

**Echtzeit-Ethernet  
für Anwendungen im Automobil:  
Metriken und deren simulationsbasierte Evaluierung  
am Beispiel von TTEthernet**

Till Steinbach  
till.steinbach@informatik.haw-hamburg.de

Kolloquium am 14. März 2011

**1** Einführung

**2** Hintergrund

**3** Metriken

**4** Konzept & Umsetzung

**5** Verifikation, Ergebnisse & Fallstudie

**6** Fazit und Ausblick

Einführung

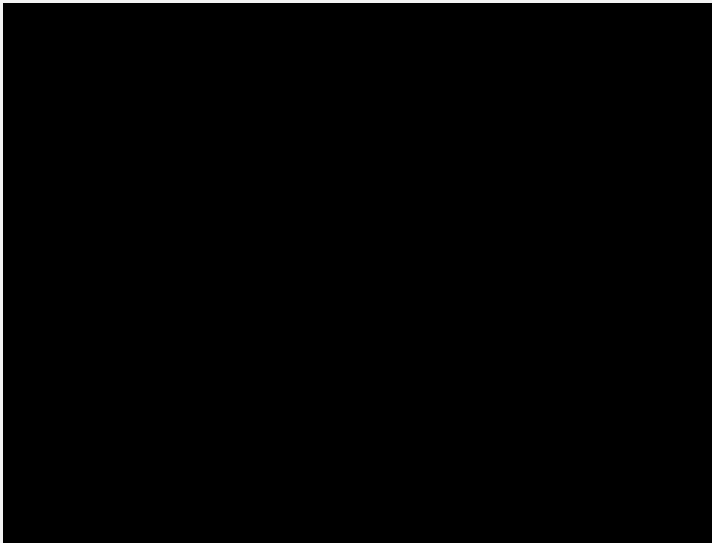
Hintergrund

Metriken

Konzept & Umsetzung

Verifikation,  
Ergebnisse & Fallstudie

Fazit und Ausblick



*„Eigentlich ist das Bordnetz im Gesamtfahrzeug bereits heute nicht mehr vernünftig zu beherrschen“ und „Die Komplexität steigt weiter“<sup>1</sup>*

**Richard Bogenberger (2008)**  
BMW Group Forschung und Technik

<sup>1</sup> Jens Badstübner: „Kollaps im Bordnetz: Schluss mit Can, Lin und Flexray“. 2008.

- Bewährte Technologie
- Hohe Übertragungs-Bandbreite  
(in Zukunft >100 Gigabit pro Sekunde)
- Entkopplung des Protokolls vom  
Übertragungsmedium (Kupfer, LWL)
- Günstige Preise für Ethernet-Komponenten
- Sehr viele Entwicklungs- und Diagnosewerkzeuge  
und fachkundige Entwickler

Einführung

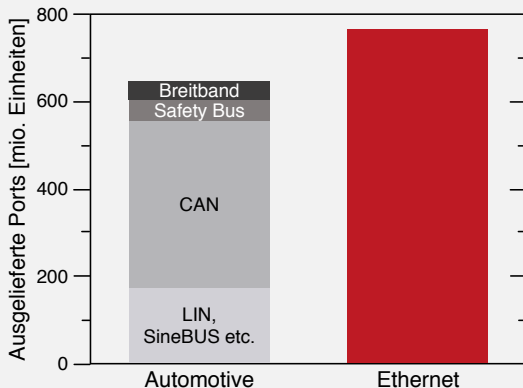
Hintergrund

Metriken

Konzept & Umsetzung

Verifikation,  
Ergebnisse & Fallstudie

Fazit und Ausblick



Ausgelieferte Einheiten in 2010<sup>2</sup>  
Automotive-Systeme und Ethernet

<sup>2</sup> Robert Bruckmeier: *Ethernet for Automotive Applications*. Juni 2010.

- Unterstützt die verteilte Entwicklung
- Ermöglicht frühe Aussagen zur Leistungsfähigkeit
- Günstiger als umfangreiche Tests mit realer Hardware
- Schnellere Zyklen in der Entwicklung als mit realer Hardware

Einführung

Hintergrund

Metriken

Konzept & Umsetzung

Verifikation,  
Ergebnisse & Fallstudie

Fazit und Ausblick

Simulationsbasierter Evaluierungsprozess:

- der charakteristische Metriken ermittelt
- der einfach zu bedienen ist
- der mit vorhandenen Werkzeugen interagiert
- dessen Ergebnisse übertragbar sind



**1** Einführung

**2** Hintergrund

**3** Metriken

**4** Konzept & Umsetzung

**5** Verifikation, Ergebnisse & Fallstudie

**6** Fazit und Ausblick

Einführung

Hintergrund

Metriken

Konzept & Umsetzung

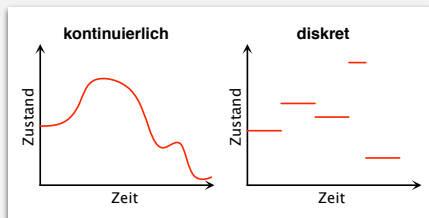
Verifikation,  
Ergebnisse & Fallstudie

Fazit und Ausblick

- Standard-Switched-Ethernet ursprünglich nicht echtzeitfähig
- 3 Klassen von Echtzeit-Erweiterungen
  - *time-triggered*  
z.B. Profinet, SynqNet, RTnet, POWERLINK, TTEthernet
  - *token-basiert*  
z.B. EtherCAT
  - *bandbreitenbasiert*  
z.B. Avionics Full Duplex Switched Ethernet (AFDX)

- Grundlagen TU Wien, heute TTTech Computertechnik AG
  
- 3 Nachrichtenarten:
  - *Time-triggered*  
höchste Priorität, zeitgesteuert, zyklisch, offline geplant,
  - *Rate-constrained*  
Event-gesteuert, bandbreitenbasiert (AFDX)
  - *Best-effort*  
geringste Priorität, Standard-Ethernet
  
- Fehlergesichertes Synchronisierungsprotokoll

- kontinuierliche oder diskrete Modelle
- OMNeT++: Plattform für die diskrete Event-basierte Simulation
- INET-Framework: Implementierung der standard Netzwerk-Protokolle für OMNeT++



**1** Einführung

**2** Hintergrund

**3** Metriken

**4** Konzept & Umsetzung

**5** Verifikation, Ergebnisse & Fallstudie

**6** Fazit und Ausblick

Einführung

Hintergrund

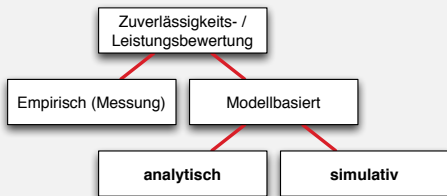
**Metriken**

Konzept & Umsetzung

Verifikation,  
Ergebnisse & Fallstudie

Fazit und Ausblick

- Metrik: Begriff für Kennzahlen in Physik und Technik
- Qualitätsangabe (Absolutbewertung) oder Vergleichbarkeit verschiedener Systeme (Relativbewertung)
- Objektive Grundlage für Aussagen zum technologischen und wirtschaftlichen Erfolg
- Verschiedene Methoden um Metriken zu ermitteln



### Ökonomische Metriken

Anschaffungskosten  
Entwicklungskosten  
Installationskosten  
Unterhaltskosten

### Verlässlichkeits- Metriken

Zuverlässigkeit  
Wartbarkeit  
Verfügbarkeit  
Paketverlustrate

### Leistungs- Metriken

Latenz  
Jitter  
Bandbreite  
Zykluslänge  
Anzahl Botschaften  
Energieverbrauch  
Rechenaufwand  
Start-Geschwindigkeit  
EMV  
Gewicht  
Abmessung

Einführung

Hintergrund

Metriken

Konzept & Umsetzung

Verifikation,  
Ergebnisse & Fallstudie

Fazit und Ausblick

*Nicht alle Metriken eignen sich für die Event-basierte Simulation!*

1 Einführung

2 Hintergrund

3 Metriken

**4 Konzept & Umsetzung**

5 Verifikation, Ergebnisse & Fallstudie

6 Fazit und Ausblick

Einführung

Hintergrund

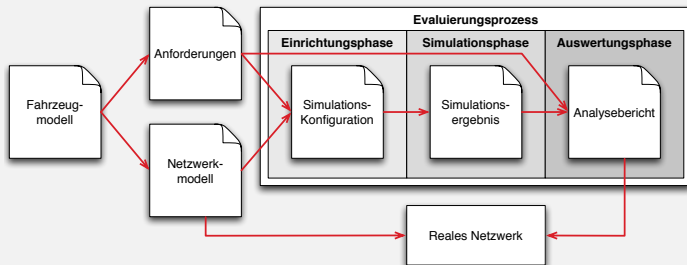
Metriken

**Konzept & Umsetzung**

Verifikation,  
Ergebnisse & Fallstudie

Fazit und Ausblick





Simulationsbasierte  
Evaluierung von  
Echtzeit-Ethernet

T. Steinbach

Einführung

Hintergrund

Metriken

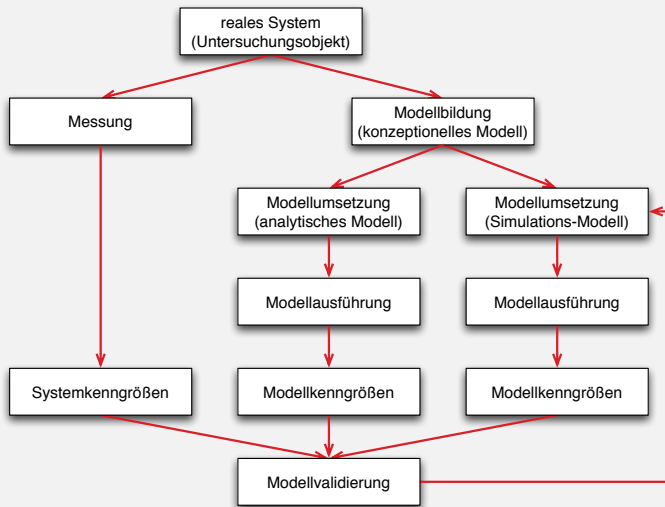
Konzept & Umsetzung

Verifikation,  
Ergebnisse & Fallstudie

Fazit und Ausblick

# Modellierung

## Schritte in der Modellierung und Modellvalidierung



- 1 Einführung
- 2 Hintergrund
- 3 Metriken
- 4 Konzept & Umsetzung
- 5 Verifikation, Ergebnisse & Fallstudie**
- 6 Fazit und Ausblick

Einführung

Hintergrund

Metriken

Konzept & Umsetzung

**Verifikation,  
Ergebnisse & Fallstudie**

Fazit und Ausblick

- Protokollkonformität
- Simulationsperformance
- Präzision des Simulationsmodells

Einführung

Hintergrund

Metriken

Konzept & Umsetzung

Verifikation,  
Ergebnisse & Fallstudie

Fazit und Ausblick

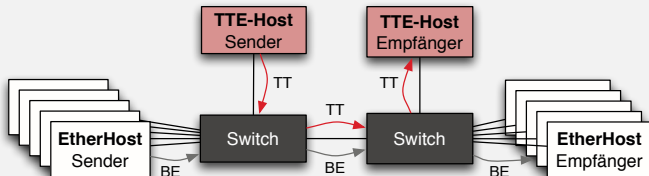
# Verifikation der Protokollkonformität

## Simulierte Topologie



Simulationsbasierte  
Evaluierung von  
Echtzeit-Ethernet

T. Steinbach



Einführung

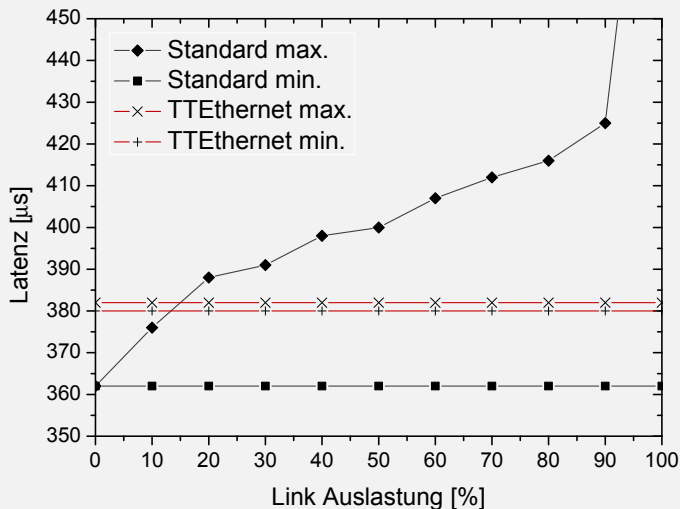
Hintergrund

Metriken

Konzept & Umsetzung

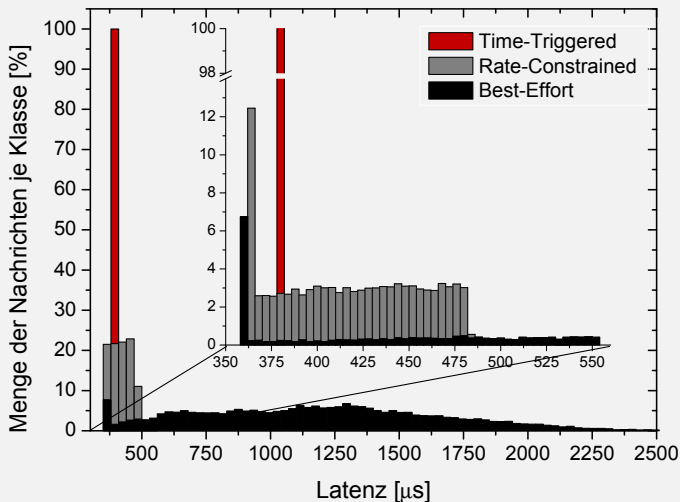
Verifikation,  
Ergebnisse & Fallstudie

Fazit und Ausblick



# Verifikation der Protokollkonformität

Ergebnisse — Latenzverteilung der unterschiedlichen Traffic-Klassen



Simulationsbasierte  
Evaluierung von  
Echtzeit-Ethernet

T. Steinbach

Einführung

Hintergrund

Metriken

Konzept & Umsetzung

Verifikation,  
Ergebnisse & Fallstudie

Fazit und Ausblick

# Präzision des Simulationsmodells

Vergleich von Simulationsmodell, analytischem Modell und Messung



Simulationsbasierte  
Evaluierung von  
Echtzeit-Ethernet

T. Steinbach

Einführung

Hintergrund

Metriken

Konzept & Umsetzung

Verifikation,  
Ergebnisse & Fallstudie

Fazit und Ausblick

Payload	Simulation	Theorie	Messung
<i>350 <math>\mu</math>s Schedule</i>			
minimum	360,5 $\mu$ s	360,245 $\mu$ s	360 $\mu$ s
maximum	593,0 $\mu$ s	592,885 $\mu$ s	592 $\mu$ s
<i>9 <math>\mu</math>s Schedule</i>			
minimum	19,5 $\mu$ s	19,245 $\mu$ s	-
maximum	252,0 $\mu$ s	251,885 $\mu$ s	-

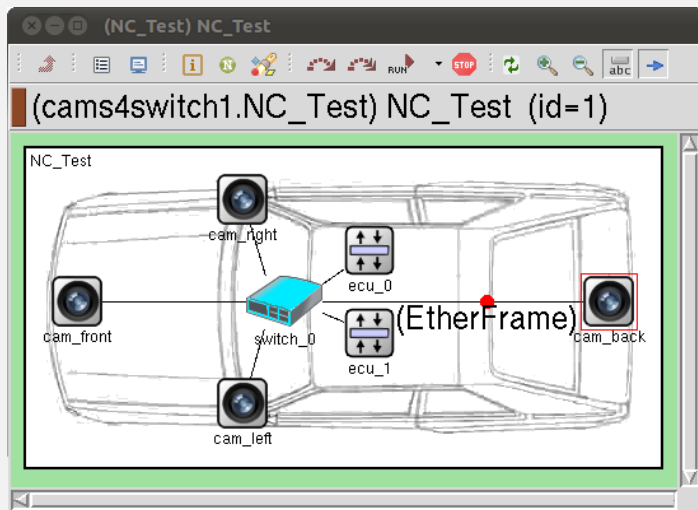


### Kamerabasierte Fahrzeugumfelderfassung:

- Objekterkennung rund um das Fahrzeug
- Diverse Anwendungen (z.B. Einparkhilfe, Blind-Spot-Erkennung, Fahrerüberwachung, Schilder-Erkennung)
- Heute über Low Voltage Differential Signaling (LVDS)

### Simulationsparameter:

- 4 Kameras, variable Anzahl Switche, Links jeweils 1 Gigabit pro Sekunde
- 30 Bilder pro Sekunde (33,3 ms Zykluszeit)
- 600 Kilobyte pro Bild (410 Frames)



Einführung

Hintergrund

Metriken

Konzept & Umsetzung

Verifikation,  
Ergebnisse & Fallstudie

Fazit und Ausblick

<i>Traffic-Klasse</i>	<i>Übertragung</i>	<i>Switch-Hops</i>	<i>Latenz Bild erste Kamera</i>	<i>Latenz Bild letzte Kamera</i>	<i>maximaler Jitter</i>
TT	seriell	1	5,1 ms	20,4 ms	9,68 $\mu$ s
TT	seriell	3	5,2 ms	20,5 ms	10,04 $\mu$ s
TT	parallel	1	20,0 ms	20,0 ms	36,98 $\mu$ s
RC	parallel	1	19,8 ms	19,8 ms	39,85 $\mu$ s
BE	parallel	1	20,0 ms	20,0 ms	<b>14.671,16 <math>\mu</math>s</b>
<i>Anforderungen</i>			33,3 ms	33,3 ms	3.333,33 $\mu$ s

- TT und RC Nachrichten erfüllen die Anforderungen
- Switche haben kaum Einfluss auf Latenz und Jitter
- Ausreichend Kapazität für Erweiterungen im Schedule
  
- Evaluierungsprozess erzielt aussagekräftige Ergebnisse
- Simulationsaufwand gering
- Konfiguration von TTEthernet-Netzwerken aufwendig und umfangreich
- Umfangreiche Konfigurationen reduzieren für die Performance signifikant

- 1 Einführung
- 2 Hintergrund
- 3 Metriken
- 4 Konzept & Umsetzung
- 5 Verifikation, Ergebnisse & Fallstudie
- 6 Fazit und Ausblick**

Einführung

Hintergrund

Metriken

Konzept & Umsetzung

Verifikation,  
Ergebnisse & Fallstudie

Fazit und Ausblick

- Neue Kommunikationssysteme fürs Auto erforderlich
- Echtzeit-Ethernet erfüllt zukünftige Anforderungen
- Die Simulation ermöglicht Ermittlung von Metriken und ist wichtiges Werkzeug in der Entwicklung
- Das Simulationsmodell ist präzise und ausreichend performant
- Durch die Aufbereitung der Simulationsergebnisse wird der Entwicklungsprozess unterstützt
- Die Fallstudie zeigt die praktische Nutzbarkeit der Entwicklung und erste zufriedenstellende Simulationsergebnisse
- Wichtige Verbesserungen: Performanz der Simulationskonfiguration und Testabdeckung bei der Synchronisierung

Simulationsbasierte  
Evaluierung von  
Echtzeit-Ethernet

T. Steinbach

Einführung

Hintergrund

Metriken

Konzept & Umsetzung

Verifikation,  
Ergebnisse & Fallstudie

Fazit und Ausblick



*Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!  
Welche Fragen darf ich nun beantworten?*