



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Problemfelder der CAN / Realtime Ethernet Umsetzung

Jan Depke

jan.depke@haw-hamburg.de

08.10.2012

**Projektbericht Sommersemester 2012
Betreuender Prüfer: Prof. Dr. Franz Korf**

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Lösungsansatz	4
2.1	Funktionalität des Gateways	4
2.2	RTE-Trafficklassen	6
2.3	Architektur	7
3	Restriktionen	7
3.1	Service Primitives	7
3.2	Protokoll und Verhalten	8
3.3	Zeitliche Ordnung der Nachrichten	10
3.4	Nutzbarkeit klassischer Applikationsmuster	11
4	Response Time Analysis	12
5	Fazit	15
	Literaturverzeichnis	16
	Abbildungsverzeichnis	18
A	Abkürzungsverzeichnis	19
B	Restriktionen, tabellarisch	20

1. Einleitung

Motivation

In aktuellen Automobilgenerationen finden verstärkt Electronic Control Unit (ECU) Verwendung, welche Steuerungs- und Kontrollaufgaben im Motor- und Komfortbereich übernehmen. Die zur Vernetzung dieser ECU genutzten Bussysteme sind den steigenden Anforderungen hinsichtlich Echtzeitverhalten und Busbandbreite mittelfristig nicht gewachsen. Aus diesem Grund erforscht die Core-Gruppe der Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW) ein automotive backbone-Bussystem auf Basis von Realtime Ethernet (RTE), welches die zukünftigen Anforderungen erfüllt.

Controller Area Network

Controller Area Network (CAN) wurde 1983 von der Robert Bosch GmbH entwickelt und 1991 in Version 2.0 unter dem Titel „CAN-Specification“ [Gmb91] veröffentlicht. 1993 wurde die CAN-Spezifikation erstmalig in einen ISO-Standard überführt. Seit 2003 ist CAN in einer aktualisierten und erweiterten Version durch ISO 11898-1:2003 [iso03] standardisiert. CAN ermöglicht die Halbduplexkommunikation in einem nachrichtenorientierten, seriellen Multi-Master-Bussystem. Das empfangerselektive Bussystem weist jeder Nachricht eine ID zu, anhand welcher die Nachricht identifiziert werden kann und die Priorität der Nachricht festgelegt ist. CAN benutzt zur Kollisionsvermeidung eine Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance (CSMA/CA)-Strategie, welche ebenso wie die Priorisierung im CAN-eigenen Arbitrierungsverfahren umgesetzt ist. In der Arbitrierungsphase senden alle sendewilligen Busteilnehmer die ID der zu übertragenden Nachricht und können anhand eines Mechanismus aus rezessiven und dominanten Bits erkennen, ob andere Busteilnehmer die gesendete ID durch eine höher priorisierte ID überschreiben und gegebenenfalls die Übertragung einstellen.

Realtime Ethernet

Die Core-Gruppe der HAW Hamburg verwendet für ihre Untersuchungen eine switch-gestützte RTE-Technologie der Firma TTTech (im Folgenden: RTE). Per RTE können Daten in mehreren Qualitätsstufen übermittelt werden, RTE stellt hierfür drei sogenannte Trafficklassen für unterschiedliche Zwecke zur Verfügung:

- Time Triggered (TT), zeitgesteuert, harte Echtzeitanforderungen
- Rate Constraint (RC), bandbreitenorientiert, schwache Echtzeitanforderungen
- Best Effort (BE), klassischer IEEE 802 Datenverkehr

Problemstellung

Der Generationsübergang zwischen zwei Bustechnologien im Automobilbereich wird durch folgende Aspekte erschwert: a) Zertifizierungskosten und -aufwand b) Aufrüstung / Neuentwicklung etablierter ECU Einheiten und c) Implementierungsaufwand der neuen Technologie. Hersteller elektronischer Steuerungsgeräte in der Automobilindustrie stellen einen Großteil der ECU mit einer CAN - Schnittstelle zur Verfügung, da entsprechende ECU preiswert zu produzieren und einfach zu implementieren sind und darüber hinaus als Industriestandard gelten. Es ist wünschenswert, diese CAN-ECU flexibel und transparent in das backbone Automobilnetzwerk auf Basis von RTE integrieren zu können.

Optimale Transparenz ist gegeben, wenn die Applikationen von legacy-CAN-Busteilnehmern nach der Migration in die RTE-gestützte Topologie ohne Anpassungen weiterverwendet werden können. Optimale Flexibilität bedeutet im Sinne der Problemstellung, daß die Topologie eines bestehenden CAN-Busses keinen Einfluß auf die Topologie des RTE-gestützten Bussystems haben muß. Das RTE-gestützte Bussystem (siehe Abbildung 1.1) muß daher mindestens etablierte Funktionalität bieten (direkte CAN-zu-CAN Kommunikation über ein Gateway, Busse y und z1), soll aber auch die Verteilung von CAN-Bussen einer Vormigrationstopologie unterstützen (Busse z1 und z2) und räumlich entfernte CAN-Busse verbinden können (z.B. Busse x und y).

Sollte eine der Eigenschaften „Transparenz“ und „Flexibilität“ nicht voll erfüllt werden können, müssen die Charakteristika und Gründe der Abweichungen dokumentiert werden. Ein geeigneter Lösungsansatz ist zu untersuchen und dahingehend zu entwickeln, daß nach Möglichkeit nur minimal vom CAN-ISO-Standard 11898:2003 abgewichen wird und Abweichungen gegebenenfalls dokumentiert werden.

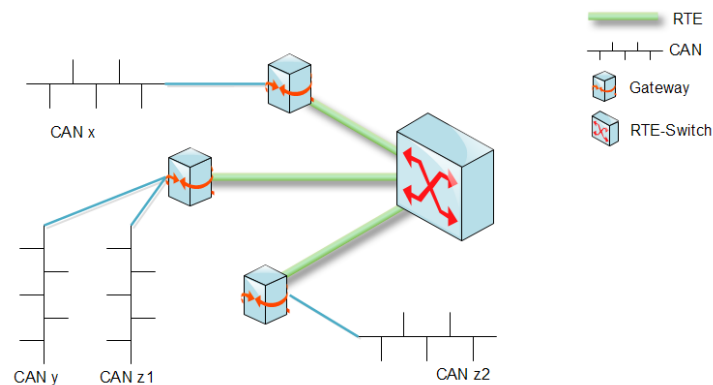


Abbildung 1.1: Beispieltopologie: CAN Bus und verteilter CAN Bus mit RTE backbone

Struktur

Diese Ausarbeitung beschreibt im Abschnitt 2 die Eigenschaften und Funktionalität eines möglichen Lösungsansatzes, um dann im Abschnitt 3 für Anwendungsentwickler relevante Einschränkungen und Abweichungen vom standardisierten CAN und seinem Verhalten zu beschreiben. Der Abschnitt 4 widmet sich den Herausforderungen der Validierung von Nachrichtenschedules im Kontext des Lösungsansatzes.

2. Lösungsansatz

Die Problemstellung erfordert für eine CAN-zu-CAN-Verbindung direkt am Gateway nur eine Bridgefunktionalität bei der Umsetzung zwischen zwei identischen Bussystemen. Ein Gateway verbindet hingegen zwei auf unterschiedlichen Protokollen basierende Netzwerke, was im Fall einer Kommunikation zwischen CAN und RTE gegeben ist. Somit ist die Gesamtfunktionsumfang nur durch ein geeignetes Gateway zu realisieren. Die Aufgaben eines Gateway sind die Behandlung der über eine der Busschnittstellen eingehenden Nachrichten entsprechend der Funktionalitätsklassen

- Nachrichtenzuordnung,
- Nachrichtenkapselung/Protokollumsetzung,
- Nachrichtenfilterung.

Dieser Lösungsansatz entwickelt eine Funktionalitätsbeschreibung anhand der Funktionalitätsklassen des Gateways und schlägt nach einer Wahl einer geeigneten RTE-Traffic-Klasse eine Architektur vor, welche die Anforderungen der Problemstellung erfüllen kann.

2.1 Funktionalität des Gateways

Im Folgenden werden die Schnittstellen des Gateways aus 'black block'-Sicht beschrieben, eine geeignete Übertragungsschicht bestimmt und die Gatewayfunktionalität entsprechend der Funktionalitätsklassen ausgearbeitet.

Schnittstellenbeschreibung

Das Gateway soll über mindestens eine CAN-Schnittstelle und über genau eine Schnittstelle zum RTE verfügen. Ein Gateway soll die bidirektionale Kommunikation zwischen den direkt angeschlossenen CAN-Bussen ermöglichen und transparente, bidirektionale Tunnel zu an weitere Gateways angeschlossene CAN-Busse über RTE bereitstellen können.

Die Kommunikation zwischen zwei CAN-Bussen erfordert in jedem Fall, daß Nachrichten-ID-Kollisionen aufgelöst werden und erfordert somit, daß die Nachrichten im Ziel-Bus in dem Empfänger verständliche Nachrichten umgesetzt werden können.

Im Folgenden wird angenommen, daß jede Kommunikation in CAN-Bussen ausgelöst und empfangen wird. Prinzipiell ist es möglich, auch Nachrichten von Busteilnehmern anderer Busse als CAN auf den CAN-Bus umzusetzen. Diese Sonderfälle werden im Folgenden nur soweit beachtet, als daß eine Erweiterbarkeit diesbezüglich nicht verhindert wird.

Wahl der Übertragungsschicht

Die Kommunikation zweier CAN-Busse über einen Tunnel zwischen Gateways kann auf unterschiedlichen Abstraktionsschichten realisiert werden:

Es wäre denkbar, die Kommunikation eines CAN-Busses bitweise über ein RTE-Netzwerk übertragen zu wollen. Da CAN-Controller unterschiedlicher Hersteller keine exakte zeitliche Übereinstimmung des Sample Points innerhalb des bit-timings aufweisen ([Ric01], [Sem97]), wird hilfsweise optimistisch angenommen, daß ein über RTE übertragenes CAN-Bus-Bit eine Übertragungslatenz von maximal der Bitfrequenz des CAN-Bus aufweisen darf, um noch als zuverlässig übermittelt zu gelten. Hieraus ergibt sich für 1 MBit/s CAN eine maximal zulässige Übertragungslatenz von $1\mu\text{s}$. Somit scheidet eine bitweise Übertragung der Pegel eines CAN-Busses aufgrund des RTE-Jitters im μs -Bereich aus, komplexere Topologien mit Switch-Ketten würden die Problematik zudem noch verschärfen.

Die sinnvollere Alternative ist die CAN-nachrichtenbasierte Übertragung innerhalb eines Tunnels zwischen Gateways, was dadurch begünstigt wird, daß die maximale Nutzlast eines RTE-Frames größer als eine maximal lange CAN-Nachricht ist. Somit kann jede CAN-Nachricht mit nur einem RTE-Frame übertragen werden.

Nachrichtenkapselung/Protokollumsetzung

Zur Übertragung von CAN-Nachrichten als Nutzlast von RTE-Frames ist ein Übertragungsprotokoll zu etablieren, welches nur relevante Informationen enthält.

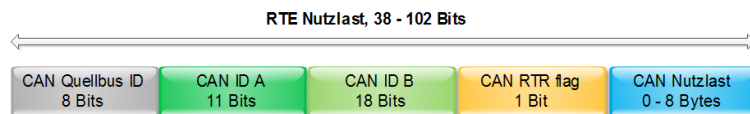


Abbildung 2.1: Kapselungsprotokoll

Da RTE-Frames in jedem Fall auf 512 Bit Nutzlastlänge erweitert werden, würde das durch Abbildung 2.1 beschriebene Protokoll zu einem verhältnismäßig hohen Übertragungsoverhead führen. Daher kann es sinnvoll sein, einen Paketservice entsprechend [Obe02] zu implementieren. Ein derartiger Paketservice sorgt für eine komplette Verwendung der Nutzlastkapazität eines RTE-Frames durch gebündelte Übertragung mehrerer CAN-Nachrichten in einem RTE-Frame. Analog zum Nagle-Algorithmus [Nag84] kann ein derartiger Mechanismus zu einer Erhöhung der Übertragungslatenz einer Nachricht führen sobald CAN-Nachrichten zurückgehalten werden um einen RTE-Frame zu füllen und sollte daher für zeitkritische Anwendungen deaktivierbar gestaltet werden. Der Paketservice kann ebenso zu burst-artigem Nachrichteneingang am Empfänger führen, was durch entsprechend dimensionierte Empfangspuffer zu kontrollieren und hinsichtlich der Nachrichtenlaufzeiten zu untersuchen ist.

Nachrichtenfilterung

Als empfängerselektiver CAN-Busteilnehmer kann das Gateway jede auf einem angeschlossenen CAN-Bus anliegende Nachricht empfangen. Daher benötigt das Gateway einen Mechanismus, um CAN-lokale Nachrichten von über das RTE zu übertragenden

Nachrichten zu unterscheiden. Die Topologiedefinition, zumindest aber die Kommunikationsmatrix, von der eine solche Unterscheidung abhängig ist, liegt üblicherweise bereits zur Entwurfszeit vor. Aus der Kommunikationsmatrix kann der Anteil der über RTE zu übertragenden CAN-Nachrichten ermittelt und somit eine selektive Nutzung des RTE ermöglicht werden.

Nachrichtenzuordnung

Im Gateway aus dem RTE eingehende Nachrichten sollen in einen vorab definierten, mit dem Gateway verbundenen CAN-Bus weitergeleitet werden. Da das Gateway die Kommunikation zwischen unterschiedlichen CAN-Bussen ermöglichen soll, muß der Fall berücksichtigt werden, daß die CAN-ID der eingehenden Nachricht nicht einzigartig innerhalb aller CAN-Busse ist. Aus diesem Grund muß ein Tupel aus einem eindeutigen Busbezeichner und einer CAN-ID gegebenenfalls durch das Gateway des Ziel-CAN-Busses einer anderen CAN-ID zugeordnet werden können. Eine diesbezügliche Zuordnungsvorschrift muß zur Entwurfszeit bekannt sein, um ein Gateway entsprechend konfigurieren zu können.

2.2 RTE-Traffic-Klassen

Um zeitkritische Nachrichten in einem RTE-Netzwerk zu versenden, stehen zwei sogenannte Traffic-Klassen zur Verfügung: Time Triggered (TT) und RC. Beide Traffic-Klassen kommunizieren über Virtual Link (VL), denen jeweils ein Sender und eine Menge an Empfängern zugeordnet werden. Dabei sind zeitkritische Nachrichten anhand einer Critical Traffic ID (CTID) eindeutig zu identifizieren. Aktuelle Implementierungen unterstützen die Verwendung von bis zu 4096, das zugrundeliegende Protokoll die Verwendung von bis zu $2^{16} - 1$ unterschiedlicher, zeitkritischer Nachrichten.

Nachrichten der TT-Klasse werden zeitgesteuert übermittelt und weisen niedrige Übertragungslatenz und geringen Jitter auf. Nachrichten der RC-Klasse werden nicht zeitgesteuert übertragen sondern derart, daß eine Bandbreite garantiert wird, indem der RTE-Switch eine konfigurierbare Sendepause zwischen zwei RC-Frames [Bandwidth Allocation Gap (BAG)] einfügt. Die RC-Kommunikation kann einen im Vergleich zur TT-Kommunikation höheren Jitter aufweisen, sobald ein Busteilnehmer Sender auf mehreren VL auf einer physikalischen Leitung ist [Pic06]. Darüber hinaus kann sich die Übertragungslatenz von RC-Nachrichten signifikant verschlechtern, sobald sporadisch eine hohe Anzahl an Nachrichten von einem Sender versendet wird [Gut11].

Unter der Prämisse, daß zur Entwurfszeit die notwendige Bandbreite für alle innerhalb der Topologie zwischen CAN und RTE umzusetzenden Nachrichten bekannt ist, orientiert sich die Wahl der für die Kommunikation zwischen den Gateways genutzten Traffic-Klasse also a) an der Schärfe der Echtzeitanforderungen und b) daran, ob eine burst-artige Übertragung von Nachrichten zu erwarten ist. Im Folgenden wird die Nutzung der TT-Klasse angenommen.

2.3 Architektur

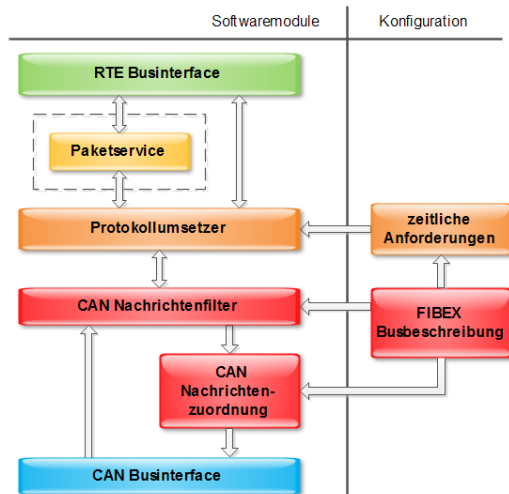


Abbildung 2.2: Gatewayarchitektur

Die in Abbildung 2.2 gezeigte Architektur beschreibt die Struktur der Softwaremodule der einzelnen, in den vorherigen Abschnitten genannten Gatewayfunktionen. Zusätzlich wird gegebenenfalls die Abhängigkeit der Softwaremodule von einer externen Konfiguration verdeutlicht. Die Konfigurationsdaten können vollständig aus einer Busbeschreibung nach FIBEX-Standard [ASA11] gewonnen werden. Die Architektur erlaubt erste Rückschlüsse auf ein in Send- und Empfangsrichtung nicht einheitliches Laufzeitverhalten. Nicht dargestellt sind Send- und Empfangspuffer, über welche bei Nutzung des Paketservice gegebenenfalls eine Priorisierung des Pfades ohne Paketservice realisiert werden kann.

3. Restriktionen

Der vorgestellte Lösungsansatz - speziell die nachrichten- und tunnelbasierte Übertragung im Kontext eines verteilten CAN-Busses - weicht von einer ISO 11898 Implementierung von CAN ab. Diese Abweichungen unterwerfen Entwickler von CAN-Applikationen Restriktionen, welche aus vier unterschiedlichen Abweichungsklassen resultieren. Im Folgenden werden diese Abweichungsklassen und die zugehörigen Restriktionen vorgestellt. Dabei gelten die Restriktionen, die für die Kommunikation über RTE verteilte CAN-Busse genannt werden ebenso für die Kommunikation zwischen unterschiedlichen, direkt mit dem Gateway verbundenen CAN-Busse, eine Unterscheidung erfolgt hier nicht.

3.1 Service Primitives

Wesentlicher Bestandteil des CAN-ISO-Standards 11898:2003 sind die sogenannten Service Primitives (SP). Service Primitives beschreiben Dienste, die auf den einzelnen Schichten des Open Systems Interconnection Reference Model (OSI-RM) den Benutzern unmittelbar angrenzender Schichten angeboten werden und müssen somit auf ihre Verträglichkeit mit dem Lösungsansatz untersucht werden. Dabei beschreiben SP des Typs „request“

Dienste, die eine höhergelegene Schicht nutzen kann. SP des Typs „confirm“ entsprechen Bestätigungsereignissen mit Bezug zu einer vorherigen Nutzung einer „request“-SP, die einer höhergelegenen Schicht angezeigt werden. SP vom Typ „indication“ werden von Benutzern tiefergelegener Schichten genutzt, um Benutzern höhergelegener Schichten den Eingang von Daten anzuzeigen.

Während die SP der Typen „request“ und „indication“ der einzelnen OSI-RM Schichten ohne Einschränkungen ebenfalls im Szenario mehrerer über RTE verbundenen CAN-Teilbusse Bestand haben, stellen SP des Typs „confirm“ die größte Hürde dar: Diese „confirm“-SP können Erfolg, Mißerfolg oder teilweisen Erfolg vorheriger Nutzungen einer „request“-SP anzeigen. Nach ISO 11898-1:2003 bestätigen sie teilweise, aber nicht notwendigerweise, eine Aktion der entsprechenden OSI-RM-Schicht des entfernten Busteilnehmers.

Da geräte-lokale Bestätigungsereignisse nur die Kommunikation zwischen den OSI-RM Schichten betreffen, sind sie von Verteilungsmaßnahmen per RTE nicht betroffen. Somit haben aus der Menge der SP nur diejenigen eine Relevanz für eine Untersuchung auf Verletzungen des ISO 11898:2003 Standards, welche a) vom Typ „confirm“ sind und b) eine Aussage bezüglich eines in einem entfernten Busteilnehmer vorliegenden Zustandes treffen. Dies betrifft genau zwei „confirm“-SP der MAC-Schicht eines CAN-Busteilnehmers.

MAC-Schicht Data.confirm

Ein MAC-Schicht Data.confirm bezieht sich auf den vorausgegangenen MAC-Schicht Data.request und bestätigt, daß der entfernte Busteilnehmer die dazugehörige MAC-Schicht Data.indication an den Benutzer der entfernten MAC-Schicht weitergeleitet hat. Sobald der Empfänger einer CAN-Nachricht durch ein Gateway vom Sender getrennt ist, zeigt das MAC-Schicht Data.confirm standardverletzend an, daß eine MAC-Schicht Data.indication an den Benutzer der Gateway-MAC-Schicht weitergeleitet wurde, ist also eine Bestätigung eines Zustandes des Gateways und nicht des letztendlichen Nachrichtempfängers.

MAC-Schicht Remote.confirm

Das MAC-Schicht Remote.confirm ist analog zum MAC-Schicht Data.confirm definiert, betrifft aber anstelle regulärer CAN-Nachrichten die Remote-Frames des CAN und ist auf Remote.request und Remote.indication bezogen. Das MAC-Schicht Remote.confirm ist ebenso den für Data.confirm genannten Einschränkungen unterworfen.

Konsequenz

Somit muß im Lösungsvorschlag auf die aktive Auswertung des ACK Bit eines Daten- oder Remote-Frames verzichtet werden, da der Endempfänger keinen Einfluß auf den Zustand des ACK Bit haben muß. Jeder Mechanismus, der anhand der Empfangsbestätigungen auf MAC-Schicht realisiert ist, darf somit nicht implementiert werden.

3.2 Protokoll und Verhalten

Um Einschränkungen im Sinne von Abweichungen des Lösungsansatzes vom CAN-ISO-Standard zu identifizieren, müssen die einzelnen CAN- Protokollbestandteile und das erwartete Antwortverhalten untersucht werden.

Arbitrierung

Während der Arbitrierungsphase benötigen alle CAN-Busteilnehmer physikalischen, bitgenauen Zugriff auf den CAN-Bus. Bereits in 2.1 wurde verdeutlicht, daß es keinen sinnvollen Mechanismus gibt, um einen bitgenauen Zugriff auf den CAN-Bus über eine RTE-Verbindungsstrecke zu propagieren. Daher können im Kontext des Lösungsansatzes CAN-Busteilnehmer nur an der Arbitrierung innerhalb ihres lokalen CAN-Busses teilnehmen.

Acknowledge

Nach ISO 11898-1:2003 sind auf der Medium Access Control (MAC) Schicht des CAN-Bus Acknowledgements für „Data Transfer“ und „Remote Data Request“ vorgesehen. Positive Acknowledgements werden von Empfängern durch Überschreiben des rezessiv gesendeten ACK Slot Bit mit einem dominanten Bit angezeigt. Es ist unter Nutzung eines über ein RTE-Netzwerk verteilten CAN-Bus nicht möglich, diesen Mechanismus zu propagieren. Die Busteilnehmer eines an vorgenanntes RTE-Netzwerk angeschlossenen CAN-Teilbusses können diesen Mechanismus innerhalb der lokalen Teilbusgrenzen durchaus nutzen.

Overload Frames

Nach ISO 11898-1:2003 können jeweils von der Logical Link Control (LLC) und der MAC Schicht Overload Frames gesendet werden, um Überlastsituationen anzuzeigen. Dieser Mechanismus basiert auf bitgenauem Zugriff aller beteiligten CAN-Busteilnehmer mit dem physikalischen Bus und kann somit in verteilten CAN-Bussen nur innerhalb eines lokalen Teilbusses verwendet werden. Der Effekt wird dadurch relativiert, daß Gateways vollqualifizierte CAN-Busteilnehmer sind und somit die von Overload Frames initiierten Ruhezeiten beim Senden in einen lokalen Teilbus hinein beachten.

Error Frames

Das Versenden von Error Frames zur Signalisierung von Fehlerzuständen erfordert physikalischen, bitgenauen Zugriff auf den CAN-Bus. Im Anwendungsfall eines verteilten CAN-Bus kann ein Error Frame somit nur innerhalb der Grenzen eines Teilbusses versendet und empfangen werden. Da ein Fehler, der das Versenden eines Error Frames auslöst, im vorgenannten Anwendungsfall seinen Ursprung in einem CAN-Busteilnehmer des lokalen Teilbusses oder aber im Gateway bzw der physikalischen Datenleitung haben muß, ist es schwer, einen realitätsnahen Konflikt aus der fehlenden Propagierung des Error Frames über das RTE zu konstruieren. Lediglich bei der Implementierung von Applikationen zur Überwachung der Bus- und Busteilnehmerintegrität - z.B. durch dedizierte Bus Guardian Busteilnehmer - müßte eine derartige Funktionalität innerhalb jedes relevanten Teilbusses eines verteilten CAN-Busses implementiert werden.

Remote Frames

Remote Frames werden in CAN-Bussen dazu genutzt, den Empfänger des Remote Frames zum Versenden einer bestimmten Nachrichten aufzufordern. In zeitkritischen Systemen werden Annahmen über eine ordnungsgemäße Antwortzeit in Reaktion auf den Empfang eines Remote Frames gemacht und diese in Zeitanforderungen festgeschrieben. Sobald Remote Frames bei einer Migration zur vorgeschlagenen Lösungsarchitektur in der Kommunikation verwendet werden, müssen die Antwortzeiten auf Basis der neuen Kommu-

nikationsstrecke neu bewertet werden - jedes zusätzliche Medium und jeder zusätzliche Busteilnehmer erhöhen die zu erwartende Antwortzeit.

TTC

Nach ISO 11898-1:2003 können sich CAN-Busteilnehmer unter Nutzung des SOF bzw. EOF Bit eines CAN-Frames als Referenzpunkt zeitlich synchronisieren. Dieser Mechanismus soll zwischen LLC und MAC realisiert werden. Somit würde das Fehlen der direkten physikalischen Verbindung zwischen zwei CAN-Busteilnehmern den bitgenauen Zugriff auf den Bus und somit die Verwendung dieses Mechanismus verhindern.

Konsequenzen

Um eine CAN-Anwendung im Lösungsansatz wiederverwenden zu können, müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

- Die Antwortzeitgarantien von Remote Frames wurden angepaßt.
- Es werden keine Overload Frames auf Anwendungsebene ausgelöst.
- Error Frames werden nicht zur Busteilnehmerverwaltung genutzt.
- Das ACK Bit ist nicht funktionaler Bestandteil der CAN-Anwendung.
- Eine Arbitrierung über Busgrenzen hinweg ist nicht erforderlich.

Da die Arbitrierung im Betrieb nach CAN-ISO-11898 für die Priorisierung der Nachrichten durch Ordnung der Buszugriffe zuständig ist, muß zusätzlich untersucht werden, ob die fehlende, gemeinsame Arbitrierung über CAN-Teilbusgrenzen hinweg bei der Verteilung eines CAN-Busses auf mehrere Teilbusse die Ordnung der Nachrichten stört.

3.3 Zeitliche Ordnung der Nachrichten

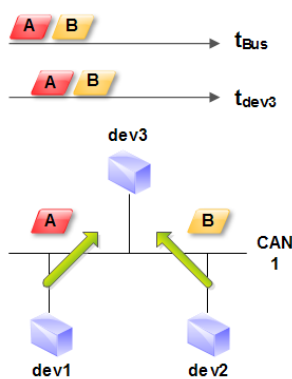


Abbildung 3.1: Zeitliche Ordnung zweier Nachrichten A und B

Innerhalb eines CAN-Bus ist die zeitliche Ordnung von versendeten Nachrichten gewährleistet. Wenn, wie in Abbildung 3.1 zwei Sender jeweils eine Nachricht an einen gemeinsamen Empfänger senden, ist bei fehlerfreier Kommunikation sichergestellt, daß die zeitliche Empfangsreihenfolge identisch zur zeitlichen Sendereihenfolge ist. Dies ist dadurch bedingt, daß jeweils nur eine Nachricht zur Zeit auf einem CAN-Bus übermittelt und von den Empfängern umgehend ausgewertet werden kann und somit die Nachrichtenreihenfolge auf einem CAN-Bus prinzipiell identisch zur Sendereihenfolge durch die einzelnen Busteilnehmer ist. In einem über RTE verteilten CAN-Bus kann diese Ordnung der Nachrichten gestört werden. Wird der CAN-Bus 1 aus Abbildung 3.1 entsprechend Abbildung 3.2 verteilt, kann die Nachricht A trotz ihres früheren Sendezeitpunktes durch Gatewaylaufzeiten, RTE-Übertragungsdauer und Switchlaufzeit derart verzögert werden, daß sie im Empfänger nach der Nachricht B eintrifft. Dieser Effekt kann ungeachtet der Prioritäten der Nachrichten A und B auftreten.

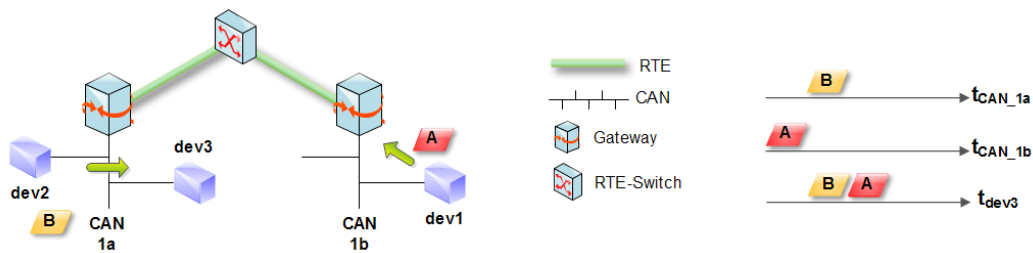


Abbildung 3.2: Zeitliche Ordnung zweier Nachrichten A und B, verteilter CAN

3.4 Nutzbarkeit klassischer Applikationsmuster

„Application Layer Frameworks“ stellen den Entwicklern von CAN-Applikationen komplexe Funktionalität über eine API oder Architekturveränderungen zur Verfügung und sollen so den Entwicklungsaufwand verringern. Derartige Application Layer Frameworks bedienen sich einiger wiederkehrender Methoden, deren Implementierbarkeit unter den bis hierhin ermittelten Restriktionen untersucht werden muß:

Zeitliche Synchronisierung

Time Triggered CAN (TTCAN) erweitert den CAN-Standard auf höheren OSI-RM-Schichten um ein zeitgesteuertes Verhalten. TTCAN garantiert das zeitgesteuerte Verhalten durch das Versenden von zeitlichen Referenznachrichten durch einen oder mehrere Zeitmaster-Busteilnehmer und stellt darüber hinaus Mechanismen zum Ausgleich des Drifts der lokalen Zeit der Busteilnehmer zur Verfügung. Die Referenznachrichten müssen hierzu unverzögert und unverdrängbar sein, um bei den Empfängern mit konstanter Frequenz eintreffen zu können. In einem verteilten CAN-Bus ist nicht sichergestellt, daß eine über RTE weitergeleitete Referenznachricht mit einer konstanten Frequenz bei entfernten Empfängern ausgewertet werden kann, da RTE nur eine maximale Verzögerung, nicht aber eine exakte Verzögerung der übermittelten Daten garantiert.

Sequenznummern

Sequenznummern sind ein Mechanismus, um Wiederholungen, Verluste und Reihenfolge von Nachrichten-Frames in Computernetzwerken zu detektieren. Ein Beispiel für die Verwendung von Sequenznummern ist der Message Code im Protokoll des Advanced General Aviation Transport Experiments (AGATE) Avionics Databus System Standard [AA01], einer Untermenge des CANaerospace Standards. Üblicherweise werden fortlaufende Sequenznummern nur zwischen zwei Kommunikationspartnern gepflegt - mit entsprechenden Modifikationen der CAN-Applikationen wäre es aber durchaus denkbar, eine globale Sequenznummer über sämtliche Nachrichten eines CAN-Busses zu etablieren. Globale Sequenznummern sind in einem verteilten CAN-Bus nicht realisierbar, da nicht jeder CAN-Teilbus Kenntnis der in anderen Teilbussen versendeten Nachrichten hat und somit keine Konsistenz von Sequenznummern über alle CAN-Teilbusse gewährleistet werden kann. Darüber hinaus widersprechen auch die unter 3.3 (Zeitliche Ordnung der Nachrichten) vorgestellten Abweichungen der Möglichkeit, konsistente Sequenznummern zu

pflügen. Darüber hinaus lassen sich fortlaufende Sequenznummern zwischen zwei in unterschiedlichen (Teil-)Bussen angeordneten CAN-Busteilnehmern ebenfalls nicht realisieren. In einem solchen Szenario könnten zwei unterschiedliche Nachrichten zwischen zwei Kommunikationspartnern identische Sequenznummern tragen, wenn sie zeitgleich gesendet werden und der entfernte Busteilnehmer noch keine Kenntnis der entsprechenden anderen Nachricht hat.

Timed Acknowledgement

Timed Acknowledgement ist ein Mechanismus, um Versand, Verlust und Verzögerung von Nachrichten-Frames in Computernetzwerken zu detektieren. Hierbei erwartet die sendende Anwendung eine auf Anwendungsebene ausgelöste Bestätigung des Eingangs der Nachricht beim Empfänger innerhalb eines definierten Zeitfensters. In einem verteilten CAN-Bus müssen Zeitlimits für eine Bestätigung durch die entfernte Anwendung unter Einbeziehung der durch RTE verursachten Übertragungslaufzeit geplant werden. Dies ist prinzipiell möglich, erfordert aber Kenntnis der CAN- und RTE-Topologie zur Anwendungsentwurfszeit. Somit kann ein entsprechendes Wohlverhalten bei Weiterverwendung von Legacy-CAN-Busteilnehmern nicht garantiert werden.

Prüfsummen

Prüfsummen sind ein Mechanismus zur Erkennung von Übertragungsfehlern und - bei ausreichend großer Hamming-Distanz - Behebung von Übertragungsfehlern. Application Layer Frameworks können auch in einem verteilten CAN-Bus eigene Prüfsummen auf der OSI-RM Anwendungsschicht als Teil der CAN-Framenutzlast definieren.

Konsequenz

Jede CAN-Anwendung muß einer weiteren Prüfung unterzogen werden, um die Verwendung von Sequenznummern und Timed Acknowledgement gegen die genannten Restriktionen abzusichern und um die Abhängigkeit von einer busübergreifenden, zeitlichen Ordnung auszuschließen.

4. Response Time Analysis

Die zeitlichen Garantien in zeitkritischen Systemen müssen überprüfbar sein. In zeitkritischen automotive-Bussystemen besteht die Kommunikation zum Großteil aus zyklisch ausgelösten Nachrichten. Eine kontinuierliche Zustandsüberwachung eines (Teil)-Systems z.B. würde das wiederholte Auslesen von Sensorwerten in wählbaren Zeitintervallen erfordern. Für zeitgesteuerte CAN-Systeme wird zur Entwurfszeit ein Zeitplan der zyklischen Nachrichten erstellt, der jeder Nachricht mindestens einen einzelnen Zeitabschnitt des Zeitplans reserviert und zeitliche Garantien festlegt. Das Resultat der Reduzierung des Zeitplans auf einen sinnvoll langen, sich wiederholenden Zeitabschnitt, der jedes zyklische

Signal mindestens einmal enthält, wird Schedule genannt. Wenn die maximale Übertragungsdauer jeder Nachricht eines Schedule über alle Iterationen des Schedule kürzer als deren garantierte, maximale Übertragungsdauer ist, gelten die Zeitgarantien als validiert. Die Berechnung der maximalen Übertragungsdauern geschieht per Worst Case Response Time (WCRT)-Analyse. Dabei werden die einzelnen Verzögerungen einer Übertragung entsprechend ihrer Ursache klassifiziert

- processing delay (Verzögerung durch Nachrichtenbereitstellung)
- queuing delay (Verzögerung in Puffern)
- transmission delay (Verzögerung durch Austakten)
- propagation delay (Verzögerung aufgrund der Signallaufzeit)

und innerhalb aller Abschnitte der Übertragungstrecke untersucht. Processing delay und queuing delay können durch gemessene Laufzeiten der beteiligten Hard- und Software ermittelt werden, zur Berechnung von transmission delay und propagation delay werden Informationen zur Nachrichtenlänge und Buseigenschaften benötigt. In einer gemischten Infrastruktur aus CAN und RTE setzt sich die WCRT einer Kommunikation zwischen unterschiedlichen Bussystemen aus Anteilen einer CAN-WCRT und einer RTE-WCRT zusammen.

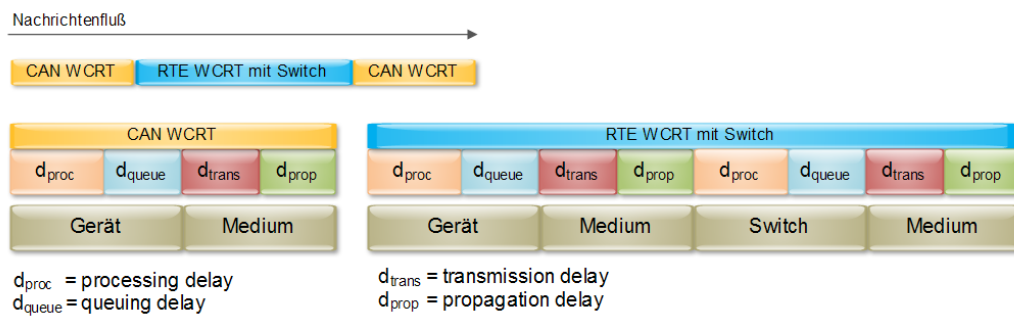


Abbildung 4.1: Beispiel einer WCRT Zusammensetzung, CAN-CAN via RTE

Abbildung 4.1 zeigt eine beispielhafte Übertragungstrecke, die aus einem CAN-Bus heraus über ein RTE-Netzwerk in einen Ziel-CAN-Bus Nachrichten übermittelt. Hier existieren drei Anteile an der WCRT, der Quell-acCAN-, RTE und der Ziel-CAN-Anteil. Diese Anteile können unabhängig voneinander berechnet werden.

WCRT in CAN-Bussen

Die Berechnung der WCRT von CAN-Nachrichten ist hinreichend erforscht, Tindell et al stellten z.B. 1994 und 1995 mit [TB94], [THW94] und [TBW94] eine Methode zur Berechnung der WCRT vor, welche schnell Akzeptanz bei Automobilherstellern (Volvo Car Corporation) und Entwicklern kommerzieller Scheduling-Analysesoftware (Volcano Communications Technologies) fand und ab 1995 produktiv eingesetzt wurde. Die weiterentwickelte Variante [DBBL07] kann genutzt werden, um im Rahmen der Untersuchung

von WCRT von über RTE übermittelten CAN-Nachrichten den CAN-Anteil der Gesamt-WCRT zu ermitteln. Die Variante beachtet die vier Verzögerungsursachenklassen und entwickelt ein Modell, daß tolerant gegenüber, von durch den Bus blockierenden, niedriger priorisierte Nachrichten verursachten, Verzögerungsfortpflanzungen und einer wählbaren Busfehlerrate ist. Die Berechnung des CAN-Anteils an der WCRT aus Abbildung 4.1 ist somit möglich.

WCRT im Realtime Ethernet

Ein switchgestütztes RTE hat eine WCRT, in die neben den Eigenschaften des Busmedium und der Busteilnehmerimplementierung ebenso Eigenschaften der in der Topologie verwendeten Hardware einfließen. Die Berechnung des durch ein oder mehrere Switches verursachten Verzögerungsanteils an der RTE-WCRT kann in Kenntnis der Switchherstellerangaben oder eigener Messungen durchgeführt werden. Anteile an der WCRT, die durch RTE-Busteilnehmer verursacht werden, sind von der jeweiligen Implementierung des Busteilnehmers abhängig, die nötigen Daten können durch Messungen ermittelt werden.

Im Falle des verwendeten RTE ist ebenso zu beachten, daß die Berechnung der RTE-WCRT je nach Trafficklasse (TT oder RC) eigenen Ermittlungsvorschriften unterliegt. Diese Ermittlungsvorschriften sind für einfache und komplexe Topologien ausreichend erforscht ([BSF09], [Ken12]). Die Berechnung des RTE-Anteils an der WCRT aus Abbildung 4.1 ist somit ebenfalls möglich.

Konsequenzen

In nullter Näherung ist anzunehmen, daß die durch ein CAN-System verursachte Verzögerung größer ist, als eine durch RTE verursachte Verzögerung. Daher ist am Beispiel in Abbildung 4.1 das doppelte Auftreten einer verhältnismäßig zeitintensiven CAN-Übertragung besonders auffällig. Dieser Effekt hat zusätzlich bei einer CAN-Busaufteilung während der Migration zu einer RTE-gestützten Topologie deutliche Konsequenzen: In Hinsicht auf eine Übertragungsdauerminimierung müssen hier geeignete Strategien zur optimalen Verteilung der CAN-Busteilnehmer auf neu entstehende CAN-Teilbusse entwickelt werden - ein erster Ansatz wäre z.B. die Busteilnehmer so anzuordnen, daß Sender und Empfänger besonders zeitkritischer Nachrichten in Teilbussen gruppiert werden.

Eine mögliche Gatewaylösung mit einer Architektur nach Abbildung 2.3 müßte auf die implementierungsabhängigen Daten zur Berechnung von processing delay und queuing delay untersucht werden. Hierbei ist von Gewicht, daß das processing delay architekturbedingt in Sende- und Empfangsrichtung nicht gleichartig ist - während Nachrichten in Richtung eines direkt verbundenen CAN-Busses die Komponente „Nachrichtenzuordnung“ durchlaufen müssen entfällt dieser Schritt für Nachrichten aus dem Gateway heraus. Das hat zur Folge, daß für einen Nachrichtenfluß ähnlich dem aus Abbildung 4.1 mindestens zwei unterschiedliche CAN-WCRT-Anteile berechnet werden müssen.

Die Berechnung des processing delays eines Gateways ist zusätzlich davon abhängig, ob über RTE ausgehende CAN-Nachrichten die Architekturkomponente „Paket-service“ nutzen sollen. Dieses gebündelte Übertragen mehrerer Nachrichten würde bis dato noch nicht quantifizierte Verzögerungen verursachen. Die Verzögerungen sind maßgeblich von dem

verwendeten CAN-Schedule und der durchschnittlichen Nachrichtenfrequenz und -größe innerhalb des Schedules abhängig. Allerdings existieren noch keine Algorithmen, um die Paketservice-Verzögerungszeit auf Basis eines Schedules zu berechnen oder umgekehrt bei Aufteilung eines CAN-Busses in mehrere Teilbusse die Paketservice-Verzögerungszeit durch geschickte, topologische Anordnung der Kommunikationsteilnehmer zu minimieren. Bis dahingehende Untersuchungen abgeschlossen sind, muß auf die Nutzung eines Paketservice für den Versand von Nachrichten mit scharfen Echtzeitanforderungen verzichtet werden.

5. Fazit

Der in dieser Ausarbeitung vorgestellte Lösungsansatz zur Entwicklung eines Gateways für über RTE verteilte CAN-Busse zeigt Problemfelder bei Weiterverwendung von Legacy-CAN-Busteilnehmern auf (siehe Anhang, tabellarische Zusammenfassung) und nennt Wege um die Kompatibilität einer CAN-Anwendung zum Lösungsansatz zu prüfen.

Um ein derartiges Gateway sinnvoll praktisch umsetzen zu können, muß die Einbindung in das technische Umfeld vorangetrieben werden: Die Extraktion einer Konfiguration für die Nachrichtenzuordnung im Gateway aus Busbeschreibungen nach FIBEX oder DBC ist bis dato noch nicht untersucht und realisiert. Ebenso sind Untersuchungen notwendig, auf welche Art und Weise ein Algorithmus über die optionale Nutzung des Paketservice entscheiden soll. Die Ausgestaltung des Paketservice ist Voraussetzung für eine abschließende Entwicklung einer Vorschrift zur Berechnung der WCRT in verteilten CAN-Bussen, welche für zeitkritische Anwendungen zwingend benötigt wird.

Weitere Fragestellungen ergeben sich aus der Idee, Nachrichten nicht nur innerhalb verteilter, homogener Bussysteme zuzustellen. So ist es denkbar, native RTE-Busteilnehmer als Quelle oder Ziel einer Nachricht zu verwenden oder über Gateways einen Tunnel über RTE zwischen CAN und einem dritten Bussystem wie z.B. Flexray aufzubauen. Neben der Entwicklung eines einheitlichen, vom angeschlossenen Bussystem unabhängigen Datenprotokolls innerhalb von RTE-Frames würde der Aspekt der Weiterverwendbarkeit von legacy-CAN-Busteilnehmern in einem inhomogenen Umfeld weitere Untersuchungen notwendig machen.

Die Untersuchung einer realen Automobilbusdefinition ist ein wichtiger Schritt, um die Praxisrelevanz der aufgeführten Restriktionen besser bestimmen zu können. Hierbei können Erkenntnisse über das Zusammenwirken von technologischen Eigenheiten, semantischen Eigenschaften, der Topologie und zeitlicher Anforderungen eines realistischen Bus zusätzlich genutzt werden, um den Anforderungskatalog an den Lösungsansatz gegebenenfalls zu verfeinern.

Literaturverzeichnis

- [AA01] National Aeronautics and Space Administration. *System Standard For The AGATE Airplane Avionics Data Bus*. Langley Research Center, Hampton, Virginia 23681-001, 1 edition, October 2001. Visit: 13.09.2012, http://www.stockflightsystems.com/tl_files/downloads/canaerospace/AGATE_DB_Std_V1.0.doc.
- [ASA11] ASAM. Asam mcd-2 net 4.0.0, fibex. [http://www.asam.net/nc/home/standards/standard-detail.html?tx_rbwmbasamstandards_pi1\[showUid\]=1246&start=](http://www.asam.net/nc/home/standards/standard-detail.html?tx_rbwmbasamstandards_pi1[showUid]=1246&start=), 2011.
- [BSF09] Henri Bauer, Jean-Luc Scharbarg, and Christian Fraboul. Applying and optimizing trajectory approach for performance evaluation of afdx avionics network. In *Proceedings of the 14th IEEE international conference on Emerging technologies & factory automation*, ETFA'09, pages 690–697, Piscataway, NJ, USA, 2009. IEEE Press.
- [CE05] Inc. Condor Engineering. Afdx protocol tutorial, 2005.
- [DBBL07] Robert Davis, Alan Burns, Reinder Bril, and Johan Lukkien. Controller area network (can) schedulability analysis: Refuted, revisited and revised. *Real-Time Systems*, 35:239–272, 2007. 10.1007/s11241-007-9012-7.
- [DBKA03] Michael Ditze, Reinhard Bernhardt, Guido Kämper, and Peter Altenbernd. Porting the internet protocol to the controller area network. 2nd International Workshop On Real-Time LANs In The Internet Age, July 2003.
- [Gmb91] Robert Bosch GmbH. Can specification, 1991. visit: <http://esd.cs.ucr.edu/webres/can20.pdf>.
- [Gut11] J. Javier Gutiérrez. Artistdesign workshop on real-time system models for schedulability analysis, 2011. Visited: 19.09.2012, http://www.artist-embedded.org/docs/Events/2011/Models_for_SA/08-AFDX-Javier_Gutierrez.pdf.
- [iso03] Iso 11898-1:2003, road vehicles – controller area network (can) – part 1: Data link layer and physical signalling, 2003. http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=33422.
- [JKR09] Mathias Johanson, Lennart Karlsson, and Tore Risch. Relaying controller area network frames over wireless internetworks for automotive testing applications. *Systems and Networks Communication, International Conference on*, 0:1–5, 2009.

- [Ken12] Hermand Dieumo Kenfack. Designmigrationsstrategien von flexray nach time-triggered ethernet. Master's thesis, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2012.
- [Nag84] John Nagle. Congestion control in ip/tcp internetworks, 1984. RFC 896.
- [Obe02] Roman Obermaisser. Can emulation in a time-triggered environment. In *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE'02)*, volume 1, pages 270–275, L'Aquila, Italy, 2002. TU Wien, IEEE.
- [Pic06] Bob Pickles. Avionics full duplex switched ethernet (afdx). Technical report, SBS Technologies, 2006. Visit: 27.08.2012.
- [Ric01] Pat Richards. Understanding microchip's can module bit timing. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00754.pdf>, 2001. Visit: 30.08.2012.
- [Sem97] Philips Semiconductors. Determination of bit timing parameters for the can controller sja 1000. http://www.mct.net/download/philips/can_timing.pdf, 1997. Visit: 30.08.2012.
- [TB94] Ken Tindell and Alan Burns. Guaranteeing message latencies on control network (can). In *In Proceedings of the 1st International CAN Conference*, pages 1–2. CiA, 1994.
- [TBW94] K. W. Tindell, A. Burns, and A. J. Wellings. An extendible approach for analyzing fixed priority hard real-time tasks. *Real-Time Systems*, 6:133–151, 1994. 10.1007/BF01088593.
- [THW94] K.W. Tindell, H. Hansson, and A. J. Wellings. Analysing real-time communications: Controller area network (can). In *Real-Time Systems Symposium, 1994., Proceedings*, 1994.
- [vBMM90] Gregor von Bochmann and Pierre Mondain-Monval. Design principles for communication gateways. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 8(1):12–21, 1990.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Beispieltopologie: CAN Bus und verteilter CAN Bus mit RTE backbone .	3
2.1	Kapselungsprotokoll	5
2.2	Gatewayarchitektur	7
3.1	Zeitliche Ordnung zweier Nachrichten A und B	10
3.2	Zeitliche Ordnung zweier Nachrichten A und B, verteilter CAN	11
4.1	Beispiel einer WCRT Zusammensetzung, CAN-CAN via RTE	13

A. Abkürzungsverzeichnis

AGATE Advanced General Aviation Transport Experiments

BAG Bandwidth Allocation Gap

BE Best Effort

CAN Controller Area Network

CSMA/CA Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance

CTID Critical Traffic ID

ECU Electronic Control Unit

HAW Hochschule für Angewandte Wissenschaften

LLC Logical Link Control

MAC Medium Access Control

OSI-RM Open Systems Interconnection Reference Model

RC Rate Constraint

RTE Realtime Ethernet

SP Service Primitives

TT Time Triggered

TTCAN Time Triggered CAN

VL Virtual Link

WCRT Worst Case Response Time

B. Restriktionen, tabellarisch

Beschreibung	ISO 11898:2003	CAN-CAN	distributed CAN
Allgemein			
bitgenauer Buszugriff	+	-	-
zeitliche Ordnung	+	-	-
Service Primitives			
MAC-Schicht Data.confirm	+	-	-
MAC-Schicht Remote.confirm	+	-	-
Verhalten			
Arbitrierung	+	-	-
Acknowledge	+	o	o
Overload Frames	+	o	o
Error Frames	+	-	-
Remote Frames	+	o	o
TTC	+	-	-
Applikationsmuster			
zeitliche Synchronisierung	+	-	-
Sequenznummern	+	o	o
timed acknowledgement	+	o	-
Prüfsummen	+	+	+

Legende:

- + = ohne Einschränkungen
- o = mit leichten Einschränkungen
- = nicht realisierbar