten senden kann.

Mit einer ganzen Reihe von Maßnahmen wird eine hohe Zuverlässigkeit von CarRing II erreicht. So wird die 8B/10B-Codierung verwendet, mit deren Hilfe Übertragungsfehler erkannt werden; über spezielle Codewörter ist eine sichere Erkennung von Rahmengrenzen gewährleistet (**Kasten** „8B/1B-Codierung“). Sowohl der „Header“ als auch die Nutzdaten (Payload) eines Übertragungsrahmens sind mit CRC-Prüfsummen versehen. Dadurch lassen sich Übertragungsfehler erkennen und in einem begrenzten Maß sogar beheben. Durch die Verwendung mehrerer Übertragungsringe wird neben der Skalierbarkeit auch ein gewisser Grad an Redundanz erreicht. Der Knoten selbst verfügt über umfangreiche redundante Hardware-Komponenten und einen elektronischen „Bypass“. Zu den redundanten Komponenten zählt u.a. ein kompletter zweiter Knoten – der so genannte Schatten-Knoten. Er ist



! Bild 2. Im Vergleich der Kommunikationssysteme für das Automobil bietet CarRing II bei moderaten Kosten eine „zukunftsichere“ Datenübertragungsrate.



! Bild 3. Die Basisstruktur bei CarRing II ist ein unidirektionaler Ring, der die Knoten verbindet. An diese können jeweils bis zu 15 Attachments angebunden werden; über entsprechende Switch-Knoten lassen sich insgesamt 255 Ringe verbinden.

mit einer unabhängigen Stromversorgung ausgestattet und wird im Fehlerfall aktiviert. Der Bypass ermöglicht es, den Knoten bei einem Totalausfall von Haupt- und Schatten-Knoten zu umgehen. Es handelt sich hierbei um einen einfachen Puffer, der mindestens einen Übertragungsrahmen des Rings aufnehmen und weiterleiten kann.

TA²I

Bei „Time Slot Access with Acknowledge Insertion“ handelt es sich um ein neues Medienzugangsverfahren, das eine Kombination aus einer Variante des „Time Division Multiple Access“-Verfahrens (TDMA) und Register Insertion (RI) darstellt. Bei dieser TDMA-Variante werden die Zeitschlitz nicht wie üblich über einen globalen Takt generiert, sondern durch leere, kreisende Transportrahmen (so genannte Transport Frames) implementiert. Jeder Knoten besitzt seinen eigenen Transport Frame. Register Insertion (RI) wird zur Übertragung kurzer Bestätigungen (so genannter Echos) verwendet, um die effektive Nutzung der Ringbandbreite zu erhöhen. Dazu kann ein Knoten den Ring temporär erweitern, indem er die Länge einer seiner Ringpuffer variiert. Echos werden mit RI vom Sender in den Ring eingefügt und nach einer Ringumrundung wieder entfernt.

Eine Besonderheit stellt die Implementierung der bei TA²I verwendeten Zeitschlitz dar (siehe **Kasten** „TA²I“!). Diese werden nicht wie üblich von einem zentralen Master-Knoten mit Hilfe eines globalen Taktes zugeteilt, sondern durch leere Übertragungsrahmen implementiert, die ständig im Ring kreisen. Jeder Knoten im Ring hat seinen eigenen Übertragungsrahmen, der in seiner Funktion einem Zeitschlitz entspricht. Diese Art der Implementierung erlaubt es, die Funktionsfähigkeit des Rings in jedem Knoten mit Hilfe von Timern zu über-

wachen. Weitere Maßnahmen zur Erhöhung der Zuverlässigkeit sind die Verwendung eines Zweiphasen-Handshake-Protokolls anstelle von einfachen Sende- und Empfangsbefehlen, eine automatische Datenpaket-Wiederholung im Fehlerfall und umfangreiche Timeout-Überwachungen.

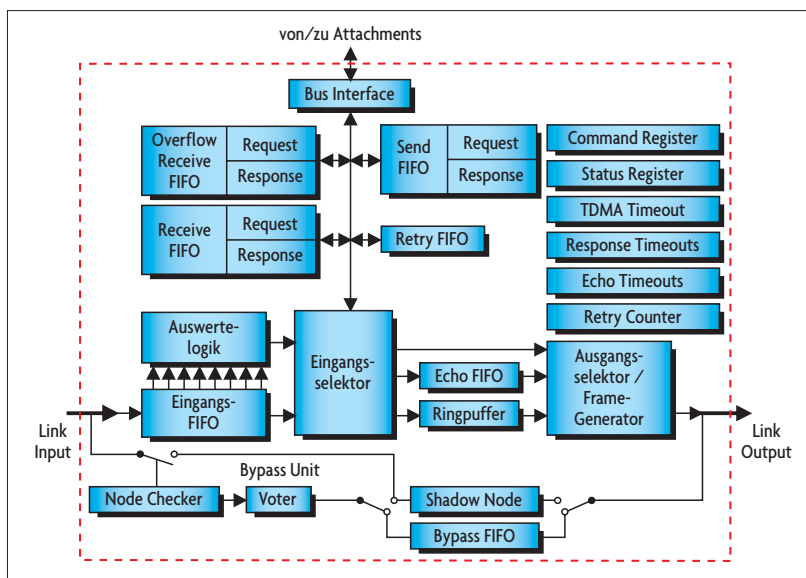
CarRing II kann bis zu 255 Ringe umfassen, damit ist die Forderung nach einer guten Skalierbarkeit erfüllt. Dadurch, dass einzelne Ringe unterschiedliche Aufgaben übernehmen, wird nicht nur die Sicherheit erhöht, sondern auch ein „gutes Design“ möglich. Das Netzwerk eines Kleinwagens kann beispielsweise mit dem eines Oberklassefahrzeugs kompatibel sein, indem es eine Teilmenge dessen Netzwerks bildet. Schließlich bietet CarRing II einen Mechanismus für die effiziente und zuverlässige Vergabe der „Bandbreite“. Erreicht wird diese durch die dezentrale Realisierung mit Hilfe des TA²I-Verfahrens. Zur Steigerung der Effizienz werden zwei Erweiterungen von TA²I verwendet: ETA²I (**Kasten** „ETA²I“) und OTA²I (**Kasten** „OTA²I“).

■ Interne Struktur der Knoten

Ein Knoten im CarRing-II-Netzwerk verfügt über Schnittstellen zum Ring und zu den Attachments (**Bild 4**). Die Schnittstellen zum Ring (Link Input, Link Output) erlauben eine Verbindung mit den beiden benachbarten Knoten. Jeder Knoten verfügt über getrennte Sende- und Empfangspuffer, um mögliche Blockierungen (Deadlocks) zu vermeiden. Zusätzlich hat jeder Puffer zwei getrennte Speicherklassen: Request und Response. Der Sendepuffer (Send FIFO) hält die zu sendenden Daten von den Attachments. Der „Retry FIFO“ ist ein spezieller Sendepuffer, in dem bereits gesendete Daten für den Fall einer Datenpaket-Wiederholung gespeichert werden. Im Empfangspuffer (Receive FIFO) werden empfangene Daten bis zur Weitergabe an die Attachments gespeichert. Ein zusätzlicher Empfangspuffer (Overflow Receive FIFO) kann von Daten mit hoher Priorität genutzt werden, falls der reguläre Empfangspuffer bereits voll ist. Mit diesem Verfahren lassen sich kurzzeitig erhöhte Datenaufkommen bewältigen, ohne dass Datenpakete verworfen werden müssen.

Die Puffer sind so organisiert, dass sie die Reihenfolge der Datenpakete bewahren. Dies ist von erheblicher Bedeutung, da z.B. „X by Wire“-Anwendungen eine strikt sequentielle Verarbeitung der Daten erfordern. Über den Eingangs-FIFO und eine daran angeschlossene Auswertelogik wird während des Empfangs eines Datenrahmens synchron zum Takt dessen „Header“ gelesen und ausgewertet. Die Auswertelogik ermittelt daraus unter anderem den Datentyp und die Zieladresse der Daten und entscheidet danach über den weiteren Weg zum Zielknoten bzw. die weitere Verarbeitung. Der Eingangsselektor ist für den eigentlichen Empfang der Daten verantwortlich. Die Aufgabe des Ausgangsselektors besteht darin, Daten zum Ausgang zu leiten und Bestätigungen in den Datenstrom einzufügen.

Die Funktionstüchtigkeit des Haupt-Knotens wird anhand von Plausibilitätsprüfungen im „Node Checker“ geprüft. Falls der Haupt-Knoten nicht korrekt arbeitet oder ganz ausfällt, realisiert die „Bypass Unit“ einen redundanten Backup. Bei einem Totalausfall werden eintreffende Daten automatisch über den „Bypass FIFO“ weitergeleitet. Sollte der Haupt-Knoten nicht korrekt funktionieren, wird der Betrieb



! Bild 4. Die Struktur eines CarRing-II-Knotens ergibt sich unmittelbar aus dem Übertragungsverfahren: In den vom „Link Input“ zum „Link Output“ durchlaufenden Datenstrom werden Informationen zu und von den Attachments aus- bzw. eingelesen. Eine „Bypass Unit“ ermöglicht die Umgehung des Knotens, sollte dieser nicht korrekt arbeiten.

ETA²I

Diese Erweiterung von TA²I wird mit „Extended Time Slot Access with Acknowledge Insertion“ bezeichnet. Hierbei ist unter bestimmten Voraussetzungen (siehe Abschnitt „Effiziente Nutzung der Zeitschlitz“) die Wiederverwendung nicht genutzter Zeitschlitz (Transportrahmen) möglich.

OTA²I

Diese Erweiterung von TA²I wird mit „Open Time Slot Access with Acknowledge Insertion“ bezeichnet. Hierbei kann ein Knoten seinen eigenen Transportrahmen zur Nutzung durch andere Knoten freigeben, falls er selbst keine Daten senden möchte.

auf einen Backup-Knoten (Shadow Node) umgestellt. Der Knoten besitzt außerdem diverse Register zur Initialisierung und Fehlerdiagnose. Einige Timer dienen zur Erkennung von Zeitüberschreitung bei Datenrahmen. Durch einen „Retry Counter“ wird die Zahl der Datenpaket-Wiederholungen begrenzt. Ohne eine solche Beschränkung wäre die Echtzeit-Fähigkeit nicht gegeben.

■ Effiziente Nutzung der Zeitschlitz

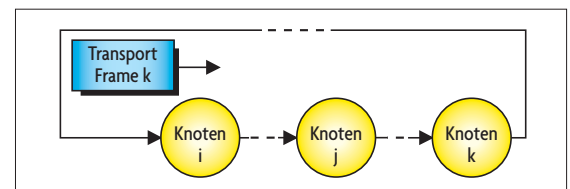
CarRing II verwendet, wie schon beschrieben, eine Variante von TDMA, bei der die Zeitschlitz als leere Übertragungsrahmen implementiert sind. Diese leeren Übertragungsrahmen werden als „Transport Frames“ bezeichnet.

In Kombination mit dem Einfügen kurzer Bestätigungen (Echos) mittels „Register Insertion“ (RI) wird das Medienzugangsverfahren als TA²I (Time Slot Access with Acknowledge Insertion) bezeichnet. Mit den synchron eintreffenden Transport Frames ist eine maximale Datenpaket-Zustellzeit garantiert, damit erfüllt das Protokoll die Forderung nach Einhaltung der Echtzeit-Bedingung. Jeder Knoten in einem Ring hat seinen eigenen Transport Frame, in dem er einmal pro TDMA-Zyklus Daten senden kann. Der Knoten erkennt seinen Transport Frame anhand einer Identifikationsnummer (ID). Beim Senden von Daten konvertiert der Knoten seinen Transport Frame in einen Datenrahmen. Nachdem der Empfänger den Inhalt des Datenrahmens gelesen hat, konvertiert er ihn in einen Transport Frame zurück.

Der Mechanismus der „Register Insertion“ (RI) wird für die Übertragung kurzer „Echos“ verwendet. Dadurch lässt sich die Bandbreite des Rings besser nutzen. Diese Echos enthalten nur die Information, ob die Daten korrekt beim Empfänger angekommen sind oder verworfen wurden. Diese Information lässt sich mit einem einzigen Bit codieren. Die Verwendung eines maximal 74 byte langen Transport Frames zur Übertragung einer derart kurzen Information würde die effektive Nutzung der Bandbreite drastisch senken. Deshalb kann ein Knoten den Ring temporär erweitern und dabei ein Echo einfügen. Dazu verfügt jeder Knoten über einen Ringpuffer variabler Länge. Beim Erweitern des Rings wird der Datenstrom innerhalb des Puffers so lange verzögert, bis ein Echo eingefügt wurde. Die Größe des Ringpuffers ist abhängig von der Anzahl der Knoten im Ring. Ein Knoten

muss genau so viele Echos einfügen können, wie es Knoten im Ring gibt, also maximal 16. Echos werden mit RI vom Sender in den Ring eingefügt und nach einer Ringumrundung vom Sender wieder entfernt.

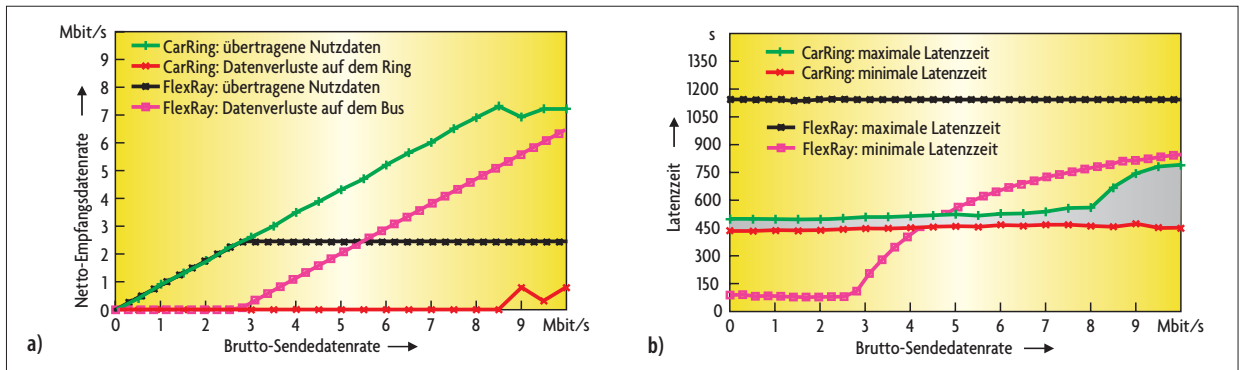
Einen gravierenden Nachteil hat das hier vorgestellte Medienzugangsverfahren dennoch: Wenn ein Knoten keine Daten senden will, bleibt sein Transport Frame ungenutzt. Es ist auch keinem anderen Knoten gestattet, diesen leeren Transport Frame für den Datentransport zu nutzen. Mit anderen Worten: Bandbreite geht verloren und kann somit nicht effizient genutzt werden. FlexRay versucht dieses Problem durch Einführung eines dynamischen Segments zu lösen, indem der Zugang zum Medium in Abhängigkeit der



tatsächlichen Bedürfnisse eines Knotens gewährt wird. CarRing II umgeht diese Schwierigkeit durch Erweiterungen von TA²I. Die Erweiterungen – ETA²I und OTA²I und ihre Kombination EOTA²I – sind abwärtskompatibel zu TA²I und können parallel dazu eingesetzt werden.

Bei ETA²I ist unter bestimmten Voraussetzungen eine Wiederverwendung der ungenutzten Transport Frames möglich. Wenn ein Knoten keine Daten senden will, kann sein Transport Frame unter Umständen von den nachfolgenden Knoten im Ring genutzt werden. Angenommen, ein beliebiger Knoten k besitzt einen Transport Frame mit der ID k. Nun kann der lee-

■ Bild 5. Beim „i zu j“-Transfer kann der leere Transport Frame k für eine Datenübertragung zwischen zwei weiteren Knoten i und j genutzt werden.



I Bild 6. Vergleich des Datendurchsatzes und der Latenzzeiten bei CarRing II und FlexRay bei nur einem Sender und einem Empfänger. Für einen besseren Vergleich wurde die Datenübertragungsrate bei beiden Bussystemen auf 10 Mbit/s begrenzt. Die geringen Unterschiede bei der Steigung der Kurven (a) sind darauf zurückzuführen, dass bei CarRing II bei gleicher Nutzlast ein größerer Header übertragen werden muss. Im Diagramm b) sind die minimalen und maximalen Latenzzeiten dargestellt.

re Transport Frame k für eine Datenübertragung zwischen zwei weiteren Knoten i und j eingesetzt werden, sofern sich diese beiden Knoten in dem Ring „vor“ Knoten k befinden. Solche Übertragungen werden mit „i-zu-j-Transfer“ bezeichnet (Bild 5). Knoten k wird von dieser zusätzlichen Übertragung nicht beeinträchtigt. Die Aussage, ob sich ein Knoten „vor“ einem anderen Knoten befindet, lässt sich nur schwer prüfen, da es sich wohlgerne um einen Ring handelt. Dennoch wird diese Aussage bei CarRing II mit Hilfe eines speziellen Algorithmus getestet, auf den hier nicht genauer eingegangen wird.

Durch eine solche Erweiterung kann also die Bandbreite effizienter genutzt werden. Dieser Vorteil lässt sich aber nur so lange aufrechterhalten, wie die Voraussetzungen für derartige Übertragungen tatsächlich erfüllt sind. Existiert kein i-zu-j-Transfer, geht die Bandbreite weiterhin verloren. An dieser Stelle greift die zweite Erweiterung: Bei OTA²I (Open Time Slot Access with Acknowledge Insertion) ist es den Knoten nun auch gestattet, ihre eigenen Transport Frames für die Verwendung durch andere Knoten freizugeben. Die Freigabe kann nur durch den Eigentümer des Transport Frames erfolgen, wenn dessen Sendepuffer leer ist. Ohne weitere Voraussetzungen können dann alle Knoten im Ring diesen Frame für einen Datentransfer nutzen. Der Eigentümer hebt die Freigabe wieder auf, sobald sich Daten in seinem Sendepuffer befinden. Damit signalisiert er den anderen Knoten, dass dieser Frame im nächsten

TDMA-Zyklus nur von ihm verwendet werden darf. Damit bleibt die Echtzeit-Fähigkeit erhalten.

Ungenutzte Transport Frames können jetzt mehrfach innerhalb eines TDMA-Zyklus verwendet werden. Es ist sogar denkbar, dass ein einzelner Sender die gesamte Ringbandbreite für sich beansprucht. Mit dieser Erweiterung kann der Ring über feine Zwischenschritte in einem komplett synchronen Modus bis hin zu einem ausschließlich asynchronen Modus betrieben werden.

■ Einfache und zuverlässige Kommunikation

Bei CarRing II ersetzt ein Zweiphasen-Handshake-Protokoll die herkömmlichen Sende- und Empfangsoperationen. Daten werden in Form von Nachrichten übertragen, es gibt keine Datenpaket-Verluste, und die Reihenfolge der Datenpakete kann garantiert werden. Ferner unterstützt das Netzwerk-Protokoll „Multicast“ und „Broadcast“ sowie die Segmentierung sehr langer Nachrichten. Grundsätzlich wird zwischen einem Sender und Empfänger eine „Sitzung“ (Session) aufgebaut. Innerhalb dieser Sitzung können bis zu 16 Ende-zu-Ende-Verbindungen auf Basis des Zweiphasen-Handshakes aufgebaut werden. Die Verbindungen arbeiten parallel und unabhängig voneinander.

Bei der Kommunikation innerhalb einer einzelnen Verbindung wiederum werden die Daten sequentiell, unter Einhaltung ihrer logischen Reihenfolge, in einer Sequenz von Datenpaketen

übertragen. Jede Kommunikation ist zeitlich in die beiden Phasen „Request“ und „Response“ unterteilt, wobei jede Phase in einem separaten Datenpaket übermittelt wird. Die Request-Phase stellt eine Art Anfrage dar, während in der Response-Phase die Antwort auf diese Anfrage übermittelt wird. Das Response-Datenpaket stellt außerdem eine implizite Bestätigung dar. Ein Vorteil der parallelen Verbindungen ist die effiziente Nutzung der Bandbreite. Es entsteht kein Verlust, während der Knoten auf ein Response-Datenpaket wartet, weil sich verschiedene Phasen mehrerer Verbindungen den Ring in einer Art Zeitmultiplex teilen.

■ Simulationsergebnisse

Die folgenden Diagramme zeigen einen Vergleich der Leistungsdaten von CarRing II und FlexRay unter normalen Bedingungen und in Überlastsituationen. Die Vergleiche beschränken sich auf Durchsatz und Latenz. Zur Simulation von FlexRay wurde eine am Institut entwickelte Software auf Basis des NS-2-Simulators und einer Spezifikation von FlexRay in der Version 2.0 verwendet. Die Auswertung bei CarRing II basiert auf den Ergebnissen der speziell für ringbasierte Netze entworfenen Simulationssoftware „RingSim“, die im Rahmen von „Steer by Wire“ weiterentwickelt wurde.

RingSim erlaubt die Simulation einzelner Ringe bis hin zu komplexen Ringsystemen bei einer Vielzahl justierbarer Parameter. Für alle Simula-

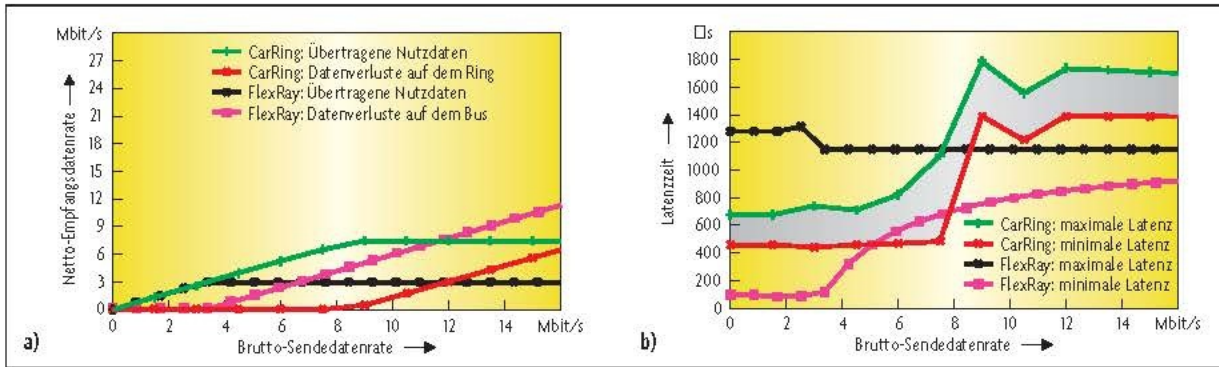


Bild 7. Vergleich des Datendurchsatzes und der Latenzzeiten bei CarRing und FlexRay bei drei Sendern und drei Empfängern. Bemerkenswert ist der geringe Unterschied zwischen minimaler und maximaler Latenzzeit bei CarRing II (a). In Diagramm b) sind die minimalen und maximalen Latenzzeiten dargestellt.

tionen beträgt die Länge der Nutzdaten 64 byte, die Laufzeit ist auf 32 ms begrenzt, wobei das System nach 8 ms einen eingeschwungenen Zustand erreicht hat. Insgesamt stehen jeweils sechs Knoten zur Verfügung, die bei FlexRay über einen herkömmlichen Bus und bei CarRing II über einen Ring verbunden sind. Zum besseren Vergleich mit FlexRay wird CarRing II nicht wie vorgesehen mit mindestens 200 Mbit/s, sondern lediglich mit 10 Mbit/s betrieben, was sich erheblich auf die Latenzzeiten auswirkt. Die Datenraten der Sender werden schrittweise von 0 auf 10 Mbit/s erhöht. CarRing II verwendet hier das Medienzugangsverfahren EOTA²¹.

Bild 6 zeigt die Ergebnisse der Simulation an einem System, in dem nur einer der sechs Knoten als Sender und einer als Empfänger arbeiten. Die restlichen Knoten sind inaktiv. Das linke Diagramm (a) zeigt die zusammengefasste Bruttodatenrate (Nutzdaten und Header) aller Sender (Eingangsdatenrate in Mbit/s) im Vergleich zu den Nutzdaten, die tatsächlich bei den Empfängern angekommen sind (Netto-Datenübertragungsrate in Mbit/s). Bemerkenswert ist der geringe Unterschied zwischen minimaler und maximaler Latenzzeit bei CarRing II (im Diagramm (b) grau dargestellt). Bild 7 zeigt die Ergebnisse einer Simulation mit drei Sendern und drei Empfängern.

Es lässt sich festhalten, dass CarRing II eine wesentlich effektivere Nutzung der Bandbreite aufweist, wogegen die Latenzzeiten bei FlexRay mit zunehmender Senderzahl besser werden, was an der geringeren Geschwindigkeit und dem zusätzlichen

Aufwand für das Zweiphasen-Handshake-Protokoll von CarRing II liegt. Beide Protokolle gewährleisten dennoch ein stabiles Verhalten in Überlastsituationen.

■ 1 Gbit/s Datenübertragungsrate

In einem der nächsten Schritte werden CarRing-II-Netzwerk-Knoten in VHDL als FPGAs implementiert, um die Simulationsergebnisse zu verifizieren und den Teststand funktionsfähig zu machen. Dazu wird ein Kommunikationsring aufgebaut, der mit

einer Datenrate von 1 Gbit/s arbeitet. Zur Vervollständigung der Protokollspezifikation werden außerdem Algorithmen für die Transportschicht und die Wegewahl entwickelt. Die Fertigstellung eines Prototyps ist für Ende 2007 vorgesehen. *jw*

Internet Links

- [1] ITZ – Informationstechnisches Zentrum der TU Clausthal: www.itz.tu-clausthal.de
- [2] Institut für Informatik der TU Clausthal – Abteilung „Technische Informatik und Rechnersysteme“: www.in.tu-clausthal.de/abteilungen/rechnersysteme



Marcel Wille

erlangte 2003 sein Diplom für Informatik an der TU Clausthal. Während des Studiums war er freiberuflicher Mitarbeiter der Firma C-Partner und hat dort Softwareprojekte im Bereich e-Commerce durchgeführt. Nach einem kurzen Aufenthalt bei der Firma Intershop in Jena kehrte er Ende 2003 an die TU Clausthal zurück und arbeitet als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe von Prof. Richter am dortigen Institut für Informatik. Im Rahmen seiner Promotion er maßgeblich an der Entwicklung des CarRing-Netzwerks beteiligt.

marcel.wille@in.tu-clausthal.de



Prof. Dr.-Ing. Dr. rer. nat. habil. Harald Richter

erlangte sein Diplom für Elektrotechnik an der TU Stuttgart. Mit seiner Arbeit über „Multiprozessor mit dynamisch variabler Topologie“ promovierte er zum Dr.-Ing. an der TU München. Nach seiner Habilitation zum Dr. rer. nat. habil. in Technischer Informatik an der TU München über „Verbindungsnetzwerke“ arbeitete er als Privatdozent für Technische Informatik an der TU München und der Uni Augsburg; derzeit hat er die Professur „Technische Informatik und Rechnersysteme“ an der TU Clausthal inne.

richter@in.tu-clausthal.de