



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

# Thesis Outline

Jonas Engler

**Worst Case Timing Analyse für TSN im Automotive-Kontext**

*Fakultät Technik und Informatik  
Studiendepartment Informatik*

*Faculty of Engineering and Computer Science  
Department of Computer Science*

Jonas Engler

**Worst Case Timing Analyse für TSN im Automotive-Kontext**

Thesis Outline eingereicht im Rahmen der Master-Seminar-Prüfung

im Studiengang Master Informatik  
am Department Informatik  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr. von Luck  
Zweitgutachter: Prof. Dr. Buth

Eingereicht am: 28. Februar 2015

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung . . . . .	1
	1.1 Motivation . . . . .	1
	1.2 Ziel . . . . .	1
2	Netzwerk-Grundlagen . . . . .	2
	2.1 AVB . . . . .	2
	2.2 TTE . . . . .	3
	2.3 TSN . . . . .	4
3	Analyse . . . . .	4
	3.1 Ethernet-Protokolle . . . . .	5
	3.2 Network-Calculus . . . . .	5
	3.3 Scheduling-Transformation . . . . .	7
	3.4 Analyse-Erweiterungen . . . . .	7
4	Fahrzeug-Modell . . . . .	8
5	Vorgehen und Abschluss . . . . .	8
	5.1 Arbeitsschritte . . . . .	8
	5.2 Risiken . . . . .	9
	5.3 Zusammenfassung . . . . .	10

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Technische Neuerungen im Automotive-Bereich lassen sich zu großen Teilen in den Bereich „Infotainment“ kategorisieren. Dazu gehören umfassende mediale Angebote gleichermaßen wie sicherheitsrelevante Informations-Konzepte. Um die Vielzahl der daraus resultierenden Daten-Streams innerhalb der Fahrzeug-Infrastruktur effizient zu verarbeiten, werden steigende Kapazitäts-Anforderungen an die verwendeten Netzwerke gestellt. Die derzeitige Verarbeitung von Daten, die weiterhin mit Feldbus-Systemen (CAN, LIN, MOST, FlexRay) stattfindet, stoßen inzwischen bezüglich ihrer Bandbreiten und Synchronisations-Mechanismen an Grenzen, die umfassende Medien-Übertragungen erschweren.

Um diesen Problemen entgegen zu wirken, muss mittel- bis langfristig eine verbesserte oder erneuerte Fahrzeug-Infrastruktur geschaffen werden. Nach dem Vorbild von AFDX (Avionics Full Duplex Switched Ethernet), das bereits Anwendung in Flugzeugen findet, bietet sich Ethernet an, die oben genannten Anforderungen zu erfüllen. Als auf Medien-Übertragungen spezialisiertes Ethernet-Protokoll ist AVB (Audio/Video Bridging) [1] ein praktikabler Kandidat für die Verwendung im Automotive-Bereich. Es baut auf dem „Legacy-Ethernet“ genannten IEEE Standard 802.1Q [2] auf, der Prioritäten an den Ausgangs-Queues definiert und damit eine Rangfolge der verwendeten Pakete ermöglicht.

In der gegenwärtigen Fassung hat AVB Probleme in Bezug auf QoS (Quality of Service). Diese Probleme fußen auf der grundsätzlichen Funktionsweise von Ethernet, die keine Präemption oder Fragmentierung von Paketen ermöglicht. Da für sicherheitsrelevante Pakete eine garantiert schnelle Übertragung zwingend notwendig ist, muss eine Erweiterung des AVB-Protokolls diese Schwachstelle beseitigen. Zu diesem Zweck wird AVB in der 2. Generation den Namen TSN (Time Sensitive Networking [3]) tragen und mit einem TDMA (Time Division Multiple Access)-Ansatz die Möglichkeit für niedrig-latente Übertragungen bieten. Eingehend auf die Latenz-Beeinflussungen durch TDMA-Pakete zeigt diese Arbeit den Weg auf, der zu einer Analyse und Evaluierung von TSN unter einem Automotive-Modell führen wird.

## 1.2 Ziel

Um dem Umstand Rechnung zu tragen, dass zur Evaluierung einer Netzwerkkonfiguration jedes mögliche Szenario im laufenden Betrieb des Netzwerks in Betracht gezogen werden muss, ist eine eingehende Analyse der zeitkritischen Netzwerkübertragungen notwendig. Für eine bestehende Fahrzeug-Topologie gilt es, eine Konfiguration zu finden, die alle Kommunikationsanforderungen erfüllt. Kontrollsignale und Mediensignale aller Art sollten in Echtzeit übertragen werden können. Die Zielsetzung besteht darin, unkritische Entertainmentsignale wie beispielsweise Filme oder Audio-Dateien möglichst ohne Verzögerung, die in „Rucklern“ resultieren können, zu versenden. Gleichzeitig ist eine Verzögerung bei kritischen Komponenten, wie beispielsweise der Rückfahrkamera, zu einem Wert zu minimieren, der unfallfreie Park-Manöver erlaubt.

Der Hauptteil der Masterarbeit wird sich zu diesem Zweck mit einem Zyklus beschäftigen, der die folgenden Schritte beinhaltet:

1. Modifikation
2. Analyse
3. Identifikation

Das verwendete Fahrzeug-Modell wird einleitend modifiziert, anschließend in einer Analyse die einzelnen Verbindungen untersucht und abschließend die Schwachpunkte des Aufbaus identifiziert. Mit bekannten Schwachpunkten lässt sich dann eine neue Modifikations-Strategie entwickeln. Am Ende soll ein Fahrzeug-Modell stehen, dessen Ende-zu-Ende-Latenzen bekannt sind und dessen Tauglichkeit für die vorgesehenen Anforderungen durch mathematische Analyse sowie Simulation evaluiert wurden.

## 2 Netzwerk-Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der relevanten Netzwerk-Protokolle behandelt. Alle Protokolle laufen über Ethernet, weisen allerdings Unterschiede in Bezug auf die Hardware der Switches und das Scheduling auf.

### 2.1 AVB

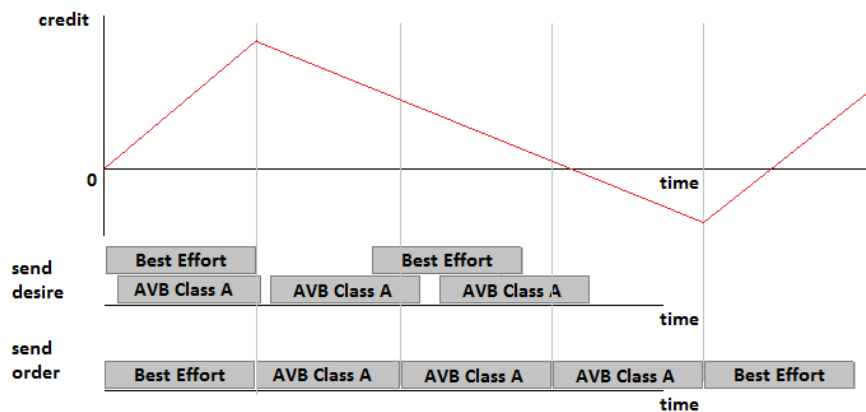


Abbildung 1: Typischer AVB-Sendeablauf

Audio/Video Bridging [1] ist ein Protokoll, das ursprünglich für die Bündelung und Digitalisierung von Audio- und Video-Signalen ausgelegt wurde und setzt sich aus eigenen Standards [4–7] zusammen. Da historisch viele Medien-Signale auf eigens dafür vorgesehenen Leitungen übertragen werden, soll AVB eine Möglichkeit bieten, multiple Signale über Ethernet

zu bündeln und damit den Verkabelungsaufwand zu verringern. Da durch die aktuelle Entwicklung des Automotive-Bereichs der Einsatz von Ethernet als Kommunikations-Backbone im Fahrzeug immer näher rückt, ist speziell für die Medien-Signale des Infotainments-Bereich eine Übertragung per AVB günstig, da die Dynamik des Protokolls für gute Ergebnisse sorgt. Auch als Kandidat für zeitkritische Übertragungen bietet sich AVB an, hat allerdings durch Worst-Case-Latenzen Probleme, umfassende Latenz-Garantien geben zu können. Die Gründe und Gegenstrategien dieser Worst-Case-Latenzen werden in den beiden Abschnitten 2.2 und 2.3 aufgezeigt und bilden in der Masterarbeit einen zentralen Punkt. Nachfolgend wird die Funktionsweise von AVB erläutert.

Unter AVB wird das Scheduling in den Ausgangs-Queues erweitert. Zusätzlich zu der Implementierung des IEEE Standard 802.1Q [2] – der für ein Prioritäts-System der Pakete sorgt – existiert der sogenannte „Credit Based Shaper“, der je nach Kreditpunkten der Netzwerk-Klasse des versendenden Pakets festlegt, ob es gesendet werden darf oder auf andere Pakete warten muss. Dieser Kredit sorgt dafür, dass kombiniert höchstens 75% der Gesamtbandbreite von den AVB-spezifischen Netzwerk-Klassen *AVB Class A* und *AVB Class B* verwendet wird. In Abb. 1 wird eine beispielhafte Versendung unter AVB anhand der Kreditpunkte für AVB Class A gezeigt. Grundsätzlich hat jedes Ethernet-Protokoll Probleme mit blockierenden Paketen (Best-Effort-Pakete), die für eine Verzögerung von bis zu einem Maximal-Ethernet-Frame führen. Unter AVB kann diese Verzögerung noch weiter steigen, wenn durch eine Aufstauung von anderen Paketen der Kredit so weit fällt, dass ein Paket zusätzlich darauf warten muss, bis dieser Kredit wieder einen Wert von mindestens 0 aufweisen kann.

Ein großer Vorteil von AVB ist die Dynamik des Protokolls. Es ist im laufenden Betrieb möglich, (Medien-)Streams an- oder abzumelden. Dadurch ist kein festgelegtes Offline-Scheduling im Voraus nötig, um ein Netzwerk zu betreiben. Der nachfolgende Abschnitt beleuchtet ein Protokoll, das die Latenz-Probleme minimiert und speziell auf zeitkritische Übertragungen ausgerichtet ist, dabei aber nicht die gleiche Dynamik wie AVB vorzuweisen hat.

## 2.2 TTE

TTE steht für Time Triggered Ethernet [8] und beschreibt einen TDMA-Ansatz unter Ethernet. Die Funktionsweise wird nachfolgend grob beschrieben.

TTE ist in drei Paket-Klassen aufgeteilt, die entscheidende Klasse ist allerdings die der Time-Triggered-(TT)Pakete. Um zeitkritische Übertragungen unter Ethernet ( $< 1ms$ ) zu ermöglichen, werden diesen TT-Paketen feste Sendeslots zugewiesen, in denen keine Sendung der anderen beiden Klassen möglich ist. Ein blockierendes Paket und andere Verzögerungen sind somit nicht möglich und das TT-Paket wird immer sofort übertragen. Auf diese Weise können je nach Anzahl der Bridges und Größe des TT-Pakets die Sende-Latenzen sehr niedrig gehalten werden. Einen Vergleich der Netzwerke AVB und TTE unter der gleichen Automotive-Topologie wurde bereits von Steinbach et al. unter [9] vorgenommen und zeigt, dass AVB Vorteile bezüglich der Medien-Signale aufweist, während TTE Kontrollsignale konstant niedrig überträgt. Eine

Kombination beider Protokolle ist daher der konsequente Schritt zur Optimierung der Ethernet-Infrastruktur im Automotive-Bereich.

## 2.3 TSN

TSN steht für Time Sensitive Networking [3], baut auf dem AVB-Protokoll auf und wurde daher ursprünglich auch „AVB Gen 2“ genannt. Die Ziele dieser Weiterentwicklung sind die Anpassung von AVB an „*industrial [...] (and) automotive needs*“ (vgl. [3]), also eine Ausrichtung auf industrielle Anwendung und den Einsatz im Automotive-Bereich. Das bedeutet, die Worst-Case-Latenzen des Protokolls drastisch zu reduzieren, aber weiterhin Medien-Übertragung bestmöglich zu unterstützen.

Ethernet bietet keinen Mechanismus zur Fragmentierung oder Präemption, was diese beiden gängigen Methoden zur Verzögerungsminimierung vorerst eliminiert. In naher Zukunft sind Ergänzungen am Ethernet-Standard (durchgeführt von der Arbeitsgruppe IEEE 802.3 [10]) geplant, die Fragmentierung und/oder Präemption von Paketen ermöglichen sollen. Um sich nicht auf diese Techniken verlassen zu müssen, wird unter TSN ein TDMA-Mechanismus in AVB integriert. Angelehnt an TTE wird der TAS (Time Aware Shaper) in das Scheduling von TSN eingreifen und dafür sorgen, dass TDMA-Pakete wie unter TTE nicht von anderen Paketen blockiert werden. In Abb. 2 werden die Änderungen des Protokolls gegenüber AVB gezeigt. Um eine Analyse der Funktionsweise und Latenzen von TSN anzufertigen, zeigt diese Arbeit nachfolgend den Weg auf, AVB in seiner jetzigen Form mit TTE zu kombinieren.

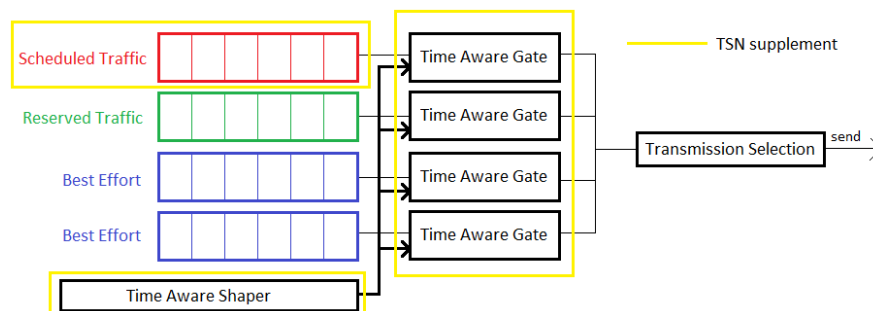


Abbildung 2: Ausgangs-Queues unter TSN

## 3 Analyse

Die oben genannten Protokolle haben jeweils Stärken und Schwächen und sind dementsprechend je nach Konfiguration des Netzwerkes gut für Automotive-Aufgaben gerüstet oder potentiell sicherheitsgefährdend. Um solche Risiken auszuschließen ist eine eingehende Analyse unablässig. Für die Betrachtung von Netzwerk-Konfigurationen sind Simulationen eine gängige Vorgehensweise, um die praktische Tauglichkeit der Konfiguration zu testen. Die

wichtigste getestete Eigenschaft sind die Latenzen der einzelnen Streams, die in der Regel gewisse Anforderungen erfüllen müssen. Eine Simulation hat durch ihre Abbildung aller einflussnehmenden Faktoren der Latenz-Verzögerung eine gute Aussagekraft. Problematisch für Simulationen sind die potentiellen Lücken in der Simulation. So besteht auch nach sehr langer Simulationszeit die Möglichkeit, dass das Worst-Case-Szenario in der Simulation nicht vorgekommen ist.

Um diesem Problem entgegen zu wirken, sind mathematische Analysen nötig, die jedes Szenario mit einschließen und den Worst-Case exakt bestimmen. In dieser Arbeit werden einige theoretische Verfahren beschrieben und beleuchtet, in welcher Weise sie in der Masterarbeit zum Einsatz kommen werden. Im folgenden Abschnitt wird gezeigt, welche Analysen für die begutachteten Ethernet-Protokolle bereits vorhanden sind.

### 3.1 Ethernet-Protokolle

Für Ethernet-Protokolle sind theoretische Abhandlungen zur Netzwerk-Analyse in mehrfachen Ausgaben vorhanden. Die Arbeiten [11–13] beispielsweise decken das Verfahren Network-Calculus (s. 3.2) in Bezug auf AVB, TTE und Automotive-Netzwerke ab. Auch für andere Verfahren [14, 15] existieren Abhandlungen zur theoretischen Netzwerk-Analyse auf AVB und Automotive-Netzwerken, die potentiell interessant für die Verwendung innerhalb der Masterarbeit sind. Eine Auswahl von zwei Verfahren wird hier nachfolgend beschrieben.

### 3.2 Network-Calculus

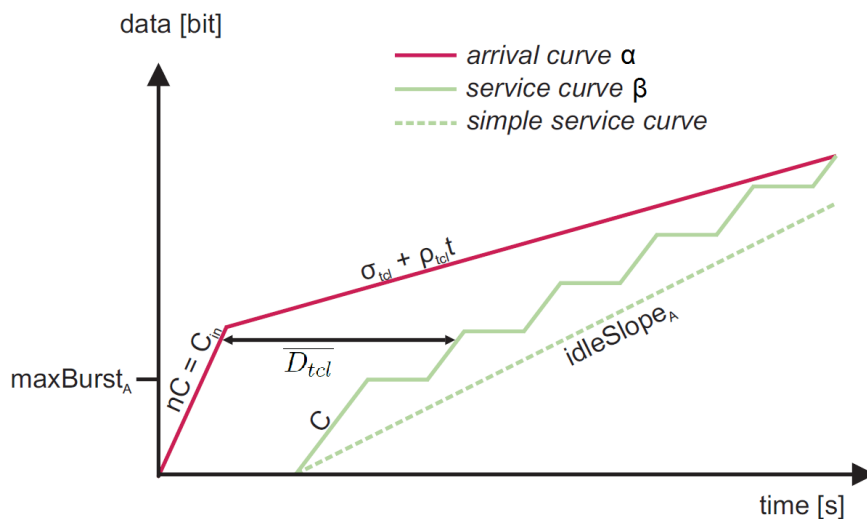


Abbildung 3: Network-Calculus: Arrival- und Service-Curve (urspr. aus [11])



Unter dem Namen Network-Calculus haben Jean-Yves le Boudec und Patrick Thiran [16] eine Analyse mit der Ausrichtung auf Netzwerke entworfen. Zugrunde liegt dem Network-Calculus die Min-Plus-Algebra [17], die einige Operatoren anders interpretiert, als sie in herkömmlicher arithmetischer Algorithmik zum Einsatz kommen.

Der Network-Calculus ist dazu bestimmt, Worst-Case-Verzögerungen (Latenzen) und minimale Queue-Größen zu errechnen. Grundsätzlich lassen sich die Bestandteile des Network-Calculus auf zwei Komponenten reduzieren:

- Arrival Curve  $\alpha$  – der gesamte ankommende Traffic über die Zeit
- Service Curve  $\beta$  – der weiterleitbare Traffic des betr. Streams über die Zeit

Diese beiden Kurven lassen sich grafisch darstellen und werden in Abb. 3 veranschaulicht. Die Analyse per Network-Calculus setzt an einzelnen Komponenten des Netzwerkes, im Falle von Ethernet also Switches und deren Ausgangs-Queues, an und bestimmt die maximale Zeit, um die der betrachtete Stream verzögert wird.

### Worst-Case-Berechnung

Die Berechnung von Worst-Case-Latenzen lässt sich grafisch gesehen an den Eigenschaften der Arrival- und Service-Curve festmachen. Es liegt immer dann eine potentielle Verzögerung des betrachteten Streams vor, wenn die Arrival Curve über der Service Curve liegt, da ankommender Verkehr eventuell noch nicht verarbeitet wurde. Diese Analyse bildet gezielt den Worst-Case ab, es ist also auch möglich, dass der betrachtete Stream in realen Situationen keine Verzögerung hinnehmen muss. Für den Worst-Case wird in Abb. 3 mit  $\overline{D}_{tcl}$  der maximale horizontale Abstand zwischen der Arrival- und Service-Curve gezeigt, der voraussetzt, dass die Service Curve unter der Arrival Curve liegt. Er lässt sich folgendermaßen berechnen:

$$\overline{D}_{tcl} = (T_{tcl} - \tau_{tcl}) + \frac{\sigma_{tcl} + \rho_{tcl} \tau_{tcl}}{R_{tcl}}$$

$$\tau_{tcl} = \frac{\sigma_{tcl}}{C_{in} - \rho_{tcl}}$$

Die einzelnen Komponenten dieser Formel haben folgende Bedeutung:

- $tcl$  ist eine Traffic-Class, beispielsweise AVB Class A
- $\overline{D}_{tcl}[s]$  – Der gesamte Delay des Streams auf dem Switch
- $T_{tcl}[s]$  – Der maximale zu erwartende Delay einer Traffic-Class  $tcl$
- $\sigma_{tcl}[\text{bits}]$  – Der initiale Burst vor der Versendung des Streams
- $\rho_{tcl}[\text{bit/s}]$  – Die Bandbreite des betrachteten Streams
- $C_{in}[\text{bit/s}]$  – Die Summe der Bandbreiten der Input-Ports
- $R_{tcl}[\text{bit/s}]$  – Die „Instantaneous Rate“
- $\tau_{tcl}[s]$  – Die Zeitspanne des initialen Bursts

### 3.3 Scheduling-Transformation

Basierend auf den Arbeiten von Diemer et al. [14,18] existiert eine Lösung zur Netzwerkanalyse mithilfe eines Scheduling-Verfahrens. Zur Anwendung kommt die Compositional Performance Analysis (CPA), die ursprünglich auf die Analyse von Schedulings ausgelegt ist. Für die Betrachtung eines AVB-Netzwerks muss eine Transformation der einzelnen Komponenten stattfinden.

Ethernet	Abbildung CPA
Transfer Time	Core Execution Time
Arrival of Frame	Activation of Task
Traffic Stream over several hops	Chain of Tasks mapped to a series of resources

Tabelle 1: Abbildungen von Ethernet auf CPA

In Tabelle 1 werden die Abbildungen der Netzwerk-Komponenten auf ihren Gegenpart in einem Scheduling gezeigt. Um die Ende-zu-Ende-Latenz einer Übertragung zu erhalten, muss die Chain of Tasks betrachtet werden. Das CPA-Modell muss für den Einsatz unter AVB noch erweitert werden, um dem Kredit-System unter AVB Rechnung zu tragen. Dafür wird die Busy-Time einer Ressource anders definiert. Diese enthält maximale und minimale Zeiten, die eine Task (= ein AVB-Paket) warten muss, bis er eine Ressource nutzen darf (= die Zeitspanne, die das Paket durch andere Pakete verzögert wird). Durch die Anpassung wird eine Ressource auch dann als „besetzt“ angesehen, wenn der AVB-Kredit nicht hoch genug ist.

#### Worst-Case-Berechnung

Der Worst-Case einer Chain of Tasks wird unter CPA mit einer Busy-Window-Analyse durchgeführt. Diese berechnet die Zeit, die an der Ressource für die Abarbeitung einer Task nötig ist. Um den Worst-Case zu erhalten, wird ein Szenario entwickelt, das alle anderen Tasks an dieser Ressource so ungünstig wie möglich anordnet. Die gesamte Ende-zu-Ende-Latenz entspricht dann der Konkatenation der Werte über alle Ressourcen (= über den gesamten Weg des Traffic-Streams).

### 3.4 Analyse-Erweiterungen

Die beiden vorgestellten Analyse-Verfahren sind derzeit nicht auf die Verwendung unter TSN ausgelegt. Um dies zu bewerkstelligen, werden die AVB-Ansätze um ein TDMA-Paket erweitert, das folgende Eigenschaften besitzt:

1. Höchste Priorität im Netz
2. Sende-Zeitslots sind unantastbar
3. Auftreten ist festgelegt

Die Punkte 1 und 2 sorgen dafür, dass im Worst-Case AVB-Pakete auf eine gesamte Paket-Klasse warten müssen. Punkt 3 bewirkt, dass von TDMA-Paketen kein zusätzlicher Burst ausgehen kann. Ein TDMA-Paket kann daher nicht aufgestaut werden und wird statisch in die Worst-Case-Analyse einfließen.

## 4 Fahrzeug-Modell

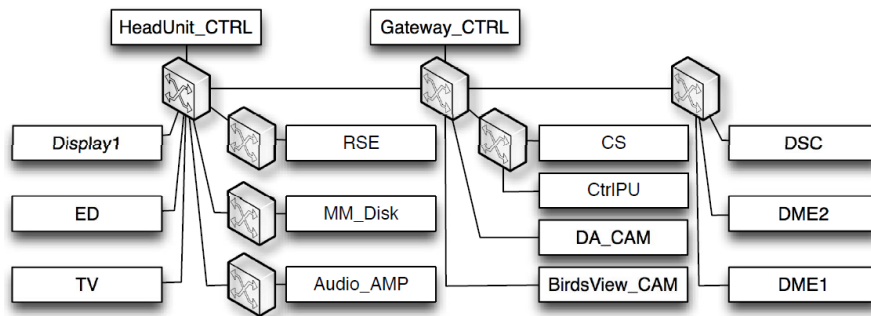


Abbildung 4: Fahrzeug-Modell Netzwerk [9]

Als Referenz-Modell wird das Fahrzeug-Modell benutzt, das bereits von Steinbach et al. [9] und Lim et al. [19] zur Simulation verwendet wurde. In Abb. 4 werden die Netzwerkkomponenten des Modells gezeigt. Für die Analyse und Simulation in der Masterarbeit wird das Modell in unterschiedlichen Versionen konfiguriert:

1. TTE-Verkehr
2. AVB-Verkehr
3. Kombiniertes AVB-/TTE-Verkehr

Für die jeweiligen Analysen per Network-Calculus oder Scheduling-Transformation werden also alle drei Modelle betrachtet um einen Vergleich der Konfigurationen zu ermöglichen.

Um den berechneten Wert aus der Analyse zu bestätigen, werden die Simulations-Modelle auf gleiche Weise konfiguriert und anschließend einen relativ langen Zeitraum simuliert (> 1 Sekunde). Dies soll als Evaluierung der angestellten Analyse dienen.

## 5 Vorgehen und Abschluss

### 5.1 Arbeitsschritte

Für die Masterarbeit fallen Teilaufgaben an, die sich in Arbeitspakete aufgeteilt in Projekt 1, Projekt 2 und der Masterarbeit selbst gliedern.

### **Network-Calculus**

Im Projekt 1 wird die Network-Calculus-Analyse durchgeführt. Dafür gibt es folgende Schritte:

1. Anpassung des Fahrzeug-Modells auf AVB
2. Aufstellen der NC-Berechnung
3. Analyse der relevanten Traffic-Streams
4. Anpassung des NC-Modells auf TTE/TSN
5. Anpassung des Fahrzeug-Modells auf TTE/TSN
6. Analyse und Evaluierung des TTE-/TSN-Fahrzeug-Modells

### **Scheduling-Transformation**

Die für Projekt 2 veranschlagte Analyse per Scheduling-Transformation hat den Vorteil, dass die grundsätzliche Fahrzeug-Modell-Anpassung auf TTE und TSN bereits vorhanden ist. Die anvisierten Schritte sind:

1. Aufstellen der ST-Berechnung
2. Analyse relevanter Streams
3. Anpassung des ST-Modells auf TTE/TSN
4. Analyse und Evaluierung des TTE-/TSN-Fahrzeug-Modells

Die Parallelen zu der Network-Calculus-Analyse sind aus Vergleichsgründen so vorgesehen.

### **Evaluiertes Fahrzeug-Modell**

Die Masterarbeit soll ein evaluiertes aussagekräftiges Fahrzeug-Modell liefern, das sicherheitsrelevante zeitkritische Toleranzen einhält. Die Nutzung des Modells als Referenz-Modell ist eine Möglichkeit, da für den Vergleich von verschiedenen Netzwerk-Ansätzen nicht selten eine gemeinsame Basis fehlt. Auf diesem Weg wäre nicht nur eine gemeinsame Topologie sondern auch eine gleiche Konfiguration (je nach Art anderer Netzwerk-Protokolle) möglich.

## **5.2 Risiken**

Während der Ausführung der Arbeitsschritte ergeben sich kleine und große Risiken. Der Abschluss der Entwicklung von TSN wird für 2017 erwartet und formuliert aktuell klar die Vorgehensweise in Richtung eines TDMA-Ansatzes. Da die Masterarbeit sich auf diesen Teil der Veränderung konzentriert, könnte eine Richtungsänderung der TSN Task Group [3], beispielsweise hin zum Fragmentierungs- oder Präemptionsansatz, eine Schmälerung des Wirkungsradius der Analysen zur Folge haben.

Für die Konfiguration des Netzwerkes ergibt sich das Risiko, dass sich TDMA-Pakete zu stark auf AVB-Pakete auswirken und somit beispielsweise eine annehmbare Medien-Übertragung unmöglich machen. Da, zumindest so bisher für TTEthernet vorgesehen, keine Bandbreiten-Benutzung von mehr als 5% für TDMA-Traffic empfohlen wird, ist eine zu starke Auswirkung des TDMA-Traffics unwahrscheinlich. Auch die Änderung des TSN-Standards ist als niedriges Risiko einzustufen.

Hohe Risiken der Arbeit liegen in der Anwendung der Analyse. Bereits die Arbeit, auf der die Network-Calculus-Analyse basiert [11], weist Ergebnisse auf, die sich in der Simulation nur schwer, annähernd oder gar nicht nachvollziehen ließen. Das ist problematisch in Bezug auf die gewünschte Evaluierung der Analysen. Zusätzlich bieten beide Analyse-Verfahren gewisse Stellschrauben zur Modifikation des Modells, eine deutliche Auswirkung auf das Worst-Case-Timing müssen diese Anpassungen allerdings nicht zwangsläufig mitbringen. Somit wäre es möglich, dass der Analyse-Prozess kein verbessertes Modell nach sich zieht.

### 5.3 Zusammenfassung

Die Automotive-Branche unterliegt dem ständigem Wandel und lässt durch den Infotainment-Trend keine Zweifel daran zu, dass sich die Kommunikations-Infrastruktur moderner Fahrzeuge auf mittel- bis langfristige Sicht ändern muss. Für den wahrscheinlichen Fall, dass die Kommunikation in Zukunft auf einen Ethernet-Backbone setzen wird, bietet sich das Netzwerk-Protokoll AVB als aussichtsreicher Kandidat für schnelle Medien-Übertragungen an. Da Latenz-Probleme auch diesem Ethernet-Protokoll Schwierigkeiten bereiten, wird die Weiterentwicklung des Protokolls TDMA-Komponenten enthalten, die zeitkritische Übertragungen für ausgewählte Pakete ermöglichen. Diese Arbeit zeigt den Weg der Masterarbeit, dieses zukünftige Universal-Protokoll für eine festgelegte Netzwerk-Topologie zu analysieren und per Simulation zu evaluieren, damit ein vollständiges Netzwerk-Modell für TSN vorliegt und dieses auch als Referenz-Modell für spätere Analysen verwendet werden kann.

### Fazit

Seit der Einführung der Feldbusse in den 1980er Jahren hat sich der Umfang der zu vernetzenden Endgeräte in Fahrzeugen drastisch gesteigert und ein Ende dieses Trends ist nicht absehbar. War es damals ausreichend, mit relativ geringen Bandbreiten die Kommunikation in den Fahrzeugen zu bewerkstelligen, ist knapp 30 Jahre später – für Kommunikations-Techniken ein erstaunlich langer Zeitraum – das Ende einer Ära in Sicht. Schafften am Anfang des digitale-Medien-Zeitalters noch „aufpolierte“ Feldbusse Abhilfe, so steht nun ein kompletter Technologie-Wechsel bevor. Für die Einführung dieser Technologie wird die hier vorgestellte Masterarbeit ihren Platz in der wissenschaftlichen Diskussion einnehmen und wünschenswerterweise Anreiz zu weiteren Netzwerk-Analysen geben. Ob ein Ethernet-Netzwerk auch in 30 Jahren noch ausreichend für die Kommunikation in Fahrzeugen sein wird, lässt sich heute ähnlich schwer vorhersagen wie damals der aktuelle Niedergang der Feldbusse.

# Literaturverzeichnis

- [1] Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., “*IEEE 802.1 AV Bridging Task Group*.” <http://ieee802.org/1/pages/avbridges.html>. zuletzt abgerufen am 06.05.2013.
- [2] Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., “*IEEE 802.1: 802.1Q - Virtual LANs*.” <http://www.ieee802.org/1/pages/802.1Q.html>. zuletzt abgerufen am 23.12.2014.
- [3] Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., “*IEEE 802.1 Time Sensitive Networking Task Group*.” <http://www.ieee802.org/1/pages/tsn.html>. zuletzt abgerufen am 23.12.2014.
- [4] “IEEE standard for local and metropolitan area networks - virtual bridged local area networks amendment 12: Forwarding and queuing enhancements for time-sensitive streams,” *IEEE Std 802.1Qav-2009 (Amendment to IEEE Std 802.1Q-2005)*, pp. C1–72, 2009.
- [5] “IEEE standard for local and metropolitan area networks—virtual bridged local area networks amendment 14: Stream reservation protocol (srp),” *IEEE Std 802.1Qat-2010 (Revision of IEEE Std 802.1Q-2005)*, pp. 1–119, 2010.
- [6] “IEEE standard for local and metropolitan area networks - timing and synchronization for time-sensitive applications in bridged local area networks,” *IEEE Std 802.1AS-2011*, pp. 1–292, 2011.
- [7] “IEEE standard for local and metropolitan area networks—audio video bridging (avb) systems,” *IEEE Std 802.1BA-2011*, pp. 1–45, 2011.
- [8] TTTech Computertechnik AG, “*TTEthernet: Deterministic Ethernet Network - TTTech*.” <https://www.tttech.com/technologies/ttethernet/>. zuletzt abgerufen am 23.12.2014.
- [9] T. Steinbach, H.-T. Lim, F. Korf, T. Schmidt, D. Herrscher, and A. Wolisz, “Tomorrow’s in-car interconnect? a competitive evaluation of ieee 802.1 avb and time-triggered ethernet (as6802),” in *Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2012 IEEE*, pp. 1–5, 2012.
- [10] Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., “*IEEE 802.3 ETHERNET WORKING GROUP*.” <http://www.ieee802.org/3/>. zuletzt abgerufen am 23.12.2014.

- [11] R. Queck, "Analysis of Ethernet AVB for automotive networks using Network Calculus," in *Vehicular Electronics and Safety (ICVES), 2012 IEEE International Conference on*, pp. 61–67, 2012.
- [12] L. Zhao, H. XIONG, Z. Zheng, and Q. Li, "Improving worst-case latency analysis for rate-constrained traffic in the time-triggered ethernet network," *Communications Letters, IEEE*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2014.
- [13] M. Manderscheid and F. Langer, "Network Calculus for the Validation of Automotive Ethernet In-vehicle Network Configurations," in *Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery (CyberC), 2011 International Conference on*, pp. 206–211, Oct 2011.
- [14] J. Diemer, D. Thiele, and R. Ernst, "Formal worst-case timing analysis of ethernet topologies with strict-priority and avb switching," in *Industrial Embedded Systems (SIES), 2012 7th IEEE International Symposium on*, pp. 1–10, 2012.
- [15] S. Quinton, T. Bone, J. Hennig, M. Neukirchner, M. Negrean, and R. Ernst, "Typical worst case response-time analysis and its use in automotive network design," in *Design Automation Conference (DAC), 2014 51st ACM/EDAC/IEEE*, pp. 1–6, June 2014.
- [16] J.-Y. Le Boudec and P. Thiran, *Network calculus: a theory of deterministic queuing systems for the internet*, vol. 2050. Springer, 2001.
- [17] Wikimedia Foundation, Inc., "Wikipedia - Network Calculus." [http://en.wikipedia.org/wiki/Network\\_calculus#Min-plus\\_algebra](http://en.wikipedia.org/wiki/Network_calculus#Min-plus_algebra). zuletzt abgerufen am 12.01.2014.
- [18] J. Diemer, J. Rox, R. Ernst, F. Chen, K. Kremer, and K. Richter, "Exploring the worst-case timing of ethernet avb for industrial applications," in *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 3182–3187, 2012.
- [19] H.-T. Lim, D. Herrscher, and F. Chaari, "Performance comparison of ieee 802.1q and ieee 802.1 avb in an ethernet-based in-vehicle network," in *Computing Technology and Information Management (ICCM), 2012 8th International Conference on*, vol. 1, pp. 1–6, 2012.