

Entwurf und Entwicklung eines Simulationsmodells für ein neuartiges Echtzeit-Ethernet System im Industrieeinsatz

Henning Westerholt

Fachgruppe Betriebssysteme und Verteilte Systeme, Universität Siegen

18.1.2007 / Kolloquium zur Diplomarbeit



- 1 Einleitung
 - Motivation
 - Aufgabenstellung
- 2 Grundlagen
 - Anforderungen an Echtzeit-Netzwerke
 - Ethernet
 - Diskrete Ereignissimulatoren
 - Untersuchung gängiger Echtzeit-Ethernet Ansätze
- 3 Simulation des Echtzeitnetzwerks
 - Anforderungen
 - Entwurf und Implementierung
 - Ergebnisse
- 4 Zusammenfassung und Ausblick

Fortschreitender Einsatz von Echtzeit-Ethernet in der Industrie

- Neuinstallationen, Austausch von alten Feldbussystemen
- Erhebliches Wachstum

Ermöglichung einer durchgängigen Kommunikation

- Effizienzsteigerungen
- Erhöhte Flexibilität

„Gewöhnliches“ Ethernet ist nicht für Echtzeit-Anwendungen geeignet

- Zahlreiche Anpassungen notwendig
- Verständnis von komplexen Systemen anhand von Modellen

Fortschreitender Einsatz von Echtzeit-Ethernet in der Industrie

- Neuinstallationen, Austausch von alten Feldbussystemen
- Erhebliches Wachstum

Ermöglichung einer durchgängigen Kommunikation

- Effizienzsteigerungen
- Erhöhte Flexibilität

„Gewöhnliches“ Ethernet ist nicht für Echtzeit-Anwendungen geeignet

- Zahlreiche Anpassungen notwendig
- Verständnis von komplexen Systemen anhand von Modellen

Fortschreitender Einsatz von Echtzeit-Ethernet in der Industrie

- Neuinstallationen, Austausch von alten Feldbussystemen
- Erhebliches Wachstum

Ermöglichung einer durchgängigen Kommunikation

- Effizienzsteigerungen
- Erhöhte Flexibilität

„Gewöhnliches“ Ethernet ist nicht für Echtzeit-Anwendungen geeignet

- Zahlreiche Anpassungen notwendig
- Verständnis von komplexen Systemen anhand von Modellen

Untersuchung von gängigen Echtzeit-Ethernet Ansätzen

- Technische Funktionsweise auf den OSI Schichten 1 bis 4
- Vergleich nach einem aufzustellenden Kriterienkatalog

Auswahl eines geeigneten Simulationssystems

- geeignet für die Simulation eines Echtzeit-Netzwerks
- Vergleich von verschiedenen verbreiteten Frameworks

Entwicklung eines Simulationsmodells

- Zusammenarbeit mit der Projektgruppe
- Entwicklung von Hilfswerkzeugen
- Simulation von ausgewählten Szenarien

Untersuchung von gängigen Echtzeit-Ethernet Ansätzen

- Technische Funktionsweise auf den OSI Schichten 1 bis 4
- Vergleich nach einem aufzustellenden Kriterienkatalog

Auswahl eines geeigneten Simulationssystems

- geeignet für die Simulation eines Echtzeit-Netzwerks
- Vergleich von verschiedenen verbreiteten Frameworks

Entwicklung eines Simulationsmodells

- Zusammenarbeit mit der Projektgruppe
- Entwicklung von Hilfswerkzeugen
- Simulation von ausgewählten Szenarien

Untersuchung von gängigen Echtzeit-Ethernet Ansätzen

- Technische Funktionsweise auf den OSI Schichten 1 bis 4
- Vergleich nach einem aufzustellenden Kriterienkatalog

Auswahl eines geeigneten Simulationssystems

- geeignet für die Simulation eines Echtzeit-Netzwerks
- Vergleich von verschiedenen verbreiteten Frameworks

Entwicklung eines Simulationsmodells

- Zusammenarbeit mit der Projektgruppe
- Entwicklung von Hilfswerkzeugen
- Simulation von ausgewählten Szenarien

Was ist Echtzeit?

Definition

Harte Echtzeitsysteme – Reaktion auf eine Eingangsanregung innerhalb einer bestimmten Zeit

Definition

Weiche Echtzeitsysteme – Mittelwert der Reaktionszeit über eine Zeitspanne nicht größer als ein Maximalwert

Definition

Echtzeitklasse	Einsatz	maximale Reaktionszeit
1	Menschliche Überwachungsfunktionen	ca. 100 ms
2	„Gewöhnliche“ Automatisierungsfunktionen	< 10 ms
3	Motion-Control Anwendungen	< 1 ms, Jitter < 1 μ s

Was ist Echtzeit?

Definition

Harte Echtzeitsysteme – Reaktion auf eine Eingangsanregung innerhalb einer bestimmten Zeit

Definition

Weiche Echtzeitsysteme – Mittelwert der Reaktionszeit über eine Zeitspanne nicht größer als ein Maximalwert

Definition

Echtzeitklasse	Einsatz	maximale Reaktionszeit
1	Menschliche Überwachungsfunktionen	ca. 100 ms
2	„Gewöhnliche“ Automatisierungsfunktionen	< 10 ms
3	Motion-Control Anwendungen	< 1 ms, Jitter < 1 μ s

Was ist Echtzeit?

Definition

Harte Echtzeitsysteme – Reaktion auf eine Eingangsanregung innerhalb einer bestimmten Zeit

Definition

Weiche Echtzeitsysteme – Mittelwert der Reaktionszeit über eine Zeitspanne nicht größer als ein Maximalwert

Definition

Echtzeitklasse	Einsatz	maximale Reaktionszeit
1	Menschliche Überwachungsfunktionen	ca. 100 ms
2	„Gewöhnliche“ Automatisierungsfunktionen	< 10 ms
3	Motion-Control Anwendungen	< 1 ms, Jitter < 1 μ s

Erfüllung der spezifizierten Leistungsanforderungen

- Zykluszeit, Jitter und Latenz
- Topologie und Skalierbarkeit

Sicherheitskritische Eigenschaften

- Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit
- Anpassung an Umgebungsbedingungen

Kompatibilität und Offenheit

- Einbeziehung von bestehenden Feldbussystemen und gewöhnlichen Ethernet
- Normung und Standardisierung
- verwendetes Applikationsmodell

Anforderungen an Echtzeit-Netzwerke

Erfüllung der spezifizierten Leistungsanforderungen

- Zykluszeit, Jitter und Latenz
- Topologie und Skalierbarkeit

Sicherheitskritische Eigenschaften

- Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit
- Anpassung an Umgebungsbedingungen

Kompatibilität und Offenheit

- Einbeziehung von bestehenden Feldbussystemen und gewöhnlichen Ethernet
- Normung und Standardisierung
- verwendetes Applikationsmodell

Anforderungen an Echtzeit-Netzwerke

Erfüllung der spezifizierten Leistungsanforderungen

- Zykluszeit, Jitter und Latenz
- Topologie und Skalierbarkeit

Sicherheitskritische Eigenschaften

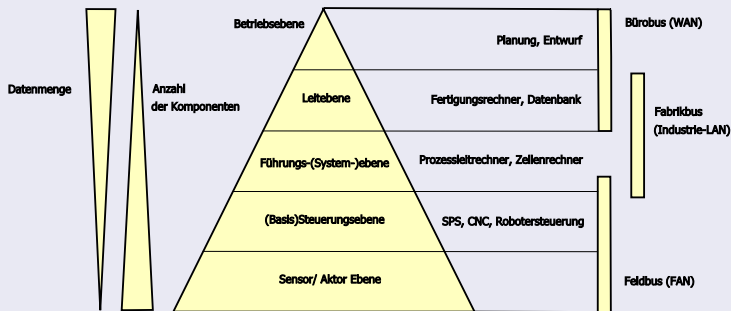
- Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit
- Anpassung an Umgebungsbedingungen

Kompatibilität und Offenheit

- Einbeziehung von bestehenden Feldbussystemen und gewöhnlichen Ethernet
- Normung und Standardisierung
- verwendetes Applikationsmodell

Netzwerke in der Automatisierungstechnik

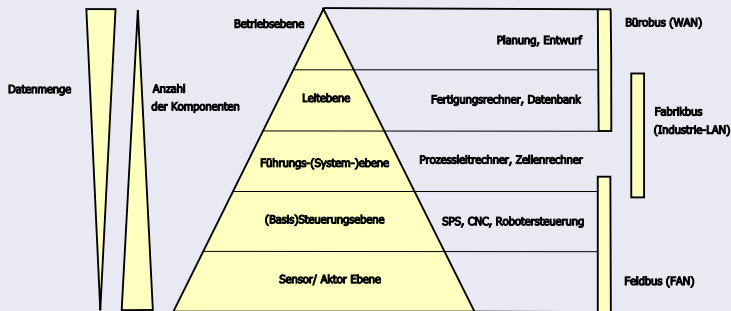
Automatisierungspyramide als Modell einer Fertigung



Aufbau und Funktionsweise der Netze

- Verwendung von Bustopologien
- Überwiegend kleine, aber häufig auftretene Nachrichten
- Implementierung nur einiger OSI-Schichten

Automatisierungspyramide als Modell einer Fertigung



Aufbau und Funktionsweise der Netze

- Verwendung von Bustopologien
- Überwiegend kleine, aber häufig auftretene Nachrichten
- Implementierung nur einiger OSI-Schichten

Ethernet allgemein

- Weitverbreiteste Technologie zum Aufbau lokaler Netze in der IT
- Design folgt einem „best-effort“ Ansatz
- Heutige Installationen unterstützen hauptsächlich 100 oder 1000 MBit/s

100 MBit/s Ethernet

Bezeichnung	Wert	Anmerkung
Bitdauer	10 ns	Übertragungsdauer eines Bits auf der Leitung
IFG	0.96 μ s	Zeitdauer ab der das Medium als frei angenommen wird
Slot-Zeit	512 Bitzeiten	Dauer eines Slots für den CSMA/CD-Algorithmus
Jam-Länge	32 Bit	Größe des Jam-Signals zur Kennzeichnung einer Störung
Min. Rahmengröße	512 Bit/ 64 Bytes	Minimale Größe eines Frames (ohne Präambel und SFD)
Max. Rahmengröße	1518 Bytes	Maximale Größe eines Frames (ohne VLAN Tag)

Ethernet allgemein

- Weitverbreiteste Technologie zum Aufbau lokaler Netze in der IT
- Design folgt einem „best-effort“ Ansatz
- Heutige Installationen unterstützen hauptsächlich 100 oder 1000 MBit/s

100 MBit/s Ethernet

Bezeichnung	Wert	Anmerkung
Bitdauer	10 ns	Übertragungsdauer eines Bits auf der Leitung
IFG	0.96 μ s	Zeitdauer ab der das Medium als frei angenommen wird
Slot-Zeit	512 Bitzeiten	Dauer eines Slots für den CSMA/CD-Algorithmus
Jam-Länge	32 Bit	Größe des Jam-Signals zur Kennzeichnung einer Störung
Min. Rahmengröße	512 Bit/ 64 Bytes	Minimale Größe eines Frames (ohne Präambel und SFD)
Max. Rahmengröße	1518 Bytes	Maximale Größe eines Frames (ohne VLAN Tag)

Modellbildung zur Untersuchung von Systemen

- Abbildung von wesentlichen Eigenschaften eines Systems
- Beschränkung auf problemrelevante Bereiche
- Erstellung eines Gestaltungsmodells, da erst ein Entwurf vorliegt

Charakterisierung von Simulationsmodellen

- Zeitdiskrete vs. kontinuierliche Simulationssysteme
- Ereignisorientierter Ansatz

Beispiele für Simulationssysteme

- ns-2
- OMNeT++

Modellbildung zur Untersuchung von Systemen

- Abbildung von wesentlichen Eigenschaften eines Systems
- Beschränkung auf problemrelevante Bereiche
- Erstellung eines Gestaltungsmodells, da erst ein Entwurf vorliegt

Charakterisierung von Simulationsmodellen

- Zeitdiskrete vs. kontinuierliche Simulationssysteme
- Ereignisorientierter Ansatz

Beispiele für Simulationssysteme

- ns-2
- OMNeT++

Modellbildung zur Untersuchung von Systemen

- Abbildung von wesentlichen Eigenschaften eines Systems
- Beschränkung auf problemrelevante Bereiche
- Erstellung eines Gestaltungsmodells, da erst ein Entwurf vorliegt

Charakterisierung von Simulationsmodellen

- Zeitdiskrete vs. kontinuierliche Simulationssysteme
- Ereignisorientierter Ansatz

Beispiele für Simulationssysteme

- ns-2
- OMNeT++

Darstellung der Benutzerschnittstelle

The screenshot displays the OMNeT++ user interface, divided into two main windows. The left window, titled "OMNeT++/tkenv - mixedLAN", shows the simulation's control and monitoring interface. It includes a menu bar (File, Edit, Simulate, Trace, Inspect, View, Options, Help), a toolbar with icons for simulation control, and a status bar. The main area contains a table of simulation events and a list of parameters for the selected component, "mixedLAN (MixedLAN)".

The right window, titled "(MixedLAN) mixedLAN (id=1) (pid=898609)", displays a network diagram. The diagram shows a central switch (switch_8) connected to several other switches (switch_5, switch_11, switch_4, switch_15, switch_18) and various devices (device_1 through device_21). The devices are represented by icons of desktop computers and laptops. The network topology is a complex mesh of connections.

Simulation Status:

Run #1: mixedLAN	Event #0	T=0.0000000 (0.00s)	Next: mixedLAN.device_1.lic (id=3)
Msgs scheduled: 87	Msgs created: 353	Msgs present: 353	
Ev/sec: n/a	Simsec/sec: n/a	Ev/simsec: n/a	

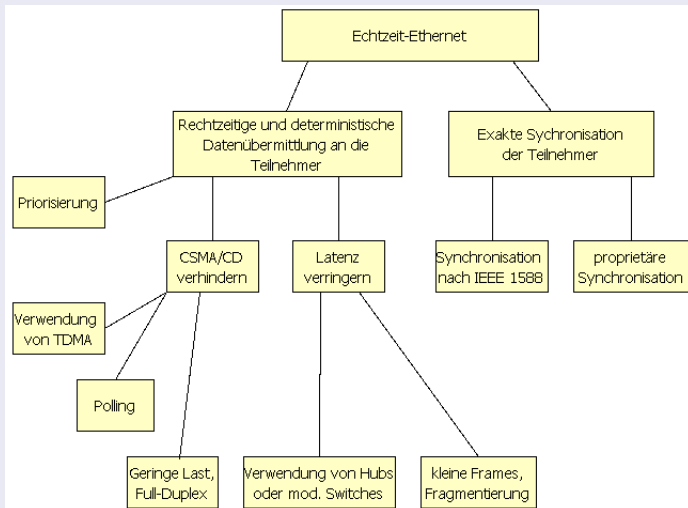
Parameters of (HRCRelayInitNPTDMA) mixedLAN.switch_0.relayInit

- number of processors: 2
- processing time: 3e-06
- ports: 5
- buffer size: 1048576
- address table size: 100
- aging time: 120
- high watermark: 524288
- pause time: 300
- time slot length: 7e-05 s
- time slot count: 5
- cycle time: 0,00028 s

Simulation Log:

- mixedLAN.device_1.srv registering DSAP 241
- warning: MAC is slotted, but has no assigned slot id
- mixedLAN.device_2.srv registering DSAP 241
- mixedLAN.device_3.srv registering DSAP 241
- warning: MAC is slotted, but has no assigned slot id
- mixedLAN.device_4.srv registering DSAP 241
- warning: MAC is slotted, but has no assigned slot id

Darstellung verschiedener Ansätze



EtherNet/IP

- Lösung auf Basis von TCP/IP
- Synchronisation mittels des IEEE 1588 Protokolls
- Slaves können mit Hilfe von Zeitstempel eigenständig handeln
- Einfache Lösung, dadurch weit verbreitet

Ethernet Powerlink

- Lösung oberhalb von gewöhnlichem Ethernet
- Traditionelles, bei Feldbussen verbreitetes Pollingverfahren
- Nutzung von Standard Ethernet Komponenten
- Mittlerer technischer Aufwand, recht weit verbreitet

EtherNet/IP

- Lösung auf Basis von TCP/IP
- Synchronisation mittels des IEEE 1588 Protokolls
- Slaves können mit Hilfe von Zeitstempel eigenständig handeln
- Einfache Lösung, dadurch weit verbreitet

Ethernet Powerlink

- Lösung oberhalb von gewöhnlichem Ethernet
- Traditionelles, bei Feldbussen verbreitetes Pollingverfahren
- Nutzung von Standard Ethernet Komponenten
- Mittlerer technischer Aufwand, recht weit verbreitet

EtherCAT

- Lösung mit modifizierten Ethernet
- Effektives Ausnutzen der Netzwerkkapazität, hohe Leistung
- Abstriche bei der Kompatibilität zu gewöhnlichen Ethernet
- Geringe Verbreitung

PROFINET

- Lösung mit modifizierten Ethernet
- Umfassende Automatisierungslösung
- Switche sorgen für Einhaltung des Ablaufplans
- Erheblicher technischer Aufwand, geringe Verbreitung

EtherCAT

- Lösung mit modifizierten Ethernet
- Effektives Ausnutzen der Netzwerkkapazität, hohe Leistung
- Abstriche bei der Kompatibilität zu gewöhnlichen Ethernet
- Geringe Verbreitung

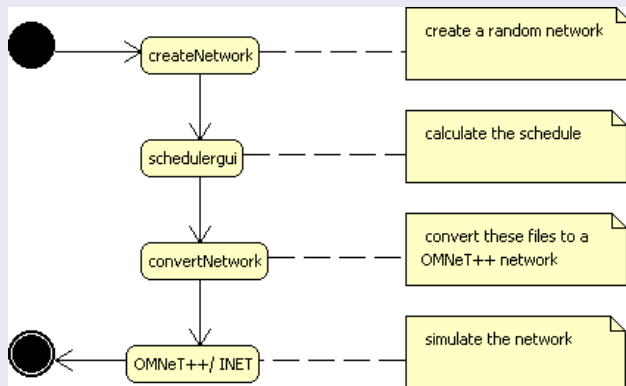
PROFINET

- Lösung mit modifizierten Ethernet
- Umfassende Automatisierungslösung
- Switche sorgen für Einhaltung des Ablaufplans
- Erheblicher technischer Aufwand, geringe Verbreitung

Allgemeine Ziele

- Korrekte Ergebnisse
- Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse
- Minimierung des Implementierungsaufwand
- gute Performance des Systems
- leichte Testbarkeit
- einfache und schnelle Auswertung der Ergebnisse
- Skalierungsfähig
- modularer Aufbau, flexibel erweiterbar

Einteilung in Submodule



Nutzung von vorhandenen Elementen des Frameworks

- Vollständige Neuentwicklung nicht durchführbar
- Anpassung an vorhandene Struktur

Vorgehen

- praktische Versuche innerhalb des Simulationssystems
- Anlehnung an PROFINET Funktionsweise

Konzeption

- Switches enthalten die Intelligenz, sorgen für Einhaltung des TDMA
- Echtzeitteilnehmer kennen nur ihren Zeitschlitz, senden entsprechend
- Verkehrsgeneratoren arbeiten komplett unabhängig

Aufbau des Simulationsmodells

Nutzung von vorhandenen Elementen des Frameworks

- Vollständige Neuentwicklung nicht durchführbar
- Anpassung an vorhandene Struktur

Vorgehen

- praktische Versuche innerhalb des Simulationssystems
- Anlehnung an PROFINET Funktionsweise

Konzeption

- Switches enthalten die Intelligenz, sorgen für Einhaltung des TDMA
- Echtzeitteilnehmer kennen nur ihren Zeitschlitz, senden entsprechend
- Verkehrsgeneratoren arbeiten komplett unabhängig

Nutzung von vorhandenen Elementen des Frameworks

- Vollständige Neuentwicklung nicht durchführbar
- Anpassung an vorhandene Struktur

Vorgehen

- praktische Versuche innerhalb des Simulationssystems
- Anlehnung an PROFINET Funktionsweise

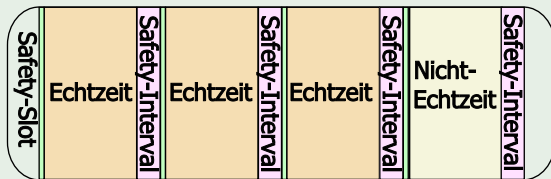
Konzeption

- Switches enthalten die Intelligenz, sorgen für Einhaltung des TDMA
- Echtzeitteilnehmer kennen nur ihren Zeitschlitz, senden entsprechend
- Verkehrsgeneratoren arbeiten komplett unabhängig

Konzeption

- Unterteilung in Echtzeit- und nicht Echtzeit-Bereich
- zwei Sicherheitspuffer
- Sicherheitspuffer notwendig durch gewähltes Design und Einschränkungen des Frameworks

Beispielaufbau eines Zyklus



„NED“ Sprache von OMNeT++

```
import "EtherHost", "EtherHostTDMA", "EtherSwitchTDMA";
module MixedLAN
  submodules:
    switch_0: EtherSwitchTDMA;
    gatesizes:
      in[5],
      out[5];
    display: "i=switch2";
  device_1: EtherHostTDMA;
    display: "i=device/pc2";
  device_2: EtherHostTDMA;
    display: "i=device/pc2";
  connection:
    switch_0.out[0] --> delay 0us --> device_1.in;
    switch_0.in[0] <-- delay 0us <-- device_1.out;
    switch_0.out[1] --> delay 0us --> device_2.in;
    switch_0.in[1] <-- delay 0us <-- device_2.out;
endmodule
network mixedLAN : MixedLAN
endnetwork simple Simple endsimple
```

XML-Sprache zur Definition des zeitlichen Ablaufplans

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<schedule timeSlotCount="3">
  <device id="device_2" slotId="0"/>
  <device id="device_3" slotId="0"/>
  <switch id="switch_0">
    <timeSlot id="0">
      <connection out="4" in="1"/>
    </timeSlot>
    <timeSlot id="1">
      <connection out="2" in="4"/>
    </timeSlot>
  </switch>
</schedule>
```

Probleme bei der Entwicklung

Komplexität von Framework und Simulationen

- Nutzung von vorhandenen Elementen des Frameworks
- Fehlersuche und -behebung dadurch erschwert
- Sehr große Anzahl an Ereignissen und Zuständen
- Fehler treten oft nur sehr selten bzw. nach längerer Laufzeit auf

Probleme bei der Zusammenarbeit mit Projektgruppe

- Genaue Spezifikation des Dateiformats
- Implizite Annahmen bei der Spezifikation
- Eigene Fehlerdiagnose und -behebung schwierig

Test des Simulationsmodells

- Umständlicher und langsamer Testablauf
- Geschwindigkeit der Ablaufplanberechnung und Konvertierung

Probleme bei der Entwicklung

Komplexität von Framework und Simulationen

- Nutzung von vorhandenen Elementen des Frameworks
- Fehlersuche und -behebung dadurch erschwert
- Sehr große Anzahl an Ereignissen und Zuständen
- Fehler treten oft nur sehr selten bzw. nach längerer Laufzeit auf

Probleme bei der Zusammenarbeit mit Projektgruppe

- Genaue Spezifikation des Dateiformats
- Implizite Annahmen bei der Spezifikation
- Eigene Fehlerdiagnose und -behebung schwierig

Test des Simulationsmodells

- Umständlicher und langsamer Testablauf
- Geschwindigkeit der Ablaufplanberechnung und Konvertierung

Probleme bei der Entwicklung

Komplexität von Framework und Simulationen

- Nutzung von vorhandenen Elementen des Frameworks
- Fehlersuche und -behebung dadurch erschwert
- Sehr große Anzahl an Ereignissen und Zuständen
- Fehler treten oft nur sehr selten bzw. nach längerer Laufzeit auf

Probleme bei der Zusammenarbeit mit Projektgruppe

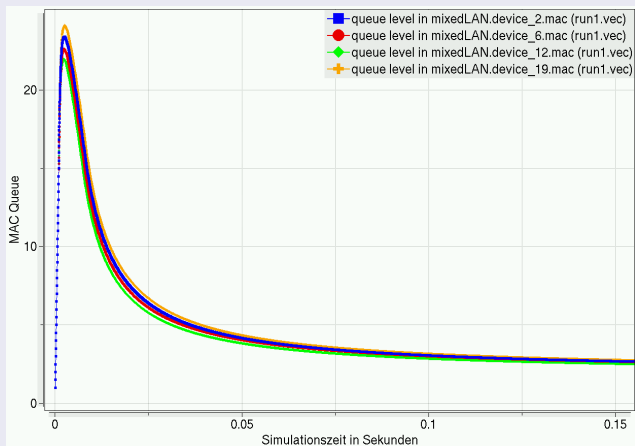
- Genaue Spezifikation des Dateiformats
- Implizite Annahmen bei der Spezifikation
- Eigene Fehlerdiagnose und -behebung schwierig

Test des Simulationsmodells

- Umständlicher und langsamer Testablauf
- Geschwindigkeit der Ablaufplanberechnung und Konvertierung

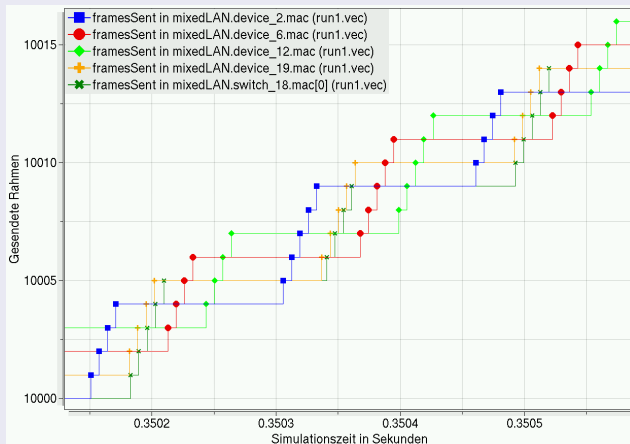
Vorführung des Simulationsmodells

Hochlaufphase des Systems



Warteschlange MAC Echtzeitgeräte in Rahmen

Funktionsweise des Zeitmultiplex



Gesendete Rahmen Echtzeitgeräte

Ergebnisse von Szenario „realer Betrieb“

Parameter des Systems

- 200 Teilnehmer im Netz, 87 Kommunikationspartner
- Aufteilung auf vier Linien, die miteinander verbunden sind
- Zykluszeit ca. 1 ms
- Nachrichtenperiode $750 \mu s$
- Zeitschlitzlänge $30 \mu s$

Leistung des Systems

- Gute Auslastung der einzelnen Linien mit ca. 80-90%
- Gewinn durch die Parallelisierung der Kommunikation etwa 2,5
- Zykluszeit erlaubt Nutzung für Anwendungen nach „Echtzeitklasse 3“

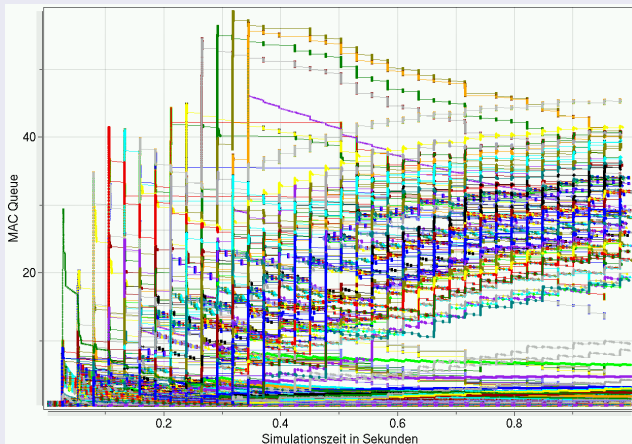
Parameter des Systems

- 200 Teilnehmer im Netz, 87 Kommunikationspartner
- Aufteilung auf vier Linien, die miteinander verbunden sind
- Zykluszeit ca. 1 ms
- Nachrichtenperiode $750 \mu s$
- Zeitschlitzlänge $30 \mu s$

Leistung des Systems

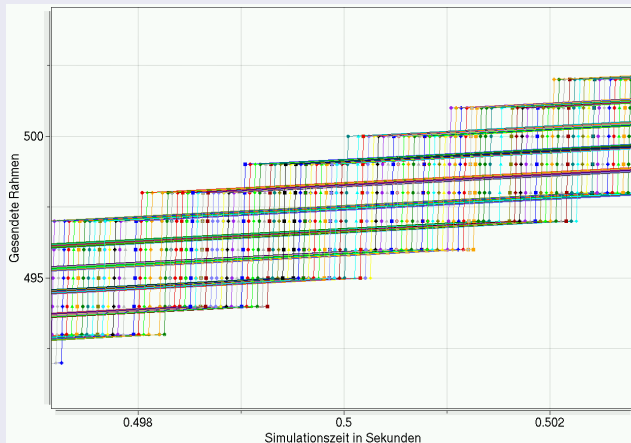
- Gute Auslastung der einzelnen Linien mit ca. 80-90%
- Gewinn durch die Parallelisierung der Kommunikation etwa 2,5
- Zykluszeit erlaubt Nutzung für Anwendungen nach „Echtzeitklasse 3“

Hochlaufphase des Systems



Warteschlange MAC Switches in Rahmen

Funktionsweise des Zeitmultiplex



Gesendete Rahmen Echtzeitgeräte

Echtzeitbetrieb

- einwandfreie Funktionsweise
- sehr gute Leistung, die auch höchsten Echtzeitanforderungen genügt
- Aufteilung des Netzes verbessert die Leistung erheblich

Gemischter Betrieb

- Funktionalität ist gegeben, aber Verbesserungspotential vorhanden
- Dynamischeres Verhalten, das schlecht vorhersehbar ist
- erhebliche Verlängerung der Hochlaufphase

Echtzeitbetrieb

- einwandfreie Funktionsweise
- sehr gute Leistung, die auch höchsten Echtzeitanforderungen genügt
- Aufteilung des Netzes verbessert die Leistung erheblich

Gemischter Betrieb

- Funktionalität ist gegeben, aber Verbesserungspotential vorhanden
- Dynamischeres Verhalten, das schlecht vorhersehbar ist
- erhebliche Verlängerung der Hochlaufphase

Zusammenfassung

- Entwicklung eines Modells eines neuartigen Ansatzes
- Dazu Untersuchung von verbreiteten Systemen
- Modell bietet eine Leistung, die höchsten Anforderungen genügt

Zusammenfassung

- Entwicklung eines Modells eines neuartigen Ansatzes
- Dazu Untersuchung von verbreiteten Systemen
- Modell bietet eine Leistung, die höchsten Anforderungen genügt

Ausblick

- Verbesserungspotential bei Simulationsmodell und Hilfswerkzeugen
- Weiterentwicklung der Simulation oder Erstellung eines Hardware-Prototyps

Zusammenfassung

- Entwicklung eines Modells eines neuartigen Ansatzes
- Dazu Untersuchung von verbreiteten Systemen
- Modell bietet eine Leistung, die höchsten Anforderungen genügt

Ausblick

- Verbesserungspotential bei Simulationsmodell und Hilfswerkzeugen
 - Weiterentwicklung der Simulation oder Erstellung eines Hardware-Prototyps
-
- Vielen Dank für die Aufmerksamkeit – Fragen?
 - Kontakt: hw@skalatan.de,
Arbeit und Code: <http://www.skalatan.de/rte/>