

Ethernet-basierte Fahrzeugnetzwerkarchitekturen für zukünftige Echtzeitsysteme im Automobil

Till Steinbach

till.steinbach@haw-hamburg.de

(Probe-)Vortrag zur Disputation
im Rahmen des INET-Seminars
25. April 2018, HAW Hamburg

1 Einführung & Hintergrund

2 Architekturen

3 Simulation

4 Versuchsfahrzeug

5 Schlussfolgerungen

6 Bewertung & Ausblick

Einführung &
Hintergrund

Architekturen

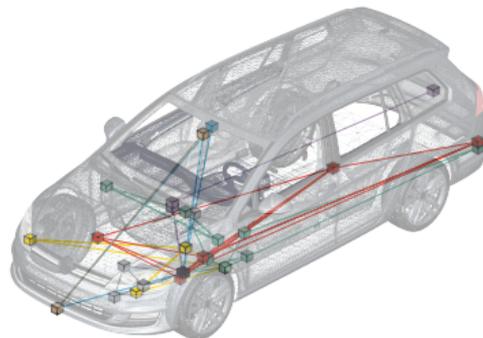
Simulation

Versuchsfahrzeug

Schlussfolgerungen

Bewertung &
Ausblick

- Massives Wachstum des Fahrzeugnetzwerkes über vergangene Jahrzehnte
- Heute großer Bedarf an modernen Kommunikationstechnologien
- Neue Sensorik mit enormem Bandbreitenbedarf
 - Radar, hochauflösende Kameras, LIDAR
- Heutige Fahrzeugnetzwerkarchitekturen sind hochgradig heterogen
 - CAN, Flexray, MOST, ...
- Ethernet als vielversprechender Kandidat für die Zukunft
 - Ausgereifte Technologie
 - Hohe und skalierbare Bandbreite
 - Umfangreiche Entwicklergemeinde



- Heutige felddbusbasierte Netzwerke zeigen Bedarf nach neuer vereinheitlichte Bordnetzarchitektur
- Echtzeit-Ethernet ist geeignete Technologie, um neue Architekturen zu realisieren
- Große Zahl an möglichen QoS- und Traffic-Shaping-Varianten
- (Standard-)Ethernet bereits heute im Fahrzeug im Einsatz:
 - Nur ausgewählte Verbindungen
 - Nur wenige Anwendungen
 - keine (harten) Echtzeitanforderungen

Standard-Ethernet löst das Architekturproblem nicht!

Stand der Technik

Eine typische Netzwerkarchitektur

Ethernet-basierte
Fahrzeugnetzwerk-
architekturen

T. Steinbach

Einführung &
Hintergrund

Motivation &
Problemstellung
Stand der Technik
Stand der Wissenschaft
Handlungsbedarf

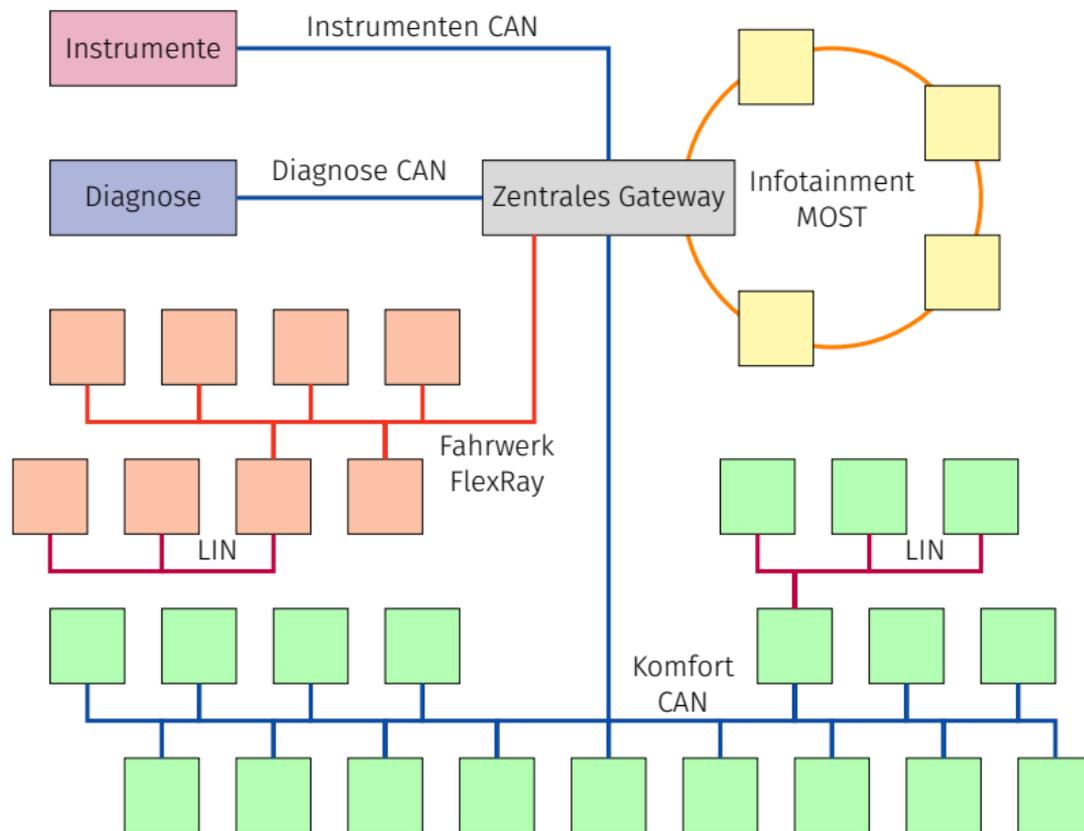
Architekturen

Simulation

Versuchsfahrzeug

Schlussfolgerungen

Bewertung &
Ausblick



- Heutige feldbusbasierte Netzwerke zeigen Bedarf nach neuer vereinheitlichte Bordnetzarchitektur
- Echtzeit-Ethernet ist geeignete Technologie, um neue Architekturen zu realisieren
- Große Zahl an möglichen QoS- und Traffic-Shaping-Varianten
- (Standard-)Ethernet bereits heute im Fahrzeug im Einsatz:
 - Nur ausgewählte Verbindungen
 - Nur wenige Anwendungen
 - keine (harten) Echtzeitanforderungen

Standard-Ethernet löst das Architekturproblem nicht!

■ Standard Ethernet nicht ausreichend für Echtzeitanforderungen:

- Steuerdaten: Ende-zu-Ende-Latenz bis hinunter zu $\approx 100 \mu\text{s}$
- Fahrerassistenz: Ende-zu-Ende-Latenz eines Video Frames bis hinunter zu $\approx 25 \text{ ms}$

■ Derzeit zwei „konkurrierende“ Ansätze

Event-triggered:

- z.B. IEEE 802.1Qav, AFDX (rate-constrained), ...
- Strikte Prioritäten
- Glätten von Bursts (z.B. Credit Based Shaper)

Time-triggered:

- z.B. TTEthernet, PROFINET, IEEE 802.1Qbv, ...
- Strikte Prioritäten
- Scheduling (koordinierter TDMA-Ansatz)

- Bisherige Forschungsprojekte untersuchten nur Teilmenge relevanter Aspekte
- Analytische, simulative und empirische Studien zeigen Lösungen für verschiedene Teilprobleme der Automotive-Kommunikation
- Ganzheitliche Untersuchung möglicher Architekturen auf Basis realistischer Topologien und Datenverkehrsmodelle bisher nicht durchgeführt
- Beeinflussung von Datenströmen unterschiedlicher Verkehrsklassen in Echtzeit-Ethernet bisher nicht untersucht

Ganzheitliche Untersuchung von Kommunikationsarchitekturen mit realistischen Netzwerktopologien und realen Datenverkehrsmodellen:

- Entwicklung und Überprüfung von Architekturvarianten mit realistischen Topologien und realen Verkehrsströmen
- Netzwerksimulation von komplexen heterogenen Fahrzeugnetzwerken mit Feldbusprotokollen, adaptierbaren Echtzeit-Ethernet-Protokollen und Feldbus-Ethernet-Gateways
- Backbone-Netzwerk auf Basis von Echtzeit-Ethernet und Feldbus-zu- Ethernet-Gateways in einem realistischen Prototypfahrzeug
- Designempfehlungen und Best-Practices für Echtzeit-Ethernet basierte Netzwerkarchitekturen im Automobil

Einführung &
Hintergrund

Motivation &
Problemstellung
Stand der Technik
Stand der Wissenschaft
Handlungsbedarf

Architekturen

Simulation

Versuchsfahrzeug

Schlussfolgerungen

Bewertung &
Ausblick

1 Einführung & Hintergrund

2 Architekturen

- Fahrzeugdatenverkehrsmodelle
- Topologievarianten

3 Simulation

4 Versuchsfahrzeug

5 Schlussfolgerungen

6 Bewertung & Ausblick

Einführung &
Hintergrund

Architekturen

Fahrzeugdatenverkehrsmod
Topologievarianten

Simulation

Versuchsfahrzeug

Schlussfolgerungen

Bewertung &
Ausblick

Zwei unterschiedliche Datenverkehrsmodelle:

- Allgemeines Serierendatenverkehrsmodell
 - Entwickelt aus Spezifikation der Kommunikationsdaten eines aktuellen Serienfahrzeugs
 - Domänen: Diagnose, Antrieb und Fahrwerk, Komfort und Info-/Entertainment
 - 41 Teilnehmer, 421 Botschaften
- Komprimiertes domänenbasiertes Datenverkehrsmodell
 - Entwickelt mit Hyung-Taek Lim (BMW Forschung und Technik)
 - Verkehrsflüsse abgeleitet aus BMW-Serienfahrzeugen
 - 15 Teilnehmer, 82 Botschaften
 - Geringere Anzahl an Botschaften da Teilnehmer hinter Domänengateways versteckt sind

Darstellung von Kommunikationsbeziehungen

Heatmap als Fingerabdruck eines Datenverkehrsmodells

Ethernet-basierte
Fahrzeugnetzwerk-
architekturen

T. Steinbach

Einführung &
Hintergrund

Architekturen

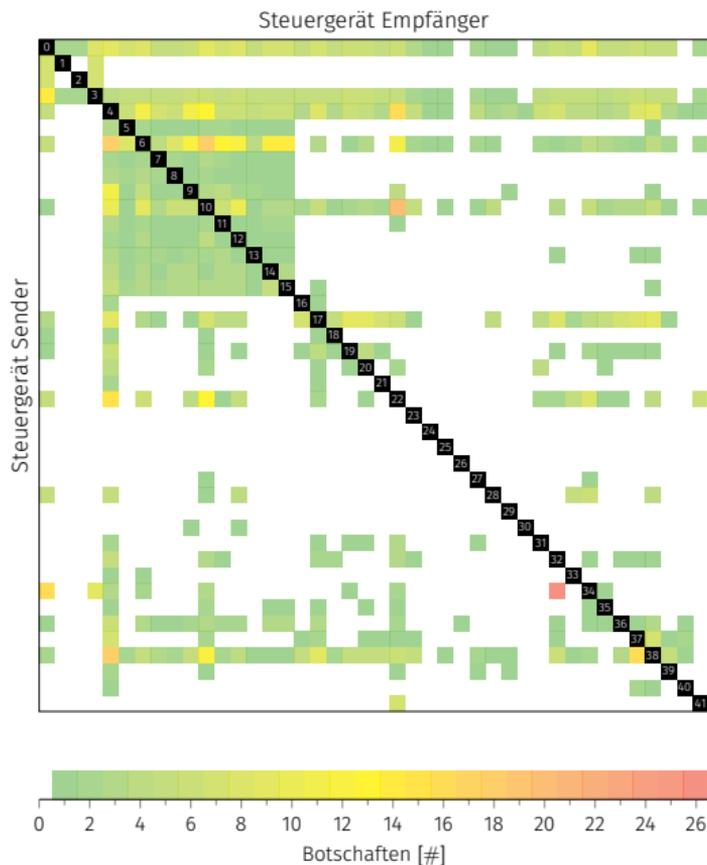
Fahrzeugdatenverkehrsmodell
Topologievarianten

Simulation

Versuchsfahrzeug

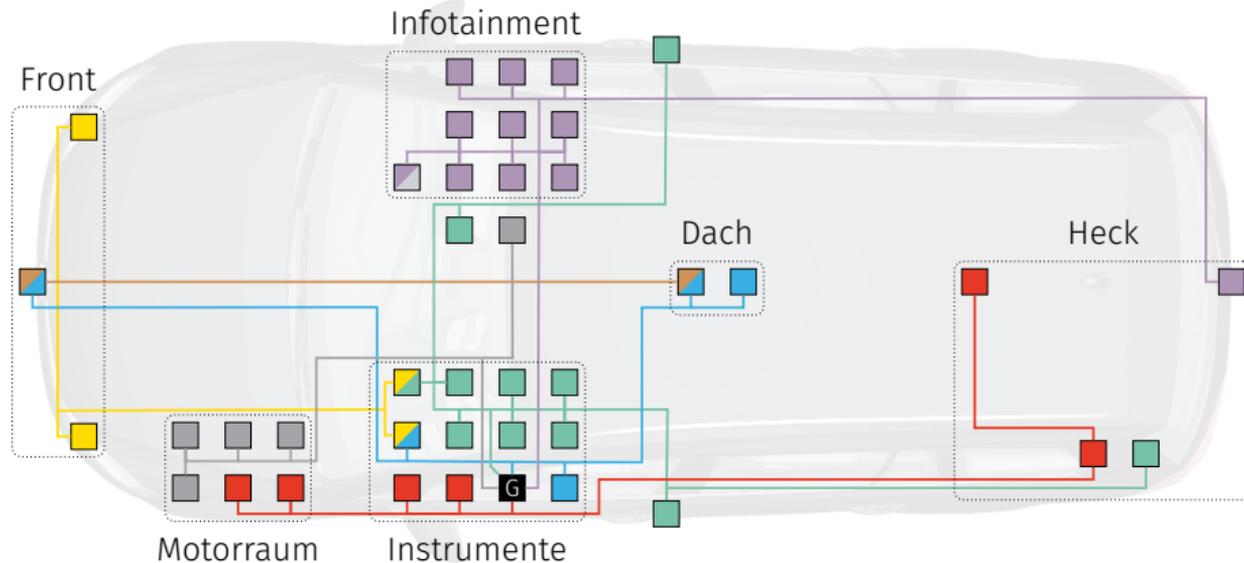
Schlussfolgerungen

Bewertung &
Ausblick



- Entwicklung von repräsentativen Topologievarianten
- Ausgangspunkt: Heutige logische Topologie in Serienfahrzeugen
- Varianten entwickelt und analysiert:
 - Domänen-Gateway-Topologie:
Erster Evolutionsschritt hin zu Ethernet, zentrales Gateway aufgeteilt in Domänen-Gateways
 - Domänen-Zonen-Topologie:
Letzter Schritt im Übergang zu Ethernet Backbone, welcher noch Busse verwendet
 - Flache Topologie:
Endstufe eines Ethernet-Fahrzeug-Backbones, alle Steuergeräte nutzen Ethernet

Heutige logische Topologie in Serienfahrzeugen



Einführung &
Hintergrund

Architekturen

Fahrzeugdatenverkehrsmod
Topologievarianten

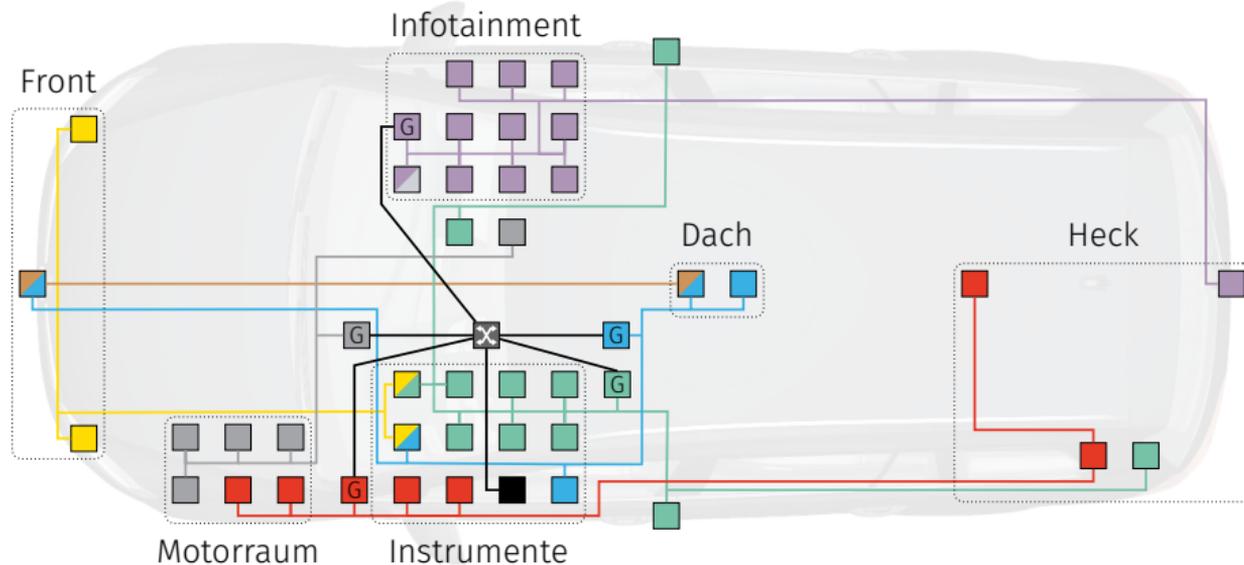
Simulation

Versuchsfahrzeug

Schlussfolgerungen

Bewertung &
Ausblick

- Entwicklung von repräsentativen Topologievarianten
- Ausgangspunkt: Heutige logische Topologie in Serienfahrzeugen
- Varianten entwickelt und analysiert:
 - Domänen-Gateway-Topologie:
Erster Evolutionsschritt hin zu Ethernet, zentrales Gateway aufgeteilt in Domänen-Gateways
 - Domänen-Zonen-Topologie:
Letzter Schritt im Übergang zu Ethernet Backbone, welcher noch Busse verwendet
 - Flache Topologie:
Endstufe eines Ethernet-Fahrzeug-Backbones, alle Steuergeräte nutzen Ethernet



Einführung &
Hintergrund

Architekturen

Fahrzeugdatenverkehrsmodi
Topologievarianten

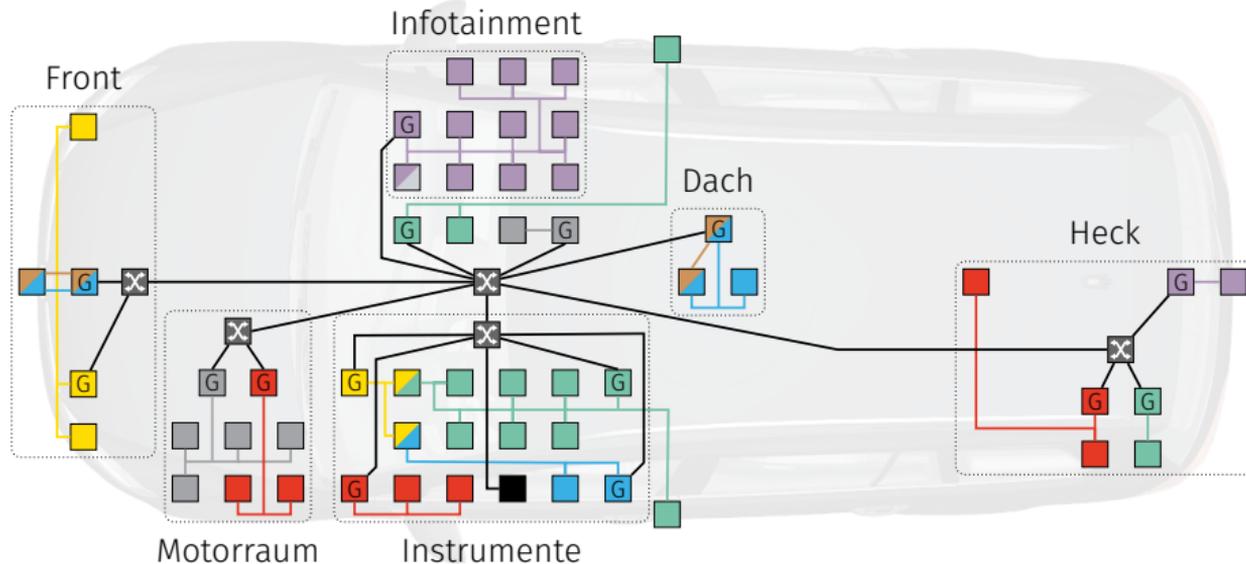
Simulation

Versuchsfahrzeug

Schlussfolgerungen

Bewertung &
Ausblick

- Entwicklung von repräsentativen Topologievarianten
- Ausgangspunkt: Heutige logische Topologie in Serienfahrzeugen
- Varianten entwickelt und analysiert:
 - Domänen-Gateway-Topologie:
Erster Evolutionsschritt hin zu Ethernet, zentrales Gateway aufgeteilt in Domänen-Gateways
 - Domänen-Zonen-Topologie:
Letzter Schritt im Übergang zu Ethernet Backbone, welcher noch Busse verwendet
 - Flache Topologie:
Endstufe eines Ethernet-Fahrzeug-Backbones, alle Steuergeräte nutzen Ethernet



Einführung &
Hintergrund

Architekturen

Fahrzeugdatenverkehrsmod
Topologievarianten

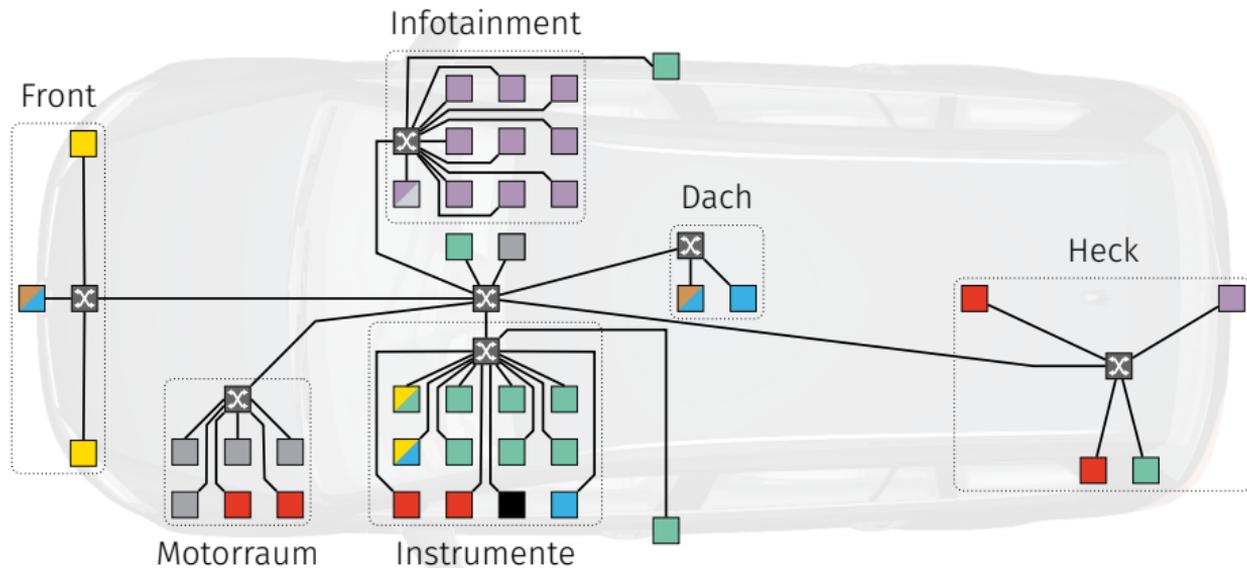
Simulation

Versuchsfahrzeug

Schlussfolgerungen

Bewertung &
Ausblick

- Entwicklung von repräsentativen Topologievarianten
- Ausgangspunkt: Heutige logische Topologie in Serienfahrzeugen
- Varianten entwickelt und analysiert:
 - Domänen-Gateway-Topologie:
Erster Evolutionsschritt hin zu Ethernet, zentrales Gateway aufgeteilt in Domänen-Gateways
 - Domänen-Zonen-Topologie:
Letzter Schritt im Übergang zu Ethernet Backbone, welcher noch Busse verwendet
 - Flache Topologie:
Endstufe eines Ethernet-Fahrzeug-Backbones, alle Steuergeräte nutzen Ethernet



Einführung &
Hintergrund

Architekturen

Fahrzeugdatenverkehrsmod
Topologievarianten

Simulation

Versuchsfahrzeug

Schlussfolgerungen

Bewertung &
Ausblick

1 Einführung & Hintergrund

2 Architekturen

3 Simulation

- Motivation
- Simulationsumgebung
- Simulationsstudien

4 Versuchsfahrzeug

5 Schlussfolgerungen

6 Bewertung & Ausblick

Einführung &
Hintergrund

Architekturen

Simulation

Motivation

Simulationsumgebung

Simulationsstudien

Versuchsfahrzeug

Schlussfolgerungen

Bewertung &
Ausblick

- Simulation ergänzt analytische Untersuchungen
- Eignet sich besonders in frühen Phasen ...
 - ... des Designs und der Evaluierung von Protokollen
 - ... der Entwicklung von Architekturen und Konfigurationen
 - ... der Vorhersage der Hardwareanforderungen
- Simulation deckt Probleme sichtbar auf (White-Box)
- Simulation erlaubt verglichen mit Prototyp schnellere Entwicklungszyklen

Einführung &
Hintergrund

Architekturen

Simulation

Motivation

Simulationsumgebung

Simulationsstudien

Versuchsfahrzeug

Schlussfolgerungen

Bewertung &
Ausblick

- Basierend auf OMNeT++-Simulationskern
- Modular aufgebaut und flexibel zu erweitern
- Analytisch¹ und empirisch² evaluiert
- Alle Modelle OpenSource veröffentlicht
- Umgebung wird bereits in akademischer Forschung und durch Fahrzeughersteller/Zulieferer eingesetzt

¹Till Steinbach, Hermand Dieumo Kenfack, Franz Korf u. a.: „An Extension of the OMNeT++ INET Framework for Simulating Real-time Ethernet with High Accuracy“.In: *Proceedings of the 4th International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques*. März 2011.

²Till Steinbach, Kai Müller, Franz Korf u. a.: „Real-time Ethernet In-Car Backbones: First Insights into an Automotive Prototype“.In: *2014 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*. Dez. 2014.

Fahrzeugnetzwerk

Abstract Network Description Language (ANDL)

SignalsAndGateways
Signalquellen, Gateways

CoRE4INET
Echtzeit-Ethernet

INET-Framework
Internetprotokolle

FiCo4OMNeT
Feldbusse (CAN und FlexRay)

oppResultManagers
Auswertung und Anbindung an externe Werkzeuge

OMNeT++
IDE und Simulationskern

Ethernet-basierte
Fahrzeugnetzwerk-
architekturen

T. Steinbach

Einführung &
Hintergrund

Architekturen

Simulation

Motivation

Simulationsumgebung

Simulationsstudien

Versuchsfahrzeug

Schlussfolgerungen

Bewertung &
Ausblick

- Untersuchung von time-triggered und event-triggered Ansätzen für Echtzeit-Kommunikation im Fahrzeug
- Beide Ansätze erfüllen grundsätzlich Anforderungen für Fahrzeugkommunikation in Netzwerken ohne Hintergrunddatenverkehr
- Time-triggered Verkehrsklasse erwartungsgemäß beste Ende-zu-Ende-Latenz und Jitter
- Ethernet AVB mit CBS nach IEEE 802.1Qav besonders geeignet für Multimedia
- Fazit: Time-Aware-Shaper-Ansatz der beide Konzepte vereint
- Gültigkeit des Time-Aware-Shaper-Konzepts in Simulation überprüft, Auswirkungen auf Scheduledesign gezeigt

- Niedrig priorisierter Datenverkehr großes Potential im Fahrzeug
- Anwendungen wie z.B. Diagnose oder Updates
- Simulationsergebnisse zeigen:
 - Für Steuerdaten beste Ergebnisse mit time-triggered Nachrichten
 - Für event-triggered Ansatz, Anstieg der Ende-zu-Ende Latenz um bis zu 500 %
 - Bis zu 15-facher Jitter

- Ethernet Frames in Standard Ethernet sind nicht unterbrechbar
- Frame-Preemption (IEEE 802.3br und IEEE 802.1Qbu) ist eine Echtzeit-Erweiterung
- Soll Auswirkungen von Hintergrunddatenverkehrs auf Echtzeitkommunikation reduzieren
- Vergleich von Architekturen mit/ohne Frame-Preemption zeigt signifikanten Rückgang der Ende-zu-Ende-Latenz
- Für Ethernet AVB sinkt maximale Latenz um zirka 77 %, für rate-constrained Datenverkehr um 70 %
- In Netzwerken mit preemption reduziert sich die zusätzliche Latenz durch Hintergrund Datenverkehr um bis zu den Faktor 10

Frame-Preemption

Simulationsergebnisse

Ethernet-basierte
Fahrzeugnetzwerk-
architekturen

T. Steinbach

Einführung &
Hintergrund

Architekturen

Simulation

Motivation

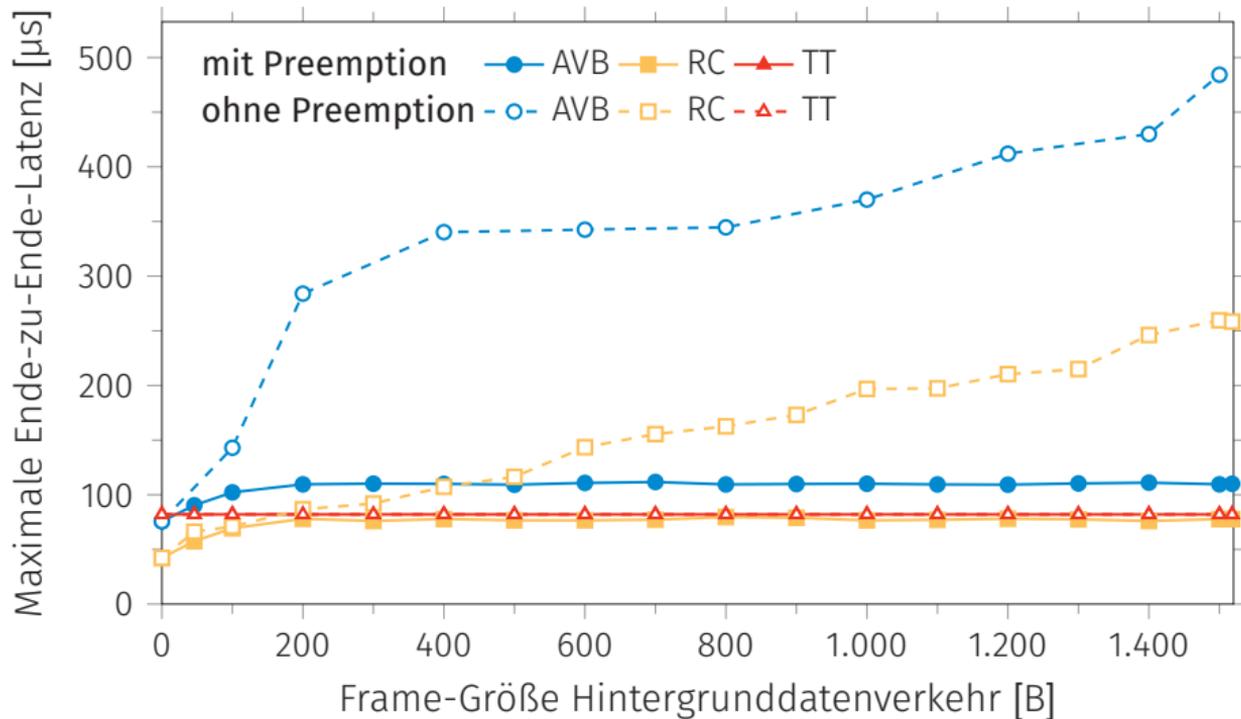
Simulationsumgebung

Simulationsstudien

Versuchsfahrzeug

Schlussfolgerungen

Bewertung &
Ausblick



- Gateway-Ansätze
- Beeinflussung von Transportprotokollen durch Echtzeit-Ethernet Traffic Shaping
- Topologievarianten
- Ergebnisse zusammengefasst zu Architekturvarianten und in der Simulation verglichen

1 Einführung & Hintergrund

2 Architekturen

3 Simulation

4 Versuchsfahrzeug

- Zielsetzung & Projektphasen
- Architektur & Umsetzung
- Ergebnisse

5 Schlussfolgerungen

6 Bewertung & Ausblick

Einführung &
Hintergrund

Architekturen

Simulation

Versuchsfahrzeug

Zielsetzung &
Projektphasen

Architektur & Umsetzung
Ergebnisse

Schlussfolgerungen

Bewertung &
Ausblick

- Serienfahrzeug (Golf 7 Variant) transparent mit einem Ethernet-Backbone ausrüsten
- Fahrzeug zusätzlich um Anwendungen mit hohem Bandbreitenbedarf erweitern
 - Sensorfusion
 - Hochauflösende Kameras
 - LiDAR (Laser-Scanner)
- 3 Phasen:
 - Laboraufbau mit allen Komponenten
 - Integration in das Serienfahrzeug, paralleler Betrieb
 - Integration in das Serienfahrzeug, reiner Echtzeit-Ethernet Betrieb



Ethernet-basierte
Fahrzeugnetzwerk-
architekturen

T. Steinbach

Einführung &
Hintergrund

Architekturen

Simulation

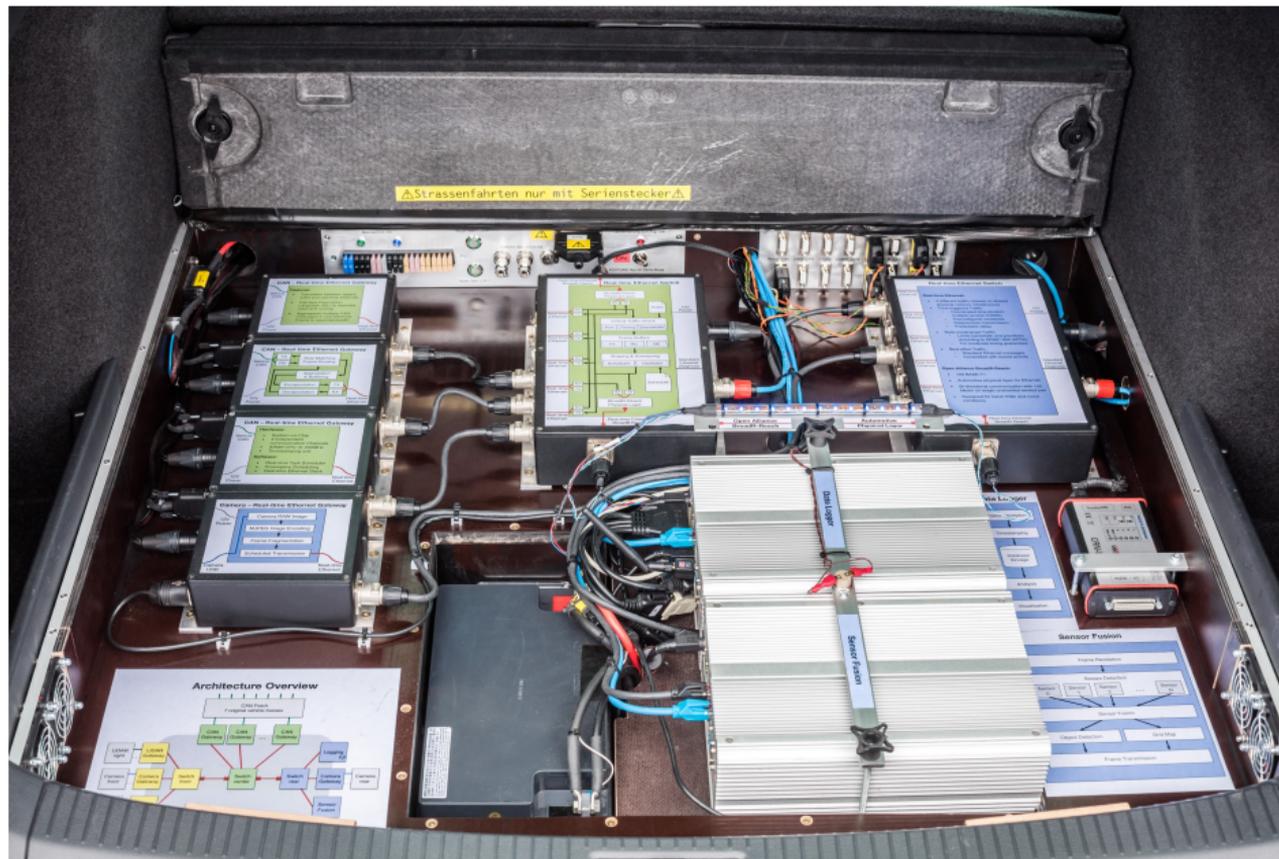
Versuchsfahrzeug

Zielsetzung &
Projektphasen

Architektur & Umsetzung
Ergebnisse

Schlussfolgerungen

Bewertung &
Ausblick



Ethernet-basierte
Fahrzeugnetzwerk-
architekturen

T. Steinbach

Einführung &
Hintergrund

Architekturen

Simulation

Versuchsfahrzeug

Zielsetzung &
Projektphasen

Architektur & Umsetzung
Ergebnisse

Schlussfolgerungen

Bewertung &
Ausblick



Ethernet-basierte
Fahrzeugnetzwerk-
architekturen

T. Steinbach

Einführung &
Hintergrund

Architekturen

Simulation

Versuchsfahrzeug

Zielsetzung &
Projektphasen

Architektur & Umsetzung
Ergebnisse

Schlussfolgerungen

Bewertung &
Ausblick



Ethernet-basierte
Fahrzeugnetzwerk-
architekturen

T. Steinbach

Einführung &
Hintergrund

Architekturen

Simulation

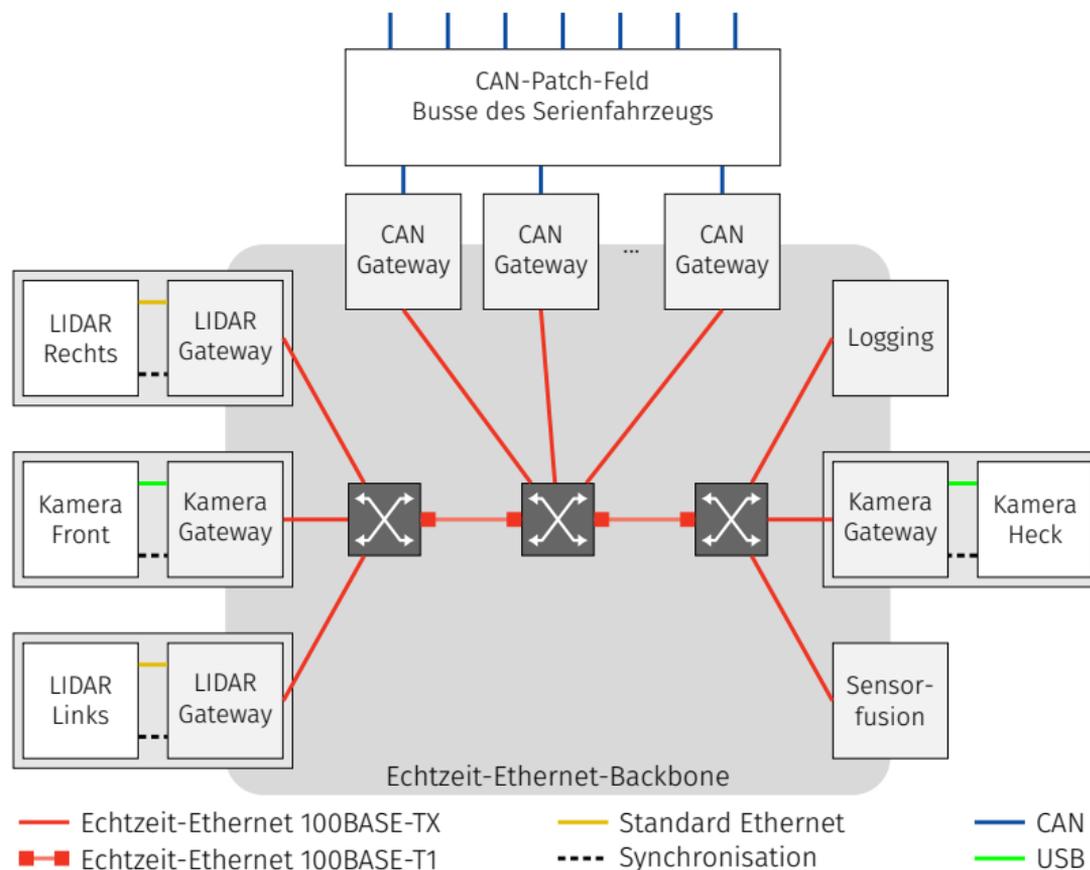
Versuchsfahrzeug

Zielsetzung &
Projektphasen

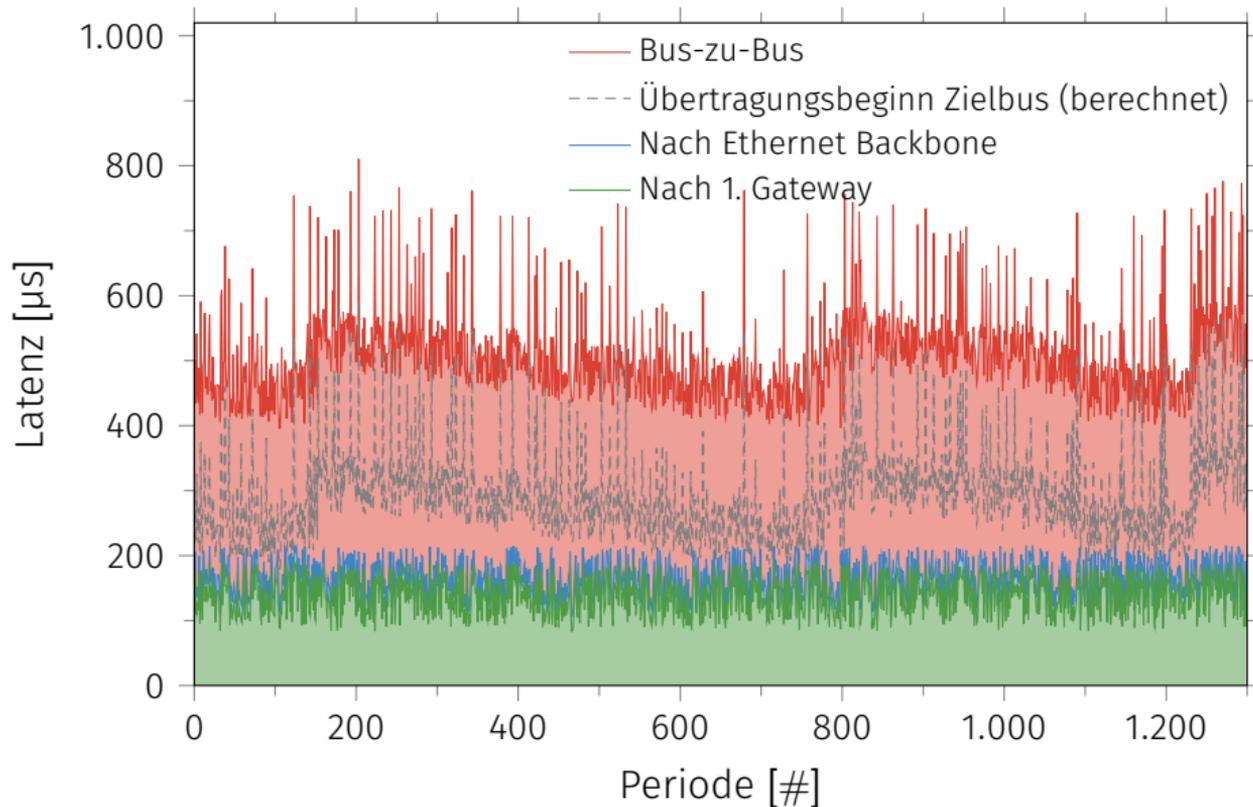
Architektur & Umsetzung
Ergebnisse

Schlussfolgerungen

Bewertung &
Ausblick



- Der Ethernet-Backbone wurde durch Zeitmessungen analysiert und mit dem Seriennetzwerk verglichen
- Die durch das Netzwerk eingebrachte Latenz ist annähernd konstant
- Im Vergleich zur CAN-Kommunikation ist die Verzögerung gering
- Verglichen mit dem Seriengateway verbessert sich die Latenzverteilung sogar



Ethernet-basierte
Fahrzeugnetzwerk-
architekturen

T. Steinbach

Einführung &
Hintergrund

Architekturen

Simulation

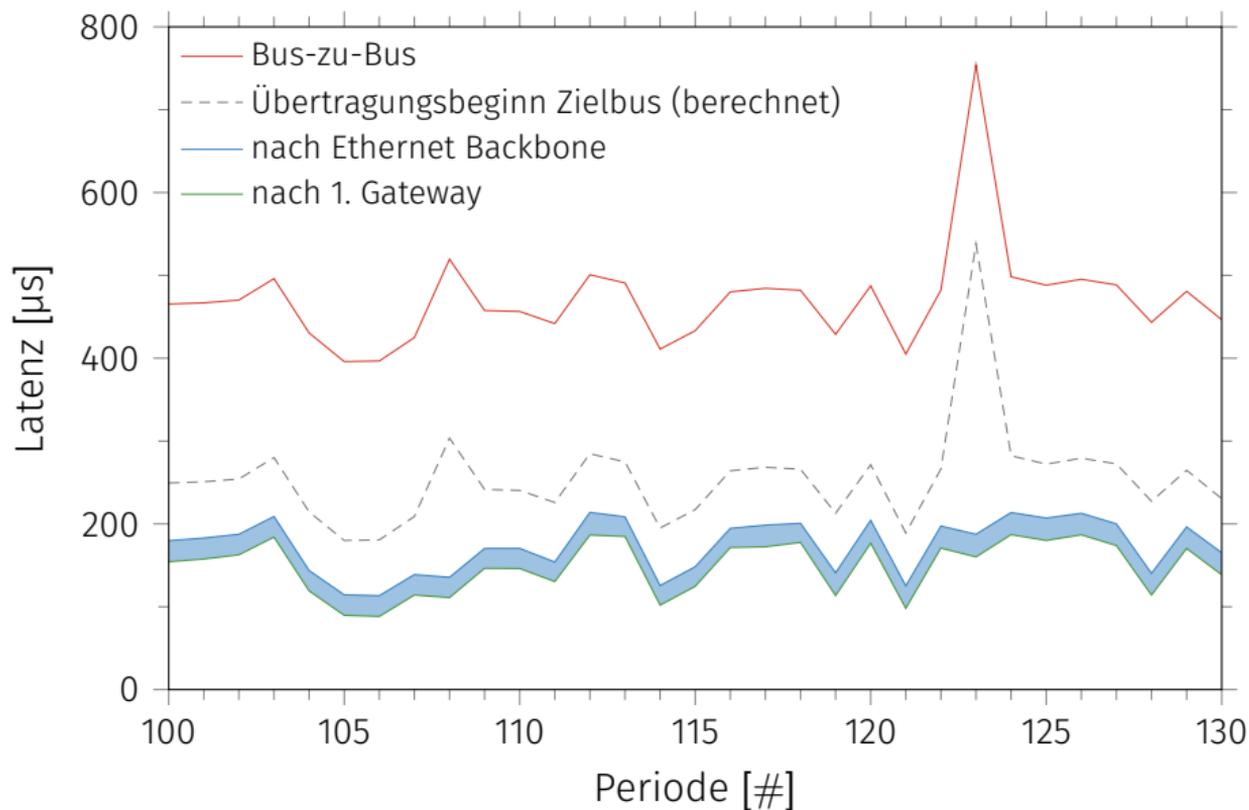
Versuchsfahrzeug

Zielsetzung &
Projektphasen

Architektur & Umsetzung
Ergebnisse

Schlussfolgerungen

Bewertung &
Ausblick



Ethernet-basierte
Fahrzeugnetzwerk-
architekturen

T. Steinbach

Einführung &
Hintergrund

Architekturen

Simulation

Versuchsfahrzeug

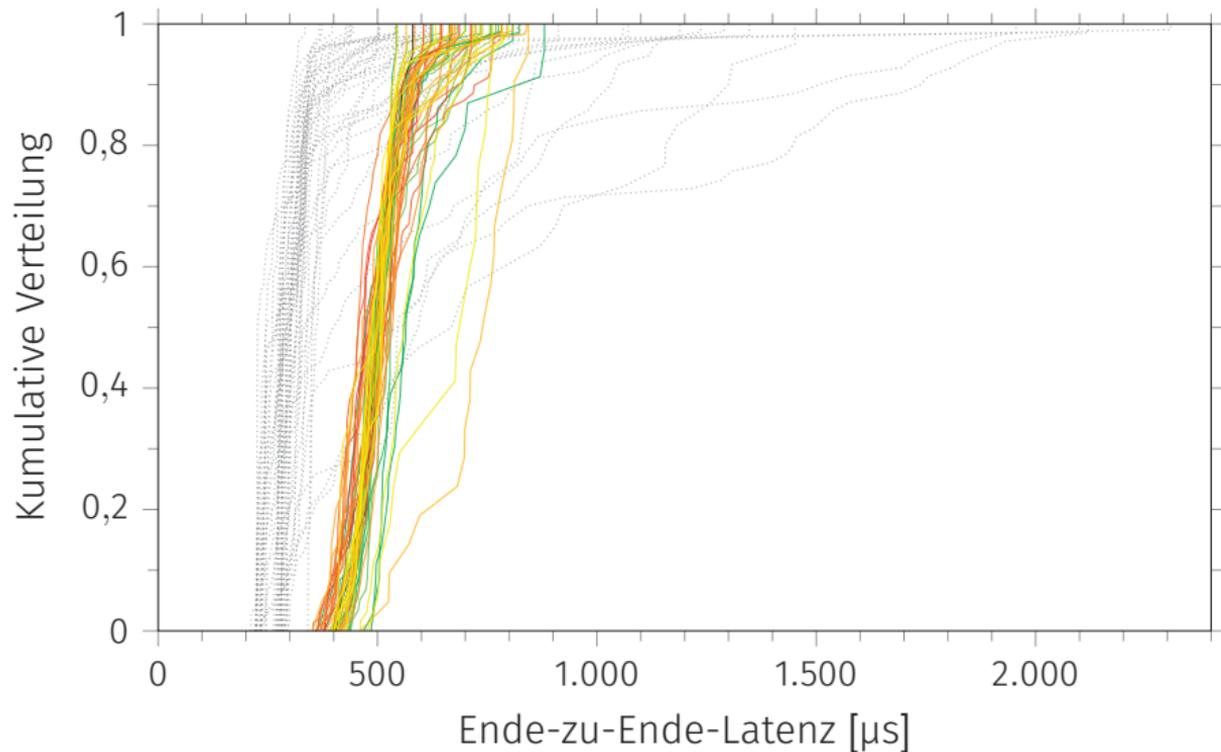
Zielsetzung &
Projektphasen

Architektur & Umsetzung
Ergebnisse

Schlussfolgerungen

Bewertung &
Ausblick

- Der Ethernet-Backbone wurde durch Zeitmessungen analysiert und mit dem Seriennetzwerk verglichen
- Die durch das Netzwerk eingebrachte Latenz ist annähernd konstant
- Im Vergleich zur CAN-Kommunikation ist die Verzögerung gering
- Verglichen mit dem Seriengateway verbessert sich die Latenzverteilung sogar



Ethernet-basierte
Fahrzeugnetzwerk-
architekturen

T. Steinbach

Einführung &
Hintergrund

Architekturen

Simulation

Versuchsfahrzeug

Zielsetzung &
Projektphasen

Architektur & Umsetzung

Ergebnisse

Schlussfolgerungen

Bewertung &
Ausblick

- Der Ethernet-Backbone wurde durch Zeitmessungen analysiert und mit dem Seriennetzwerk verglichen
- Die durch das Netzwerk eingebrachte Latenz ist annähernd konstant
- Im Vergleich zur CAN-Kommunikation ist die Verzögerung gering
- Verglichen mit dem Seriengateway verbessert sich die Latenzverteilung sogar

1 Einführung & Hintergrund

2 Architekturen

3 Simulation

4 Versuchsfahrzeug

5 Schlussfolgerungen
■ Designempfehlungen

6 Bewertung & Ausblick

Einführung &
Hintergrund

Architekturen

Simulation

Versuchsfahrzeug

Schlussfolgerungen

Designempfehlungen

Bewertung &
Ausblick

- Kommunikationsdesign
 - Schedule
 - Shaping von Hintergrunddatenverkehr
 - Begrenzung der MTU
 - Transportprotokolle
- Topologiedesign
- Linkgeschwindigkeit
- Preemption
- ...

1 Einführung & Hintergrund

2 Architekturen

3 Simulation

4 Versuchsfahrzeug

5 Schlussfolgerungen

6 Bewertung & Ausblick

- Zusammenfassung
- Ausblick

Einführung &
Hintergrund

Architekturen

Simulation

Versuchsfahrzeug

Schlussfolgerungen

**Bewertung &
Ausblick**

Zusammenfassung

Ausblick

- Fahrzeugnetzwerkarchitekturen definiert, in Simulationsstudien untersucht und systematisch verglichen
- Architekturvarianten entwickelt, welche Probleme heutiger Fahrzeugnetzwerke lösen
- Realistische Datenverkehrsmodelle aus Spezifikationen und Traces realer Serienfahrzeuge abgeleitet
- Simulationsumgebung für heterogene Fahrzeugnetzwerke entwickelt: Erlaubt tiefen Einblick in das Systemverhalten umfangreicher Ethernet-basierter Architekturen
- In Simulation in ca. 268 CPU-Stunden knapp 100 Designs mit 530 GB Ergebnissen simuliert
- Datenbasis für zukünftige Entscheidungen beim Design von Fahrzeugnetzwerken und Entwicklung neuer oder erweiterter Echtzeitprotokolle

- Erste umfassende Studie zu zukünftigen Echtzeit-Ethernet-basierten Fahrzeugnetzwerkarchitekturen basierend auf realistischen Datenverkehrsmodellen
- Reales Prototypfahrzeug zur Erprobung ausgewählter Aspekte der Simulationsstudien
- Empirische Untersuchung im Prototyp zeigt Gültigkeit der Simulation
- Gezeigt wie zukünftige Kommunikationsarchitekturen transparent integrierbar
- Designvorschläge für zukünftige Kommunikationsnetzwerke im Automobil
- Ansätze und Richtwerte können bereits in Designphase Probleme im Netzwerk verhindern und Netzwerkmetriken verbessern

Themen mit zukünftig großer Bedeutung:

■ Security:

- Ethernet als offene und verbreitete Standardtechnologie senkt technische Hürde für Zugriff
- Gleichzeitig erstmals Möglichkeiten wie Segmentierung durch VLANs und Bandbreite für Verschlüsselungs- und Authentifizierungsalgorithmen
- Nutzung von ausgereiften abgesicherten (Internet-)Protokollen

■ Redundanz:

- Im Automobilbereich bisher weitgehend ungenutzt
- Sicherheit bisher durch Eingreifen des Fahrers sowie physikalische Rückfallsysteme
- Redundanz hat in Anwendungsbereichen wie Avionik bereits große Bedeutung
- Mit hochautomatisierten (Level 4) und autonomen Fahrzeugen (Level 5) auch im Automobil notwendig



Vielen Dank für Ihr Interesse!

- **Webseite der CoRE-Arbeitsgruppe (HAW Hamburg):**
Publikationen, Berichte, OpenSource Software, ...
<http://www.haw-hamburg.de/core>

- [1] Till Steinbach, Hermand Dieumo Kenfack, Franz Korf und Thomas C. Schmidt. „An Extension of the OMNeT++ INET Framework for Simulating Real-time Ethernet with High Accuracy“. In: *Proceedings of the 4th International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques*. Barcelona, Spain: ACM-DL, März 2011, S. 375–382.
- [2] Till Steinbach, Kai Müller, Franz Korf und René Röllig. „Real-time Ethernet In-Car Backbones: First Insights into an Automotive Prototype“. In: *2014 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*. Paderborn: IEEE Press, Dez. 2014, S. 137–138.