

Ethernet-basierte Fahrzeugnetzwerkarchitekturen für zukünftige Echtzeitsysteme im Automobil

Von der Fakultät für Informatik, Wirtschafts- und Rechtswissenschaften
der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
zur Erlangung des Grades und Titels eines

Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

angenommene Dissertation

von Herrn Till Steinbach
geboren am 13.08.1984 in Hamburg

Gutachter: Prof. Dr. Werner Damm

Weiterer Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Franz Korf

Tag der Disputation: 23. Mai 2018

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XV
Listings	XVII
Verzeichnis der Farbkodierung	XIX
Abkürzungsverzeichnis	XXI
Glossar	XXVII
1 Einführung	1
1.1 Motivation	3
1.2 Problemstellung	6
1.3 Zielsetzung, Forschungsansatz und methodisches Vorgehen	7
1.4 Aufbau der Arbeit	10
2 Stand der Wissenschaft und Technik	11
2.1 Stand der Technik	11
2.1.1 Heutige Fahrzeugnetzwerktechnologien	11
2.1.2 Ethernet	22
2.1.3 Echtzeit-Ethernet-Protokolle	27
2.2 Stand der Wissenschaft	43
2.2.1 Sicherheit in eingebetteten IP-basierten Systemen	43
2.2.2 Protokollvergleiche	46
2.2.3 Time-triggered Kommunikation	48
2.2.4 Simulation	49
2.2.5 Formale Zeitanalyse	50
2.2.6 Topologien	53
2.2.7 Gateways	53
2.2.8 Anwendungen	55
2.2.9 Modellbasierte Entwicklung	56

2.3	Zusammenfassung und resultierender Handlungsbedarf	57
3	Bewertungsgrundlage und Elemente zukünftiger Architekturen.	59
3.1	Anforderungen und Netzwerkmetriken	59
3.1.1	Bandbreite	59
3.1.2	Latenz	60
3.1.3	Jitter	62
3.2	Fahrzeugdatenverkehrsmodelle	63
3.2.1	Allgemeines Seriidatenverkehrsmodell.	63
3.2.2	Komprimiertes domänenbasiertes Datenverkehrsmodell	67
3.3	Topologien für Ethernet-basierte Fahrzeugnetze	71
3.3.1	Heutige Topologie in Serienfahrzeugen	72
3.3.2	Domänen-Gateway-Topologie.	73
3.3.3	Domänen-Zonen-Topologie	74
3.3.4	Flache Topologie	76
3.4	Kommunikationstechnologien und -strategien	77
3.4.1	Global geplante Kommunikation und Überprovisionierung	77
3.4.2	Deterministische Übertragung	81
3.4.3	Limitierung von Frame-Größen — Runts und Giants	90
3.5	Gateway-Architekturen	94
3.5.1	Tunnel-Gateways	95
3.5.2	Übersetzende Gateways.	99
4	Evaluierung in der Simulation	103
4.1	DES (Diskrete ereignisbasierte Simulation)	105
4.2	Simulationsumgebung	107
4.2.1	Simulationsplattform OMNeT++	107
4.2.2	Fahrzeugnetzwerksimulation	110
4.2.3	Echtzeit-Ethernet-Modelle	111
4.2.4	Feldbusmodelle.	114
4.2.5	Gateway-Modelle	116
4.2.6	Werkzeugkette	117
4.2.7	Absicherung der Gültigkeit der Simulationsergebnisse	135
4.3	Referenzarchitektur (Serienfahrzeug)	137
4.3.1	Hintergrund zur Fragestellung	137
4.3.2	Untersuchungsszenario	137
4.3.3	Ergebnisse der Simulation	138
4.3.4	Diskussion der Ergebnisse	141

4.4	Time-triggered und event-triggered Echtzeit-Ethernet	143
4.4.1	Hintergrund zur Fragestellung	143
4.4.2	Untersuchungsszenario	144
4.4.3	Ergebnisse der Simulation	146
4.4.4	Diskussion der Ergebnisse	150
4.5	Time-Aware-Shaper-Konzept	152
4.5.1	Hintergrund zur Fragestellung	153
4.5.2	Untersuchungsszenario	159
4.5.3	Ergebnisse der Simulation	161
4.5.4	Diskussion der Ergebnisse	170
4.6	Hintergrunddatenverkehr im Echtzeit-Ethernet.	171
4.6.1	Hintergrund der Fragestellung	172
4.6.2	Untersuchungsszenario	172
4.6.3	Ergebnisse der Simulation	174
4.6.4	Diskussion der Ergebnisse	179
4.7	Frame Preemption im Fahrzeugnetzwerk	181
4.7.1	Hintergrund der Fragestellung	181
4.7.2	Untersuchungsszenario	183
4.7.3	Ergebnisse der Simulation	184
4.7.4	Diskussion der Ergebnisse	188
4.8	Transportprotokolle und Echtzeit-Ethernet Traffic Shaping	189
4.8.1	Hintergrund der Fragestellung	189
4.8.2	Untersuchungsszenario	191
4.8.3	Ergebnisse der Simulation	193
4.8.4	Diskussion der Ergebnisse	197
4.9	Netzwerkarchitekturen	198
4.9.1	Hintergrund der Fragestellung	199
4.9.2	Untersuchungsszenario	199
4.9.3	Ergebnisse der Simulation	203
4.9.4	Diskussion der Ergebnisse	215
5	Evaluierung im Versuchsfahrzeug	221
5.1	Zielsetzung und Projektphasen	222
5.2	Ausgangsfahrzeug	222
5.3	Komponenten	224
5.3.1	Kameras und Bildkodierung	224
5.3.2	Laser-Scanner.	225
5.3.3	Switche und Physical Layer	227
5.3.4	ECUs und Software	228

5.3.5 Weitere Komponenten	233
5.4 Umsetzung	233
5.4.1 Architektur und Topologie	234
5.4.2 Datenströme und Netzwerkprotokolle	236
5.5 Ergebnisse	239
5.5.1 Funktionale Ergebnisse	239
5.5.2 Leistungsmessung	240
5.5.3 Diskussion der Ergebnisse	252
6 Schlussfolgerungen und Designempfehlungen	255
6.1 Diskussion der Untersuchungsergebnisse	255
6.2 Designempfehlungen und Best Practices	259
6.2.1 Kommunikationsdesign	259
6.2.2 Topologiedesign	264
6.2.3 Linkgeschwindigkeit	266
6.2.4 Preemption	267
6.2.5 Zeitsynchronisierung	268
6.2.6 Implementierung	269
6.2.7 Werkzeuge und Fehlersuche	270
7 Zusammenfassung, Bewertung und Ausblick	271
7.1 Zusammenfassung	271
7.2 Bewertung	283
7.3 Ausblick	284
A Überblick über Forschungsfragen	287
B Datenverkehrsmodelle	291
B.1 Allgemeines Seriendatenverkehrsmodell	291
B.2 Komprimiertes domänenbasiertes Datenverkehrsmodell	300
C Abstract Network Description Language	303
Ausgewählte Veröffentlichungen des Autors	307
Literatur	311
Mitbetreute Abschlussarbeiten	331
Sachregister	335

Zusammenfassung

Das Fahrzeugkommunikationsnetzwerk von Automobilen befindet sich derzeit in einem starken Wandel. Neue Anwendungen aus den Bereichen der Fahrerassistenzsysteme und des Infotainments sowie insbesondere das automatisierte und autonome Fahren haben einen weit höheren Bedarf an leistungsfähigen Kommunikationsverbindungen, als die bisher im Automobil eingesetzten Technologien garantieren können. Dies gilt insbesondere für neue Sensorik wie beispielsweise Kameras, Radar und Laser-Scanner, welche die Umwelt mit einem hohen Detailgrad aufzeichnen und dafür höhere Bandbreiten als bisherige Systeme übertragen müssen. Echtzeit-Ethernet ist die favorisierte Lösung für die Herausforderungen zukünftiger Fahrzeugnetzwerke; es wurden jedoch, trotz des Bekenntnisses großer Automobilhersteller zu Automotive-Ethernet, bisher keine umfassenden und auf realistischen Datenverkehrsmodellen basierenden Architekturanalysen durchgeführt.

Die vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag zum Design und zur Bewertung neuer Ethernet-basierter Fahrzeugnetzwerkarchitekturen. Sie liefert Werkzeuge für die simulationsbasierte Analyse und Beurteilung von Netzwerkarchitekturen und evaluiert anhand konkreter Anwendungen, beispielsweise aus dem Bereich der Sensorfusion, und realistischer auf realen Verkehrsdaten aufbauender Szenarien mögliche Netzwerkdesigns und Konfigurationen. Dabei wird auch der schrittweise Übergang von Legacy-Technologien hin zu einem rein Echtzeit-Ethernet-basierten Fahrzeugnetzwerk berücksichtigt. Ein schrittweiser Migrationspfad ist eine wichtige Anforderung für einen erfolgreichen Einsatz im Automobil. Auf Basis der hierbei aus analytischen Modellen sowie Simulationsstudien und einem realen Fahrzeugprototyp gewonnenen Erkenntnisse werden Designempfehlungen für die Entwicklung zukünftiger Ethernet-basierter Fahrzeugnetzwerke ausgesprochen.

Methodisch kommt in der vorliegenden Arbeit insbesondere die Netzwerksimulation zum Einsatz. Für die Bewertung neuer Fahrzeugnetzwerkarchitekturen werden Werkzeuge zur Simulation und Analyse zukünftiger heterogener Echtzeit-Ethernet-Backbones entwickelt. Damit stellt die Arbeit eine leistungsfähige Open-Source-Simulationsumgebung für die Analyse zukünftiger Fahrzeugnetzwerke bereit, welche in Forschung und Entwicklung frei ver-

wendet und weiterentwickelt werden kann. Mithilfe eines Prototypfahrzeugs werden die in der Simulation sowie in analytischen Modellen untersuchten Aspekte in einer realen Fahrzeugumgebung überprüft. Die Untersuchung im Prototyp weist die Realisierbarkeit der entwickelten Ansätze nach und zeigt auf, an welcher Stelle Herausforderungen und Handlungsbedarfe bei der Implementierung der entwickelten Konzepte bestehen.

Die Ergebnisse der Untersuchung führen zu Designempfehlungen und Best Practices für zukünftige Backbone-Netzwerke im Automobil. Diese umfassen unter anderem das Kommunikationsdesign, den Einsatz von Echtzeitverkehrsklassen, die Optimierung von Hintergrunddatenverkehr und die Entwicklung geeigneter Netzwerktopologien. Es wird gezeigt, dass sich die im Backbone-Netzwerk erreichbaren Kennzahlen unter Einhaltung der Designempfehlungen um ein Vielfaches verbessern lassen.

Abstract

Communication in car networks is currently undergoing a major change. New applications from the areas of advanced driver assistance, infotainment and in particular highly automated and autonomous driving foster the demand for high performance communication links that cannot be satisfied with legacy technologies such as CAN or FlexRay. New environmental sensors such as cameras, radar, or laser scanners raise bandwidth requirements in particular. Realtime Ethernet is the favoured solution to cope with these challenges of future in-car networks. Although large automobile companies confirm their interest in automotive Ethernet technologies, there are no comprehensive architectural analyses nor performance studies based on realistic in-car traffic models yet.

This work contributes to the design and assessment of new Ethernet based in-car networks. It provides tools for the analysis and evaluation of architectures and assesses network configurations based on selected applications, such as sensor fusion, as well as communication patterns from realistic scenarios of real series cars. As a major result, design recommendations and best practices for the development of future in-car network architectures are given.

Network simulation is particularly used throughout this work. A toolchain for simulating and analyzing new heterogeneous realtime Ethernet backbones is provided. This toolchain covers the gradual transition from today's legacy technologies to a solely Ethernet based network. It provides an open source simulation environment capable of analyzing future in-car communication that can be used for research and development. By deploying a prototype car, the results from analytical models and simulation are examined in a real vehicular environment. It is shown that today's fieldbus technologies can be transparently consolidated in a new communication architecture. The empirical study performed with the prototype proves that the developed approach is feasible and reveals the areas of further challenges and additional efforts in implementation.

The results of the analytical model, the simulation and the study in the prototype result in design recommendations and best practices for a future backbone network in the automobile. The recommendations include, the

communication design, the use of realtime traffic classes, the optimization of crosstraffic scenarios and the design of suitable network topologies. It is shown that a backbone network can significantly improve performance when complying to the recommended design rules.