



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

Ausarbeitung Anwendungen 2 -  
SoSe 2009  
Till Steinbach

`till.steinbach@informatik.haw-hamburg.de`

Time-Triggered Ethernet in Fahrzeugnetzwerken  
Related Work

## Inhaltsverzeichnis

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 Einführung</b>                                     | <b>4</b>  |
| 1.1 Motivation . . . . .                                | 4         |
| 1.2 Problemstellung . . . . .                           | 4         |
| 1.3 Aktueller Stand meiner Arbeit . . . . .             | 5         |
| 1.4 Struktur und Schwerpunkte dieser Arbeit . . . . .   | 6         |
| <b>2 Vorstellung relevanter und verwandter Projekte</b> | <b>6</b>  |
| 2.1 Rückblick AW1 . . . . .                             | 6         |
| 2.2 Kommerzielle Arbeiten und Projekte . . . . .        | 7         |
| 2.3 Wissenschaftliche Arbeiten und Projekte . . . . .   | 8         |
| <b>3 Einordnung der eigenen Arbeit</b>                  | <b>11</b> |
| <b>4 Fazit</b>  | <b>12</b> |
| <b>Literatur</b>  | <b>13</b> |

**Kurzzusammenfassung**

Die Anforderungen an die Kommunikation von Fahrzeugsystemen steigen stetig, neue Ansätze für Kommunikationsnetzwerke in Fahrzeugen sind gewünscht. Diese Netzwerke müssen strikten real-time Anforderungen genügen und gleichzeitig flexible Unterstützung für Datenverkehr mit schwächeren Anforderungen bieten. Ein neuer Ansatz für real-time Kommunikation über Ethernet ist TTEthernet. Die TTEthernet Technologie ist noch jung; eine umfassende Bewertung hat bisher noch nicht stattgefunden. In diesem Dokument werden Arbeiten und Gremien vorgestellt, welche für die TTEthernet-Technologie und ihre Analyse von Relevanz sind.

# 1 Einführung

## 1.1 Motivation

Heutige Fahrzeuge sind komplexe verteilte Echtzeit-Systeme mit hohen Anforderungen an breitbandige Kommunikations-Verbindungen. In solchen Systemen haben die Kommunikationsflüsse zwischen den verteilten Modulen einen signifikanten Einfluss auf die Sicherheit, Zuverlässigkeit und den Komfort des Fahrzeugs. Neue Architekturentwürfe im Automotive-Bereich sehen mehrere verteilte Steuerungseinheiten mit spezifischen Aufgaben vor, welche über ein Backbone-Netzwerk — z.B. sternförmig — miteinander verbunden sind. Ein solches Backbone-Netzwerk muss starker Last gewachsen sein, während es stets einer vorhersagbaren Übertragungsverzögerung unterliegt.

Ein neuer Ansatz für Fahrzeug-Netzwerke ist die Nutzung von Ethernet. Ethernet hat bereits bewiesen, ein flexibles, hoch skalierbares Netzwerkprotokoll zu sein. Dennoch kann Ethernet nicht die erforderliche Vorhersagbarkeit und Zuverlässigkeit in der Paketweiterleitung und dem Medienzugriff garantieren, welche für eine Echtzeit-Kommunikation erforderlich sind. Es gibt — vor allem in der Automatisierungs-Branche — einige Projekte, die diese Hindernisse zu umgehen versuchen.

Ein Fahrzeugnetzwerk ist ein wohldefiniertes, geschlossenes System. Im Allgemeinen werden keine Komponenten spontan hinzugefügt oder entfernt. Damit sind die Voraussetzungen erfüllt, um im Voraus Performance-Werte für das Netzwerk zu errechnen oder zu simulieren. Die Konfiguration des Netzwerks kann auf dieser Basis im Voraus und statisch erfolgen. An dieser Stelle weicht das Fahrzeugnetzwerk von traditionellen lokalen (LAN) oder ausgebreiteten Netzwerken (WAN) ab. Eine Anpassung an variierende Topologien ist nicht erforderlich.

Neben hoher Bandbreite bietet Ethernet die freie Wahl des Transportmediums. Neben der am weitesten verbreiteten Form über Kupferkabel, kann z.B. auch über Lichtwellenleiter wie in IEEE 802.3 (vgl. [IEEE Computer Society, 2005](#)) übertragen werden. Ethernetcontroller sind bereits weit verbreitet und die Preise profitieren von hohen Absatzzahlen. Zudem gibt es eine breite Entwicklergemeinschaft und ein großes Spektrum an Entwicklungstools aus dem Ethernetbereich, welche die Entwicklung beschleunigen und Kosten reduzieren können.

Es gibt keine Standard-Spezifikation für ein Time-Triggered Ethernet. Im Zentrum meiner Arbeit steht die TTEthernet-Spezifikation der Firma TTTech (vgl. [Steiner, 2008](#)) aus Wien.

## 1.2 Problemstellung

Bisher sind keine Arbeiten veröffentlicht, die eine Realisierbarkeit des Fahrzeug-Netzwerkes mit Echtzeit-Ethernet oder spezieller mit Time-Triggered Ethernet zeigt. Zudem gibt es keine

Erfahrungen mit der Konsolidierung verschiedener Bussysteme mit unterschiedlichen Anforderungen an die Zuverlässigkeit und das Zeitverhalten im Auto. Um den Erfolg einer testweisen Umsetzung in einem realen Fahrzeug sicherzustellen, ist die vorherige Analyse und Simulation eines Echtzeit-Ethernet basierten Fahrzeugnetzes unumgänglich.

Darüber hinaus bietet die Umsetzung in einem leistungsfähigen Simulationswerkzeug die Möglichkeit, bereits in einem frühen Stadium Fahrzeug-spezifische Anwendungen zu testen. Dies begünstigt eine rasche Umsetzung in einen realen Prototyp vor allem in einem Umfeld, in dem die reale Hardware erst sehr spät zur Verfügung steht. Für die Umsetzung z.B. im Rahmen des HAWKS-Projektes (vgl. [HAWKS Racing Team](#)) sind dies entscheidende Faktoren, um die Akzeptanz der Technologie zu fördern.

Weiterhin bietet sich eine Simulationsumgebung für die aktive Arbeit am Protokoll an. Leistungsunterschiede können dort einfach und objektiv für verschiedene Echtzeit-relevante Metriken getestet, aufgezeichnet und verglichen werden, ohne die Hardware zu manipulieren. Auch große Netzwerke lassen sich ohne den hohen finanziellen Aufwand, den ein umfangreicher Testaufbau verursacht, berücksichtigen.

### 1.3 Aktueller Stand meiner Arbeit

Im Fokus meiner Arbeit steht die Bewertung von Time-Triggered Ethernet für die Verwendung in Fahrzeugnetzwerken. Derzeit stehen wir im Kontakt mit der Herstellerfirma TTTech. In Kürze steht an der HAW ein Evaluierungssystem von TTEthernet zur Verfügung, welches im Rahmen einer Bachelorarbeit in Betrieb genommen werden soll.

Im Rahmen des Projektes wurde in einem ersten Schritt TTEthernet mit FlexRay verglichen. FlexRay ist die kommende Technologie für Fahrzeugnetzwerke und wird bereits in einigen Serienfahrzeugen eingesetzt.

Für die Analyse wurde auf Basis der TTEthernet-Spezifikation in einem mathematischen Modell bewiesen, dass sich der Datenverkehr einer voll ausgelasteten FlexRay Konfiguration komplett in TTEthernet einbetten lässt. Darüber hinaus wurden TTEthernet und FlexRay mit Bezug auf weitere echtzeitrelevante Metriken verglichen.

Die Ergebnisse dieser Analyse wurden als Beitrag (vgl. [Steinbach u. a., 2009](#)) für den 5. Workshop des GI/ITG-Fachausschusses „Messung, Modellierung und Bewertung von Rechensystemen“ (vgl. [GI/ITG-Fachausschuss MMB, 2009](#)) eingereicht.

## 1.4 Struktur und Schwerpunkte dieser Arbeit

Im folgenden Kapitel 2 werden, nach einem kurzen Rückblick auf die Ergebnisse aus AW1, Arbeiten und Gremien vorgestellt, welche für die TTEthernet-Technologie und die Analyse und Evaluierungsarbeit von Relevanz sind. Die Gesamtheit der hier vorgestellten Arbeiten erhebt nicht den Anspruch, vollständig zu sein. Im Fokus stehen die Arbeiten und Gruppen, welche für meine Arbeit von Nutzen sind oder einen Einfluss auf sie haben.

Die Aufstellung ist unterteilt in Projekte mit einem eher kommerziellen Hintergrund (Abschnitt 2.2) und Projekte, die aus dem wissenschaftlichen Bereich stammen (Abschnitt 2.3). Das abschließende Kapitel 4 zieht ein Fazit.

## 2 Vorstellung relevanter und verwandter Projekte

### 2.1 Rückblick AW1

In der Arbeit zur AW1 Veranstaltung im Wintersemester 2008/2009 wurde das Automobil als Zielplattform für Entwicklungen im Echtzeit-Ethernet-Bereich vorgestellt und die daraus resultierenden Anforderungen aufgedeckt. Durch Klassifizierung konnte ein Marktüberblick über die derzeit vorhandenen oder in Entwicklung befindlichen Systeme und Technologien gegeben werden. Obgleich die in AW1 vorgestellten Systeme für meine Arbeit von Relevanz sind, möchte ich mich an dieser Stelle auf den Verweis auf die Ausarbeitung beschränken (vgl. [Steinbach, 2008](#)).

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Arbeit der AW1 Veranstaltung war der Vergleich der relevanten Technologien für Echtzeit-Ethernet. Generell gibt es drei Ansätze, um zu verhindern, dass Echtzeit-Nachrichten einen Switch gleichzeitig passieren und damit unvorhergesehene Verzögerungen auslösen.

In *Token-basierten* Systemen wird eine exklusive Ressource, das Token, zwischen den Teilnehmern ausgetauscht. Der Teilnehmer, der im Besitz des Tokens ist, darf Nachrichten versenden. Beispiele hierfür sind IEEE 802.5 Token Ring oder IEEE 802.4 (vgl. [Postel und Reynolds, 1988](#)) Token Bus Netzwerke. Das Hauptproblem von Token-basierten Systemen ist die limitierte Skalierbarkeit, da die Länge des Buszyklus von der Anzahl der sendenden Teilnehmer abhängt. Zudem ist die Erkennung und Neuerzeugung eines verlorenen Tokens komplex und zeitintensiv. Dennoch gab es Ansätze Token-basierte Zugriffsmethoden für Echtzeitkommunikation einzusetzen (vgl. [Strosnider u. a., 1988](#); [Jayasumana und Jayasumana, 1989](#); [Yao und Zhao, 1991](#)). EtherCAT als Vertreter der Ethernetprotokolle aus der Automatisierungsbranche setzt eine Token-basierte Zugriffsmethode ein (vgl. [Ethercat Technology Group](#)).

Bandbreiten-limitierende Protokolle wie das Avionics Full-Duplex Switched Ethernet (AFDX) (vgl. [Aeronautical Radio Incorporated, 2002](#)), ein Protokoll, was in neuen Flugzeugen eingesetzt wird, limitiert die nutzbare Bandbreite für jeden Sender. Damit kann sichergestellt werden, dass die Latenz durch Kollisionen im Switch ein oberes Limit besitzt (vgl. [Charara u. a., 2006](#)). Da es jedoch keine globale Synchronisierung gibt, ist die Latenz einer Nachricht zwar begrenzt, aber nicht vorhersagbar.

Überwiegend werden *time-triggered* Protokolle für die echtzeitkritische Kommunikation eingesetzt. Dieser Ansatz ist auch in der Automotivebranche mit Protokollen wie TTCAN (vgl. [International Organization for Standardization, 2004](#)) und FlexRay (vgl. [FlexRay consortium, 2005](#)) verbreitet. Daher wurde auf Basis der Erkenntnisse aus AW1 Time-Triggered Ethernet für die weiteren Untersuchungen gewählt.

## 2.2 Kommerzielle Arbeiten und Projekte

### Time-Triggered Ethernet by TTTech

Im Zentrum der Arbeit steht Time-Triggered Ethernet (TTEthernet) (vgl. [Steiner, 2008](#)), ein Produkt der Firma TTTech (Wien, Österreich), wobei die ersten Ansätze von TTEthernet in der Real-Time Systems Group der TU-Wien am Institut für Technische Informatik entwickelt wurden (vgl. [Kopetz u. a., 2005](#)).

Die Firma TTTech hat mit dem Time-Triggered Protocol und Arbeiten am FlexRay Protokoll bereits Erfahrung mit Kommunikationssystemen für Fahrzeugnetzwerke gesammelt, welche in Time-Triggered Ethernet eingeflossen sind.

Time-Triggered Ethernet (TTEthernet) erlaubt die Übertragung von Daten mit harten Echtzeit-Anforderungen und Daten ohne Anforderungen an die Echtzeit über dasselbe Netzwerk. TTEthernet nutzt dabei normale Ethernet-Frames zur Übertragung. Ein vordefinierter Zeitplan legt fest, zu welchem Zeitpunkt die periodisch wiederkehrenden Nachrichten gesendet werden. Ein Teilnehmer, der das TTEthernet-Protokoll nicht kennt, kann dennoch an der nicht-Echtzeit-Kommunikation teilnehmen, da das Netzwerk auf Standard-Ethernet-Frames basiert. Damit beschränkt sich die Implementierung des Protokolls auf die Module, die Daten mit harten Echtzeitanforderungen versenden müssen.

Das TTEthernet-Protokoll fügt dem Standard-Ethernet ein Zeitschlitz-Verfahren (TDMA) hinzu. Dazu definiert TTEthernet ein Synchronisationsprotokoll, welches eine global gültige Zeit über alle sendenden Teilnehmer herstellt. Ein für jeden Teilnehmer jeweils konfigurierter Zeitplan definiert den Zeitpunkt an dem eine Echtzeit-Nachricht versandt wird.

Derzeit wird die Standardisierung von TTEthernet durch die Society of Automotive Engineers (vgl. [SAE - AS-2D Time Triggered Systems and Architecture Committee, 2009](#)) vorbereitet.

### **Analyse von Echtzeit-Ethernet Technologien**

Eine umfangreiche Analysearbeit zu den führenden Echtzeit-Ethernet Technologien aus dem Bereich der Automatisierungsbranche wurde vom Corporate Research Center der Firma ABB in Schweden durchgeführt (vgl. [Prytz, 2008](#)). Das Forschungszentrum ist spezialisiert auf die Optimierung von Automatisierungsprozessen, Automatisierungsnetzwerke, Mechatronik und Industrieroboter. ABB ist ein global operierender Konzern der Elektrotechnik mit dem Fokus auf Energietechnikprodukte, Automationsprodukte, Prozessautomation und Robotik.

Die Forschungsarbeit vergleicht EtherCAT und PROFINET, zwei führende Produkte der Automatisierungsbranche. Aus dieser Arbeit können vor allem die Analysetechniken zu Echtzeit-relevanten Metriken übernommen werden. Zudem werden viele Größen rechnerisch bewiesen. Dafür wird eine übersichtliche Notation verwendet, welche ich in meiner Arbeit adaptieren werde.

### **Relevante Arbeitsgruppen**

Eine für meine Arbeit wichtige Fachgruppe ist das „Time Triggered Systems and Architecture Committee“ (AS-2D) der Society of Automotive Engineers. Hier wird unter der Kennung AS 6802 die Standardisierung von TTEthernet vorbereitet (vgl. [SAE - AS-2D Time Triggered Systems and Architecture Committee, 2009](#)). Die Society of Automotive Engineers wurde 1905 gegründet, um den Austausch von Wissen voranzutreiben. Heute setzt sie sich in erster Linie dafür ein, Standards in der Automobil-Industrie zu schaffen. Derzeit gibt es noch keinen Zeitplan für den Standardisierungsprozess von TTEthernet. Derzeit recherchiere ich, in welcher Form die Teilnahme am Standardisierungsprozess möglich ist. Das deutsche Gegenstück zur SAE ist die VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik.

## **2.3 Wissenschaftliche Arbeiten und Projekte**

### **Time-Triggered Ethernet by TU Wien**

Die ersten Schritte im Bereich Time-Triggered Ethernet wurden in der Real-Time Systems Research Group der TU Wien gemacht (vgl. [TU Wien - Institut für Technische Informatik](#)). Das in meiner Arbeit eingesetzte TTEthernet ist nicht identisch mit der Arbeit der Arbeitsgruppe, beruht aber im Grundsatz auf denselben Prinzipien (vgl. [Kopetz u. a., 2005](#); [Kopetz, 2008](#)). Des Weiteren arbeitet die Forschungsgruppe mit dem IEEE 1588 Clock Synchronization Protocol (vgl. [Ademaj und Kopetz, 2007a](#)), welches auch in TTEthernet von TTech eingesetzt werden

kann. Eine Referenzimplementierung mit Standardkomponenten wurde von der Forschungsgruppe exemplarisch umgesetzt (vgl. [Steinhammer u. a., 2006](#)). Die Real-Time Systems Research Group beschäftigt sich schon länger mit Fahrzeugnetzen, beispielsweise mit Arbeiten am Time-Triggered Protocol.

### Realtime Switching Technologien

In Standard-Ethernet gibt es hauptsächlich zwei Arten der Weiterleitung bei Switches. *Store-and-forward*-Switches empfangen den kompletten Ethernet-Frame, um zu überprüfen, ob er gültig und komplett ist. Ausschließlich gültige Frames werden anschließend auf Basis der Zieladresse im Frame-Header weitergeleitet. *Cut-through*-Switches warten mit der Weiterleitung nur, bis der Frame-Header mit der Zieladresse empfangen wurde.

Für Echtzeitkommunikation ist eine geringe Verzögerung im Switch erwünscht, da die Latenz zwischen Sender und Empfänger von der Verzögerung in den Switches abhängt. *Store-and-forward*-Switches haben wegen der längeren Zeit die sie benötigen, um den kompletten Frame zu empfangen, eine größere Verzögerung als *cut-through*-Switches. Darüber hinaus hängt bei *Store-and-forward*-Switches die Länge der Verzögerung von der Größe des weiterzuleitenden Ethernet-Frames ab.

Da im Time-Triggered Ethernet die Zeitschlitze für Echtzeitnachrichten vordefiniert sind, kann das Netzwerk nicht von der Erkennung von beschädigten Nachrichten profitieren, die *store-and-forward* Switches bieten. Mit ca.  $10\mu s$  (vgl. [Felser, 2005](#)) bei 100 MBit/s Netzwerken ist die typische Verzögerung selbst bei *cut-through*-Switchen relativ hoch.

An dieser Stelle setzt die Arbeit von Dopatka und Wismüller (vgl. [Dopatka, 2008](#); [Dopatka und Wismüller, 2007](#)) an. Hier wird eine neue Art des Switchings vorgestellt, die von den Autoren Real-Time Crossbar getauft wurde. Bei diesem Ansatz werden, basierend auf einem vordefinierten Zeitplan, Eingangs- und Ausgangsport direkt kurzgeschlossen. Der Zeitplan enthält dabei zu jeder vordefinierten Nachricht ein Zeitfenster für die Nachricht, den Eingangsport und den Ausgangsport. Mit diesem vordefinierten Wissen ist der Switch in der Lage, die eingehenden Signale direkt an den Ausgangsport anzulegen. Zu Zeiten, in denen keine Echtzeit-Nachricht konfiguriert ist, werden alle Ports zu einem normalen *store-and-forward* Switch verbunden, der die Weiterleitung für den nicht-Echtzeit-Datenverkehr übernimmt. [Abbildung 1](#) zeigt die Architektur eines solchen Switches.

Ein solcher Switch hätte eine signifikant niedrigere Verzögerung, vergleichbar mit der Verzögerung, die ein Ethernet-Hub erzeugt, welcher vereinfacht alle Ports auf Signalebene kurzschließt. Dieser Gewinn resultiert daraus, dass der Frame-Header mit der Zieladresse nicht interpretiert werden muss.

Ein Modell für einen solchen Realtime-Crossbar Switch wurde in (vgl. [Dopatka, 2008](#)) gegeben. Eine Umsetzung in Hardware ist derzeit nicht bekannt. Das Modell kann aber in der Simulation aufgegriffen werden.

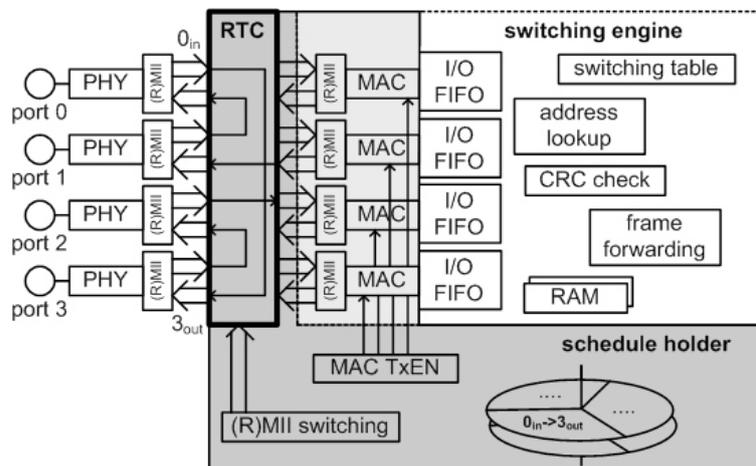


Abbildung 1: Realtime Crossbar Ansatz nach [Dopatka und Wismüller \(2007\)](#)

### Diskrete Eventbasierte Simulation

Eine nah verwandte Arbeit ist das Masterprojekt von Taweewit Pensawat (Halmstad University) (vgl. [Pensawat, 2006](#)). Hier wurde Earliest Deadline First Scheduling, ein anderer Ansatz für Real-Time-Ethernet, exemplarisch mit dem Simulationswerkzeug OMNet++ simuliert. Im Gegensatz zu meiner Arbeit geht es in diesem Projekt weniger um die Bewertung von Echtzeitsystemen. Die Arbeit fokussiert auf die Umsetzung eines Algorithmus in ein zeitdiskretes Simulationsmodell. Als Simulationswerkzeug wurde in dieser Arbeit OMNet++ verwendet.

OMNet++ ist ein Simulations-Framework für diskrete eventbasierte Simulation. Nach Pensawat eignen sich eventbasierte Techniken besonders gut für die Simulation, da die Paketvermittlung hauptsächlich eventbasiert funktioniert. Weiterhin wird für die Simulation OMNet++ empfohlen, da es sowohl gut strukturiert, als auch äußerst performant arbeitet. Mit dem INET Framework für OMNet++ steht nach Pensawat ein umfangreiches Framework für die Arbeit an Ethernet-Netzwerken bereit.

In der Projektarbeit musste der Ethernet Switch erweitert werden, um das Real-Time Protokoll umzusetzen. Da für TTEthernet ebenfalls der Switch des INET-Framework verwendet werden muss, kann diese Arbeit als Machbarkeitsstudie betrachtet werden. Leider gibt die Arbeit keinen Aufschluss über den Aufwand, der bei der Erweiterung zu erwarten ist. Der Sourcecode und die Dokumentation der Erweiterungen ist nicht veröffentlicht.

### Analyse von Echtzeit-Ethernet Technologien

Im Forschungszentrum Jülich werden Systeme zur Kontrolle von Prozessen in physikalischen Experimenten eingesetzt. Die dortigen Systeme arbeiten vorwiegend mit PROFIBUS als Kommunikationsschnittstelle. PROFIBUS ist ein verbreitetes Kommunikationssystem aus dem Automatisierungsbereich. Um zukünftigen Anforderungen gewachsen zu sein, wird in Jülich PROFINET, der Ethernet-basierte Nachfolger von PROFIBUS analysiert. In einer Performance-Analyse wurden hier Echtzeiteigenschaften von PROFINET ermittelt (vgl. [Kleines u. a., 2008](#)). Die Analyse basiert hierbei nicht auf Simulation, sondern auf einem mathematischen und argumentativen Modell.

Auch wenn sich die Ergebnisse so nicht auf Fahrzeugnetzwerke übertragen lassen, können die Analysemethoden adaptiert werden. Die Vergleichsarbeit von TTEthernet und FlexRay (vgl. [Steinbach u. a., 2009](#)) basiert auf einem sehr ähnlichen Ansatz, bei dem das Zeitverhalten mathematisch nachvollzogen wird.

### Relevante Arbeitsgruppen und Konferenzen

Aus dem Wissenschaftlichen Bereich gibt es Arbeitsgruppen mit Verbindung zu meinem Thema im IEEE und ACM. Im IEEE ist die Vehicular Technology Society (vgl. [Institute of Electrical and Electronics Engineers, b](#)) angesiedelt, welche sich mit technischen Themen rund um Fahrzeuge beschäftigt. Der Fokus dieser Arbeitsgruppe liegt jedoch nicht im Bereich der Kommunikationssysteme im Fahrzeug, sondern der Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation.

Die ACM Special Interest Group on Data Communications (SIGCOMM) (vgl. [Association for Computing Machinery](#)) ist das Forum der ACM für die Diskussion zu Themen der Kommunikation und von Computernetzen. Hier werden Themen der Echtzeit-Kommunikation behandelt. Die Arbeiten stehen dabei jedoch nicht im Bezug zu Fahrzeugnetzwerken und ihre Ergebnisse sind daher nur bedingt übertragbar.

Eine wegen ihrer Veröffentlichungen bedeutende Konferenz ist das International IEEE Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication (ISPCS) (vgl. [Institute of Electrical and Electronics Engineers, a](#)). Hier wurden auch Arbeiten der TU Wien zur Uhrensynchronisation in Time-Triggered Ethernet mit dem IEEE 1588 Standard veröffentlicht (vgl. [Ademaj und Kopetz, 2007b](#)).

## 3 Einordnung der eigenen Arbeit

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, gibt es zur Zeit keine Arbeiten, die die Realisierbarkeit von Fahrzeug-Netzwerken mit Echtzeit-Ethernet oder TTEthernet zeigen. Speziell die

Machbarkeit der Konsolidierung von Bussystemen für Echtzeitkommunikation und Komfort-Anwendungen ist Neuland und derzeit noch nicht mit Studien untermauert.

Die ersten Schritte einer solchen Studie sollten auf Analyse und Simulationsebene stattfinden. Durch eine solche Vorarbeit kann im Folgenden der Erfolg bei der Umsetzung in einem realen Projekt, z.B. aus dem FAUST-Umfeld (vgl. [HAW-Hamburg - Department Informatik](#)) sichergestellt werden.

Im Rahmen dieser Analysen möchte ich ein Simulationsmodell erstellen, welches auf den Erfahrungen des Projektes der Universität Halmstad (vgl. Abschnitt 2.3; [Pensawat \(2006\)](#)) beruht, jedoch auf die Besonderheiten von Echtzeitkommunikation im Fahrzeug besonders eingeht.

Das Simulationsmodell soll vor allem an den Stellen die Analyse unterstützen, an denen eine mathematische Herangehensweise wie in unserem eingereichten Paper (vgl. [Steinbach u. a., 2009](#)) zu umfangreich oder komplex wird. Weitere Arbeiten mit dem Fokus auf Anwendungen im Fahrzeug können dieses Modell zukünftig benutzen, um in einem frühen Stadium, ohne den Einsatz von echter Hardware, Eigenschaften des Fahrzeugnetzwerkes einzubeziehen.

## 4 Fazit

In dieser Arbeit wurden die relevanten Projekte und Arbeitsgruppen aus dem Bereich Analyse von Time-Triggered Ethernet vorgestellt. Dabei wird deutlich, dass es Arbeiten zu Analysemethoden und Simulation von Echtzeitnetzwerken gibt und Arbeiten, die eher auf die Technologie von Echtzeit- oder Time-Triggered Ethernet eingehen. Beide Zweige sind für meine Arbeit von Bedeutung. Analysen von Time-Triggered-Ethernet speziell im Einsatz in Fahrzeugnetzwerken gibt es bisher nicht, oder sind nicht veröffentlicht. Allgemein ist die TTEthernet Technologie noch äußerst jung.

Abbildung 2 zeigt, wie die vorgestellten Arbeiten thematisch positioniert sind und wo sich meine Arbeit thematisch einordnet. Die X-Achse beschreibt, wie stark eine Arbeit oder Forschungsgruppe auf den Bereich der Evaluation, die Analyse von Metriken und Simulation eingeht. Die Y-Achse beschreibt, wie nah eine Arbeit an der Time-Triggered Ethernet Technologie positioniert ist.

Die Recherche hat gezeigt, dass es vergleichbare Arbeiten aus anderen technischen Bereichen gibt. Eine Übertragung auf Fahrzeugnetzwerke ist nicht direkt möglich. Damit grenzt sich meine Arbeit von den bisherigen Veröffentlichungen ab. Es hat sich gezeigt, dass der Bedarf für Analysearbeit von Time-Triggered Ethernet im Bereich der Fahrzeugnetzwerke besteht.

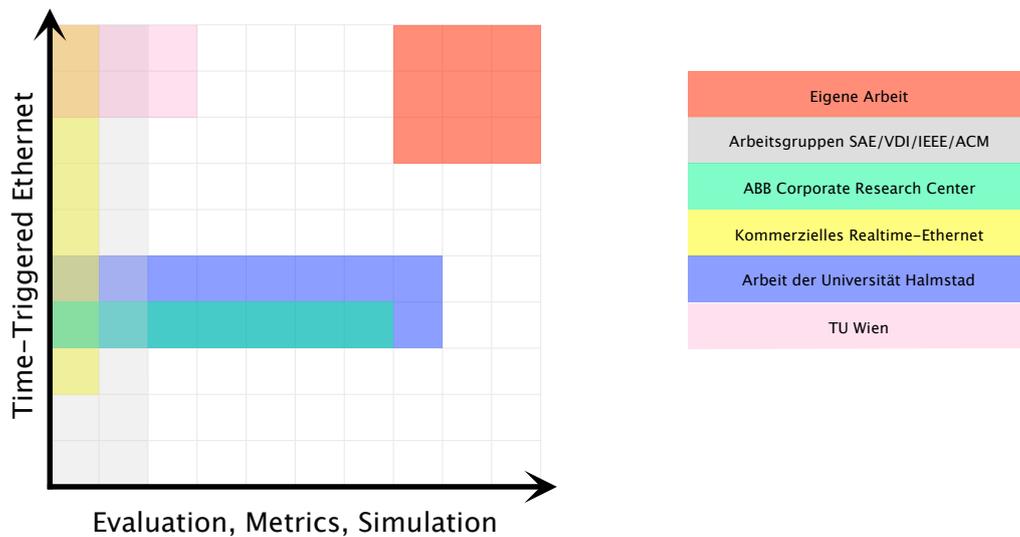


Abbildung 2: Positionierung der vorgestellten Arbeiten, Projekte und Gruppen

## Literatur

- [Ademaj und Kopetz 2007a] ADEMAJ, A. ; KOPETZ, H.: Time-Triggered Ethernet and IEEE 1588 Clock Synchronization. In: *Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication, 2007. ISPCS 2007. IEEE International Symposium on*, Oct 2007, S. 41–43
- [Ademaj und Kopetz 2007b] ADEMAJ, A. ; KOPETZ, H.: Time-Triggered Ethernet and IEEE 1588 Clock Synchronization. In: *Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication, 2007. ISPCS 2007. IEEE International Symposium on*, Oct. 2007, S. 41–43
- [Aeronautical Radio Incorporated 2002] AERONAUTICAL RADIO INCORPORATED: Aircraft Data Network / ARINC. Annapolis, MD, USA, 2002 (664). – Standard
- [Association for Computing Machinery ] ASSOCIATION FOR COMPUTING MACHINERY: *SIGCOMM - Data Communication*. – URL <http://www.sigcomm.org/>. – Zugriffsdatum: 2009-06-20
- [Charara u. a. 2006] CHARARA, Hussein ; SCHARBARG, Jean-Luc ; ERMONT, Jérôme ; FRABOUL, Christian: Methods for bounding end-to-end delays on an AFDX network. In: *Real-Time Systems, 2006. 18th Euromicro Conference on*, 2006. – ISSN 1068-3070

- [Dopatka und Wismüller 2007] DOPATKA, F. ; WISMÜLLER, R.: Design of a Realtime Industrial-Ethernet Network Including Hot-Pluggable Asynchronous Devices. In: *Industrial Electronics, 2007. ISIE 2007. IEEE International Symposium on*, June 2007, S. 1826–1831
- [Dopatka 2008] DOPATKA, Frank: *Ein Framework für echtzeitfähige Ethernet-Netzwerke in der Automatisierungstechnik mit variabler Kompatibilität zu Standard-Ethernet*. Siegen, Germany, Universität Siegen, Dissertation, Sep 2008
- [Ethercat Technology Group ] ETHERCAT TECHNOLOGY GROUP: *Ethercat*. – URL <http://www.ethercat.org>. – Zugriffsdatum: 2009-06-20
- [Felser 2005] FELSER, Max: Ethernet-Switches für Motion-Control. In: *Automate.now! Jahrbuch der Automatisierungstechnik* (2005), S. 2–5
- [FlexRay consortium 2005] FLEXRAY CONSORTIUM: Protocol Specification. Stuttgart, Germany, Dec 2005 (2.1). – Specification
- [GI/ITG-Fachausschuss MMB 2009] GI/ITG-FACHAUSSCHUSS MMB: *5. Workshop zum Thema Leistungs-, Zuverlässigkeits- und Verlässlichkeitsbewertung von Kommunikationsnetzen und verteilten Systemen*. 2009. – URL <http://www.informatik.uni-hamburg.de/TKRN/MMBnet/MMBnet09index.html>. – Zugriffsdatum: 2009-06-20
- [HAW-Hamburg - Department Informatik ] HAW-HAMBURG - DEPARTMENT INFORMATIK: *FAUST Fahrerassistenz- und Autonome Systeme*. – URL <http://www.informatik.haw-hamburg.de/faust.html>. – Zugriffsdatum: 2009-06-20
- [HAWKS Racing Team ] HAWKS RACING TEAM: *Internetseite*. – URL <http://www.hawksracing.de>. – Zugriffsdatum: 2009-06-20
- [IEEE Computer Society 2005] IEEE COMPUTER SOCIETY: IEEE Std 802.3-2005 / IEEE. New York, NY, USA, Dec 2005. – Standard. – URL <http://ieee802.org/3/>. – Zugriffsdatum: 2009-06-20
- [Institute of Electrical and Electronics Engineers a] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS: *International IEEE Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication*. – URL <http://www.ispcs.org>. – Zugriffsdatum: 2009-06-20
- [Institute of Electrical and Electronics Engineers b] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS: *Vehicular Technology Society*. – URL <http://www.vtsociety.org/>. – Zugriffsdatum: 2009-06-20
- [International Organization for Standardization 2004] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: Road vehicles - Controller area network (CAN) - Part 4: Time-triggered communication / ISO. Geneva, Switzerland, 2004 (11898-4:2004). – ISO

- [Jayasumana und Jayasumana 1989] JAYASUMANA, A.P. ; JAYASUMANA, G.G.: On the use of the IEEE 802.4 token bus in distributed real-time control systems. In: *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 36 (1989), Aug, Nr. 3, S. 391–397. – ISSN 0278-0046
- [Kleines u. a. 2008] KLEINES, H. ; DETERT, S. ; DROCHNER, M. ; SUXDORF, F.: Performance Aspects of PROFINET IO. In: *Nuclear Science, IEEE Transactions on* 55 (2008), Feb., Nr. 1, S. 290–294. – ISSN 0018-9499
- [Kopetz 2008] KOPETZ, H.: The Rationale for Time-Triggered Ethernet. In: *Real-Time Systems Symposium, 2008*, Dec 2008, S. 3–11. – ISSN 1052-8725
- [Kopetz u. a. 2005] KOPETZ, H. ; ADEMAJ, A. ; GRILLINGER, P. ; STEINHAMMER, K.: The time-triggered Ethernet (TTE) design. In: *Object-Oriented Real-Time Distributed Computing, 2005. ISORC 2005. Eighth IEEE International Symposium on*, May 2005, S. 22–33
- [Pensawat 2006] PENSAWAT, Taweewit: Real-Time Ethernet Networks Simulation Model / Halmstad University. Halmstad, Sweden, Dec 2006. – Masterprojekt
- [Postel und Reynolds 1988] POSTEL, J. ; REYNOLDS, J.K.: Standard for the transmission of IP datagrams over IEEE 802 networks / IETF. Februar 1988 (1042). – RFC
- [Prytz 2008] PRYTZ, G.: A performance analysis of EtherCAT and PROFINET IRT. In: *Emerging Technologies and Factory Automation, 2008. ETFA 2008. IEEE International Conference on*, Sept. 2008, S. 408–415
- [SAE - AS-2D Time Triggered Systems and Architecture Committee 2009] SAE - AS-2D TIME TRIGGERED SYSTEMS AND ARCHITECTURE COMMITTEE: *Time-Triggered Ethernet (AS 6802)*. 2009. – URL <http://www.sae.org>. – Zugriffsdatum: 2009-06-20
- [Steinbach 2008] STEINBACH, Till: *Ethernet als Bus für Echtzeitanwendungen im Automobil*. Dec 2008. – URL <http://papers.till-steinbach.de/s-ebca-08a.pdf>. – Zugriffsdatum: 2009-06-20
- [Steinbach u. a. 2009] STEINBACH, Till ; KORF, Franz ; SCHMIDT, Thomas: *Comparing Time-Triggered Ethernet with FlexRay: An Evaluation of Competing Approaches to Real-time for In-Vehicle Networks*. May 2009. – Unveröffentlicht
- [Steiner 2008] STEINER, Wilfried: *TTEthernet Specification*. TTTech Computertechnik AG. Nov 2008. – URL <http://www.tttech.com>. – Zugriffsdatum: 2009-06-20
- [Steinhammer u. a. 2006] STEINHAMMER, Klaus ; GRILLINGER, Petr ; ADEMAJ, Astrit ; KOPETZ, Hermann: A time-triggered ethernet (TTE) switch. In: *DATE '06: Proceedings of the conference on Design, automation and test in Europe*. 3001 Leuven, Belgium, Belgium : European Design and Automation Association, 2006, S. 794–799. – ISBN 3-9810801-0-6

- 
- [Strosnider u. a. 1988] STROSNIDER, J.K. ; MARCHOK, T. ; LEHOCZKY, J.: Advanced real-time scheduling using the IEEE 802.5 token ring. In: *Real-Time Systems Symposium, 1988., Proceedings.*, Dec 1988, S. 42–52
- [TU Wien - Institut für Technische Informatik ] TU WIEN - INSTITUT FÜR TECHNISCHE INFORMATIK: *Real-Time Systems Group.* – URL <http://www.vmars.tuwien.ac.at>. – Zugriffsdatum: 2009-06-20
- [Yao und Zhao 1991] YAO, L. ; ZHAO, W.: Performance of an extended IEEE 802.5 protocol in hard real-time systems. In: *INFOCOM '91. Proceedings. Tenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Networking in the 90s.*, IEEE, Apr 1991, S. 469–478