

Simulation und Evaluation von Echtzeit-Ethernet in Fahrzeugnetzen



Till Steinbach

Hochschule für Angewandte Wissenschaften
Hamburg
Berliner Tor 7
20099 Hamburg
Deutschland
till.steinbach@informatik.haw-hamburg.de

Till Steinbach ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW) Hamburg, wo er zuvor Informatik studierte. Anfang 2011 schloss er seine Masterarbeit zur Simu-

lation von Echtzeit-Ethernet basierten Fahrzeugnetzen ab, für die er mit dem Hermann-Appel-Preis in der Kategorie Elektronikentwicklung ausgezeichnet wurde. Er ist Mitgründer der Arbeitsgruppe Communication over Real-time Ethernet (CoRE). Seine Interessen liegen im Bereich der Echtzeitkommunikation und dem Design und der Analyse von neuen Kommunikationstechnologien, Netzwerkprotokollen und Architekturen für Fahrzeugnetze.



Franz Korf

Hochschule für Angewandte Wissenschaften
Hamburg
Berliner Tor 7
20099 Hamburg
Deutschland
korf@informatik.haw-hamburg.de

Prof. Dr.-Ing. Franz Korf leitet die Arbeitsgruppe Communication over Real-time Ethernet (CoRE) an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW) Hamburg. Nach dem Studium der Informatik

an der RWTH Aachen promovierte er in den Gebieten High Level Synthesetechniken und formale Verifikationstechniken bei Prof. Dr. W. Damm. Nach einer 10-jährigen Tätigkeit in der Industrie, wo er unterschiedliche Aufgaben im Bereich der Entwicklung innovativer Server-Architekturen und OEM Entwicklung verantwortete, wechselte er an die HAW Hamburg. Dort liegt sein Schwerpunkt im Bereich eingebetteter Echtzeitsysteme.



Thomas C. Schmidt

Hochschule für Angewandte Wissenschaften
Hamburg
Berliner Tor 7
20099 Hamburg
Deutschland
schmidt@informatik.haw-hamburg.de

Prof. Dr. Thomas C. Schmidt leitet die Arbeitsgruppe Internet Technologies (INET) an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW) Hamburg. Er studierte Mathematik, Physik und Germanistik an

der Freien Universität Berlin, der University of Maryland und der Technischen Universität Berlin. 1993 promovierte er zur Quantendynamik von Vielteilchensystemen bei Prof. Dr. D.H.E. Groß. Seine Forschungsschwerpunkte umfassen derzeit das Internet der nächsten Generation, mobile und multimediale Kommunikation, P2P-Netze sowie Hypermedia-Systeme. Thomas Schmidt beteiligt sich aktiv an der Internet-Standardisierung und ist Co-Chair der SAM Research Group.

Zusammenfassung—Die Zunahme von elektronischen Systemen insbesondere im Fahrerassistenz- und Komfortbereich der Fahrzeuge drängt die etablierten Automotive-Kommunikationstechnologien an die Grenze ihrer Leistungsfähigkeit. Ein neuer Ansatz für die Kommunikation zwischen Steuergeräten ist Ethernet im Automobil. Echtzeiterweiterungen haben den Einsatzbereich von Standard-Switched-Ethernet auf zeitkritische Anwendungen ausgedehnt.

Diese Arbeit stellt eine simulationsbasierte Evaluationsstrategie für Echtzeit-Ethernet-basierte Vermittlungsinfrastrukturen im Fahrzeug vor. Wir führen eine gründliche Analyse des zugrundeliegenden Simulationsmodells durch, welche die Simulationsergebnisse mit Berechnungen eines mathematischen Modells und Messungen auf echter Hardware vergleicht. Sehr präzise Übereinstimmungen belegen die Gültigkeit der Implementierung und der mit ihr ermittelten Kenngrößen.

I. EINFÜHRUNG & MOTIVATION

In einem modernen Kraftfahrzeug wird der Fahrer von einer Vielzahl an Fahrerassistenzsystemen unterstützt. Mit bis zu 70 Steuergeräten in Oberklassemodellen sind heutige Fahrzeuge komplexe verteilte Echtzeitsysteme, deren Kommunikationsflüsse zwischen den verteilten Modulen einen signifikanten Einfluss auf ihre Zuverlässigkeit, die Sicherheit und den Komfort der Insassen haben. Durch die Zunahme von elektronischen Systemen im Automobil sind auch die Anforderungen an leistungsfähige Kommunikationskanäle zwischen den einzelnen Steuergeräten gestiegen. Dieser Anstieg wird sich auch in den kommenden Jahren, insbesondere durch kamerabasierte Assistenzsysteme, unvermindert fortsetzen. Es werden neue Entwürfe benötigt, welche diesen zunehmenden Anforderungen gerecht werden können.

Auch die Heterogenität und Komplexität der Datenübertragung in aktuellen Serienfahrzeugen erfordert die Weiterentwicklung des Fahrzeugnetzwerkes. Je nach Anwendung und Datenbedarf kommen spezialisierte Bussysteme zum Einsatz. Eine Kommunikation zwischen den verschiedenen Technologien wird durch Gateways ermöglicht, welche die Nachrichten zwischen den verschiedenen Systemen übersetzen. Die hieraus entstehende heterogene Struktur macht das Fahrzeugnetzwerk kompliziert und dadurch insbesondere in der Entwicklung teuer. Anzustreben ist eine neue Technologie, die sich weitgehend durchgängig im gesamten Fahrzeug einsetzen lässt. Solch ein neuer Architekturansatz für die Kommunikation im Automotive-Bereich basiert auf einem sogenannten *Backbone-Netzwerk*, einer *intelligenten Vermittlungsinfrastruktur*, welche die verteilten Steuergeräte des Fahrzeugs strukturiert verbindet. Dieser zentrale Fahrzeug-Backbone muss nicht nur starker Last gewachsen sein, sondern dabei auch eine deterministische Nachrichtenübertragung garantieren können.

Die in Computernetzen etablierte *Ethernet-Technologie* bildet zunächst einen Ansatz zur skalierbaren, strukturierten Vernetzung. Der Ethernet-Basisstandard kann jedoch nicht die

für eine Echtzeitkommunikation im Fahrzeug erforderliche Vorhersagbarkeit und Zuverlässigkeit in der Paketweiterleitung und dem Medienzugriff garantieren. Echtzeiterweiterungen von Standard-Ethernet versprechen zuverlässige, isochrone Übertragungseigenschaften und haben im Bereich der Prozessautomatisierung bereits umfangreichen Einsatz in Produktsystemen gefunden. Time-Triggered Ethernet (TTEthernet) [1] ist eine solche Echtzeiterweiterung, welche insbesondere die speziellen Bedürfnisse der Fahrzeugkommunikation adressiert. In TTEthernet werden alle sendenden Echtzeiteilnehmer über ein ausfallgesichertes Protokoll synchronisiert und operieren anschließend nach einem vordefinierten gemeinsamen Zeitplan, der das simultane Senden zweier Echtzeitnachrichten über dieselbe physikalische Verbindung ausschließt. Damit erweitert TTEthernet das Standard-Ethernet-Protokoll um die Fähigkeit, zeitkritische Daten deterministisch zu transportieren.

Vorarbeiten [2] haben gezeigt, dass TTEthernet eine erfolgversprechende Technologie für eine zukünftige intelligente Vermittlungsinfrastruktur in Fahrzeugen ist. Es greift Konzepte aus verschiedenen in Flug- und Fahrzeugen bewährten Protokollen wie *FlexRay*, *TTP* oder *AFDX* auf und integriert diese in einer physikalisch geteilten Infrastruktur.

Diese Arbeit stellt eine simulationsbasierte Evaluierungsstrategie für TTEthernet im Fahrzeug vor. Relevante Metriken werden identifiziert, an ausgewählten Fahrzeugszenarien evaluiert und sorgfältig verifiziert. Als Ergebnis dieses Prozesses erhält der Anwender automatisiert einen Analysebericht über die vermessenen Metriken und ihre Konformität mit den Anforderungen. Durch eine präzise Abbildung der zeitlichen Eigenschaften im Simulationsmodell können die Ergebnisse direkt auf ein mit demselben Netzwerkmodell konfiguriertes reales Netzwerk übertragen werden.

Der Beitrag gliedert sich wie folgt: Im Abschnitt II wird der Hintergrund sowie die vergleichbaren und verwandten Arbeiten vorgestellt. Das Konzept der simulationsbasierten Evaluierung und die Architektur der Plattform wird in Abschnitt III gezeigt. Abschließend werden in Abschnitt IV Ergebnisse der Evaluierung vorgestellt sowie ein zusammenfassendes Fazit mit dem Ausblick auf weitere Ziele in Abschnitt V gegeben.

II. HINTERGRUND & VERWANDTE ARBEITEN

Fahrzeugnetzwerke sind wohldefinierte, geschlossene Systeme. In der Regel werden Komponenten nicht spontan in das System eingefügt oder entfernt, so dass Kommunikations- und Zeitverhalten weitgehend im voraus berechenbar sind. Das System kann statisch konfiguriert werden und muss sich nicht an veränderliche Topologien oder variierende Teilnehmerzahlen anpassen, wie es etwa in lokalen (LAN) oder Weitverkehrs-Computer-Netzwerken (WAN) erforderlich ist.

Echtzeitanwendungen im Automobil haben hohe Anforderungen an das Zeitverhalten der Datenübertragung zwischen den Steuergeräten. Die Güte von Regelungssystemen wie beispielsweise der Antriebsschlupfregelung (ASR) hängt vom Zeitverhalten der Datenübertragung, insbesondere der Nachrichtenlaufzeit (Latenz) und der Varianz der Nachrichtenlaufzeit (Jitter) ab, denn sie hat wesentlichen Einfluss auf die

Totzeit der verteilten Regelung. Je länger die Totzeit ist, desto schlechter wird das Regelverhalten. Dies kann soweit führen, dass die Regelung unbrauchbar wird.

Zur Zeit ist das Datenübertragungsnetz in Serienfahrzeugen heterogen aufgebaut. Je nach Anwendung und zu übertragenden Daten kommen spezielle Bussysteme zum Einsatz [3]. Gängige Technologien sind der *LIN-Bus*, der *CAN-Bus*, *FlexRay* und der *MOST-Bus*.

A. Die Echtzeit-Ethernet-Technologie

Grundsätzlich lassen sich die am Markt befindlichen Ethernet-Technologien in die drei Hauptfelder *time-triggered* Systeme, *Token-basierte* Systeme und *bandbreitenbasierte* Systeme einordnen, da sie jeweils die wichtigsten Eigenschaften vereinen.

Time-triggered (zeitgesteuerte) Protokolle arbeiten synchron und zyklisch. Sie sind ein verbreiteter Ansatz, um Echtzeitfähigkeit auf Kommunikationssystemen herzustellen. Dabei synchronisieren sie sich über eine globale Zeit. Jeder Teilnehmer hat eine lokale Uhr, welche möglichst genau mit den Uhren der anderen Teilnehmer synchronisiert werden muss. Zugewiesene Zeitschlitze definieren für jeden Teilnehmer, wann er das Medium zum Senden nutzen darf. Damit ist sichergestellt, dass immer nur ein Teilnehmer zur Zeit auf das Medium zugreift. Diese Technik wird auch als *koordiniertes Time-Division-Multiple-Access (TDMA)* bezeichnet. Diverse Echtzeit-Ethernet-Produkte, darunter auch TTEthernet basieren auf dem time-triggered Konzept.

Die Grundlage von Token-basierten Systemen ist der wechselseitige Ausschluss mit Hilfe einer zwischen allen Teilnehmern geteilten Ressource, dem *Token*. Das Token wandert von Teilnehmer zu Teilnehmer, wobei nur derjenige senden darf, der das Token hält. Damit ist sichergestellt, dass das Medium stets frei ist, wenn Daten gesendet werden. In der Prozessautomatisierung wird das Token-basierte *EtherCAT-Protokoll* eingesetzt.

Bandbreitenbasierte Systeme arbeiten ohne eine Form der Synchronisierung. Es werden virtuelle Bandbreitenkontingente konfiguriert. Jeder Teilnehmer sendet in einem solchen Kontingent. Da keine Synchronisierung stattfindet, ist in Systemen mit Bandbreitenkontingenten die berechnete längste Verzögerungszeit und damit auch der Jitter weit höher als im Regelfall zu beobachten. Dies hängt damit zusammen, dass im worst-case alle Teilnehmer zur gleichen Zeit ihre Nachrichten versenden. Das AFDX-Protokoll [4] ist ein typisches bandbreitenbasiertes Protokoll.

B. Time-triggered Ethernet

TTEthernet wird von der Firma TTTech entwickelt. Die Standardisierung der TTEthernet-Spezifikation [1] durch die Society of Automotive Engineers (SAE) wird momentan abgeschlossen [5]. TTEthernet basiert auf Standard-Switched-Ethernet, wobei die Topologie aus full-duplex Punkt-zu-Punkt Links zusammengesetzt wird.

TTEthernet definiert drei Nachrichtenklassen: Für die *time-triggered* Kommunikation weisen offline konfigurierte Schedules jedem Teilnehmer definierte Zeitschlitze je Link zu. Die-

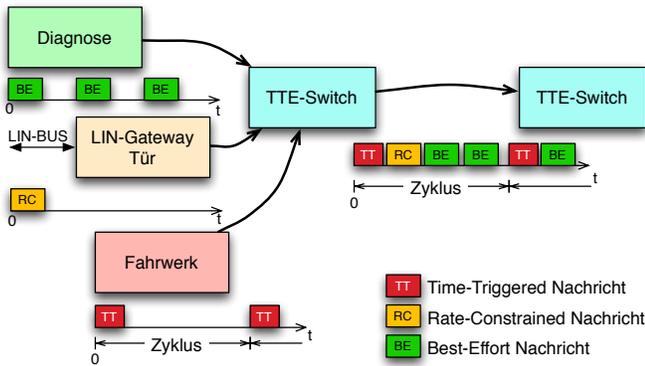


Abbildung 1. TTEthernet-Beispielanwendung — Fahrzeugkommunikation mit drei unterschiedlichen Verkehrsklassen

ses Netzwerk-Zugriffsverfahren erlaubt vorhersagbare Übertragungszeiten in definierten Grenzen ohne Warteschlangenbildung in den Switches und damit Kommunikation mit niedriger Latenz und geringem Jitter. Ein fehlergesichertes Synchronisierungsprotokoll implementiert die globale Zeit.

Neben den time-triggered Nachrichten definiert TTEthernet noch zwei weitere Nachrichtenarten. *Rate-constrained* Nachrichten sind für die Übertragung von Daten mit weniger harten Zeitanforderungen bestimmt und basieren auf dem AFDX-Protokoll [4]. *Best-effort* Nachrichten basieren auf Standard-Ethernet und haben in der Übertragung die niedrigste Priorität. Eine Fähigkeit von TTEthernet-Netzwerken ist dadurch, Teilnehmer zu integrieren, die das time-triggered Protokoll nicht unterstützen. Diese Teilnehmer bleiben unsynchronisiert und kommunizieren ausschließlich über best-effort Nachrichten.

Abbildung 1 visualisiert eine Beispiel-Anwendung aus dem Automotive-Umfeld, in der die drei Nachrichtenarten auf demselben physikalischen Link koexistieren. Während time-triggered Nachrichten — beispielsweise für die Übertragung von Fahrwerksinformationen — unter strikter Einhaltung des Übertragungszyklus und mit der höchsten Priorität weitergeleitet werden, werden rate-constrained Pakete in freien Zeitschlitzen übertragen. Die darüber hinaus noch freie Bandbreite wird für die Übertragung von best-effort Datenverkehr verwendet.

C. Vorarbeiten, verwandte und vergleichbare Arbeiten

In Vorarbeiten wurde für einen Vergleich zwischen TTEthernet und FlexRay auf Basis analytischer Methoden bereits ein mathematisches Modell für die TTEthernet-Technologie erstellt [2]. Dieses Modell wurde in dieser Arbeit insbesondere für die Validierung der Simulationsergebnisse herangezogen.

Der Einsatz von neuen Vermittlungsinfrastrukturen in Kraftfahrzeugen wird durch verschiedene Institutionen untersucht. Insbesondere ist die BMW-Group zu erwähnen, welche im Jahre 2007 als technische Demonstration einen IP-basierten Fahrzeug-Prototyp vorstellte und den Einsatz von Ethernet für Anwendungen im Fahrzeug anstrebt. Insbesondere in Zusammenarbeit zwischen der Technischen Universität München und BMW (CAR@TUM) entstanden verschiedene Forschungsprojekte und Veröffentlichungen zu Grundlagenthemata wie dem Design von vereinheitlichten Kommunikationsinfrastrukturen [6], [7], der Abbildung von Kommunikationsstrukturen aktueller Fahrzeuge auf Ethernet-basierte Vermittlungsinfrastrukturen [8] oder der Koexistenz von Verkehrsklassen mit

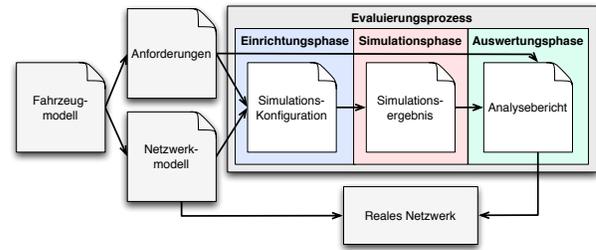


Abbildung 2. Überblick über die Phasen des Evaluierungsprozesses und seine Ein- und Ausgabegrößen

verschiedenen Eigenschaften in switched Netzwerken [9]. Die Arbeiten basieren fast ausschließlich auf Standard-Ethernet und grenzen sich damit von dieser Arbeit ab.

Nach aktuellem Kenntnisstand sind keine vollständigen Implementierungen von time-triggered Echtzeit-Ethernet-Erweiterungen für OMNeT++ öffentlich verfügbar. Für andere Simulationstools wie den OPNET-Modeler gibt es Modelle für Protokolle aus der Anlagensteuerung [10], [11]. Da die Protokolle jedoch von TTEthernet abweichen, sind diese Modelle nicht als Vorlage für ein Simulationsmodell geeignet.

III. KONZEPT, ARCHITEKTUR & IMPLEMENTIERUNG

Da das analytische Modell [2] nur mit großem Aufwand den benötigten Detailgrad liefert, wurde ein simulationsbasierter Evaluierungsprozess entwickelt.

Abbildung 2 zeigt die Struktur des Evaluierungsprozesses, sowie die Ein- und Ausgangsgrößen. Die Simulation wird durch eine Netzwerkkonfiguration gespeist, die zuvor manuell oder mit Werkzeugunterstützung aus dem Fahrzeugmodell erstellt wurde. Zusätzlich definieren die Anwendungen dieses Modells die Anforderungen an die Vermittlungsinfrastruktur, die in der Evaluierung analysiert werden.

Der Evaluierungsprozess selbst ist in drei Phasen unterteilt. Zunächst wird die Simulation auf Basis der Netzwerkkonfiguration und Anwendungsanforderungen definiert. Anschließend wird in der Simulationsphase das abgeleitete Modell in der Simulationsumgebung vermessen und dokumentiert. Abschließend werden die Ergebnisse in der Auswertungsphase mit den zuvor erstellten Anforderungen verglichen und bewertet. Diese Information hilft dem Nutzer, in einem iterativen Vorgehen die Konfiguration anzupassen, bis sie alle Vorgaben erfüllt. Als Ergebnis erhält der Nutzer eine Übersicht über alle für ihn relevanten Metriken zusammen mit einer Netzwerkkonfiguration, welche direkt in vorhandene Hardware eingespielt werden kann.

Die Basis für den Evaluierungsprozess ist eine Netzwerkkonfiguration im Format von TTEthernet. Diese XML-Datei enthält bereits die wichtigsten Informationen für die Simulation und wird vom Evaluierungs-Framework eingelesen und in das Format der Simulationsumgebung übersetzt. Als weitere Eingabe in den Evaluierungsprozess wird eine formale Beschreibung der Datenflüsse und ihrer Anforderungen definiert. Diese Beschreibung ist notwendig, um in der Simulation für die spätere Anwendung charakteristische Datenflüsse zu generieren und ein gutes Simulationsergebnis, welches die späteren realen Eigenschaften wiedergibt, zu erzielen. Im nächsten Schritt werden die globalen Parameter der Simulation, bei-

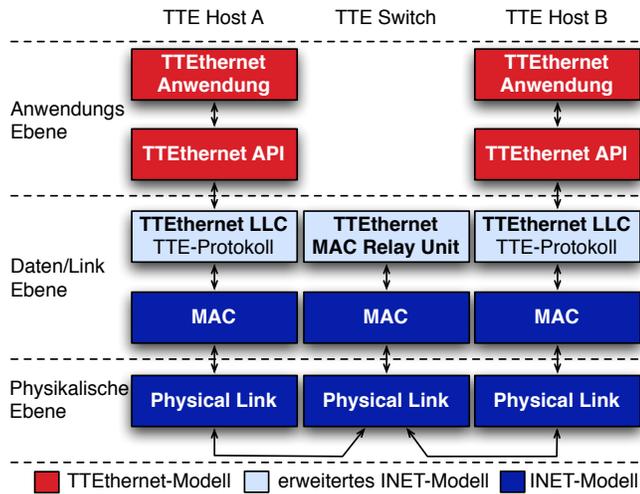


Abbildung 3. TTEthernet-Integration in das INET-Framework

spielsweise die Simulationsdauer oder die zeitliche Auflösung, festgelegt. Anschließend wird die Simulation durchgeführt.

Im letzten Schritt generiert das System einen Bericht über die simulierten Metriken. Als Eingabe dient hier, neben den Ergebnissen der Simulation, die Beschreibung der Datenflüsse und Anforderungen. Erfüllt die Konfiguration alle Anforderungen, kann der Nutzer auf Basis des Berichtes entscheiden, ob die evaluierte Konfiguration in dieser Form eingesetzt werden soll. Werden Anforderungen nicht erfüllt, muss die Konfiguration angepasst und erneut evaluiert werden. Die Evaluierung unterstützt den Nutzer nun so lange in einem zyklischen Prozess, bis das gewünschte Ergebnis erzielt wird.

A. Elemente des Simulationsmodells

Die Simulation setzt sich aus drei Schichten zusammen. Die Basis bildet die OMNeT++-Simulationsumgebung. Darauf basierend wird das INET-Framework eingesetzt. Da TTEthernet Standard-Ethernet erweitert, wird durch Vererbung im darauf aufbauenden Simulationsmodell die grundlegende Netzwerkfunktionalität vom physikalischen und Link-Layer aus dem INET-Framework abgeleitet.

Auf Basis des INET-Frameworks wird die TTEthernet-Simulationsschicht [12] implementiert. Sie erweitert das Modell um die Echtzeiteigenschaften des TTEthernet-Protokolls. Dabei muss besonders auf eine präzise Abbildung des Zeitverhaltens geachtet werden. Nur so lassen sich die Ergebnisse der Simulation zuverlässig auf ein echtes Szenario übertragen.

Abbildung 3 zeigt die wichtigsten Komponenten des TTEthernet-Modells und ihre Integration in die Schichten der Simulationsplattform. Dadurch, dass TTEthernet auf Standard-Ethernet basiert, müssen ausschließlich Komponenten des INET-Frameworks oberhalb der MAC-Ebene erweitert oder angepasst werden. Für das Modell des Ethernet-Hosts wird der Protokollstack in einer Erweiterung des Ethernet-LLC implementiert. Darüber liegen die TTEthernet-API und die Anwendungen in neuen Modulen. Für den TTEthernet-Switch kann die Protokoll-Implementierung direkt als Erweiterung der MACRelayUnit aus dem INET-Framework umgesetzt werden.

B. Uhrenmodell

Die global synchronisierte Zeit und das Scheduling von jeder Komponente sind die wichtigsten Unterschiede von TTEthernet gegenüber Standard-Ethernet. Daher benötigt jeder Teilnehmer des Netzwerks ein eigenes Uhrenmodell, das über ein fehlergesichertes Synchronisationsprotokoll mit den Uhren der anderen Teilnehmer synchronisiert wird. Die kleinste Einheit der Uhr in TTEthernet ist ein *Tick*. Dabei ist die Länge des Ticks konfigurierbar.

Bei der Modellierung der Uhr muss beachtet werden, dass jeder Oszillator eine gewisse Ungenauigkeit besitzt, welche als *Clock-Drift* bezeichnet wird. Diese Clock-Drift hat signifikanten Einfluss auf das Verhalten des Protokolls und muss daher überlegt in das Uhrenmodell integriert werden. Aus Leistungsgründen kann die Clock-Drift nicht dadurch modelliert werden, dass jeder Tick als separates Ereignis simuliert wird. Stattdessen werden die Ticks zwischen zwei Ereignissen zusammengefasst. Dabei wird ein *Clock-Drift-Faktor* eingeführt, welcher die Ungenauigkeit der Uhr nachbildet. Dieser Faktor wird für dieses Intervall als konstant angenommen. Die Gleichung 1 zeigt die Formel für die Berechnung des aktuellen Wertes der Uhr.

$$t' = t + \delta \cdot (\Delta t_{Tick} + \Delta t_{Drift}) \quad (1)$$

Dabei ist t' die Zeit für das nächste geplante Ereignis, t ist die aktuelle Simulationszeit, δ ist die Anzahl von Ticks im Schedule für das nächste Ereignis, Δt_{Tick} ist die konfigurierbare Zeit eines Ticks und Δt_{Drift} ist die für das aktuelle Intervall berechnete Clock-Drift. Dieses Modell der Uhren ist eine zulässige und ausreichend genaue Vereinfachung des Verhaltens von realen Uhren, da während eines Zyklus die Varianz der Clock-Drift in der Realität nur gering ist.

C. Switchmodell

Der TTEthernet-Switch kombiniert ein Standard-Switched-Ethernet-Gerät für die Weiterleitung von best-effort Daten mit einem Modul, welches das Synchronisationsprotokoll und das Weiterleiten von zeitkritischen Daten (time-triggered und rate-constrained) unterstützt.

Für die Implementierung des TTEthernet-Switches wird das MACRelayUnit Interface aus dem INET-Framework implementiert. Die Logik für die Weiterleitung des zeitkritischen Datenverkehrs verwendet das beschriebene Uhrenmodell (siehe Abschnitt III-B).

Wie durch die TTEthernet-Spezifikation vorgegeben, werden ankommende Pakete anhand ihrer Zieladresse klassifiziert und dann, basierend auf ihrer Nachrichtenart, weitergeleitet oder bearbeitet: Synchronisationsnachrichten werden überprüft und an das Synchronisationsmodul des Gerätes weitergeleitet. Time-triggered Nachrichten werden in einem Puffer bis zu ihrem geplanten Weiterleitungszeitpunkt zwischengespeichert und dann abgesendet. Rate-constrained Nachrichten werden, sofern keine time-triggered Kommunikation ansteht, sofort weitergeleitet. Best-effort Nachrichten werden in der übrigen Zeit weitergeleitet.

Direkt nach dem Empfang eines Ethernet-Frames überprüft der TTEthernet-Switch die Nachricht auf Konformität mit

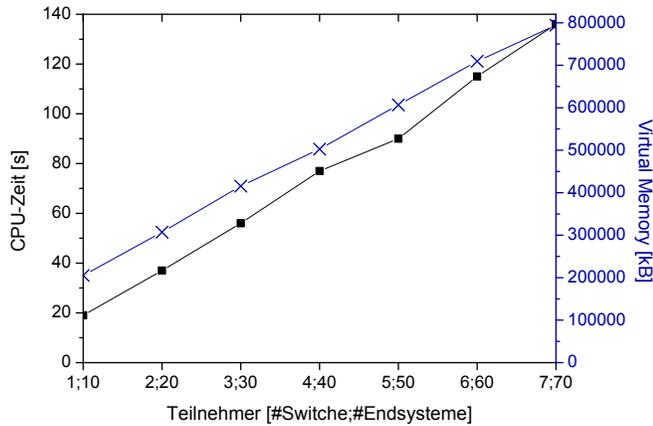


Abbildung 4. Lineares Skalierungsverhalten des Simulationsmodells bei abstrakten Topologien verschiedener Größe

den vorkonfigurierten Regeln. Für zeitkritischen Datenverkehr sind die Konformitätsüberprüfungen in der Critical-Traffic-Configuration (CTC)-Tabelle abgelegt. Der Switch kann unter anderem überprüfen, ob die Nachricht auf dem richtigen Port und zum korrekten Zeitpunkt angekommen ist. Während für rate-constrained Nachrichten die Einhaltung des Bandwidth Allocation Gap (BAG) überprüft wird, ist für time-triggered Daten zu prüfen, ob die Nachricht zur geplanten Zeit eintrifft. Diese Analyse ist wichtig, um das System vor der Störung durch fehlerhafte oder bösartige Sender zu schützen.

D. Hostmodell

Für die Simulation von TTEthernet-Endsystemen muss der Standard-Ethernet-Protokollstack um die time-triggered Funktionalität erweitert werden. Dafür muss das Nachrichten-Scheduling und der zugehörige Scheduler, die Klassifizierung von eingehenden Nachrichten und das Synchronisationsmodul implementiert werden. Das Nachrichten-Scheduling legt fest, wann eine time-triggered Nachricht gesendet oder empfangen wird. Es wird offline konfiguriert. Für unterschiedliche Ereignisse, darunter das Versenden oder Empfangen von Nachrichten, aktiviert der Scheduler sogenannte *Tasks*.

Für die direkte Integration von Anwendungen in das Simulationsmodell wird die TTEthernet-API für das Simulationsmodell implementiert. Über Code-Integration können darüber Anwendungen, die gegen die API programmiert wurden, direkt in der Simulation verwendet werden. Dabei verwendet das Hostmodell die gleichen Datenstrukturen wie die reale Implementierung. Alle Nachrichten werden in Puffern zwischen Anwendungs- und Protokoll-Layer ausgetauscht.

IV. EVALUIERUNG & ERGEBNISSE

In diesem Abschnitt werden ausgewählte Simulationsergebnisse, sowie eine Evaluierung der Simulationsperformance aufgezeigt. Weiterhin wird die vorgestellte Simulationsumgebung realen Hardwaremessungen und Ergebnissen aus dem analytischen Modell gegenübergestellt.

A. Simulationsergebnisse und Performance

Die entwickelte TTEthernet-Implementierung wird zunächst auf Basis künstlich generierter Topologien für Fahrzeug-Backbones getestet. Um zu überprüfen, ob das Modell den

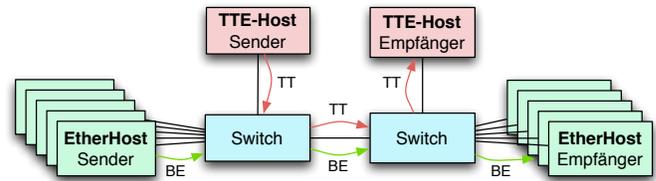


Abbildung 5. Simulierte Topologie für den Nachweis der Protokollkonformität — Parallele Übertragung von time-triggered und best-effort Nachrichten

Anforderungen an die Skalierbarkeit gerecht wird, werden Topologien innerhalb der erwarteten maximalen Backbonegröße generiert. Basierend auf aktuellen Designs wird eine Topologie von maximal 70 Hosts und 7 Switches simuliert.

Die Simulation läuft auf Standard-PC-Hardware auf einem Prozessorkern mit 2,4 GHz und 2 GB Arbeitsspeicher. Experimente zeigen eine lineare Abhängigkeit zwischen dem Speicherverbrauch und der Netzwerkgröße sowie der Anzahl von time-triggered Botschaften im Zyklus. Abbildung 4 zeigt die benötigte CPU-Zeit und den Speicherverbrauch bei Simulationen unterschiedlicher Größe. Dabei wird jeweils über 30 Echtzeitsekunden simuliert. Auf der X-Achse ist die Topologiegröße (Anzahl Switches und Anzahl Hosts) aufgetragen. Es wird dabei eine synthetisch generierte Topologie ausgemessen. Simulationen auf verschiedenen Topologien gleicher Größe und Summe der Switching-Hops je Nachricht zeigen, dass die Rechenzeit und der Speicherverbrauch ausschließlich von der Größe und nicht von der Struktur der Topologie abhängt.

Um die Metriken und Protokollkonformität des TTEthernet-Modells zu zeigen, wird weiterhin die Latenz und der Jitter eines Beispiel-Netzwerkes mit TTEthernet- und Standard-Ethernet-Switches aus dem INET-Framework verglichen. Die dafür verwendete Topologie besteht aus zwei verbundenen Switches, an denen zwei TTEthernet-Hosts für time-triggered und zehn Standard-Ethernet-Hosts für die Erzeugung von best-effort Hintergrunddatenverkehr hängen (siehe Abbildung 5). Alle Links im simulierten Netzwerk haben eine Bandbreite von 100 Mbit/s. Die Clock-Drift wird mit 200 ppm konfiguriert. Die Signallaufzeit des Kabels beträgt 100 ns je Link.

Um den Einfluss des best-effort Datenverkehrs auf die Übertragung über den Link zwischen den beiden Switches zu messen, wird dieser zusätzlich zu den time-triggered Nachrichten zwischen 0% und 100% mit best-effort Frames ausgelastet. Während dieser Simulation wird die minimale und maximale Ende-zu-Ende Latenz über 10.000 Nachrichten gemessen. Die Extremwerte der Ende-zu-Ende Latenz sind die wichtigste Metrik für die Echtzeit-Fahrzeugkommunikation.

1) *Exemplarische Simulationsergebnisse:* Die Ende-zu-Ende Latenz zwischen den time-triggered Hosts wird für die INET-Ethernet-Switch-Implementierung und das TTEthernet-Modell gemessen. Die Ergebnisse (siehe Abbildung 6) zeigen die maximale und minimale Nachrichtenlatenz für die Beispieltopologie (Abbildung 5) in einer Messung über 10.000 Nachrichten, während das Netzwerk zusätzlich mit einer variablen Anzahl von best-effort Frames belastet wird.

TTEthernet verspricht zuverlässige Kommunikation innerhalb definierter zeitlicher Grenzen. Abbildung 6 zeigt, dass durch das synchronisierte Protokoll, die Priorisierung und die Mechanismen zur deterministischen Medienreservierung eine

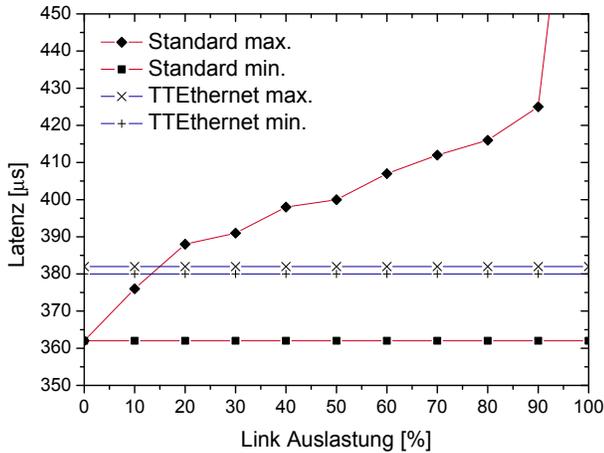


Abbildung 6. Vergleich der Ende-zu-Ende Latenz — Standard INET-Switch und TTEthernet-Switch

gleichförmige, von der Linkauslastung unabhängige Latenz erreicht wird. Die geringen Schwankungen zwischen minimaler und maximaler Latenz entstehen durch Clock-Drift der lokalen Uhren (siehe Abschnitt III-B). Der Einfluss der Clock-Drift ist in den Vorarbeiten bereits analytisch verifiziert worden [2].

Demgegenüber steigt beim INET-Ethernet-Switch die Differenz zwischen minimaler und maximaler Latenz mit zunehmender Linkauslastung. Dieser Effekt entsteht durch das Aufstauen von Nachrichten an den ausgehenden Ports der Switches. Wird der Link voll ausgelastet, ist die Kommunikation nicht mehr zuverlässig. Es werden Nachrichten verworfen, da die Übertragungskapazität nicht balanciert ist.

Eine weitere wichtige Analyse, welche die Topologie und Konfiguration eines Netzwerkes charakterisiert, ist die *Latenzverteilung*. Graphen zur Latenzverteilung können die Entscheidung unterstützen, ob ein Netzwerk die Anforderungen der Applikationen an die Weiterleitung von event-triggered Datenverkehr erfüllt. Abbildung 7 zeigt die Latenz für die drei Nachrichtenarten von TTEthernet auf demselben voll ausgelasteten TTEthernet Netzwerk, entsprechend des im Evaluierungsprozess automatisch generierten Analyseberichts. Wie gefordert haben die time-triggered Nachrichten eine nahezu konstante Latenz. Die rate-constrained Nachrichten werden mit einer variablen, jedoch auf $500\mu\text{s}$ begrenzten Verzögerung ausgeliefert. Durch das Aufstauen und die Mechanismen zur Linkreservierung ist im Vergleich dazu beim best-effort Datenverkehr der Jitter hoch.

B. Verifikation des Simulationsmodells

Der Vergleich der Simulationsergebnisse mit Ergebnissen aus dem analytischen Modell [2] und Messungen mit echter TTEthernet-Hardware [13] zeigt die korrekte Abbildung des Protokolls im TTEthernet-Simulationsmodell. Da zum Zeitpunkt der Messungen nur ein Hardware-Switch zur Verfügung stand, ist eine einfachere Topologie für die Verifikation genutzt worden. Die Verifikation kann wie hier beschrieben jedoch auf jegliche Topologie angewendet werden.

Die Evaluierung nutzt eine Topologie mit einem Switch und mehreren Hosts. Dabei läuft die Kommunikation zwischen den Teilnehmern stets durch einen Switching-Hop. Während der

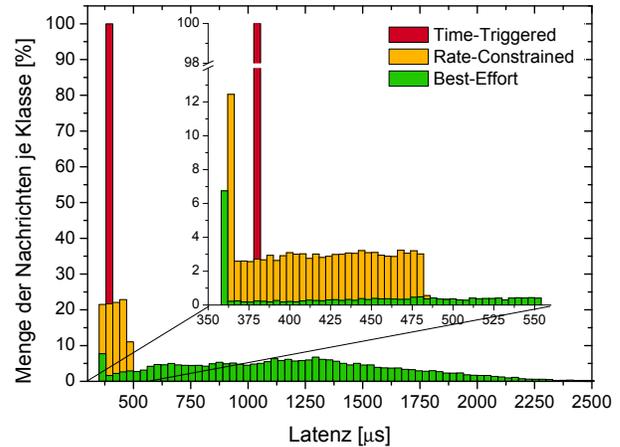


Abbildung 7. Latenzverteilung der drei Verkehrsklassen von TTEthernet bei einem voll ausgelasteten Link

Evaluierung werden im Switch verschiedene Schedules mit unterschiedlichen Weiterleitungsverzögerungen eingesetzt.

Die Simulation läuft über 10.000 Nachrichten jeweils für verschiedene Switch-Schedules, gezeigt sind Schedules mit $350\mu\text{s}$ und $9\mu\text{s}$ Verzögerung zwischen Empfang und Weiterleitung des Frames im Switch. Eine Verzögerung von $9\mu\text{s}$ ist zur Zeit das Minimum für eine zuverlässige Weiterleitung.

Der Schedule mit $9\mu\text{s}$ führt zu einer simulierten Ende-zu-Ende Latenz von $19,5\mu\text{s}$ für einen Frame mit minimaler Payload und $252,0\mu\text{s}$ für einen Frame mit maximaler Payload. Für den Schedule mit $350\mu\text{s}$ Weiterleitungsverzögerung beträgt die Ende-zu-Ende Latenz, abhängig von der Payloadgröße, $360,5\mu\text{s}$ bis $593,0\mu\text{s}$. Im Folgenden werden diese Simulationsergebnisse mit dem mathematischen Modell und der Hardwaremessung verglichen.

1) *Vergleich mit mathematischem Modell*: Das mathematische Modell der TTEthernet-Komponenten ist in einer Vorarbeit für einen theoretischen Vergleich der Leistungsmerkmale von TTEthernet und FlexRay entwickelt und veröffentlicht worden [2].

Die folgenden Gleichungen sind Teil dieses Frameworks. Mit ihrer Hilfe lässt sich das zeitliche Verhalten einer TTEthernet-Komponente berechnen: Die Latenz t_L wird dabei für minimale und maximale Payload berechnet. Sie setzt sich zusammen aus der physikalischen Signallaufzeit auf dem Kabel $t_{WD} \cdot l_W$, der Zeit für die Datenübertragung — jeweils beim Sender und dem weiterleitenden Switch — $2 \cdot l_F \cdot t_b$ und der Verzögerung durch den Switch-Schedule t_{SD} :

$$t_L(t_{SD}) = t_{WD} \cdot l_W + 2 \cdot l_F \cdot t_b + t_{SD} \quad (2)$$

$$t_{L_{min}}(t_{SD}) = 10 \frac{\text{ns}}{\text{m}} \cdot 0,5 \text{ m} + 2 \cdot 5,12 \mu\text{s} + t_{SD} \quad (3)$$

$$t_{L_{max}}(t_{SD}) = 10 \frac{\text{ns}}{\text{m}} \cdot 0,5 \text{ m} + 2 \cdot 121,44 \mu\text{s} + t_{SD} \quad (4)$$

Wie erwartet besteht eine lineare Abhängigkeit zur Framelänge l_F . Für den Schedule mit $t_{SD} = 350\mu\text{s}$ liegt die berechnete Latenz je nach Payload-Größe zwischen $360,245\mu\text{s}$ und $592,885\mu\text{s}$. Dieselbe Berechnung für den Schedule mit der minimalen Verzögerung von $t_{SD} = 9\mu\text{s}$ ergibt eine Latenz zwischen $19,245\mu\text{s}$ und $251,885\mu\text{s}$.

Die Ergebnisse des mathematischen Frameworks sind geringfügig ($<300\text{ns}$) niedriger als die Simulationsergebnisse.

Tabelle I
VERGLEICH DER LATENZGRENZWERTE BEI MINIMALER UND MAXIMALER
PAYLOAD FÜR VERSCHIEDENE SWITCH-SCHEDULES

Weiterleitungs- verzögerung	Payload	Simulation	Theorie	Messung
350 μ s Schedule	minimum	360,5 μ s	360,245 μ s	360 μ s
	maximum	593,0 μ s	592,885 μ s	592 μ s
9 μ s Schedule	minimum	19,5 μ s	19,245 μ s	-
	maximum	252,0 μ s	251,885 μ s	-

Der Grund sind Vereinfachungen im mathematischen Modell bei der Abbildung von Hardware-Verzögerungen. Diese Verzögerungen werden in der Simulation präzise berücksichtigt.

2) Vergleich mit Messungen auf TTEthernet-Hardware:

Um die Qualität des Simulationsmodells besser bewerten zu können, werden die Ergebnisse mit dem Verhalten echter TTEthernet-Hardware verglichen. Dazu wird eine in Vorarbeiten erstellte, auf einem Echtzeit-Linux-Kernel basierende Messmethode [13] verwendet. Diese Methode erlaubt die Messung von Latenz und Jitter des angeschlossenen Netzwerkes mit einer Genauigkeit im einstelligen Mikrosekunden-Bereich.

Für das simulierte Netzwerk mit einem Schedule von 350 μ s Verzögerung ergibt sich eine gemessene Latenz zwischen 360 μ s und 592 μ s je nach Framegröße. Bei Vernachlässigung der niedrigeren Präzision der Messmethode gegenüber der Simulation sind die Ergebnisse als vergleichbar anzusehen. Der Schedule mit 9 μ s Verzögerung konnte nicht gemessen werden, da die Messmethode auf einer Softwareimplementierung des TTEthernet-Stacks basiert, dessen Präzision der Synchronisierung nicht ausreicht. Infolgedessen ergeben sich bei diesem Schedule partielle Paketverluste bei der softwarebasierten Messmethode.

3) *Bewertung der Verifikation:* Das Simulationsmodell implementiert das erwartete Verhalten eines TTEthernet-Systems mit einer hohen Genauigkeit. Die Ergebnisse der Experimente zeigen, dass das Modell konform mit der TTEthernet-Spezifikation, dem mathematisch-analytischen Modell und der Hardwaremessung arbeitet. Die Latenz der time-triggered Nachrichten ist unabhängig vom simultan gesendeten best-effort Datenverkehr. Tabelle I zeigt die Ergebnisse der verschiedenen Messungen und Experimente für die Schedules mit 9 μ s und 350 μ s im Vergleich.

V. ZUSAMMENFASSUNG & AUSBLICK

Durch die Zunahme von elektronischen Systemen im Automobil sind die Anforderungen an Kommunikationsverbindungen stark gestiegen. Ein neuer Architekturansatz sieht ein Backbone-Netzwerk vor, das als zentrales Element aller Datenverbindungen hoher Last gewachsen sein muss und dabei eine vorhersagbare, deterministische Nachrichtenübertragung garantiert. Eine mögliche Technologie für zukünftige Fahrzeug-Backbones ist Echtzeit-Ethernet. Um frühzeitig Aussagen zur Eignung von Ethernet-basierter Fahrzeugkommunikation machen zu können, spielt die Simulation von konkreten Anwendungsszenarien eine wichtige Rolle für OEM und Zulieferer. Ein flexibler Evaluierungsprozess unterstützt dabei die Entwicklung.

Diese Arbeit stellt ein präzises, gut skalierendes Simulationsmodell für Echtzeit-Ethernet-basierte Kommunikation in

Fahrzeugen vor. Durch die sorgfältige Validierung auf Basis von mathematischen Berechnungen in einem analytischen Modell und Messungen auf echter TTEthernet-Hardware kann sichergestellt werden, dass die Ergebnisse der Simulation auf reale Probleme anwendbar sind.

In einer Fallstudie wurde der Evaluierungsprozess mit einer realen Automotive-Anwendung getestet. Dabei wurde eine reale Fahrzeuganwendung mit hohen Bandbreitenanforderungen — die kamerabasierte Fahrzeugumfeldererkennung — durch den Evaluierungsprozess verarbeitet. Hierdurch konnte die praktische Relevanz eines simulationsbasierten Ansatzes für die Automotive-Entwicklung gezeigt werden.

Zukünftige Simulationsarbeiten auf Basis konkreter Automobiltopologien und realistischer Anwendungsdaten begleiten die Analyse, wie time-triggered Ethernet-Systeme in einem zukünftigen Fahrzeug-Backbone umgesetzt werden können. Dabei unterstützt der in dieser Arbeit vorgestellte Evaluierungsprozess und die darin enthaltene Simulationsumgebung die Entwicklung von prototypischen Umsetzungen und konkreten Lösungen wie der Konsolidierung aktueller automotive Bussysteme zu einer intelligenten Ethernet-basierten Vermittlungsinfrastruktur.

LITERATUR

- [1] W. Steiner, "TTEthernet Specification," TTTech Computertechnik AG, Nov. 2008. [Online]. Available: <http://www.tttech.com>
- [2] T. Steinbach, F. Korf, and T. C. Schmidt, "Comparing Time-Triggered Ethernet with FlexRay: An Evaluation of Competing Approaches to Real-time for In-Vehicle Networks," in *8th IEEE Intern. Workshop on Factory Communication Systems*. Piscataway, New Jersey: IEEE Press, May 2010, pp. 199–202.
- [3] T. Dohmke, "Bussysteme im Automobil: CAN, FlexRay und MOST," Technische Universität Berlin, DaimlerChrysler AG, Tech. Rep., 2002.
- [4] Aeronautical Radio Incorporated, "Aircraft Data Network," ARINC, Annapolis, Maryland, Standard 664, 2002.
- [5] SAE - AS-2D Time Triggered Systems and Architecture Committee, "Time-Triggered Ethernet (AS 6802)," 2009. [Online]. Available: <http://www.sae.org>
- [6] B. Müller-Rathgeber, M. Eichhorn, and H.-U. Michel, "A unified car-it communication-architecture: Design guidelines and prototypical implementation," in *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2008*, Jun. 2008, pp. 709–714.
- [7] —, "A unified car-it communication-architecture: Network switch design guidelines," in *IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, 2008*, Sep. 2008, pp. 16–21.
- [8] B. Müller-Rathgeber and H.-U. Michel, "Automotive network planning - a genetic approach," in *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2009*, Jun. 2009, pp. 1088–1092.
- [9] J. Hillebrand, M. Rahmani, R. Bogenberger, and E. Steinbach, "Coexistence of Time-Triggered and Event-Triggered Traffic in Switched Full-Duplex Ethernet Networks," in *International Symposium on Industrial Embedded Systems, 2007. SIES '07.*, Jul. 2007, pp. 217–224.
- [10] L. Seno and C. Zunino, "A simulation approach to a Real-Time Ethernet protocol: EtherCAT," in *IEEE Int. Conference on Emerging Technologies and Factory Automation 2008*, Sep. 2008, pp. 440–443.
- [11] P. Ferrari, A. Flammini, and S. Vitturi, "Performance analysis of PROFINET networks," *Computer Standards & Interfaces*, vol. 28, pp. 369–385, Apr. 2006.
- [12] T. Steinbach, H. Dieumo Kenfack, F. Korf, and T. C. Schmidt, "An Extension of the OMNeT++ INET Framework for Simulating Real-time Ethernet with High Accuracy," in *4th International Conference on Simulation Tools and Techniques (SIMUTools)*, 2011.
- [13] F. Bartols, T. Steinbach, F. Korf, and T. C. Schmidt, "Performance Analysis of Time-Triggered Ether-Networks Using Off-the-Shelf-Components," in *14th IEEE International Symposium on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing Workshops (ISORCW) 2011*. Piscataway, New Jersey: IEEE Press, Mar. 2011, pp. 49–56.