



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Ausarbeitung - Anwendungen 1 - WS 08/09

Till Steinbach

Ethernet als Bus für Echtzeitanwendungen im Automobil

Till Steinbach

Thema der Ausarbeitung - Anwendungen 1 - WS 08/09

Ethernet als Bus für Echtzeitanwendungen im Automobil

Kurzzusammenfassung

Im Automobil wächst der Anteil von Elektronik rapide. Neben Fahrerassistenzsystemen wie der Antriebsschlupfregelung (ASR) oder dem Elektronischen Stabilitätsprogramm (ESP) oder dem Einsatz der "X-by-Wire"-Technologie nimmt vor allem der Anteil von Entertainment- und Telekommunikationssystemen zu. Heute eingesetzte Bussysteme sind auf spezielle Anwendungen zugeschnitten und die Grenzen ihrer Leistungsfähigkeit. Diese Arbeit erklärt die Motivation für den Einsatz der Ethernet-Technologie im Automobil, stellt die wichtigsten Anforderungen vor und gibt einen Überblick über Konzepte aus der Automatisierungsbranche, um diese Anforderungen zu erfüllen. Im Bereich der Prozessautomatisierung werden bereits einige Echtzeit-Ethernet-Lösungen angeboten und eingesetzt.

Betreuende Prüfer

Prof. Dr. Birgit Wendholt, Prof. Dr. Stephan Pareigis

Betreuer

Prof. Dr. Franz Korf, Prof. Dr. Hans H. Heitmann, Prof. Dr. Thomas Schmidt

Till Steinbach

Title of the paper

Using Ethernet for realtime applications in automobiles

Abstract

The amount of electronics in automobiles increases fast. Beside driver assistance systems like the traction control system, the electronic stability control or the usage of "x-by-wire"-systems the amount of entertainment- or telecommunication systems increases. Bussystems used today in automotive context are fitted to the application and come to their limit. This paper explains the motivation to use the ethernet technology in automobiles, presents the most important requirements and gives an overview over concepts of the automation industry. In the automation sector realtime ethernet solutions are already offered and utilized.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.1.1	Warum Ethernet als Systembus	2
1.2	Problemstellung und Zielsetzung	3
1.3	Struktur und Schwerpunkte dieser Arbeit	3
2	Zielplattform	5
2.1	Typische Merkmale eines verteilten Echtzeit-Systems im Automobil	5
2.2	Anforderungen	6
2.2.1	Anforderungen für Echtzeitbus-Systeme im Automobil	6
2.2.2	Anforderungen für ein Echtzeitbus-System im FAUST-Umfeld (speziell im HAWKS-Racing Rennwagen)	7
3	Technologieübersicht	8
3.1	Klassifizierung der Systeme	8
3.2	Time-triggered Systeme	8
3.2.1	Eigenschaften von time-triggered Systemen	8
3.2.2	Marktübersicht time-triggered Systeme	9
3.3	Token-basierte Systeme	11
3.3.1	Eigenschaften von token-basierten Systemen	11
3.3.2	Marktübersicht Token-basierte Systeme	11
3.4	Bandbreiten-basierte Systeme	12
3.4.1	Eigenschaften von bandbreiten-basierten Systemen	12
3.4.2	Marktübersicht bandbreiten-basierte Systeme	12
3.5	Allgemeine Eigenschaften	13
4	Fazit	14
4.1	Ausblick auf weiteres Vorgehen	14
4.2	Risikoabschätzung	15
A	Realtime Ethernet Systeme aus der Automatisierungsbranche im Vergleich	16

Glossar	18
Abkürzungsverzeichnis	19
Literaturverzeichnis	19

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

Ein modernes Kraftfahrzeug unterstützt den Fahrer mit einer Vielzahl an Fahrerassistenzsystemen. Beispiele sind die *Antriebsschlupfregelung (ASR)* oder das *Elektronisches Stabilitätsprogramm (ESP)*. Auch die „X-by-Wire^G“-Technologie, also die Übertragung von Steuer- und Regelungsbefehlen des Fahrers über Datenleitungen im Gegensatz zur mechanischen Übertragung, nimmt zu (vgl. Leen und Heffernan, 2002). Zudem verfügen Kraftfahrzeuge über immer mehr Informations- und Unterhaltungselektronik. Während in den 70er Jahren noch das Autoradio die Krönung der Fahrzeugelektronik darstellte, werden in heutigen Oberklassefahrzeugen bis zu 70 Steuergeräte verbaut (vgl. Navet u. a., 2005). Ein Kraftfahrzeug ist somit ein komplexes verteiltes Echtzeitsystem. Bedeutenden Einfluss in verteilten Echtzeitsystemen hat der Datenfluss zwischen den verteilten Komponenten. In einem aktuellen Serienmodell sind mehrere hundert Sensoren über die gesamte Karosserie verteilt. Die datenverarbeitenden Steuergeräte sind zumeist an einer komplett anderen Stelle im Fahrzeug eingebaut als die Sensorik, die die Daten aufnimmt. Damit kommt der Datenübertragung im Fahrzeug eine bedeutende Rolle zu.

Momentan ist das Datenübertragungsnetz in Serienfahrzeugen heterogen aufgebaut. Je nach Anwendung und zu übertragenden Daten kommen spezielle Bussysteme zum Einsatz. Tabelle 1.1 zeigt heute eingesetzte Bussysteme und ihre Verwendung.

Jedes Bussystem ist für seine jeweilige Anwendung optimal. Um jedoch eine Kommunikation zwischen den verschiedenen Bussystemen zu ermöglichen, müssen sogenannte Gateways eingesetzt werden, welche die Nachrichten zwischen den verschiedenen Systemen übersetzen (vgl. Dohmke, 2002). Die heterogene Struktur macht das Fahrzeugnetzwerk kompliziert und damit in der Entwicklung teuer. Wünschenswert wäre eine Bustechnologie, die sich durchgängig im gesamten Fahrzeug einsetzen ließe.

Zukünftige Techniken wie die „Car-2-Infrastruktur-“ oder „Car-2-Car-Kommunikation“, in de-

Bus	Typisches Anwendungsfeld
Controller Area Network (CAN)	Vernetzung von Steuergeräten
Flexray	Vernetzung von Steuergeräten (höhere Bandbreite)
Media Oriented System Transport (MOST)	Vernetzung von Audio- und Video-, Sprach- und Datenanwendungen
Local Interconnect Network (LIN)	Vernetzung von Aktoren und Sensoren

Tabelle 1.1: Überblick über Bussysteme im Fahrzeug und ihre typische Verwendung

nen das Fahrzeug mit seiner Umwelt interagiert, erfordern neue Ansätze für das Bordnetzwerk des Automobils.

1.1.1 Warum Ethernet als Systembus

Die Ethernet-Technologie ist eine bewährte Technik, die mit dem Internet ihren Durchbruch erlebte. Durch die gestiegene Verbreitung sind die Preise für Ethernet-Komponenten gesunken (vgl. Greifeneder und Frey, 2007). Heute haben sehr viele Microcontroller bereits Hardware für die Anbindung an Ethernet integriert. Ein großer Vorteil bei der Verwendung von Ethernet ist Entkopplung der Kommunikation vom Übertragungsmedium. Der Ethernet-Standard definiert neben der Nutzung von Kupferkabel in verschiedenen Konfigurationen z.B. auch die Übertragung über Lichtwellenleiter (vgl. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2005). Die Wahl des Übertragungsmediums kann somit gut an die Anforderungen der Übertragungsstrecke – wie z.B. besonders hohe Bandbreite oder besonders hohe Sicherheit gegenüber elektromagnetischen Einstrahlungen – angepasst werden. Im nicht zeitkritischen Bereich stehen bereits eine große Anzahl an anwendungsspezifischen Protokollen zur Verfügung, die auf Ethernet basieren. Der Einsatz solcher Standardprotokolle z.B. im Diagnose-, oder Unterhaltungsbereich hilft Kosten in der Entwicklung einzusparen und vereinfacht die Integration von herstellerfremden Systemen, sogenannten *Components of the shelf (COTS)*.

Dadurch, dass Ethernet eine weit verbreitete Technologie ist, gibt es bereits eine große Palette an Entwicklungs- und Diagnosewerkzeugen. Die Zahl an fachkundigen Entwicklern ist beim Ethernet-Protokoll weit größer als bei speziellen automotive^G Lösungen wie *Local Interconnect Network (LIN)* oder *Media Oriented System Transport (MOST)*.

Es ist momentan nicht bekannt, wieviele Hersteller und Zulieferer an Lösungen für Echtzeit-Ethernet im Automobil arbeiten. Die einzigen dazu veröffentlichten Ergebnisse stammen von BMW. Dort wurde ein Versuchsfahrzeug mit Ethernet ausgerüstet. Die verwendete Technologie wurde nicht veröffentlicht. Zu den Ergebnissen der Studie sagt der Projektmanager

Richard Bogenberger: „Our experiments with prototypes demonstrated, that the real-time behavior far exceeded the requirements — even when we ran multimedia applications across the same network.“ (vgl. Christoph Hammerschmidt, 2007) Dabei wird deutlich, dass die klassische Trennung von Übertragungsleitungen sicherheitskritischer und sicherheitsunkritischer Anwendungen abgebaut werden soll.

1.2 Problemstellung und Zielsetzung

Ursprünglich ist Ethernet nicht echtzeitfähig, da die Teilnehmer nicht synchronisiert werden. Es kommt zu Kollisionen z.B. an den Knotenpunkten, welche die Nachrichten verzögern. Das Ziel der Forschung auf diesem Gebiet ist das Erarbeiten eines Konzeptes für ein Echtzeit-Ethernet-Bussystem, was auf die Anforderungen der Automobilbranche zugeschnitten ist.

Als Proof-of-Concept bietet sich die Implementierung auf einem Fahrzeug des FAUST-Programmes (vgl. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg) der HAW-Hamburg an. Spezielles Interesse besteht im Projekt HAWKS-Racing (vgl. HAWKS Racing Team), dessen Telemetrieabteilung Teil des FAUST-Programmes ist.

Das HAWKS-Racing-Team ist ein studentisches Projekt, welches jährlich einen Rennwagen zur Teilnahme an der Formula Student (vgl. Formula Student Germany) entwickelt. Die Formula Student ist ein studentischer Wettbewerb, in dem Rennwagen verschiedener studentischer Teams gegeneinander antreten. Neben den realen Fahreigenschaften der Fahrzeuge werden hier auch technologische Aspekte bewertet. Die Telemetrie-Baugruppe des Teams erhofft sich durch den Einsatz eines neuartigen und fortschrittlichen Bussystems einen Technologievorteil gegenüber anderen Rennteams. Darüber hinaus soll in kommende Rennwagen neue Funktionalität, wie z.B. IP-basierter Sprechfunk oder die Übertragung von Rundenzeiten und Nachrichten aus der Box an den Fahrer, integriert werden.

1.3 Struktur und Schwerpunkte dieser Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist ein Einstieg in das Thema Ethernet im Automobil. Neben der Anforderungsanalyse wird hauptsächlich eine Technologie und Marktübersicht von Realtime-Ethernetlösungen aus der Automatisierungsbranche erarbeitet. Im Bereich der Automatisierung werden bereits einige Echtzeit-Ethernet-Lösungen angeboten und eingesetzt. Diese verschiedenen Technologien werden klassifiziert, um erste Abschätzungen bezüglich der Einsetzbarkeit im Automobil zu ermöglichen.

Kapitel 2 stellt das Automobil als Zielplattform vor und erläutert Anforderungen, die sich aus diesem Kontext ergeben.

Kapitel 3 gibt einen Überblick über Technologien aus dem Echtzeit-Ethernet Bereich und

stellt Systeme aus der Automatisierungsbranche vor.

Kapitel 4 zieht ein Fazit und gibt einen Ausblick auf die nächsten Schritte.

Begriffe, deren Bedeutung oder Definition nicht allgemein bekannt sind, sind mit einem *G* markiert und im Glossar¹ erklärt. Abkürzungen werden bei ihrer ersten Erwähnung ausgeschrieben und im Abkürzungsverzeichnis² gelistet. Zudem sind die Abkürzungen zur besseren Übersicht *kursiv* gesetzt.

¹Glossar auf Seite 18

²Abkürzungsverzeichnis auf Seite 19

Kapitel 2

Zielplattform

Das folgende Kapitel stellt zunächst die Eigenschaften eines typischen verteilten Echtzeit-Systems im Automobil vor, um dann auf die Anforderungen, die sich aus diesem Kontext ergeben, einzugehen.

2.1 Typische Merkmale eines verteilten Echtzeit-Systems im Automobil

Echtzeitanwendungen im Automobil haben teilweise hohe Anforderungen an das Zeitverhalten. So muss z.B. bei einem Aufprall die Aufnahme der Sensorwerte, die Datenübertragung und die Aktivierung des Airbags abgeschlossen sein, bevor die Relativbewegung der Insassen beginnt (vgl. Rokosch, 2002). Die Güte von Regelungssystemen wie der *Antriebs-schlupfregelung (ASR)* hängt ebenfalls von der Nachrichtenlaufzeit (Latenz) und der Variabilität der Nachrichtenlaufzeit (Jitter) ab, denn sie hat wesentlichen Einfluss auf die Totzeit. Die Totzeit ist ein Begriff aus der Regelungstechnik, der die Zeitspanne zwischen einer Änderung am Systemeingang und der entsprechenden Antwort am Systemausgang bezeichnet. Je länger die Totzeit ist, desto schlechter wird das Regelverhalten. Dies kann soweit führen, dass der Regler unbrauchbar wird.

Ein Automobil ist ein definiertes geschlossenes System. In der Regel werden Komponenten nicht spontan in das System eingefügt oder entfernt. Damit kann der Determinismus und das Zeitverhalten des Bussystems gut im voraus berechnet werden. Das System kann statisch konfiguriert werden und muss sich nicht auf sich ändernde Topologien oder variierende Teilnehmerzahlen anpassen, wie es etwa im Internet erforderlich ist.

2.2 Anforderungen

Die Anforderungen an das eingesetzte Echtzeit-Ethernet-Bussystem lassen sich grob in zwei Kategorien gliedern. Zum einen sind die Anforderungen aus dem Automobilbereich zu erfüllen. Zum anderen sind die Anforderungen zu erfüllen, die sich aus der Implementierung im FAUST-, bzw. HAWKS-Racing Rennwagen-Kontext ergeben.

2.2.1 Anforderungen für Echtzeitbus-Systeme im Automobil

Die Automobilindustrie definiert einen umfangreichen Anforderungskatalog an Bussysteme für Echtzeitanwendungen im Automobil. Die wichtigsten Anforderungen sind im folgenden Abschnitt erläutert (vgl. Belschner u. a., 2000). Die Anforderungen sind nach ihrer Priorität geordnet.

Parallele Übertragung von Daten mit harten, weichen und ohne Echtzeitanforderungen: Verschiedene Anwendungen im Fahrzeug haben unterschiedliche Anforderungen an Determinismus und Zeitverhalten des Bussystems. Daten für Fahrerassistenzsysteme und Sicherheitseinrichtungen des Fahrzeugs müssen mit absolut deterministischem Zeitverhalten, also innerhalb definierter Grenzen für Nachrichten-Latenz und Jitter^G, übertragen werden. Weiterhin gibt es Systeme mit weichen Zeitanforderungen. Dies betrifft z.B. die Kommunikations- und Unterhaltungselektronik im Fahrzeug. Eine dritte Klasse von Daten hat keine feste Zeitanforderung an das Bussystem im Fahrzeug.

Synchrone und asynchrone Übertragung: Regelungssysteme im Fahrzeug basieren meist auf synchroner Kommunikation. Kommunikations- und Unterhaltungsanwendungen, Konfigurations- und Diagnosedaten werden dagegen in der Regel asynchron und nur bei Bedarf übertragen.

Geringer Nachrichtenjitter: Die Regelgüte einer verteilten Regelung hängt maßgeblich von der Höhe des Nachrichtenjitters ab. Mit Jitter^G wird die Variabilität der Nachrichtenlaufzeit bezeichnet.

Redundanz: Um fehlertolerant sicherheitsrelevante Systeme zu vernetzen, muss das Netzwerk ein Redundanzkonzept anbieten.

Hohe Übertragungsbandbreite: Steuerelektronik im Antriebs- und Fahrwerksbereich von Automobilen hat derzeit eine Bandbreitenanforderung von ca. 2 MBit/Sek. Diese Daten müssen dabei mit deterministischem Zeitverhalten ausgeliefert werden. Multimediaanwendun-

gen wie z.B. hochauflösende Videodaten haben einen deutlich höheren Bandbreitenbedarf bei geringeren Anforderungen an das Zeitverhalten.

Einfacher Austausch des Physical-Layers: Je nach Anwendung und Einsatzgebiet sind verschiedene physikalische Medien optimal für die Datenübertragung. Ein fortschrittliches Bussystem abstrahiert vom physikalischen Medium und lässt damit den Austausch und die Kombination verschiedener physikalischer Medien zu.

Einfache Anwendung: Kürzere Produkteinführungszeiten fordern eine schnelle Entwicklung. Daraus ergibt sich die Anforderung nach einfachen flexiblen Schnittstellen zum Bussystem.

Nutzung von Standardkomponenten: Standardkomponenten, sogenannte *Components of the shelf (COTS)*, helfen die Kosten in Entwicklung und Produktion zu sparen.

2.2.2 Anforderungen für ein Echtzeitbus-System im FAUST-Umfeld (speziell im HAWKS-Racing Rennwagen)

Kommunikation zwischen Systemen mit (Echtzeit-) Betriebssystem und betriebssystemlosen Komponenten: In den FAUST-Projekten werden meist Komponenten mit Betriebssystem und Komponenten ohne Betriebssystem gemeinsam verwendet. Das Bussystem muss auf beiden Systemklassen implementierbar sein.

Einsatz von Standard-Ethernet-Komponenten: Die FAUST-Projekte setzen hauptsächlich standard PC-Hardware und Microcontroller ein. Somit muss das Bussystem auf den Geräten in Software implementiert werden können. Hardwaremodifikationen sind nicht möglich oder zumindest unerwünscht, da sie die Entwicklung verkomplizieren und verteuern.

Geringes Gewicht und geringer Platzbedarf, geringer Strombedarf der Komponenten: Da auf Busteilnehmerseite Chips mit integriertem Ethernetcontroller eingesetzt werden sollen, fällt hier kein extra Gewicht für die Busteilnahme an. Da das Realtime-Ethernet jedoch switched ist, fällt zusätzlich Platzbedarf, Gewicht und Stromverbrauch für die Switches an. Dieser Mehrbedarf ist zu minimieren.

Kapitel 3

Technologieübersicht

Im folgenden Kapitel werden Technologien und Produkte vorgestellt, die es ermöglichen, Echtzeitfähigkeit auf Bussystemen herzustellen.

3.1 Klassifizierung der Systeme

Grundsätzlich lassen sich die am Markt befindlichen Technologien und Systeme nach verschiedenen Kriterien wie z.B. Nachrichtenlatenz, Jitter, Nutzung von Standardhardware, Offenheit der Technologie oder Kosten klassifizieren. Im folgenden Abschnitt sind die Technologien in die 3 Hauptfelder time-triggered Systeme, token-basierte Systeme und bandbreitenbasierte Systeme eingeordnet, da sie die wichtigsten Eigenschaften vereinen. Tabelle A.1 schlüsselt weitere Kriterien auf.

3.2 Time-triggered Systeme

Time-triggered Systeme sind der verbreitete Ansatz um Echtzeitfähigkeit auf Bussystemen herzustellen. Dabei synchronisieren sich time-triggered Systeme über eine globale Zeit. Bei time-triggered Systemen hat jeder Teilnehmer eine Uhr, welche möglichst genau mit den Uhren der anderen Teilnehmer synchronisiert werden muss. Jedem Teilnehmer werden dann Zeitschlitze zugewiesen, in denen der Teilnehmer auf den Bus senden darf. Damit ist sichergestellt, dass immer nur ein Teilnehmer zur Zeit auf den Bus sendet. Diese Technik wird auch als *Time division multiple access (TDMA)* bezeichnet.

3.2.1 Eigenschaften von time-triggered Systemen

Es gibt eine ganze Reihe an Verfahren, um eine globale Zeit herzustellen. Bei den Zeit-Master-Slave-Verfahren gibt es einen sogenannten Timemaster, der den Kommunikations-

ablauf steuert, indem er regelmäßig Synchronisierungsnachrichten verschickt. Dieser Time-master kann ein Busteilnehmer sein oder im Switch implementiert werden. Bei der Konfiguration von time-triggered Systemen ist darauf zu achten, dass die Teilnehmer nie über ihren Zeitschlitz hinaus senden. Je genauer die Busteilnehmer synchronisiert werden können, desto enger können die Zeitschlitze aneinander gehängt werden. Da auf dem Medium eines geschichteten Ethernet keine Kollision auftreten kann, reicht es bei Systemen mit weniger harten Kriterien für den Nachrichtenjitter aus, die Teilnehmer grob zu synchronisieren. Die Kollisionen, die dabei im Switch entstehen, werden durch die Queues des Switches aufgelöst. Eine weitere Form der Zeitsynchronisation ist das *Precision Time Protocol (PTP)* (vgl. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2002). *PTP* kann sowohl in Hardware als auch in Software implementiert werden. In Hardware kann *PTP* eine Genauigkeit im Bereich von Nanosekunden erreichen. Eine Softwareimplementierung erreicht Genauigkeiten im Mikrosekunden Bereich (vgl. Tan, 2007).

3.2.2 Marktübersicht time-triggered Systeme

Profinet ist ein Echtzeit-Ethernet-Standard, der von der PROFIBUS Nutzerorganisation e.V. als industrieller Fachverband organisiert wird. Profinet definiert 3 Klassen von Daten PROFINET NRT(Non Real Time), PROFINET RT(Real Time) und PROFINET IRT(Isochronous Real Time). Im Bereich NRT kommen Standard IP-Protokolle zum Einsatz. Dabei werden Zykluszeiten größer 100ms erreicht. Im Bereich RT werden die Daten im Ethernet-Protokoll transportiert. Die Zykluszeiten liegen hier größer 10ms. Für harte Echtzeitanforderungen definiert Profinet mit Isochronous Real Time ein Verfahren, das Zykluszeiten kleiner 1ms und Jitter kleiner $1\mu\text{s}$ erreichen kann und auf spezielle Ethernet-Controller angewiesen ist. Zur Synchronisierung der Teilnehmer setzt Profinet das *Precision Time Protocol (PTP)* ein. In den Profinet Switches werden Zeitschlitze für die Übertragung von Isochronous Real Time Daten reserviert. Dadurch kann verhindert werden, dass diese Pakete bei der Übertragung verzögert werden (vgl. Felser, 2005).

TTEthernet entstand aus einem Projekt der Real-Time Systems Group (vgl. Real Time Systems Group (RTS)) der TU Wien aus dem Jahre 2004 und wird heute von der österreichischen Firma TTEch Computertechnik AG weiterentwickelt und kommerziell angeboten. TTEthernet steht für time-triggered Ethernet. Auch TTEthernet definiert 3 Klassen von Nachrichten: time-triggered Messages werden in vordefinierten Zyklen gesendet und haben Vorrang vor allen anderen Nachrichten. Rate-constrained messages sind Nachrichten mit weniger harten Echtzeitanforderungen. Für Rate-constrained messages ist nur sichergestellt, dass ausreichend Bandbreite für die Übertragung zur Verfügung steht. Best-effort messages sind vergleichbar mit normalen Ethernet-Nachrichten. Für Best-effort messages werden keine Annahmen zur Laufzeit gemacht. Sie nutzen die übrige Bandbreite, nachdem

time-triggert und Rate-constrained messages übertragen wurden. TTEthernet ist ein offenes Protokoll. Zum Einsatz kommen spezielle FPGA basierte Switches (vgl. TTEch). Die Controller der Teilnehmer können in Software auf Standardhardware implementiert werden (vgl. Grillinger u. a., 2006).

SynqNet ist ein Bussystem für Antriebssteuerungen im Automatisierungsbereich, entwickelt von der Danaher Motion Corporation und 2001 vorgestellt. SynqNet bietet keine Sterntopologie an; damit sind keine Switches erforderlich. Jeder Busteilnehmer hat zwei Interfaces, was sowohl die Ringtopologie als auch die Linientopologie ermöglicht. Durch den Verzicht auf die Sterntopologie erreicht SynqNet im Vergleich zu anderen Bussystemen niedrigere Latenz und Jitter. Zudem werden Leitungslängen und Anzahl an Knoten auf dem Leitungsweg während der Initialisierung berechnet und ermittelt, was zu einer genauen Voraussage der Laufzeiten führt (vgl. SynqNet Interest Group).

RTnet entstand an der Universität Hannover in der Real-Time Systems Group (vgl. Real-Time Systems Group). Die Referenzimplementierung basiert auf Linux und der Echtzeiterweiterung RTAI. Da RTnet ohne spezielle Hardware arbeitet, ist es erforderlich, dass der Bus abgeschlossen ist und alle Busteilnehmer ausschließlich das RTnet Protokoll sprechen. Es ist jedoch möglich, TCP/IP Kommunikation über das RTnet Protokoll zu tunneln. RTnet arbeitet nach dem TDMA-Verfahren, wobei nicht zeitkritische Daten ungenutzte Zeitslots verwenden (vgl. Kiszka und Wagner, 2005). Die Synchronisation der Teilnehmer erfolgt durch einen Master, der periodisch den Beginn eines neuen Zyklusses durch eine Startnachricht (Start of Frame) signalisiert. Die Busteilnehmer synchronisieren anhand dieser Nachricht ihre Uhren. RTnet ist als freies Softwareprojekt entstanden und kann ohne Lizenzkosten weiterentwickelt und genutzt werden (vgl. Kiszka und Schwebel, 2004).

POWERLINK wurde ursprünglich von der Firma B&R als proprietäre Technologie entwickelt und 2001 vorgestellt. 2002 entschied sich B&R, die Technik offenzulegen, und gründete die Ethernet POWERLINK Standardization Group (EPSG), die seitdem die Entwicklung vorantreibt. Seit der Version 2 des Protokolls aus dem Jahre 2003 ist CANopen in POWERLINK integriert. POWERLINK ist ein timemaster-basiertes Verfahren. Ein Buszyklus wird durch ein „Start of Cycle“-Paket (SoC) gestartet. An dieser Nachricht synchronisieren sich die Busteilnehmer und senden in dem ihnen zugewiesenen Zeitschlitz ihre Nachrichten. Das Ende dieser synchronen Phase wird durch ein „Start of Asynchron“-Paket (SoA) markiert. Bis zum nächsten SoC-Paket können nun zeitunkritische und asynchron auftretende Daten versendet werden. Damit kann über Gateways, die die Daten im Zeitschlitz der asynchronen Nachrichten platzieren, auch Standard IP-Datenverkehr über den Bus übertragen werden.

3.3 Token-basierte Systeme

Die Grundlage von Token basierten Systemen ist der wechselseitige Ausschluss mit Hilfe einer zwischen allen Busteilnehmern geteilten Ressource, dem Token. Das Token wandert dabei von Teilnehmer zu Teilnehmer. Daten über den Bus senden darf immer nur der Teilnehmer, der das Token hält. Damit ist sichergestellt, dass der Bus stets frei ist, wenn Daten gesendet werden. Der Bus synchronisiert sich stets über das Token. Ein Beispiel für ein token-basiertes Bussystem ist das Token Ring Protokoll (IEEE 802.5) aus dem Bereich der Computernetze. Hier ist für die Topologie ein geschlossener Ring erforderlich. Der IEEE-Standard 802.4 definiert solche Token Bus-Systeme auch für die Sterntopologie. Eine Ringstruktur wird dabei nicht über das physikalische Medium hergestellt, sondern auf logischer Ebene. Das Token wird jeweils zum Teilnehmer mit der nächst niedrigeren Adresse weitergegeben.

3.3.1 Eigenschaften von token-basierten Systemen

Token-basierte Systeme können mit Standard-Ethernet-Switches implementiert werden, da sich die gesamte Protokoll-Logik auf die Busteilnehmer verschieben lässt. Dabei ist stets sicherzustellen, dass nur ein Token im Umlauf ist. Das Komplexere an token-basierten Systemen ist die Erkennung und Neuerzeugung eines verlorenen Tokens, was durch Paketverlust oder Ausfall eines Teilnehmers eintreten kann. Die Dauer dieses Vorgangs muss dabei bei der Berechnung des Jitters in jedem Fall berücksichtigt werden und hat damit direkt Einfluss auf die worst-case Übertragungszeit. Bei Token basierten Systemen kann zwar die Dauer der eigentlichen Datenübertragung sehr gut berechnet werden, jedoch hängt der Zeitpunkt der Übertragung wesentlich von der Busbelastung ab. Mit variabler Teilnehmeranzahl verändert sich auch die Zykluslänge. Somit kann zwar eine definierte Aussage über Laufzeit und Jitter getroffen werden, dieser hängt jedoch von der Anzahl der aktiven (sendenden) Teilnehmer ab. Neben dem klassischen Tokensystem mit einem Token für den gesamten Bus, können bei umfangreicheren Topologien auch mehrere Token eingesetzt werden. Dabei dürfen Nachrichten von Sendern mit verschiedenen Token jedoch nicht über dieselbe Leitung gesendet werden.

3.3.2 Marktübersicht Token-basierte Systeme

Ethercat wird von der Ethercat Technology Group, einer Interessengemeinschaft aus Anwendern und Herstellern, welche von der Firma Beckhoff gegründet wurde, entwickelt. Ethercat wurde 2003 veröffentlicht. Ethercat ist ein klassisches token-basiertes System. Ein Master sendet einen Standard-Ethernet-Frame, der in einem logischen Ring von Teilnehmer zu Teilnehmer weitergeleitet wird. Die Slaves empfangen dieses Telegramm und entnehmen für sie bestimmte Daten, bzw. fügen Daten ein, während sie das Telegramm weiterleiten. Ethercat unterstützt verschiedene physikalische Medien und Topologien. Die Wahl der Topologie

hat dabei Auswirkung auf Nachrichtenlatenz, Jitter und Redundanz sowie die Möglichkeit im laufenden Betrieb Teilnehmer hinzuzufügen oder zu entfernen. Der Ethercat Master kann komplett in Software und auf Standardhardware implementiert werden. Da die Ethercat-Slaves die Telegramme während des Durchlaufs bearbeiten, können hier keine Standard-Ethernetcontroller eingesetzt werden. Hier kommen spezielle ASIC- oder FPGA-Lösungen zum Einsatz. Zur exakten Synchronisierung von Steuerbefehlen setzt Ethercat das *Precision Time Protocol (PTP)* ein. Seit 2005 ist EtherCAT IEC Norm (vgl. Ethercat Technology Group).

3.4 Bandbreiten-basierte Systeme

Bandbreiten-basierte Systeme arbeiten ohne eine Form der Synchronisation. Dabei werden virtuelle Bandbreitenkontingente konfiguriert. Jeder Teilnehmer sendet mit einem solchen Kontingent. In diesem System überwachen die Switches, dass der Busteilnehmer sein Kontingent nicht überschreitet.

3.4.1 Eigenschaften von bandbreiten-basierten Systemen

Da keine Synchronisation stattfindet, ist in Systemen mit Bandbreitenkontingenten die berechnete worst-case Verzögerungszeit und damit auch der Jitter weit höher, als in der Realität zu beobachten. Dies hängt damit zusammen, dass im worst-case alle Teilnehmer zur gleichen Zeit ihre Nachrichten versenden. Um die zur Verfügung stehende Bandbreite zu verteilen, gibt es verschiedene Verfahren. Beim sogenannten Tokenbucket Verfahren werden beispielsweise Tickets an die Busteilnehmer verteilt. Jeder Teilnehmer verbraucht Tickets, wenn er auf den Bus sendet. Die Tickets können auch bis zu einer definierten Menge angespart werden. Dadurch, dass stets nur eine definierte Anzahl an Tickets im Umlauf ist, ist sichergestellt, dass in endlicher Zeit alle Nachrichten zugestellt werden.

3.4.2 Marktübersicht bandbreiten-basierte Systeme

AFDX ist kein Protokoll aus der Automatisierungsbranche, sondern wurde für den Einsatz im Flugzeug entwickelt. AFDX definiert maximale Transferraten für jeden Busteilnehmer und ist damit ein klassisches bandbreitenbasiertes Verfahren. Jeder Teilnehmer sendet in einem vorkonfigurierten Intervall. Dabei überwachen spezielle Switches, dass die Teilnehmer ihr Intervall nicht unterschreiten. Details zu AFDX können der Studienarbeit von Christian Strahl (vgl. Strahl, 2008) entnommen werden.

3.5 Allgemeine Eigenschaften

Neben den technologiespezifischen gibt es auch allgemeine Kriterien, die Einfluss auf Nachrichtenlatenz und Jitter haben. Dies betrifft z.B: die maximale Paketlänge, die Einfluss auf die maximale Dauer der Übertragung hat (siehe Formel 3.1). Dieser Effekt kommt besonders bei asynchron arbeitenden Systemen zur Wirkung, aber auch bei Systemen, die sowohl Echtzeit als auch normalen Datenverkehr zulassen. Um parallel Daten mit harter und weicher Echtzeitanforderung zu übertragen, werden in den meisten Systemen die Echtzeitpakete markiert und in den Switches bevorzugt weitergeleitet. Dennoch wird die Zustellung des Echtzeitpaketes um bis zu einer Nachricht verzögert, sofern das Echtzeitpaket gerade eintrifft, wenn ein nicht priorisiertes Paket gesendet wird. Diese Verzögerung steht in direkter Relation zur maximalen Nachrichtenlänge. Dieses Verzögerungsproblem kann in synchron arbeitenden Systemen umgangen werden, indem explizit Zeitbereiche für die Übertragung von Nichtezeit-Paketen eingeplant werden und diese Pakete vom Switch nur in diesen Zeitschlitzten weitergeleitet werden. Damit kann der Bus jedoch nicht mehr optimal ausgenutzt werden.

$$\text{Nachrichtenlaufzeit} = \text{Latenz} + \frac{\text{Nachrichtenlaenge}}{\text{Datenuebertragungsrate}} \quad (3.1)$$

Kapitel 4

Fazit

In dieser Arbeit wurden die wichtigsten Anforderungen an ein zukunftsfähiges Bussystem im Automobil zusammengestellt. Verschiedene Echtzeit-Ethernet-Technologien wurden vorgestellt und ihre Eigenschaften erarbeitet. Darüber hinaus wurde eine Übersicht über wichtige Produkte und Projekte des Echtzeit-Ethernetbereichs in der Automatisierungsbranche gegeben. Es zeigt sich, dass Ethernet prinzipiell geeignet ist, um Nachrichten zu übertragen, welche harte Echtzeitanforderungen an das Bussystem stellen.

4.1 Ausblick auf weiteres Vorgehen

Um das Ziel eines leistungsfähigen Bussystems für den Einsatz im FAUST-Umfeld zu erreichen, muss im nächsten Schritt der hier erarbeitete Technologieüberblick ausgewertet werden. Danach kann eine Entscheidung zu Gunsten einer oder mehrerer Technologien oder Produkte fallen, welche genauer auf ihre Eignung im Automobilbereich untersucht werden. An dieser Stelle muss zunächst ein detailliertes Fahrzeugmodell erarbeitet werden, welches die Eigenschaften eines typischen Automobils möglichst genau widerspiegelt. Neben einem räumlichen Modell, welches Anforderungen an die Topologie stellt, gehört dazu auch ein genaues Modell der zeitlichen Abhängigkeiten, sowie des Datenaufkommens. Auf Basis dieses Modelles lassen sich die Zeiteigenschaften vorhandener Technologien genau berechnen und simulieren, in dessen Folge eine begründete Entscheidung bezüglich einer Technologie gefällt werden kann. Um diesen Prozess möglichst nah an den Anforderungen der Automobilindustrie durchzuführen, wäre eine Kooperation mit einem Industriepartner erstrebenswert.

Ein langfristiges Ziel ist der Einsatz der Technologie im HAWKS Rennwagen der Saison 2010.

4.2 Risikoabschätzung

Ein Risiko für dieses Projekt besteht darin, dass ein Standard für Ethernet im Automobilbereich verabschiedet wird, und somit die Arbeiten an diesem Thema obsolet werden. Momentan sind jedoch keine Bestrebungen in dieser Richtung absehbar, sodass nicht mit einem solchen Standard zu rechnen ist. Ein weiteres Risiko ist, dass die Anforderungen nicht erfüllt werden können. Speziell im Bereich Hardware kann noch nicht abgeschätzt werden, ob Standard-Ethernetcontroller die Anforderungen an das Zeitverhalten im Automobil erfüllen können. Dies muss zunächst wie in Abschnitt 4.1 geschildert überprüft werden.

Insgesamt kann das Risiko des Projektes als gering eingestuft werden. Die in dieser Arbeit zusammengestellten Technologien lassen eine positive Prognose im Hinblick auf das Projektziel zu.

Anhang A

Realtime Ethernet Systeme aus der Automatisierungsbranche im Vergleich

Die folgende Tabelle basiert auf Hersteller oder Entwicklerangaben und kann daher vor allem im Bereich des Timings nur als Richtwert gesehen werden.

System	Hardware Busteilnehmer	Hardware Switch	min. Zykluszeit	max. Jitter	Zugänglichkeit
Ethernet	standard Controller mit IEEE1588	managed Switch	2-6ms	20µs	offen
Profinet	spezieller Controller (ASIC)	proprietärer Switch	1ms	1µs	proprietär
TTEthernet	optional spezieller Controller	FPGA basierter Switch	k.A.	k.A.	offen
SynqNet	spezieller Controller (FPGA)	Linien/Ring Topologie	<25µs	<1µs	offen
Ethercat	spezieller Controller (FPGA/ASIC)	standard Switch	125-250µs	1µs	offen
RTnet	standard Controller	Switch oder Hub	k.A.	k.A.	offen
Powerlink	optional spezieller Controller	Hub	400µs	1µs	offen
SERCOS III	spezieller Controller (FPGA)	Linien/Ring Topologie	125-250µs	1µs	offen

Tabelle A.1: Überblick über Bussysteme - Angaben laut Hersteller/Entwickler

Glossar

automotive

Automotive ist ein Oberbegriff für Maschinen angetriebene Fahrzeuge..

Jitter

Mit Jitter (deutsch: „Fluktuation“/„Schwankung“) wird in der Nachrichtentechnik die Varianz der Laufzeit von Datenpaketen bezeichnet..

X-by-Wire

X-by-Wire bezeichnet den Ersatz von mechanischen Verbindungen zur Steuerung, durch die Leitung elektrischer, elektronischer, optoelektronischer oder optischer Steuerungssignale vom Bediener zum Aktor..

Abkürzungsverzeichnis

ASR	Antriebsschlupfregelung
COTS	Components of the shelf
ESP	Elektronische Stabilitätsprogramm
LIN	Local Interconnect Network
MOST	Media Oriented System Transport
PTP	Precision Time Protocol
TDMA	Time division multiple access

Literaturverzeichnis

- [Belschner u. a. 2000] BELSCHNER, Ralf ; BERWANGER, Josef ; BRACKLO, Claas ; EBNER, Christian ; HEDENETZ, Bernd ; KUFFNER, Walter ; LOHRMANN, Peter ; MINUTH, Jürgen ; PELLER, Martin ; SCHEDL, Anton ; SEEFRIED, Volker: Anforderungen an ein zukünftiges Bussystem für fehlertolerante Anwendungen aus Sicht Kfz-Hersteller. In: *VDI-Berichte* 1547 (2000), S. 23–41. – ISBN 3-18-091547-1
- [Christoph Hammerschmidt 2007] CHRISTOPH HAMMERSCHMIDT: BMW brings Internet protocol under the hood. In: *EE Times Europe* (2007). – URL <http://www.eetimes.com/showArticle.jhtml?articleID=204300325>. – Zugriffsdatum: 2008-12-10
- [Dohmke 2002] DOHMKE, Thomas: Bussysteme im Automobil: CAN, FlexRay und MOST / Technische Universität Berlin, DaimlerChrysler AG. 2002. – Forschungsbericht
- [Ethercat Technology Group] ETHERCAT TECHNOLOGY GROUP: *Ethercat*. – URL <http://www.ethercat.org>. – Zugriffsdatum: 2008-12-03
- [Felser 2005] FELSER, Max: *Real-Time Ethernet: Standards and PROFINET*. Bd. IFAC Summer School in Prague 2005. International Federation of Automatic Control, 2005
- [Formula Student Germany] FORMULA STUDENT GERMANY: *FSG*. – URL <http://www.formulastudent.de/>. – Zugriffsdatum: 2008-12-10
- [Greifeneder und Frey 2007] GREIFENEDER, Jürgen ; FREY, Georg: Analyse netzbasierter Automatisierungssysteme. In: *VDI-Berichte* 1980 (2007), S. 23–33
- [Grillinger u. a. 2006] GRILLINGER, Petr ; ADEMAJ, Astrit ; STEINHAMMER, Klaus ; KOPETZ, Hermann: Software Implementation of Time-Triggered Ethernet Controller. In: *Workshop on Factory Communication Systems*, 2006, S. 145–150. – ISBN 1-4244-0379-0
- [HAWKS Racing Team] HAWKS RACING TEAM: *Internetseite*. – URL <http://www.hawksracing.de>. – Zugriffsdatum: 2008-12-08

- [Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg] HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN HAMBURG: *FAUST*. – URL <http://www.informatik.haw-hamburg.de/faust.html>. – Zugriffsdatum: 2008-12-10
- [Institute of Electrical and Electronics Engineers 2002] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (Hrsg.): *IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems*. Bd. IEEE Std. 1588. IEEE, 2002. – ISBN 0-7381-3369-8
- [Institute of Electrical and Electronics Engineers 2005] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (Hrsg.): *IEEE 802.3: LAN/MAN CSMA/CD Access Method*. Bd. IEEE 802.3-2005. IEEE, 2005
- [Kiszka und Schwebel 2004] KISZKA, Jan ; SCHWEBEL, Robert: Alternative: RTnet. In: *AD Newsletter* 10 (2004), S. 67–69. – URL <http://www.rts.uni-hannover.de/rtnet/download/ad104705.pdf>. – Zugriffsdatum: 2008-12-10
- [Kiszka und Wagner 2005] KISZKA, Jan ; WAGNER, Bernado: RTnet - a flexible hard real-time networking framework. In: *10th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA 2005)* 1 (2005), S. 456–463. – URL <http://www.rts.uni-hannover.de/rtnet/download/RTnet-ETFA05.pdf>. – Zugriffsdatum: 2008-12-10
- [Leen und Heffernan 2002] LEEN, Gabriel ; HEFFERNAN, Donal: Expanding Automotive Electronic Systems. In: *Computer* 35 (2002), Nr. 1, S. 88–93. – ISSN 0018-9162
- [Navet u. a. 2005] NAVET, Nicolas ; SONG, Yeqiong ; SIMONOT-LION, Françoise ; WILWERT, Cédric: Trends in Automotive Communication Systems. In: *Proceedings of the IEEE* 93 (2005), June, Nr. 6, S. 1204–1223. – ISSN 0018-9219
- [Real-Time Systems Group] REAL-TIME SYSTEMS GROUP: *RTnet*. – URL <http://www.rts.uni-hannover.de/rtnet/>. – Zugriffsdatum: 2008-12-10
- [Real Time Systems Group (RTS)] REAL TIME SYSTEMS GROUP (RTS): *TTEthernet*. – URL <http://ti.tuwien.ac.at/rts>. – Zugriffsdatum: 2008-12-10
- [Rokosch 2002] ROKOSCH, Uwe: *Airbag und Gurtstraffer*. Würzburg : Vogel, 2002. – ISBN 978-3802318832
- [Strahl 2008] STRAHL, Christian: Realtime Ethernet aus Sicht der Flugzeug- und Automobilindustrie / Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg. URL <http://users.informatik.haw-hamburg.de/~ubicomp/projekte/master08-09-aw1/strahl/>, 2008. – Studienarbeit

-
- [SynqNet Interest Group] SYNQNET INTEREST GROUP: *SynqNet*. – URL <http://www.synqnet.org/>. – Zugriffsdatum: 2008-12-10
- [Tan 2007] TAN, Alexander E.: *IEEE 1588 Precision Time Protocol Time Synchronization Performance*. National Semiconductor Corporation , 2007 (AN-1728). – URL <http://www.national.com/an/AN/AN-1728.pdf>. – Zugriffsdatum: 2008-12-10
- [TTTech] TTECH: *TTEthernet*. – URL <http://www.tttech.com/solutions/ttethernet/>. – Zugriffsdatum: 2008-12-10