

## Vorstellung der Dissertation

# Ein Framework für echtzeitfähige Ethernet-Netzwerke in der Automatisierungstechnik mit variabler Kompatibilität zu Standard-Ethernet

von  
Frank Dopatka

Dipl.-Inf. Frank Dopatka M. Sc.  
Frank.Dopatka@uni-siegen.de

Universität Siegen  
FB12 - Elektrotechnik und Informatik, Betriebssysteme und verteilte Systeme

Folie 2

## Inhaltsübersicht des Vortrags

### • Motivation

- thematisches Umfeld
- Formulierung der Problemstellung
- State-of-the-Art

### • Vorstellung der Vorgehensweise & der Lösungen

- I: Formales Framework (Kern der Arbeit)
- II: Wie können Echtzeitanforderungen umgesetzt werden?  
Mit welchen Auswirkungen?
- III: Wie kann ein möglicher Echtzeit-Switch aussehen?

### • Gesamtfazit:

## Wissenschaftlicher Beitrag dieser Arbeit

Dipl.-Inf. Frank Dopatka M. Sc.  
Frank.Dopatka@uni-siegen.de

Universität Siegen  
FB12 - Elektrotechnik und Informatik, Betriebssysteme und verteilte Systeme

Folie 3

## Automatisierte Anlagen: Papiermaschine mit durchlaufender Warenbahn

- Motivation  
- State of the Art  
I. Formales Framework

II. Implementierung der Echtzeit

III. Echtzeit-Switch

- Gesamtfazit

Vielzahl an Sensoren  
(Lichtschranken, Endschalter, Temp, Druck,...)  
und Aktoren (Ventile, Antriebe)

Antriebstechnik (Motion Control):  
„Königsklasse der Automatisierung“

Alle Antriebe der Anlage sind durch ein Netzwerk  
verbunden und müssen hochsynchronisiert sein!  
Sonst: Abriß der Warenbahn!

<http://www.prowell.de/media/presse/bilder/PM1-ProdRekord/PM1-Papiermaschine.jpg>

Dipl.-Inf. Frank Dopatka M. Sc.  
Frank.Dopatka@uni-siegen.de

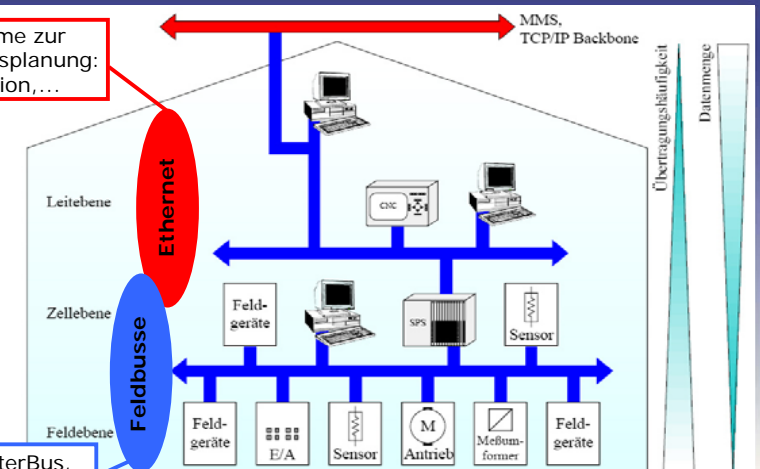
Universität Siegen  
FB12 - Elektrotechnik und Informatik, Betriebssysteme und verteilte Systeme

Folie 4

## Trend zur vertikalen Integration

ERP-Systeme zur  
Produktionsplanung:  
SAP, Navision,...

MMS,  
TCP/IP Backbone



Profibus, InterBus,  
SERCOS I und II

[http://www.emg.ing.tu-bs.de/pdf/IKF/Feldbusse\\_Skript\\_SS04.pdf](http://www.emg.ing.tu-bs.de/pdf/IKF/Feldbusse_Skript_SS04.pdf)

Dipl.-Inf. Frank Dopatka M. Sc.  
Frank.Dopatka@uni-siegen.de

Universität Siegen  
FB12 - Elektrotechnik und Informatik, Betriebssysteme und verteilte Systeme

Folie 5

## Trend zur vertikalen Integration

- Motivation  
- State of the Art

I. Formales Framework  
II. Implementierung der Echtzeit  
III. Echtzeit-Switch  
- Gesamtfazit

**Ziele:**

- Homogenisierung der Netzwerkinfrastrukturen (Leitebene bis zur Feldebene)
- Ersetzung oder Ergänzung der Feldbusse durch gängige Ethernet-Netzwerke

**Probleme:**

- best-effort Ansatz des Ethernets vs. isochrone (IRT) Übertragungen und Determinismus:
  - Switches werfen Frames und verzögern
  - Hubs lassen keine nebenläufige Kommunikation zu
  - grosse Frames blockieren das Netzwerk
- Kompatibilität zum Ethernet-Standard vs. Anforderungen aus der Automatisierungstechnik:

**Wie können die Anforderungen unter Beibehaltung des Ethernet-Standards erfüllt werden?**

Dipl.-Inf. Frank Dopatka M. Sc.  
Frank.Dopatka@uni-siegen.de

Universität Siegen  
FB12 - Elektrotechnik und Informatik, Betriebssysteme und verteilte Systeme






Folie 6

## State-of-the-Art: bisherige Lösungsansätze

- Motivation  
- State of the Art



I. Formales Framework  
II. Implementierung der Echtzeit  
III. Echtzeit-Switch  
- Gesamtfazit

**Ethernet PowerLink, TCnet:**


- minimale Verzögerung durch Hubs
- zentrale Schedule, zentraler Manager
- jedes Gerät muss Protokoll beachten
- geschlossene Subnetze: „da kann man auch Feldbus nehmen“

**EtherCAT, SERCOS:**

- Schieberegister-ähnliche Übertragung in einzelndem großen Ethernet-Frame
- zentralisiert
- jedes Gerät Protokoll kennen
- geschlossenes Subnetz: FMMU-Stecker mit Gateway vergleichbar

**ProfiNet IRT:**





- offene Infrastruktur
- dezentrale Kommunikation
- (proprietäre Nicht-Standard-) Switches

**Problem: jeder Ansatz ist ein fester Kompromiß**

Dipl.-Inf. Frank Dopatka M. Sc.  
Frank.Dopatka@uni-siegen.de



Universität Siegen  
FB12 - Elektrotechnik und Informatik, Betriebssysteme und verteilte Systeme

# I. Erstellung des Frameworks

Dipl.-Inf. Frank Dopatka M. Sc.  
Frank.Dopatka@uni-siegen.de

Universität Siegen  
FB12 - Elektrotechnik und Informatik, Betriebssysteme und verteilte Systeme

Folie 8

## Vorgehensweise

- Motivation  
- State of the Art

I. Formales Framework  
II. Implementierung der Echtzeit  
III. Echtzeit-Switch  
- Gesamtfazit

**Ziel:**

- Erstellung eines flexiblen, formal beründeten Frameworks, das von einer konkreten Implementierung unabhängig ist

**Ausgangspunkt:**

- Gegebene Netzwerk-Infrastruktur
- Gegebene IRT-Übertragungen

**Vorgehensweise:**



- Vom vereinfachten Modell zur realitätsnahen Anwendung
- Zerlegung in Teilprobleme und algorithmische Lösung

**erstes Beispiel im Folgenden:**

- Idealisierte Unicast (1:1) Vollduplex-Übertragungen
- Keine Berücksichtigung von Verzögerungszeiten
- Einheitliche (Mindest-)Framegröße
- Verwendung von Switches

Dipl.-Inf. Frank Dopatka M. Sc.  
Frank.Dopatka@uni-siegen.de

Universität Siegen  
FB12 - Elektrotechnik und Informatik, Betriebssysteme und verteilte Systeme

### Netzwerk & Übertragungen...

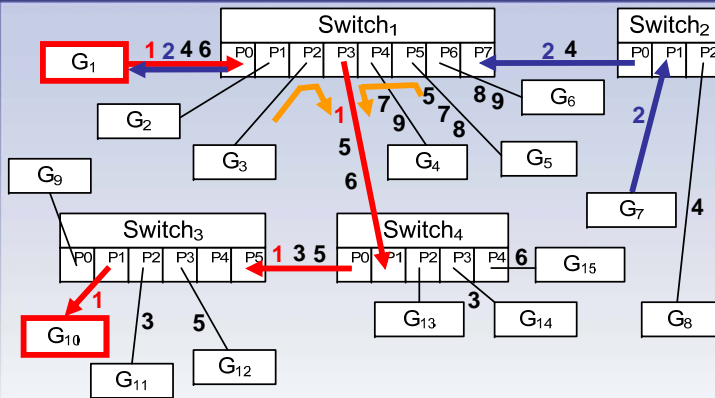
- Motivation  
- State of the Art

I. Formales Framework

II. Implementierung der Echtzeit

III. Echtzeit-Switch

- Gesamtfazit



**Gerichtete Übertragungen erzeugen „Konflikte“:**  
Gefahr der Zwischenspeicherung bei identischer Übertragungsrichtung auf einem Kabel → Scheduling!

Dipl.-Inf. Frank Dopatka M. Sc.  
Frank.Dopatka@uni-siegen.de

Universität Siegen

FB12 - Elektrotechnik und Informatik, Betriebssysteme und verteilte Systeme

### Switch betrachten (voll duplex)...

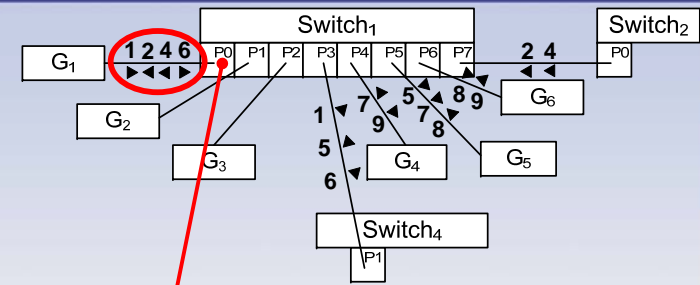
- Motivation  
- State of the Art

I. Formales Framework

II. Implementierung der Echtzeit

III. Echtzeit-Switch

- Gesamtfazit



An jedem Port gibt es eingehende und ausgehende Übertragungen!

**erster zentraler Ansatz dieser Arbeit:**

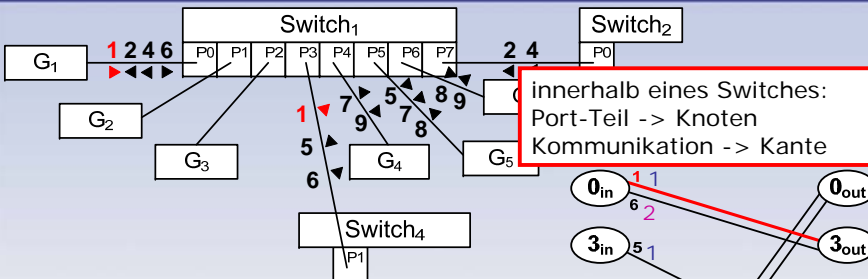
jeden Switch einzeln betrachten, Konfliktgraphen bilden und diesen färben...

Dipl.-Inf. Frank Dopatka M. Sc.  
Frank.Dopatka@uni-siegen.de

Universität Siegen

FB12 - Elektrotechnik und Informatik, Betriebssysteme und verteilte Systeme

### Konfliktgraph bilden & färben...



Der resultierende Multigraph ist **bipartit!**

- Kann mit  $\chi'(G) = \Delta(G)$  Farben kantengefärbt werden
- Alon präsentierte einen optimalen Algorithmus mit Laufzeitkomplexität von  $O(|E| \log |E|)$ :

Slot 1:	1	2	5	8	9
Slot 2:	4	6	7		

Dipl.-Inf. Frank Dopatka M. Sc.  
Frank.Dopatka@uni-siegen.de

Universität Siegen

FB12 - Elektrotechnik und Informatik, Betriebssysteme und verteilte Systeme

### Beispiel der interdisziplinären Modellierung: „Der UC/VD-Kantenkonfliktgraph ist bipartit“

- Motivation  
- State of the Art

I. Formales Framework

II. Implementierung der Echtzeit

III. Echtzeit-Switch

- Gesamtfazit

Sei  $v$  ein Switch aus der Menge der Switches im Netzwerk. Dann ist der zugehörige Unicast-Vollduplex-Kantenkonfliktgraph  $C(E, V, g)$  zu  $v$  bipartit.

Zu jeder Kante  $r \in E$  ist  $g(r) = \{(v^{KL(r)-})_{in}, (v^{KL(r)+})_{out}\}$ .

Also verbindet jede Kante aus  $E$  einen Knoten aus  $V_{in}$  mit einem Knoten aus  $V_{out}$ . Daher sind keine zwei Knoten aus  $V_{in}$  bzw.  $V_{out}$  benachbart.

Nun lässt sich eine 2-Knotenfärbung für  $C$  definieren:

$$c: V \mapsto \{1, 2\} \quad x \mapsto \begin{cases} 1 & x = e_{in} \in V_{in} \\ 2 & x = e_{out} \in V_{out} \end{cases}$$

Dies ist offenbar eine Färbung, denn seien  $x, y \in V$  benachbart in  $C$ , dann ist o.B.d.A.  $x \in V_{in}$  und  $y \in V_{out}$  und somit  $c(x) = 1 \neq 2 = c(y)$ .

Uwe Nowak, 2006

Dipl.-Inf. Frank Dopatka M. Sc.  
Frank.Dopatka@uni-siegen.de

Universität Siegen

FB12 - Elektrotechnik und Informatik, Betriebssysteme und verteilte Systeme

### Ergebnisse zusammengefasst...

- Motivation  
- State of the Art

I. Formales Framework

II. Implementierung der Echtzeit

III. Echtzeit-Switch

- Gesamtfazit

#### idealisiert Halbduplexbetrieb und Unicast:

- Switches einzeln betrachtbar, aber NP-harte Färbung
- Lokale Schedules synchronisierbar

#### idealisiert Vollduplexbetrieb und Unicast:

- Bipartite lokale Konfliktgraphen
- Synchronisierbare Schedules durch Weitergabe bereits gefärbter Übertragungen

#### Broadcast/Multicast:

- jede Broadcast-Übertragung benötigt eigenen Slot
- Multicast-Übertragungen können durch Färbung eines globalen Knotenkonfliktgraphen eingebunden werden

#### Integration von Hubs:

- Hubs und angeschlossene Geräte wie einzelnes Gerät betrachten
- Kombination von Hubs und Switches sind in der Antriebstechnik sinnvoll

Dipl.-Inf. Frank Dopatka M. Sc.  
Frank.Dopatka@uni-siegen.de

Universität Siegen

FB12 - Elektrotechnik und Informatik, Betriebssysteme und verteilte Systeme



### Ergebnisse zusammengefasst...

- Motivation  
- State of the Art

I. Formales Framework

II. Implementierung der Echtzeit

III. Echtzeit-Switch

- Gesamtfazit

#### Integration asynchroner Übertragungen:

- als einzelne Phase (IRT/asynchron)
- ungenutzte Bandbreite in der IRT-Phase für asynchrone Hop-by-Hop Übertragen nutzbar

#### Zulassen variabler Framegrößen:

- In 2er-Potenzen gestaffelte Framegrößen lassen sich leicht in einer Schedule integrieren
- Multidimensionaler Greedy-Algorithmus und Bottom-Up Erweiterung zur schrittweisen Färbung der Konfliktgraphen und Einsortierung der Übertragungen in die Schedule

#### IRT-Übertragung in Vielfachen von Produktionszyklen:

- beispielsweise zum Auslesen peripherer Sensorik
- abwechselnd mit asynchronen Übertragungen
- sich gegenseitig abwechselnd (bei Hubs)
- Multiplexing bei Switches schwierig

Dipl.-Inf. Frank Dopatka M. Sc.  
Frank.Dopatka@uni-siegen.de

Universität Siegen

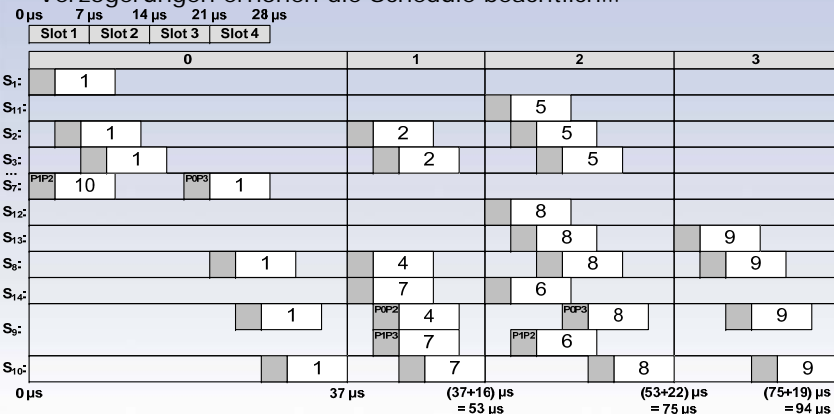
FB12 - Elektrotechnik und Informatik, Betriebssysteme und verteilte Systeme



### Ergebnisse zusammengefasst...

#### Berücksichtigung von Verzögerungszeiten:

- Verzögerungen erhöhen die Schedule beachtlich...



Dipl.-Inf. Frank Dopatka M. Sc.  
Frank.Dopatka@uni-siegen.de

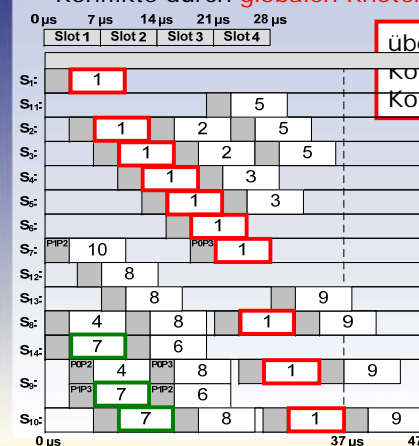
Universität Siegen

FB12 - Elektrotechnik und Informatik, Betriebssysteme und verteilte Systeme

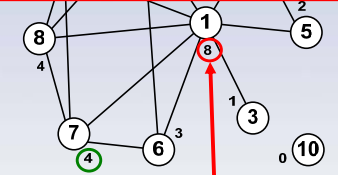


### Ergebnisse zusammengefasst...

- Idee: Jede IRT-Übertragung möglichst früh beginnen
- Konflikte durch globalen Knoten-Konfliktgraphen erkennen



über das gesamte Netzwerk betrachtet:  
Kommunikation -> Knoten  
Konflikt -> Kante



Anzahl der Konflikte

Dipl.-Inf. Frank Dopatka M. Sc.  
Frank.Dopatka@uni-siegen.de

Universität Siegen

FB12 - Elektrotechnik und Informatik, Betriebssysteme und verteilte Systeme



## II. Implementierung der Echtzeit

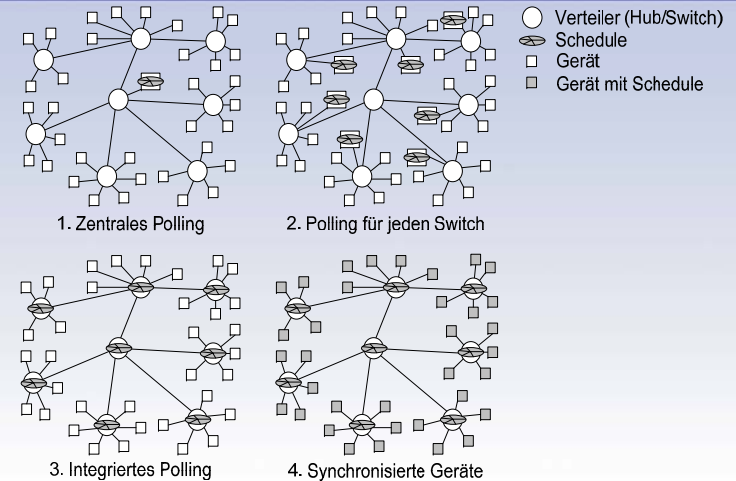
Dipl.-Inf. Frank Dopatka M. Sc.  
Frank.Dopatka@uni-siegen.de

Universität Siegen

FB12 - Elektrotechnik und Informatik, Betriebssysteme und verteilte Systeme

Folie 18

## Wo werden die Schedules umgesetzt?



Dipl.-Inf. Frank Dopatka M. Sc.  
Frank.Dopatka@uni-siegen.de

Universität Siegen

FB12 - Elektrotechnik und Informatik, Betriebssysteme und verteilte Systeme

Folie 19

## Vor/Nachteile...

- Motivation  
- State of the Art

I.  
Formales  
Framework

II.  
Implementierung  
der Echtzeit

III.  
Echtzeit-Switch

- Gesamtfazit

### Zentrales Polling (Verteilung von Sendeberechtigung):

- + Einfach zu berechnende Schedule; Für Hubs ideal
- Nur bedingt für dezentrale Kommunikation geeignet (Manager ist Flaschenhals)
- Keine nRT-Geräte erlaubt

### Polling für jeden Switch:

- + Parallele Übertragungen möglich
- + Einheitliche Entfernung der Geräte zum Scheduler
- Erhöhte Verzögerungszeit; Synchronisationsaufwand
- Viele Zusatzgeräte notwendig; Keine nRT-Geräte erlaubt

### Integriertes Polling in jeden Switch (neuer Ansatz!):

- + Switches können passive Geräte direkt pollen
- + Dezentrale Kommunikation möglich
- + nRT-Geräte gleichzeitig im Netz erlaubt
- Modifizierung der Switches erforderlich

### Integriertes Polling und synchronisierte Geräte:

- + Höchste Echtzeitfähigkeit mit dezentraler Kommunikation
- + nRT-Geräte gleichzeitig im Netz erlaubt
- Viele modifizierte Geräte; Synchronisationsaufwand

## III. IRT-Echtzeit Switch

Dipl.-Inf. Frank Dopatka M. Sc.  
Frank.Dopatka@uni-siegen.de

Universität Siegen

FB12 - Elektrotechnik und Informatik, Betriebssysteme und verteilte Systeme

## Die Idee...

- Motivation  
- State of the Art

I.  
Formales  
Framework

II.  
Implementierung  
der Echtzeit

III.  
Echtzeit-Switch

- Gesamtfazit

### Modifizierung des Switches nah am Übertragungsmedium an einer standardisierten Schnittstelle: (R)MII

- Ports werden entsprechend der geladenen Schedule direkt dynamisch miteinander gekreuzt („cross-linking“ auf OSI-Schicht 2) -> Real-Time Crossbar RTC
- Verzögerungszeiten ähnlich eines Hubs (0.5µs/Gerät) für IRT-Frames
- nRT-Frames werden unabhängig Hop-by-Hop weitergeleitet und durch eine Switching-Engine oberhalb von OSI-Schicht 2 verwaltet



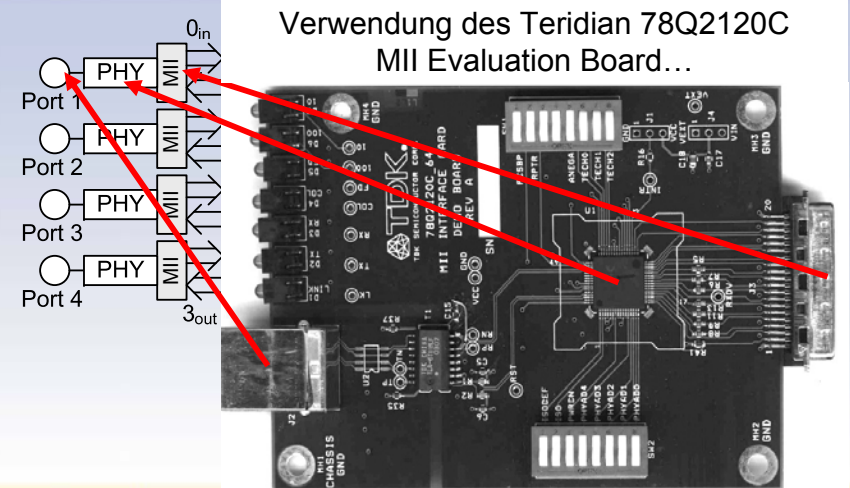
Dipl.-Inf. Frank Dopatka M. Sc.  
Frank.Dopatka@uni-siegen.de

Universität Siegen

FB12 - Elektrotechnik und Informatik, Betriebssysteme und verteilte Systeme



## Der IRT-Switch



Dipl.-Inf. Frank Dopatka M. Sc.  
Frank.Dopatka@uni-siegen.de

Universität Siegen

FB12 - Elektrotechnik und Informatik, Betriebssysteme und verteilte Systeme



## Ergebnisse zusammengefasst...

- Motivation  
- State of the Art

I.  
Formales  
Framework

II.  
Implementierung  
der Echtzeit

III.  
Echtzeit-Switch

- Gesamtfazit

- Prototyp der MII Real-Time Crossbar (RTC) wurde in VHDL erstellt und synthetisiert
- Dabei wurde eine Schaltung zur Synchronisation des Send- und Empfangstaktes entwickelt und simuliert: Das Problem bestand darin, dass sowohl der Send-, als auch der Empfangstakt vom PHY vorgegeben wird
- Außerdem wurde eine Schaltung zur Vervollständigung der Präambel entwickelt und simuliert: Das Problem bestand darin, dass zur Einsynchronisierung des PHY-Bausteins beim Empfang einige Bit der Frame-Präambel verloren gehen können.

**Ergebnis:  
Eine Umsetzung als FPGA ist möglich!**



Dipl.-Inf. Frank Dopatka M. Sc.  
Frank.Dopatka@uni-siegen.de

Universität Siegen

FB12 - Elektrotechnik und Informatik, Betriebssysteme und verteilte Systeme



## Gesamtfazit



Dipl.-Inf. Frank Dopatka M. Sc.  
Frank.Dopatka@uni-siegen.de

Universität Siegen

FB12 - Elektrotechnik und Informatik, Betriebssysteme und verteilte Systeme



## Der wissenschaftliche Beitrag

- Motivation  
- State of the Art

I.  
Formales  
Framework

II.  
Implementierung  
der Echtzeit

III.  
Echtzeit-Switch

- **Gesamtfazit**

- Das erstellte Framework ermöglicht erstmalig eine **abstrakte formalisierte Sichtweise** auf echtzeitfähige Netzwerke der Automatisierungstechnik
- **Abstraktion und Verallgemeinerung** von technologischen Implementierungen in einem **interdisziplinären Ansatz** (Netzwerke, Scheduling, Automatisierung, Mathematik)
- **Katalog von Verfahren** von idealisierten Übertragungen bis zu realitätsnahen Sichtweisen
- bei der Umsetzung der Schedules neue Idee eines Switches, der **bei passiven Geräten Sendeberechtigungen verteilt**
- **Simulation des Frameworks** in eigenem Simulator und durch Integration in OmNet++
- Erste Schritte zur Implementierung der Schedules durch **VHDL-Synthetisierung** einer Real-Time Crossbar



Dipl.-Inf. Frank Dopatka M. Sc.  
Frank.Dopatka@uni-siegen.de



Universität Siegen

FB12 - Elektrotechnik und Informatik, Betriebssysteme und verteilte Systeme