

CarRing II: Kann ein Echtzeit-Computernetzwerk die Feldbusse im Auto ersetzen?

Ist ein Nachfolger für FlexRay & Co. bereits gefunden?

Während die Automobilindustrie aufgrund fehlender Standards und einer Vielzahl verschiedener Bussysteme noch mit Qualitäts- und Performanzproblemen ihrer mechatronischen Systeme zu kämpfen hat, steigen die Anzahl solcher Systeme und die damit verbundenen Kommunikationsanforderungen unaufhörlich. Dieser Trend wird sich mit dem Einsatz von „x-by-wire“ Funktionen noch verstärken. Höhere Datenübertragungsraten und Echtzeit-Fähigkeit bei annähernd gleichbleibenden Kosten erfordern neue Ansätze. CarRing II ist ein solcher Ansatz, der versucht die Probleme von Feldbussen zu lösen und alle zukünftigen Anforderungen im Automobilbereich zu erfüllen. Dabei wird zur Vernetzung mechatronischer Komponenten ein zuverlässiges Echtzeit-Computernetzwerk anstelle herkömmlicher Feldbusse verwendet. CarRing II basiert auf einer Ringtopologie und erreicht durch effiziente Protokolle Datenraten bis 1 Gbit/s. Ziel ist die Suche nach einer Antwort auf die Frage: Was kommt nach FlexRay?

Von Dipl.-Inf. Marcel Wille



Innovationen im Auto sind heutzutage vor allem im Bereich Mechatronik zu finden. Dieser Bereich beinhaltet das Zusammenspiel und die Vernetzung mechanischer und elektronischer Systeme, wie beispielsweise Steuergeräte, Sensoren, Elektromotoren oder andere Aktoren. Bereits heute enthalten Oberklassewagen mehr als 80 Steuergeräte, die mit einer Vielzahl von Sensoren und Aktoren vernetzt sind. Ihr Einsatz hat in den letzten Jahrzehnten zahlreiche Fahrerassistenzsysteme, wie zum Beispiel ABS oder ESP hervorgebracht und damit Sicherheit und Fahrkomfort im Auto entscheidend verbessert. Entwicklungen mechatronischer Systeme sind demnach auch mit dem Einsatz von Elektronik und Software verbunden. Die

Elektronik sorgt zwar einerseits für mehr Komfort und Sicherheit, ist aber andererseits auch für viele Pannen und Ausfälle verantwortlich.

Während die Zahl mechatronischer Systeme und die Kommunikationsanforderungen ständig gestiegen sind – und mit zukünftigen „x-by-wire“ Funktionen weiter steigen werden –, ist die Technologie zur Kopplung der Systeme bei konventionellen Feldbussen stehen geblieben. Fehlende Funktionalität wird meistens durch Anwendungssoftware nachgebildet, mit dem Ergebnis, dass ein Großteil der Arbeit in den Händen der Anwendungsprogrammierer liegt. Das ist nur eine Ursache für

x-by-wire:

Im Auto der Zukunft werden bisher elementare mechanische Funktionen, wie z.B. Bremsen oder Lenken nach und nach durch mechatronische Lösungen, sog. „x-by-wire“ Funktionen, ersetzt. Beispiele hierfür sind das elektronische Lenkrad (steer-by-wire) oder die elektronische Bremse (brake-by-wire). Die Ideen reichen bis hin zum Fahren mit Autopilot. Damit verbunden sind aber auch der Einsatz weiterer Steuergeräte und zusätzliche Kommunikationsanforderungen.

Qualitäts- und Zuverlässigkeitsprobleme der Automobilindustrie. Eine weitere liegt im Einsatz vieler unterschiedlicher Netzwerke und Software zur Verbindung mechatronischer Systeme. Einen einheitlichen Standard gibt es bisher nicht. Ferner kann mit einem Feldbus nur eine geringe Zahl von Komponenten vernetzt werden, was zu beschränkter Skalierbarkeit und Flexibilität führt. All diese Probleme haben negative Auswirkungen auf den Automobilssektor, da sie zusätzliche Kosten verursachen und zukunftsweisende Entwicklungen behindern.

CAN (*Controller Area Network*)

ist ein asynchrones, serielles Bussystem, das von der Firma Bosch entwickelt wurde. CAN unterstützt Datenraten bis 1 Mbit/s und Prioritäten. Für den Medienzugang wird CSMA/CD eingesetzt. Falls eine Kollision auf dem Bus entdeckt wurde, kann die Übertragung des Rahmens höherer Priorität durch Bit-Arbitrierung fortgesetzt werden. Die Übertragung des anderen Datenrahmens wird abgebrochen und erst wiederholt, wenn der Bus frei ist.

LIN (*Local Interconnect Network*)

ist ein kostengünstiger Feldbus für einfache Anwendungen, wie z.B. Fensterheber. LIN erlaubt eine kollisionsfreie Übertragung mit Datenraten bis 20 kBit/s. Dazu bestimmt der Busmaster welcher der anderen Knoten am Bus senden darf.

MOST (*Media Oriented System Transport*)

wurde speziell für die Übertragung von Multimediadaten im Auto entwickelt. Mit Datenraten von 24,8 Mbit/s lassen sich unkomprimierte Audio- und Videostreams in Form von Blöcken übertragen. Ein Block beinhaltet dabei 16 Frames mit je 64 Byte Nutzdaten. Bei Most sind neben Schicht 1 und 2 auch weitere Schichten definiert.

Nicht zuletzt deshalb befasst sich die Abteilung „Technische Informatik und Rechnersysteme“ der TU Clausthal seit 2004 mit der Entwicklung eines neuen und zukunftsweisenden Verbindungsnetzwerks für Autos. Aus den Ergebnissen der bisherigen Forschung ist das Verbindungsnetzwerk *CarRing II* hervorgegangen. Hierbei handelt es sich um ein hochzuverlässiges, echtzeitfähiges Kommunikationsnetzwerk, das für den Einsatz bei sicherheitskritischen Anwendungen und zukünftigen „x-by-wire“ Funktionen entwickelt wurde. Im Gegensatz zu herkömmlichen Feldbussen, stellt *CarRing II* eine Vielzahl von Funktionalitäten auf allen Schichten des OSI-7-Schichtenmodells bereit. Eine Analyse vorhandener Computernetzwerke, wie beispielsweise *Ethernet* oder *FireWire* ergab, dass diese aufgrund fehlender Echtzeitfähigkeit, zu hoher Komplexität oder zu hohen Kosten nicht für den Einsatz im Auto in Frage kommen. In heutigen Autos dominieren 4 verschiedene Feldbussysteme die Vernetzungstechnik. Dabei handelt es sich um *CAN*, *LIN*, *MOST* und *FlexRay*.

FlexRay als erster Schritt in die richtige Richtung

FlexRay ist ein serielles, deterministisches, zuverlässiges und fehlertolerantes Feldbussystem, das speziell für den Einsatz im Auto entwickelt wurde. Die Entwicklung von *FlexRay* erfolgt seit dem Jahr 2000 im Rahmen des *FlexRay*-Konsortiums, zu dessen Mitgliedern unter anderem DaimlerChrysler und BMW gehören. Nach mehrjähriger Erprobung kommt *FlexRay* seit Ende dieses Jahres im BMW X5 weltweit erstmals zum Serieneinsatz.

FlexRay stellt Datenraten bis 10 Mbit/s zur Verfügung. Über einen einzelnen Bus können bis zu 64 Kommunikationsknoten miteinander verbunden werden. Da es sich um einen herkömmlichen Feldbus handelt, sind nur die Schichten 1 und 2 im OSI-7-Schichtenmodell definiert.

Vielfältige Designmöglichkeiten erlauben Bustopologien ebenso wie Sterntopologien und Kombinationen aus beiden. Die Netzwerkknoten bei *FlexRay* werden als

elektronische Steuereinheiten (ECUs) bezeichnet. Sie erzeugen und verarbeiten Daten. Jede ECU ist an bis zu zwei Kommunikationskanäle angeschlossen, die unabhängig voneinander angesprochen werden können und unter Umständen sogar verschiedene Topologien aufweisen. Es gibt zwei Anwendungsmöglichkeiten für die Kanäle. Zunächst können auf beiden Kanälen verschiedene Datenblöcke gesendet werden, womit sich die Bandbreite steigern lässt. Zum zweiten kann ein Datenblock zeitgleich auf beiden Kanälen übertragen werden, um durch die Redundanz eine zusätzliche Ausfallsicherheit zu erreichen.

TDMA (Time Division Multiple Access):

Bei TDMA handelt es sich um ein Zeitmultiplexverfahren, bei dem in bestimmten Zeitabschnitten (Zeitschlitz) die Daten verschiedener Sender auf einem gemeinsamen Medium übertragen werden. Dabei unterscheidet man zwischen dem synchronen Verfahren mit einer festen Zuteilung von Zeitschlitz für jeden Knoten und dem asynchronen Verfahren mit einer bedarfsgerechten Zuteilung von Zeitschlitz.

FlexRay unterstützt synchrone Datentransfers im statischen und asynchrone im dynamischen Teil. Synchrone Übertragungen garantieren maximale Verzögerungszeiten bei Echtzeit-Anwendungen. Für den Medienzugang im statischen Teil wird *TDMA* verwendet. Hierbei erhält jeder Knoten ein statisches Zeitintervall (Zeitschlitz), in dem er das exklusive Nutzungsrecht für den Bus hat und Daten senden kann. Hat ein Knoten keine Daten zu senden, bleibt sein

Zeitschlitz und damit das Medium ungenutzt. Andere Knoten können diese ungenutzten Zeitschlitz nicht verwenden, was einer der Nachteile von *FlexRay* ist.

COMMUNICATION CYCLE

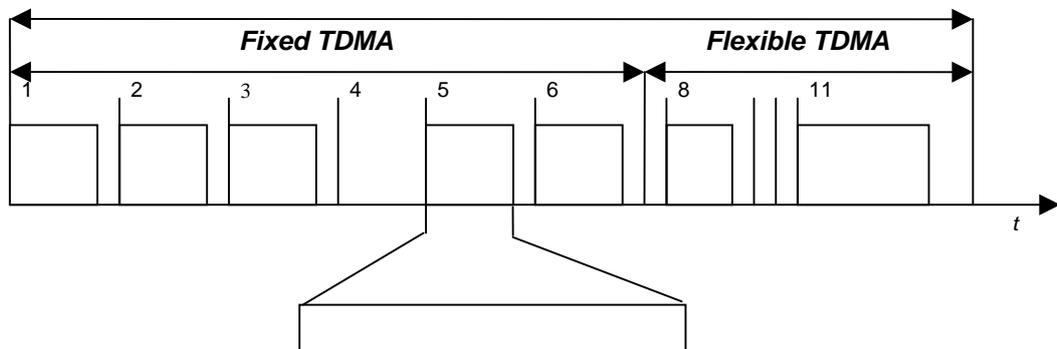


Abbildung 1: FlexRay-Kommunikationszyklus

Das Medienzugangsverfahren im dynamischen Segment wird mit *Flexible TDMA* bezeichnet. Bei *FTDMA* wird die Echtzeit zugunsten einer verbesserten Netzwerkauslastung vernachlässigt. Die Buszuteilung erfolgt prioritätsbasiert, indem den Knoten in einer vordefinierten Reihenfolge die Nutzung des Busses erlaubt wird. Nachdem alle für *FTDMA* zur Verfügung gestellten Zeitschlitz verbraucht sind, wird den verbliebenen Knoten kein Buszugriff mehr gewährt. Folglich haben Knoten mit geringer Priorität unter Umständen keine Möglichkeit Daten zu senden. Deshalb kann bei *FTDMA* keine maximale Verzögerungszeit der Daten garantiert werden. Es ist somit ungeeignet für Echtzeit-Anwendungen.

Die Anforderungen an *FlexRay* sind mit denen von *CarRing II* vergleichbar. Allerdings steht *CarRing II* weniger in Konkurrenz zu *FlexRay*, sondern könnte vielmehr ein potentieller Nachfolger werden. Sicherlich war und ist *FlexRay* ein erster Schritt in Richtung zuverlässige und echtzeitfähige Kommunikation im Auto, aber auf Dauer wird auch *FlexRay* den ständig steigenden Anforderungen nicht genügen.

CarRing II – Highlights eines neuen Ansatzes

Bei der Entwicklung von *CarRing II* werden mehrere Ziele verfolgt. Zunächst sollen die Probleme von Feldbussen, wie z.B. begrenzte Skalierbarkeit und eingeschränkte Zuverlässigkeit, gelöst werden. Außerdem soll durch ein unabhängiges Format der Datenaustausch zwischen Systemen verschiedener Hersteller ermöglicht werden. Letztendlich soll *CarRing II* eine einheitliche Lösung für ein Kommunikationsnetzwerk im Auto zur Verfügung zu stellen, das die Anforderungen, insbesondere von Echtzeit-Anwendungen, aller zukünftigen Innovationen im Auto erfüllen kann. Im Vergleich zu Feldbussen vollzieht *CarRing II* einen Paradigmenwechsel bei der systemweiten Kommunikation im Auto, indem jetzt ein Echtzeit-Computernetzwerk mit allen notwendigen Funktionen zur Verfügung gestellt wird. Die Entwicklung orientiert sich dabei eng am OSI-7-Schichtenmodell.

CarRing II ist ein Hochgeschwindigkeitsnetzwerk mit Datenraten von 200 Mbit/s bis 1 Gbit/s. Die hohen Datenraten sowie Echtzeitfähigkeit, Skalierbarkeit und Effizienz erreicht *CarRing II* durch Verwendung einer Ringtopologie und effiziente Protokolle. Als Übertragungsmedien sind sowohl optische Plastikfasern (POF) als auch kupferbasierte Leitungen vorgesehen. Besonders Plastikfasern sind sehr flexibel, bei annähernd gleichen Kosten leichter als Kupferkabel, einfach in der Handhabung und absolut unempfindlich gegenüber elektrischen und magnetischen Störungen.

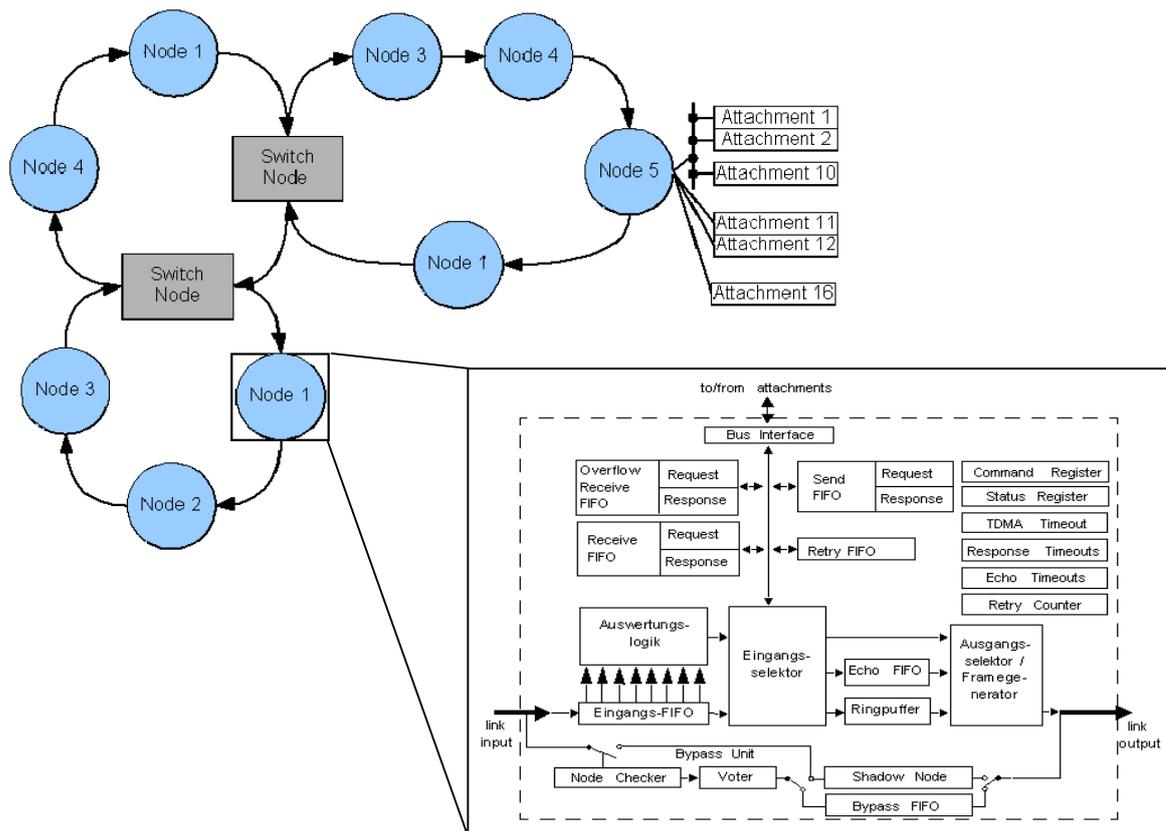


Abbildung 2: CarRing II Topologie und Knotenstruktur

Grundsätzlich unterscheidet man bei *CarRing II* zwischen Knoten und Attachments, wobei bis zu 16 Attachments an einen einzigen Knoten angeschlossen werden können. Die Knoten sind elektronische Chips, die das für *CarRing II* entwickelte

Protokoll umsetzen. Attachments können Sensoren, Aktoren, Steuergeräte, parallele und serielle Schnittstellen sowie komplette Subsysteme, wie z.B. ein CAN-Bus, sein. Basisstruktur ist ein unidirektionaler Ring mit bis zu 16 Knoten. Maximal 255 Ringe können über entsprechende Switchknoten miteinander verbunden werden. Insgesamt lassen sich bei *CarRing II* demnach 4096 vollwertige Kommunikationsknoten mit je 16 Attachments realisieren. Da jeder Knoten als Sender und Empfänger arbeitet, ist eine Vollduplex-Kommunikation über den unidirektionalen Ring möglich.

Einfache Knotenstruktur spart Kosten

Ein Knoten im *CarRing II*-Netzwerk verfügt über Schnittstellen zum Ring und zu den Attachments. Die Schnittstellen zum Ring (*link input*, *link output*) erlauben eine Verbindung mit den beiden benachbarten Knoten.

Jeder Knoten verfügt weiterhin über getrennte Sende- und Empfangspuffer mit je 2 Speicherklassen – Request und Response –, um mögliche Blockierungen (Deadlocks) zu vermeiden. Eine weitere Aufteilung der Speicherklassen erhält man durch Prioritäten. Der Sendepuffer (*Send FIFO*) beinhaltet die Daten von den Attachments. Der Retry FIFO ist ein spezieller Sendepuffer, in dem bereits gesendete Daten für den Fall einer Paketwiederholung gespeichert werden. Im Empfangspuffer (*Receive FIFO*) werden 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 dieser Technik lassen sich kurzzeitig erhöhte Datenaufkommen bewältigen, ohne Pakete verwerfen zu müssen. Über den *Eingangs-FIFO* und eine daran angeschlossene Auswertungslogik werden die Informationen des Datenpakets in seinem Header in Echtzeit gelesen und ausgewertet. Darauf aufbauend werden Steuersignale für den *Eingangsselektor* generiert und Verarbeitungsentscheidungen getroffen.

Der *Eingangsselektor* modifiziert zu sendende Pakete, leitet Pakete im Ring weiter, startet die Erzeugung von kurzen Bestätigungspaketen (Echos) und entfernt eintreffende Bestätigungen vom Ring. Ein variabler Ringpuffer speichert ggf. Datenpakete solange bis der Knoten eine Bestätigung gesendet hat. Aufgabe des *Ausgangsselektors* ist es, Daten auf den Ring zu geben und Bestätigungen in den Datenstrom einzufügen.

Die so genannte *Bypass Unit* beinhaltet eine redundante Backup-Lösung, falls der Hauptknoten nicht korrekt arbeitet oder ganz und gar ausfällt. Bei einem Totalausfall werden eintreffende Daten automatisch über den *Bypass FIFO* weitergeleitet. Sollte der Hauptknoten nicht korrekt funktionieren, wird der Betrieb auf den Backup-Knoten (*Shadow Node*) umgestellt.

Hohe Zuverlässigkeit für sicherheitskritische Anwendungen

Eine Vielzahl von Maßnahmen sorgt für die hohe Zuverlässigkeit von *CarRing II*. Auf der Schicht 1 des OSI-7-Schichtenmodells ist die Verwendung von Plastikfasern vorgesehen, die unempfindlich gegenüber jeglicher Art Störung sind und auch unter hohen Temperaturen zuverlässig arbeiten. Außerdem wird die *8B/10B-Codierung* verwendet, wo durch zusätzliche Codewörter frühzeitig Übertragungsfehler ohne *CRC-Prüfsummen* erkannt und teilweise korrigiert werden. Zusätzliche Redundanz kann durch das Netzwerkdesign erreicht werden, indem ein System aus Doppelringen, vergleichbar mit den beiden Kanälen bei *FlexRay*, verwendet wird.

Der Knoten selbst verfügt über umfangreiche redundante HW-Komponenten, wie beispielsweise einen kompletten Backup-Knoten, der sich auf demselben Chip oder

auf einem separaten zweiten Chip mit eigener Stromversorgung unterbringen lässt. Ein elektronischer Bypass ermöglicht es, Datenpakete bei einem Totalausfall von Haupt- und Backup-Knoten trotzdem im Ring weiterzuleiten.

Jeder Knoten verfügt weiterhin über getrennte Pufferklassen, um Blockierungen zu vermeiden. Außerdem gibt es einen zusätzlichen *Overflow*-Empfangspuffer, der bei

8B/10B-Codierung:

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

Überlastung des Empfängers trotzdem Pakete höchster Priorität aufnehmen kann.

Schicht 2 erhöht die Zuverlässigkeit weiter, indem jeder Übertragungsrahmen mit einer 32 Bit *CRC-Prüfsumme* versehen ist, die es erlaubt Übertragungsfehler zu erkennen und in einem begrenzten Maß zu beheben.

Jedes empfangene Paket muss mit einem kurzen *Echo*-Paket bestätigt werden. Im Fall einer negativen Bestätigung initiiert der Sender eine automatische Paketwiederholung im lokalen Ring. Aus Echtzeit-Gründen ist nicht mehr als eine Wiederholung möglich.

Beim Medienzugangsverfahren spielt neben der Effizienz auch der Aspekt Zuverlässigkeit eine wichtige Rolle. Das Verfahren basiert auf *TDMA*, implementiert aber die Zeitschlitzte nicht

wie üblich über einen zentralen Taktgeber, sondern durch kreisende Übertragungsrahmen (Transport Frames). Diese Art der Implementierung erlaubt es, die Funktionsfähigkeit des Rings in jedem Knoten mit Hilfe von Timern zu überwachen.

Schicht 3 erhöht die Zuverlässigkeit durch adaptive Wegewahl. Dadurch ist es möglich Pakete auch auszuliefern, wenn ein Teil des Systems ausgefallen ist.

Letztlich werden auf Schicht 5 zuverlässige Ende-zu-Ende-Verbindungen zwischen den Kommunikationspartnern aufgebaut. Beim Aufbau einer Verbindung wird im Empfänger eine Authentifizierung und Autorisierung durchgeführt, um ungewollte Zugriffe zu verhindern. So kann sich ein Sender beispielsweise auf einem Speicherbereich oder bei einem Prozess des Empfängers mit bestimmten Rechten anmelden. Neben Blocktransfers besteht jetzt auch die Möglichkeit ein zuverlässiges 2-Phasen-Handshake-Protokoll aus *Request*- und *Response*-Paketen zu verwenden. Ein *Response*-Paket ist eine Bestätigung oder beinhaltet die Antwort auf ein vorangegangenes *Request*-Paket. Über Sequenznummern lassen sich Paketverluste und Duplikate erkennen sowie ggf. die Paketreihenfolge wiederherstellen.

Datenübertragung in Echtzeit

Eine der wichtigsten Eigenschaften von *CarRing II* stellt die Kommunikation in Echtzeit dar. Besonders sicherheitskritische Systeme erfordern die Angabe exakter Antwortzeiten. Um das zu erreichen, wird ein effizientes Medienzugangsverfahren verwendet, das auf *TDMA* basiert und sicherstellt, dass jeder Kommunikationsknoten mindestens ein Datenpaket pro Kommunikationszyklus senden kann. Dadurch ist es möglich eine maximale Paketzustellzeit zu garantieren. Durch diverse Erweiterungen wird die Effizienz des Verfahrens weiter gesteigert.

Die Transport Frames des *TDMA*-Verfahrens haben kurze Nutzdatenfelder fester Länge, wodurch sich Verzögerungszeiten verkürzen und leichter bestimmen lassen.

Die sehr kurzen Bestätigungen (Echos) werden unabhängig von den Transport Frames in den Datenstrom eingefügt, da die Verwendung von überdimensionierten

Transport Frames zur Übertragung derart kurzer Informationen die Effizienz drastisch senken und die Verzögerungszeiten der Pakete erhöhen würde, was wiederum der Echtzeit-Anforderung widerspricht. Für die Zahl der Bestätigungen, die jeder Knoten in den Datenstrom einfügen kann, gibt es eine obere Schranke. Eine Berechnung der Antwortzeiten ist also weiterhin möglich.

Innerhalb der Knoten werden die Daten schritthaltend in Echtzeit gelesen und verarbeitet. Auf der Schicht 3 (Wegewahl) des OSI-7-Schichtenmodells werden vor dem eigentlichen Datentransfer virtuelle Verbindungen zwischen Sender und Empfänger aufgebaut. So werden alle Pakete auf demselben Weg übertragen, der nur im Fehlerfall verlassen werden darf. Dieser Fakt spricht ebenfalls für stabile Verzögerungszeiten.

System aus Ringen garantiert gute Skalierbarkeit

Bis zu 255 Ringe, die über Switchknoten miteinander verbunden werden können und verschiedene Anforderungen erfüllen, erhöhen nicht nur die Sicherheit sondern ermöglichen ferner gute Skalierbarkeit und ein gutes Design. Das Netzwerk eines Kleinwagens kann beispielsweise mit dem eines Autos der Oberklasse kompatibel sein, indem es eine Teilmenge des Netzwerks im Oberklassewagen bildet.

Mit 255 Ringen und bis zu 16 Knoten je Ring lassen sich bei *CarRing II* 4096 vollwertige Kommunikationsknoten mit wiederum je 16 Attachments realisieren.

Zudem kann die Länge der Nutzdatenfelder so skaliert werden, dass sie den Anforderungen eines Ringes entspricht.

Neue Ansätze erlauben einen effizienten Medienzugang

CarRing II verwendet eine erweiterte Variante von TDMA, bei der die Zeitschlitze als leere Übertragungsrahmen (Transport Frames) implementiert sind. In Kombination mit dem Einfügen kurzer Bestätigungen (Echos) durch *Register Insertion* (RI) wird das neue Medienzugangsverfahren als *TA²I* (**T**ime Slot **A**ccess with **A**cknowledge **I**nsertion) bezeichnet.

Für die synchrone Datenübertragung besitzt jeder Knoten im Ring seinen eigenen Transport Frame, in dem er einmal pro TDMA-Zyklus Daten senden kann. Der Knoten erkennt seinen Transport Frame anhand einer 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.

TA²I:

„**T**ime Slot **A**ccess with **A**cknowledge **I**nsertion“ ist eine Kombination aus einer Variante des Time Division Multiple Access (TDMA) Verfahrens und Register Insertion (RI).

Hierbei werden die Zeitschlitze nicht wie üblich über einen globalen Takt generiert, sondern durch leere, kreisende Transportrahmen (Transport Frames) implementiert. Jeder Knoten besitzt seinen eigenen Transport Frame. Mit Register Insertion werden kurze Bestätigungen (Echos) übertragen, um die effektive Nutzung der Ringbandbreite zu erhöhen. Dazu kann ein Knoten den Ring temporär erweitern, indem er die Länge einer seiner Ringpuffer variiert.

Acknowledge Insertion erhöht die effektive Nutzung der Ringbandbreite, indem es zur Übertragung kurzer Echos verwendet wird. Solche Echos enthalten nur Informationen zur Flusssteuerung und, ob die Daten korrekt beim Empfänger angekommen sind. Um nicht große Transport Frames zur Übertragung dieser kurzen Information verwenden zu müssen, kann jeder Knoten den Ring temporär erweitern und dabei ein Echo in den Datenstrom 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 von der Anzahl der Knoten im Ring abhängig. Ein Knoten muss genau so viele Echos einfügen können, wie es Knoten im Ring gibt. Echos werden 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 Transport Frame zu nutzen. Mit anderen Worten, die Bandbreite geht verloren und kann nicht effizient genutzt werden. *FlexRay* versucht dieses Problem zu lösen, indem ein dynamisches Segment eingeführt wurde, in welchem der Medienzugang in Abhängigkeit der tatsächlichen Bedürfnisse eines Knotens gewährt wird. *CarRing II* umgeht diese Schwierigkeit durch Erweiterungen von TA^2I . Die Erweiterungen, bestehend aus ETA^2I , OTA^2I und ihrer Kombination $EOTA^2I$, sind abwärtskompatibel zu TA^2I und können parallel dazu eingesetzt werden.

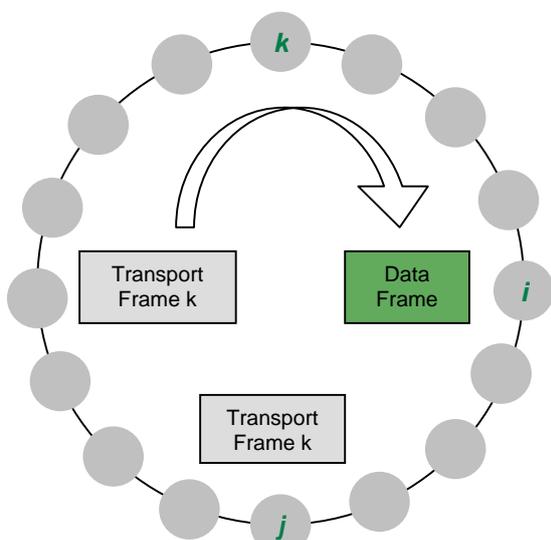


Abbildung 3: „i-zu-j Transfer“

ETA^2I erlaubt in besonderen Fällen eine Wiederverwendung ungenutzter Transport Frames, d.h. wenn ein Knoten keine Daten senden will, kann sein Transport Frame unter Umständen von den nachfolgenden Knoten im Ring genutzt werden. Die Voraussetzungen für den Einsatz von ETA^2I lassen sich anhand eines Beispiels erläutern. Angenommen, ein beliebiger Knoten k besitzt einen Transport Frame mit der ID k . Nun kann der leere Transport Frame k für eine Datenübertragung zwischen zwei weiteren Knoten i und j eingesetzt werden, sofern Knoten k von dieser Übertragung nicht beeinträchtigt wird. Der Vorteil effizienterer Bandbreitennutzung lässt sich aber nur so lange

aufrechterhalten, wie die Voraussetzungen für derartige Übertragungen tatsächlich erfüllt sind. Existiert kein „i-zu-j Transfer“, geht weiterhin Bandbreite verloren. Genau an dieser Stelle greift die zweite Erweiterung. Bei OTA^2I 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 ausschließlich von ihm verwendet werden darf. Damit bleibt auch hier die Echtzeit erhalten. Ungenutzte Transport Frames können jetzt mehrfach innerhalb eines $TDMA$ -Zyklus verwendet werden. Es ist sogar denkbar, dass ein

ETA^2I :

„Extended Time Slot Access with Acknowledge Insertion“ ist eine Erweiterung von TA^2I , wo unter bestimmten Voraussetzungen die Wiederverwendung nicht genutzter Transport Frames möglich ist.

OTA^2I :

Die zweite Erweiterung von TA^2I wird mit „Open Time Slot Access with Acknowledge Insertion“ bezeichnet. Hier kann ein Knoten seinen Transport Frame für andere Knoten freigeben, falls er selbst keine Daten senden möchte.

einzelner Sender die gesamte Bandbreite für sich beansprucht. Der Ring lässt sich so über feine Zwischenschritte vom komplett synchronen Modus bis hin zum ausschließlich asynchronen Modus betreiben.

Effiziente und zuverlässige Kommunikation

Bei *CarRing II* werden die Daten in Form von Nachrichten übertragen, es gibt keine Paketverluste und die Reihenfolge der Daten kann garantiert werden. Ferner unterstützt das Protokoll Multicast und Broadcast sowie die Segmentierung sehr langer Nachrichten.

Grundsätzlich wird auf Schicht 5 eine Verbindung zwischen den Attachments von Sender und Empfänger aufgebaut. Innerhalb einer Verbindung werden sowohl Speicherzugriffe als auch Prozesskommunikation unterstützt. Zwischen 2 Knoten können bis zu 16 Verbindungen parallel und unabhängig voneinander arbeiten. Bei der Kommunikation innerhalb einer einzelnen Verbindung wiederum werden die Daten sequentiell, unter Einhaltung ihrer logischen Reihenfolge übertragen. Vorteil der parallelen Verbindungen ist die effiziente Nutzung der Bandbreite. Es entsteht kein Verlust, während der Knoten auf ein Paket wartet, weil sich die Verbindungen den Ring in einer Art Zeitmultiplex teilen.

Zusätzlich werden beim Verbindungsaufbau die Zugriffsrechte der Knoten für einen bestimmten Speicherbereich bzw. Prozess überprüft, um beispielsweise ungewollte Schreibzugriffe zu verhindern.

Neben der Möglichkeit eines Blocktransfers, wird auch ein zuverlässiges 2-Phasen-Handshake-Protokoll unterstützt, bei dem jede Kommunikation zeitlich in zwei Phasen (*Request* und *Response*) unterteilt ist. In der *Responsephase* wird eine Bestätigung bzw. die Antwort auf ein vorangegangenes *Request-Paket* übermittelt.

Simulationsergebnisse

Die folgenden Diagramme zeigen einen Performanzvergleich 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 an der TU Clausthal 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

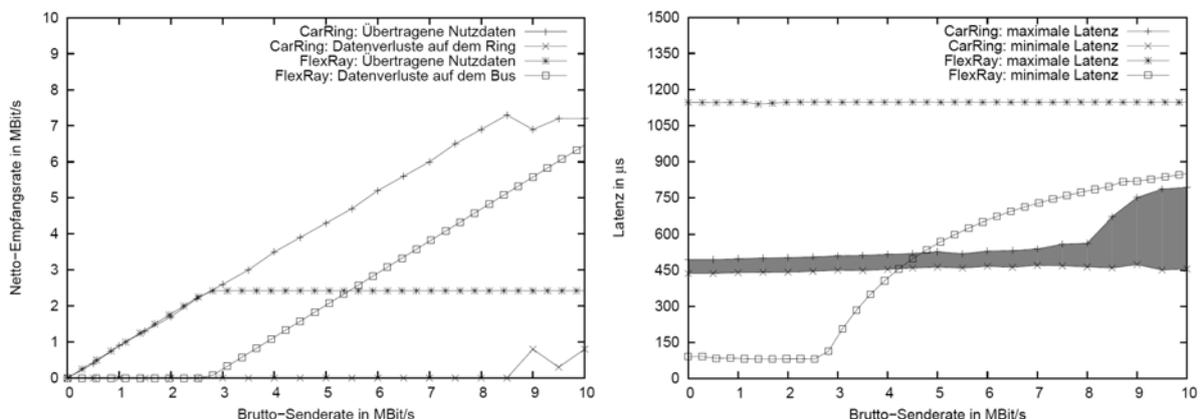


Abbildung 4: Durchsatz und Latenz in einem Ring mit 6 Knoten (1 Sender, 1 Empfänger)

Simulationssoftware „RingSim“.

Bei einer Laufzeit von 32 Millisekunden, wobei das System nach 8 Millisekunden einen eingeschwungenen Zustand erreicht hat, sollen jeweils Pakete mit 64 Bytes Nutzdaten übertragen werden. Insgesamt stehen 6 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 das Medienzugangsverfahren *EOTA²*.

Bei den ersten beiden Diagrammen (Abb. 4) arbeitet nur einer der 6 Knoten als Sender und einer als Empfänger. Die restlichen Knoten sind inaktiv. Das linke

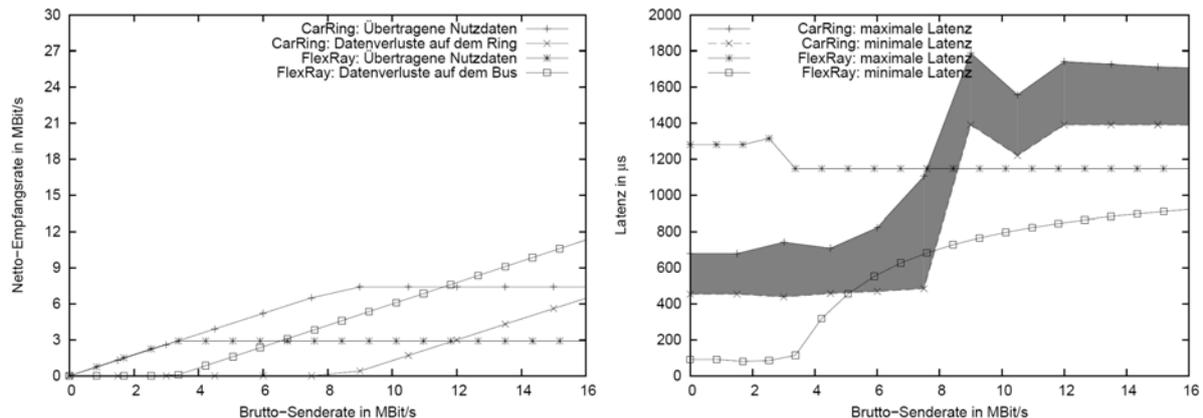


Abbildung 5: Durchsatz und Latenz in einem Ring mit 6 Knoten (3 Sender, 3 Empfänger)

Diagramm zeigt die zusammengefasste Bruttodatenrate (Nutzdaten incl. Header) aller Sender in Mbit/s im Vergleich zu den Nutzdaten, die tatsächlich bei den Empfängern angekommen sind (Netto-Empfangsrate). Geringe Divergenzen bei der Steigung der Kurven sind darauf zurückzuführen, dass *CarRing II* bei gleicher Nutzlast einen größeren Header übertragen muss.

Im rechten Diagramm sind die minimalen und maximalen Latenzen dargestellt. Bemerkenswert ist der geringe Unterschied zwischen minimaler und maximaler Latenz bei *CarRing II* (im Diagramm grau schraffiert).

Die Diagramme in Abb. 5 zeigen eine Simulation mit 3 Sendern und 3 Empfängern. Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass *CarRing II* eine wesentlich effektivere Nutzung der Bandbreite aufweist, wohingegen die Latenzzeiten bei *FlexRay* mit zunehmender Senderzahl besser werden, was letztendlich an der geringeren Geschwindigkeit von *CarRing II* und dem zusätzlichen Aufwand für das 2-Phasen-Handshake-Protokoll liegt. Beide gewährleisten dennoch ein stabiles Verhalten in Überlastsituationen.

Ausblick

In den nächsten Schritten werden die verbleibenden Protokolle entwickelt, Netzwerkschichten modelliert und implementiert und das Netzwerk letztendlich in einen bereits im Aufbau befindlichen Prototyp integriert. Der „Steer-by-wire“-Prototyp wird erstmals auf der Hannover Messe 2007 vorgestellt.

Kontakt:

Marcel Wille
 TU Clausthal
 - Institut für Informatik -
 38678 Clausthal-Zellerfeld
 Tel.: 0 53 23 / 72 – 71 71
www.in.tu-clausthal.de
 /abteilungen/rechnersysteme