

**maschinenbauforum.ch**

powered by  SIGMATEK

Zürich University  
of Applied Sciences

**zhaw** School of  
Engineering  
InES Institute of  
Embedded Systems

**Maschinenbauforum 2017**

**Ist TSN mit OPC UA das  
Real-time Ethernet der Zukunft?**

**Hans Weibel**

**Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW)**

**Institute of Embedded Systems (InES)**

# Inhalt

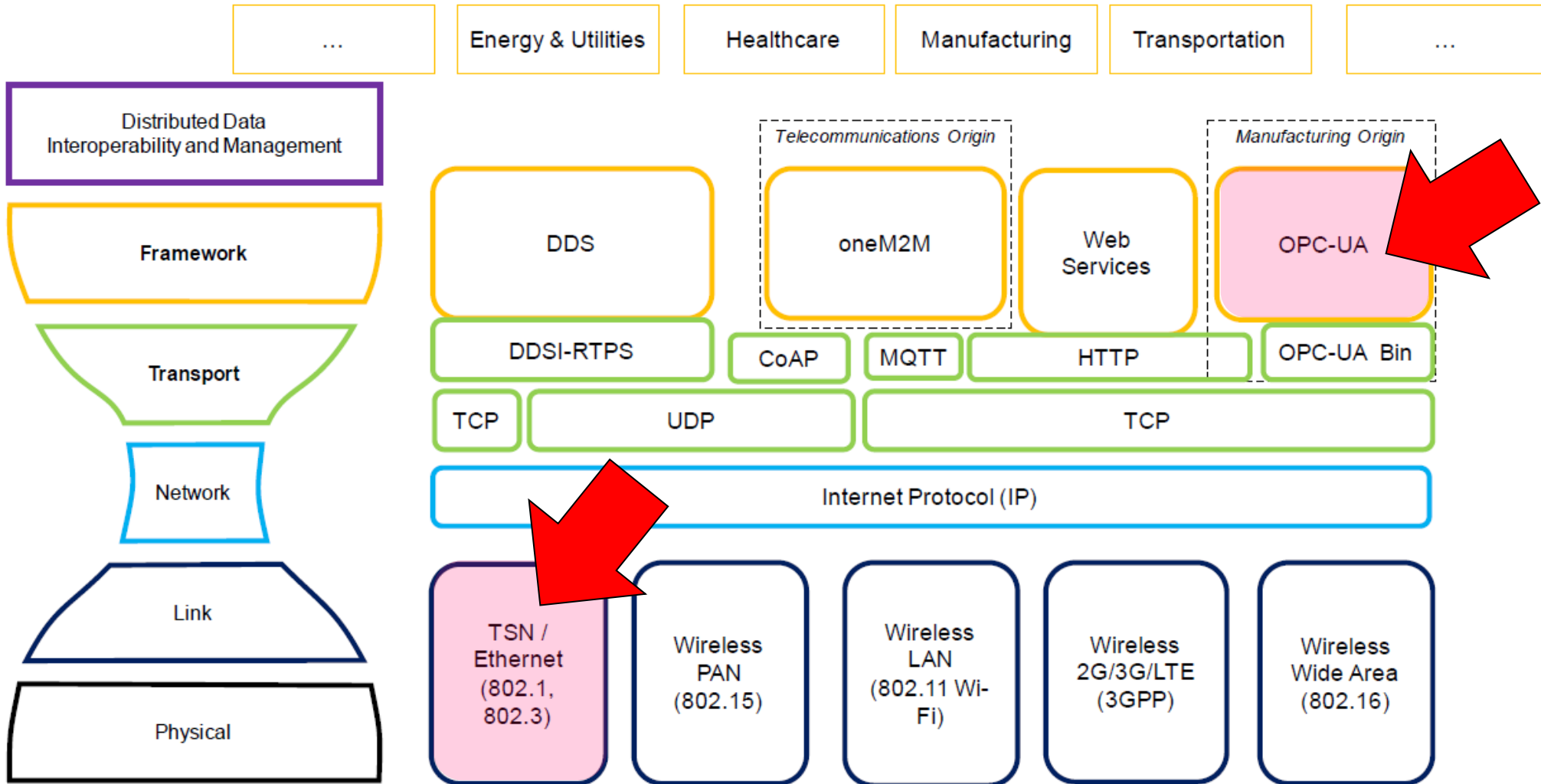
- Zielsetzung
- Einordnung von TSN und OPC UA
- Konvergenz von Ethernet für IT und OT
- Umfang und Funktionsweise von TSN
- TSN im Vergleich mit den etablierten real-time Ethernet-Varianten
- Zukunft von TSN und der etablierten real-time Ethernet-Varianten
- Die Rolle von OPC UA
- Fazit

# In eigener Sache

## InES @ ZHAW

- Das **Institute of Embedded Systems (InES)** ist Teil der **Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW)**
- Im Rahmen der angewandten Forschung und Entwicklung widmet sich das InES speziell der industriellen Kommunikation, mit Fokus auf Ethernet und drahtlosen Lösungen
  - real-time Ethernet (AVB/TSN, Ethernet Powerlink, ProfiNet, etc.)
  - hochpräzise Zeitsynchronisation (IEEE 1588, IEEE 802.1AS)
  - Protokolle für hochverfügbares Ethernet (MRP, PRP, HSR gemäss IEC 62439)
  - wireless (Sensor Networks, Energy Harvesting, Bluetooth, RFID, UWB)
- Die Aktivitäten umfassen
  - Konzept- und Machbarkeitsstudien
  - Prototyping, Proof-of-Concept und Referenzimplementationen
  - Protocol Stacks, FPGA IP
  - Support und Engineering

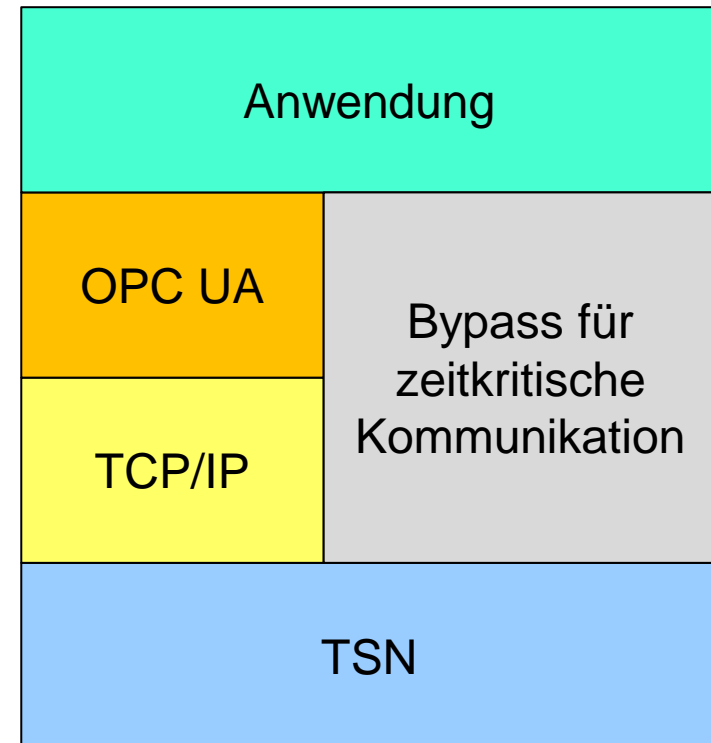
# Einordnung von TSN und OPC UA



# Ethernet für OT und IT

## Konvergenz – OT und IT im selben Netzwerk

- Mit Industrie 4.0 verschwindet die Automatisierungspyramide
  - Architektur erfordert durchgängige Kommunikation durch alle Ebenen
- Ein konvergentes Netzwerk unterstützt
  - Operational Technology (OT), also die zeitkritischen Funktionen der Steuerungs- und Feldebene
  - Information Technology (IT), also die Aspekte der Leitebene und Fertigungssteuerung (ERP und MES)
- Die beiden Bereiche
  - haben sehr unterschiedliche Anforderungen an das Netzwerk
  - dürfen sich gegenseitig nicht beeinträchtigen



# Ethernet für IT und OT

## Quality of Service (QoS) Anforderungen

- **Information Technology (IT):** Die Hauptanwendung von Ethernet ist das Unternehmensnetzwerk im Dienst der Business-IT
  - der Service ist “Best Effort”
  - Performance Parameter sind Bitrate, Durchsatz und durchschnittliche Latenz
  - die Leistung ist bei entsprechender Dimensionierung meist ausreichend
  - wenn nicht, dann helfen Priorisierungsmechanismen oder zusätzliche Ressourcen
- **Operational Technology (OT):** Für industrielle Steuerungen gelten andere Vorgaben:
  - deterministische Kommunikation ist gefordert, d.h. die worst-case Latenz muss bekannt, akzeptabel und garantiert sein
  - es gibt keine Verluste infolge Überlast

# Ethernet für IT und OT

## Quality of Service (QoS) Garantien

- Leistung kann nur garantiert werden, wenn es übergeordnete Regeln gibt, deren Einhaltung erzwungen wird
  - Ermittlung/Planung des zu bewältigenden Verkehrsaufkommens
  - entsprechende Dimensionierung der Ressourcen
  - Begrenzung des zugelassenen Verkehrs (Policing)
  - Abgrenzung gegenüber den Netzbereich, in denen andere Regeln gelten
- Der Verkehrsfluss wird bedarfsgerecht gesteuert durch Mechanismen wie
  - Klassifizierung der Frames (Einteilung in Traffic Classes)
  - Priorisierung
  - Reservation von Ressourcen
  - Scheduling und Traffic Shaping
- Real-time Frames (OT) sind so zu behandeln, dass die Garantien erfüllt werden; non-real-time Verkehr (IT) darf die verbleibende Kapazität konsumieren

# Time-Sensitive Networking (TSN)

## Um was geht es?

- TSN ist nicht ein Standard, sondern eine Task Group von IEEE 802.1
- Ziel ist die **Erweiterung von Ethernet** durch Mechanismen, die eine garantierte **Quality of Service (QoS)** auf dem **Data Link Layer** (OSI Layer 2) bieten, insbesondere
  - kurze und garantierte worst-case Latenz im Ethernet
  - keine Verluste infolge Überlast
- TSN bietet ein **Set von QoS-Mechanismen**, die je nach Anforderungen **in unterschiedlichen Kombinationen** verwendet werden können
- Ursprüngliche Anstrengungen waren auf Audio/Video fokussiert und liefen daher unter der Bezeichnung Audio/Video Bridging (AVB)
- Nach der Ausdehnung des Anwendungsbereiches auf Industrie und Automobiltechnik wurde die Gruppe in TSN umbenannt - TSN ist somit als zweite Generation von AVB zu verstehen



# Der TSN Baukasten

## Bestandteile

- Time Synchronization IEEE 802.1AS
- Time Synchronization Enhancements IEEE 802.1ASrev
- Stream Reservation IEEE 802.1Qat
- Stream Reservation Enhancements IEEE 802.1Qcc
- Credit Based Shaper IEEE 802.1Qav
- Asynchronous Traffic Shaper IEEE 802.1Qcr
- Cyclic Queuing and Forwarding IEEE 802.1Qch
- Time-aware Scheduler IEEE 802.1Qbv
- Frame Preemption IEEE 802.1Qbu / IEEE 802.3br
- Ingress Filtering and Policing IEEE 802.1Qci
- Seamless Redundancy IEEE 802.1CB

Für den Maschinenbau sind die **markierten** Teile von besonderer Bedeutung.

# Zeitsynchronisation

## Zweck

- Die Zeitsynchronisation sorgt dafür, dass alle Knoten innerhalb einer **TSN-Domain** über präzise abgegliche Uhren verfügen
- Eine einheitliche Systemzeit ermöglichen zeitgesteuerte Funktionen wie
  - Traffic Shaping und Scheduling
  - Zeitschlitzverfahren
  - anwendungsspezifische Koordinationsaufgaben
- Die Anforderungen an die Genauigkeit sind
  - anwendungsspezifisch und
  - liegen im Bereich von Mikrosekunden bis in den Sub-Mikrosekunden
- Das verwendete Protokoll ist spezifiziert in:
  - IEEE 802.1AS, eine Variante des “Precision Time Protocol” (IEEE 1588)

# Traffic Shaping und Scheduling

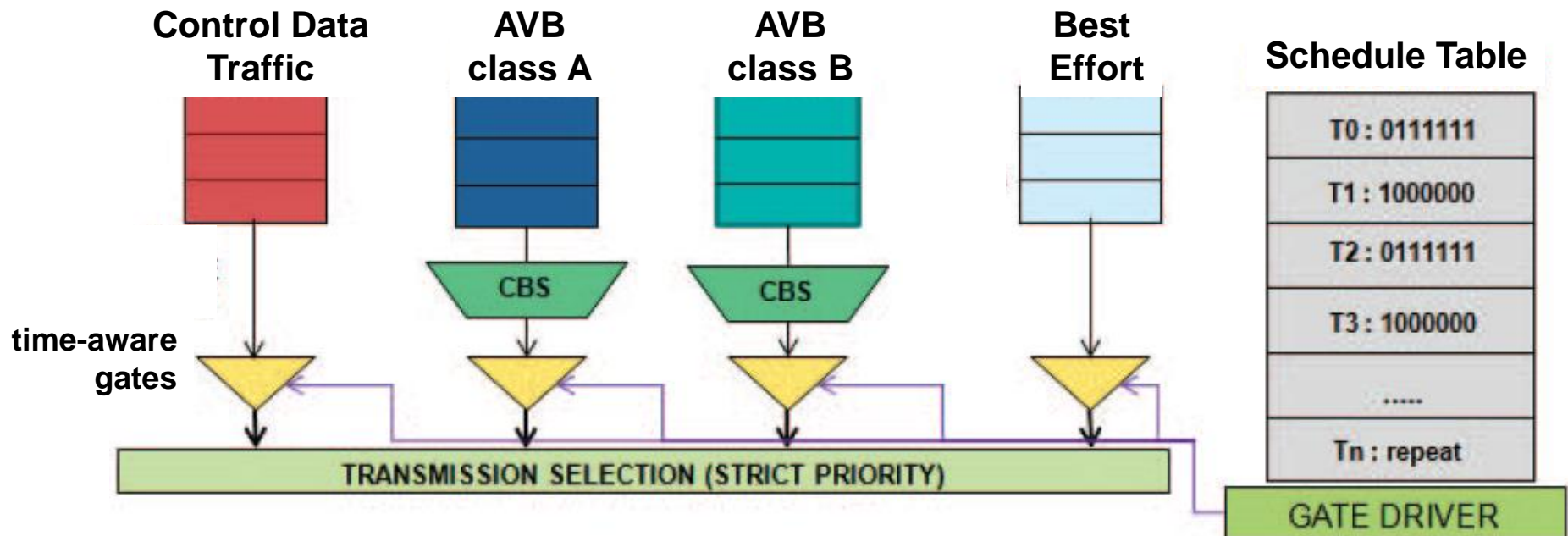
## Zweck

- Eine Bridge (Switch) verwaltet pro Port und Traffic Class je eine Warteschlange
- Der **Scheduler** entscheidet, welches Frame als nächstes übertragen wird
- Der Entscheid beruht auf verschiedenen Kriterien und Zielfunktionen
  - Priorität/Dringlichkeit
  - Zeit, Vorgeschichte
  - Fairness-Aspekte
  - Quoten, Kredit, Gewichtung
- Traffic **Shaping** bezeichnet Techniken, die gewisse Frames gezielt verzögern, um ein “besseres” Verkehrsmuster zu erzielen.  
“besser” heisst in diesem Zusammenhang:
  - die geforderten Qualitätsmerkmale (Delay, Delay Variation, Durchsatz) auf eine ausgewogene Weise zu berücksichtigen (nicht besser als nötig)
  - abgegebene Garantien zu erfüllen
  - vorhandene Ressourcen gut zu nutzen

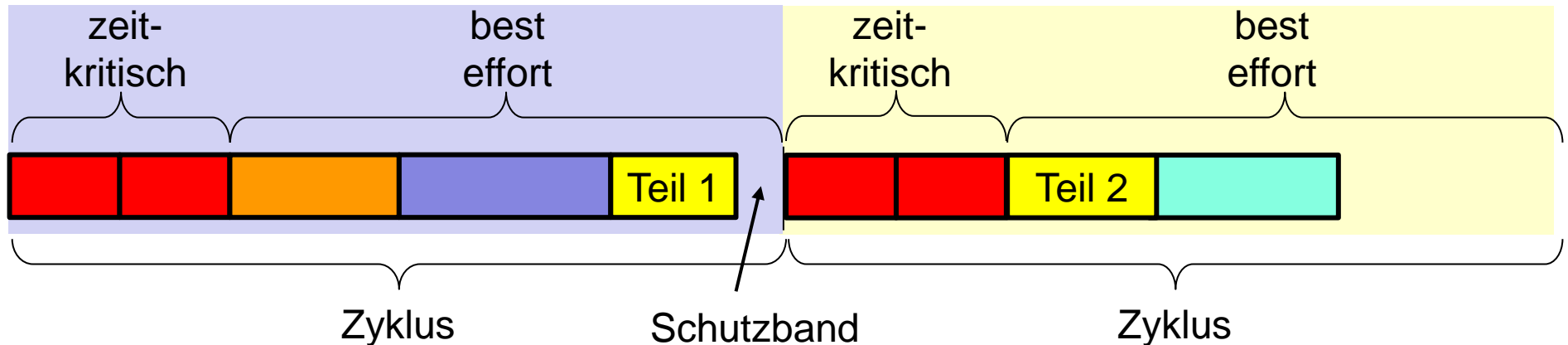
# Time-aware Scheduling

## Time-gated Queues

- Zyklische Kommunikation nach einem “Fahrplan”
- Zeitgesteuerte Gates zwischen den Warteschlangen und der Transmission Selection ermöglichen die Realisierung eines Zeitschlitzverfahrens



# Time-aware Scheduling Zeitverhalten



- Wenn das Gate für zeitkritischen Verkehr offen und das Ausgangsport frei ist
  - kann die Übertragung sofort beginnen
  - mit cut-through Forwarding lässt sich eine sehr kurze Latenz erzielen
- Wie erreicht man, dass das Ausgangsport rechtzeitig frei ist? Drei Optionen:
  - so dimensionieren, dass in die Best Effort Phase mindestens ein Frame maximaler Länge reinpasst (Verschwendung)
  - Framelänge limitieren (z.B. durch Fragmentierung auf Layer 3)
  - Frame Preemption Mechanismus (“Fragmentierung” auf Layer 2)

# Frame Preemption

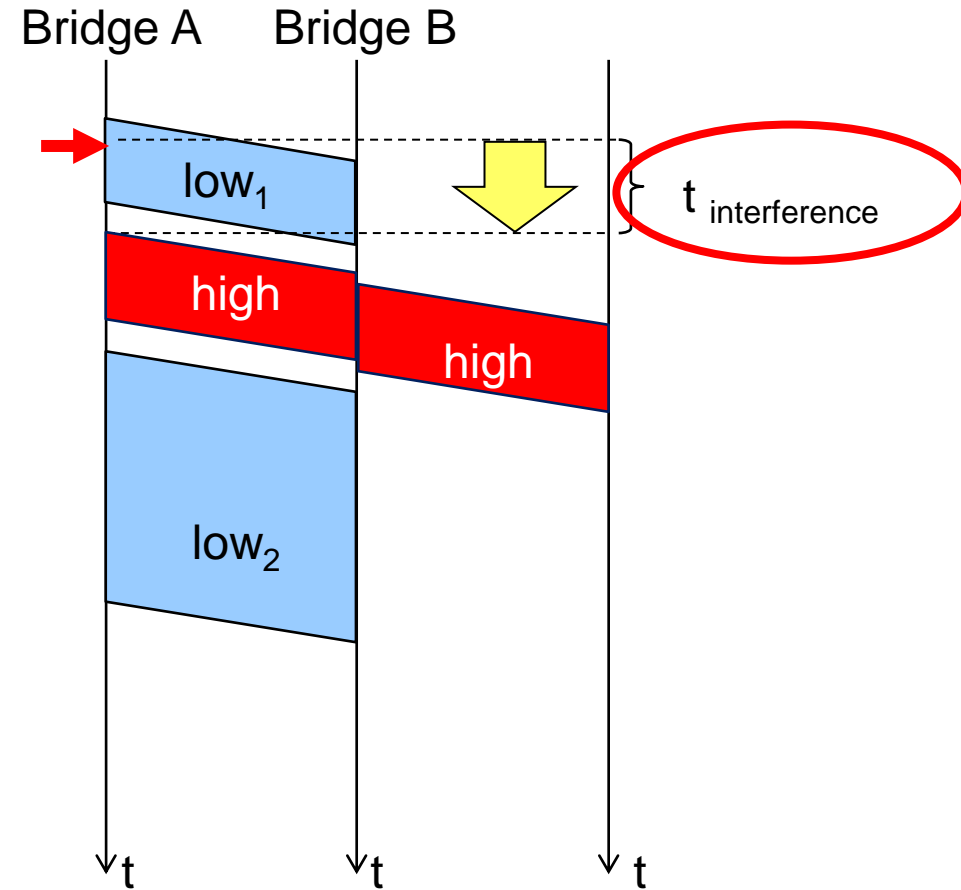
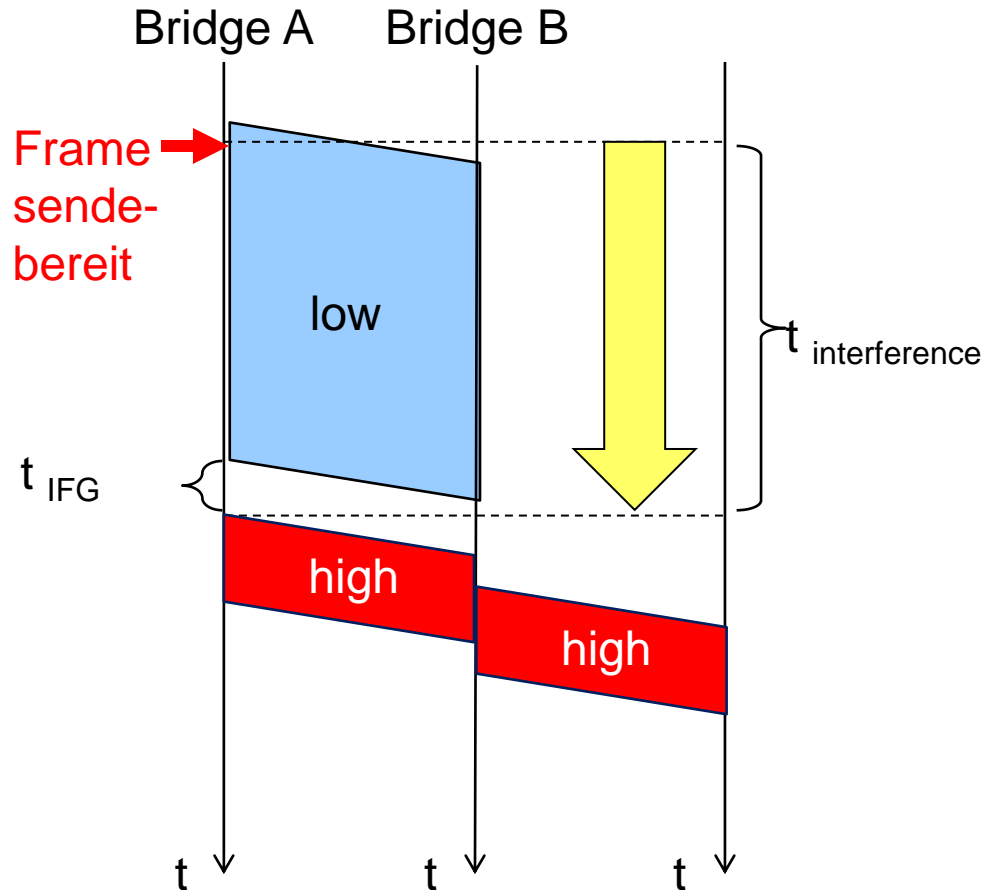
## Zweck

- Zeitkritische Frames (in diesem Zusammenhang Express Frames genannt), können ein Frame, dessen Übertragung bereits begonnen hat, abbrechen und später wieder fortsetzen.
  - der Vorgang ist Hop-by-Hop zwischen zwei benachbarten Ports
  - es gibt nur eine Unterbrechungsebene
- Preemption beschränkt die störende Einwirkung langer Frames
  - dies ist besonders bei tiefen Bitraten wertvoll
  - generell kann für Frames mit höchster Priorität eine viel kürzere worst-case Latenz erzielt werden
  - kombiniert mit Time-aware Scheduling sind kürzere Zykluszeiten möglich und die Ressourcen werden besser genutzt
- Das verwendete Protokoll ist spezifiziert in:
  - IEEE 802.3br “Interspersing Express Traffic” (IET)

# Frame Preemption Verbesserung

ein Frame hoher Priorität ist versanbereitet, doch das Zielport ist bereits belegt

Ein Frame mit tiefer Priorität kann unterbrochen und später fortgesetzt werden



Die worst-case Latenz  $t_{interference}$  in einem 100 Mbps Ethernet ist 123  $\mu$ s pro Hop

# Verlustfreie Redundanz

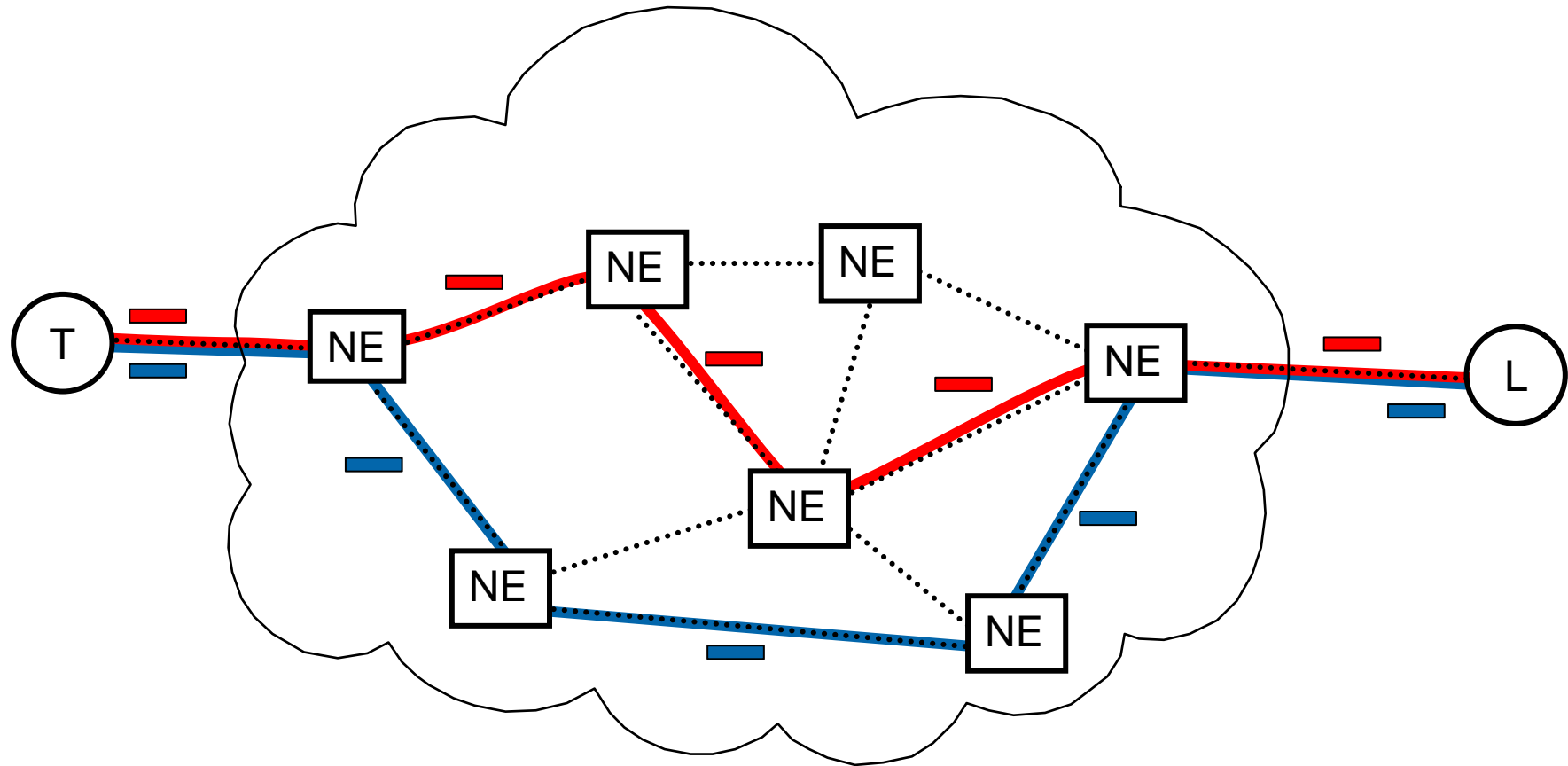
## Duplizierung und Eliminierung von Frames



- Die Idee beruht darauf, dass man für kritische Streams
  - mehrere Kopien des selben Frames auf verschiedenen unabhängigen Pfaden überträgt
  - der Empfänger verarbeitet das zuerst eintreffende Frame und verwirft nachfolgende Kopien
  - damit ist man gegen **Ausfälle von Geräten** wie auch gegen **sporadische Übertragungsfehler** gewappnet
  
- Das verwendete Protokoll ist spezifiziert in:
  - IEEE 802.3CB
  
- Ähnliche Verfahren sind in IEC 62439 normiert:
  - Parallel Redundancy Protocol (PRP), IEC 62439-3 Clause 4
  - High-availability Seamless Redundancy (HSR), IEC 62439-3 Clause 5



# Verlustfreie Redundanz

## Zwei disjunkte Pfade für kritische Datenströme

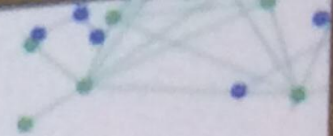


-  main path
-  redundant path

# TSN

## Zusammenfassung

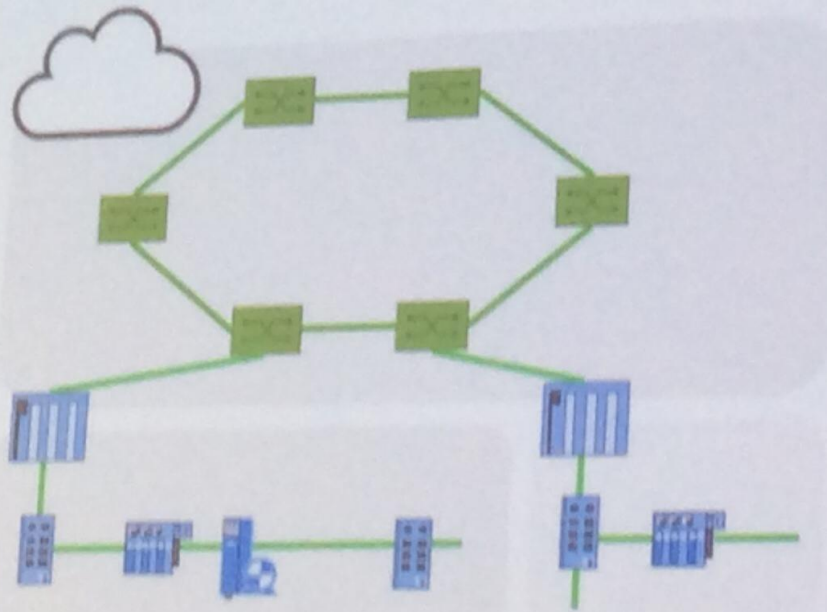
- TSN ist ein Quality-of-Service Toolkit für IEEE 802 Ethernet
- Die Mechanismen lassen sich nach Bedarf kombinieren
- TSN kann in Bezug auf QoS die existierenden Echtzeit-Ethernet-Varianten ersetzen und teilweise gar übertreffen
- TSN findet breite Akzeptanz
  - die Protokollerweiterungen sind in Einklang mit IEEE 802 Ethernet
  - die Protokollerweiterungen werden weiter entwickelt
  - ist nicht auf eine bestimmte Bitrate beschränkt
  - ist eine nicht von einer Firma dominierte Lösung
- TSN wird von mehreren Seiten vorangetrieben
  - Halbleiterhersteller bieten erste Lösungen an
  - Gerätehersteller arbeiten an Plattformen für Endgeräte und TSN-Switches
- Es gibt auch noch Baustellen:
  - Engineering, Projektierung, Konfiguration, Management, Interoperabilität



Wir nutzen TSN in der

1. Feldebene
2. Anlagenebene
3. Cloud-Anbindung

optimal und  
praktisch umsetzbar



**Anlagenebene**



**Feldebene**

Klare Aussage von Profinet International an der Hannovermesse 2017:  
Profinet wird TSN in allen Bereichen nutzen.

# Stellenwert von TSN im Kontext etablierter Lösungen

## Profinet

Zitate aus News von Profibus & Profinet International:

<http://profinews.com/2016/05/profinet-and-tsn-close-ranks-through-industrie-4-0/>

- The combination will also yield versatile use of new TSN-capable standard Ethernet blocks for manufacturers of PROFINET devices. **Proven PROFINET services, profiles, and user interfaces, such as diagnostics, alarms, PROFI-safe, and PROFIdrive remain unchanged** for the user.
- PI will actively advance the further development of TSN and point out ways **this technology can be used in PROFINET networks**. In doing so, special attention will obviously be given to a seamless transition for today's installations so that users have an easy path to TSN-based networks.
- Other topics such as **the use of OPC UA** and expanded access to asset management data are also needed for implementation of Industrie 4.0 applications and are being actively advanced by the I4.0 working group.

# Stellenwert von TSN im Kontext etablierter Lösungen Sercos International

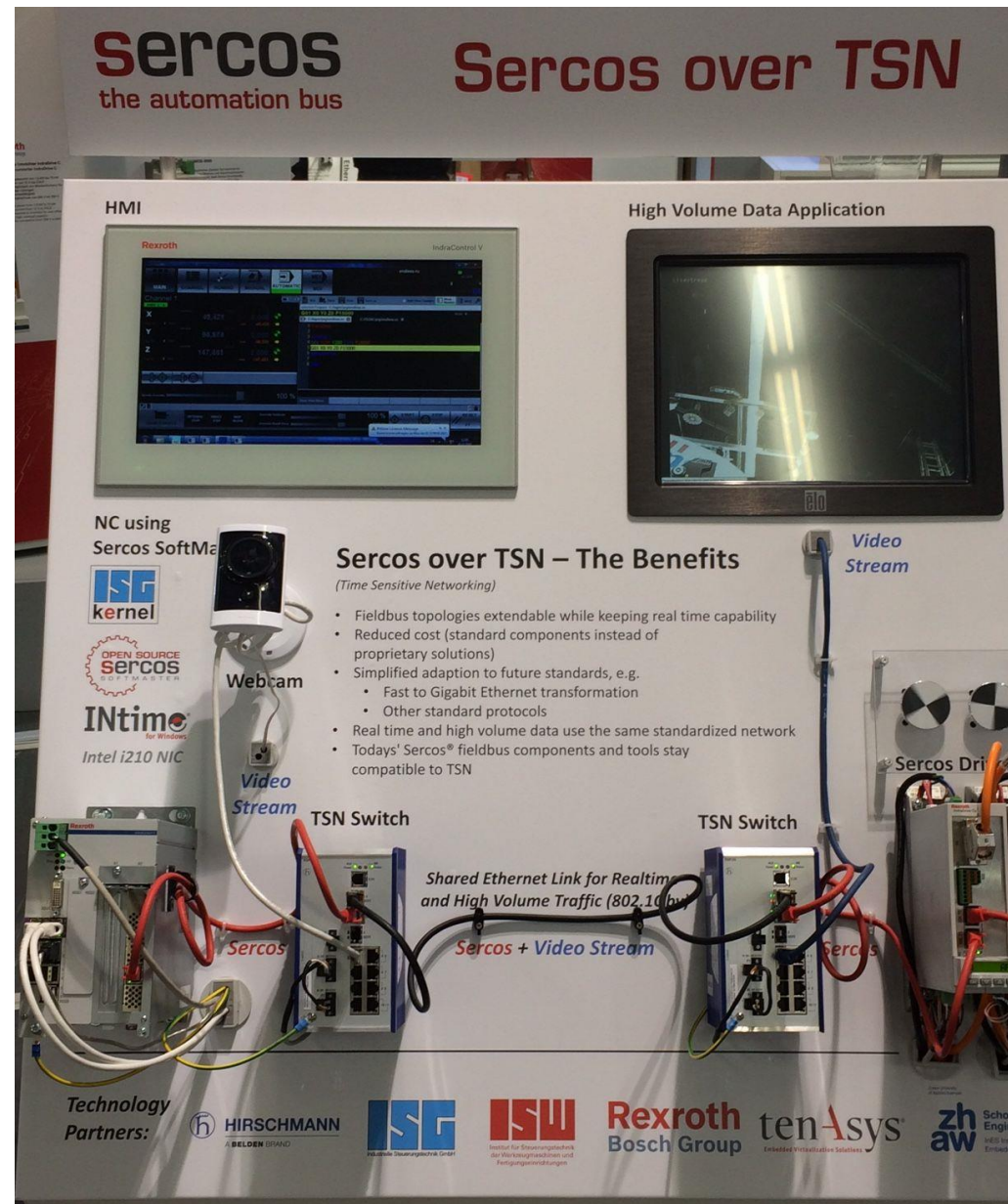
Meldung zur SPS IPC Drives 2015:  
Arbeitsgruppe wird TSN auf Eignung für  
die schnelle und echtzeitfähige  
Maschinenkommunikation evaluieren.

<http://www.sercos.de/newsdetail/sercos-international-arbeitsgruppe-fuer-ethernet-tsn-gegruendet/>

Sercos International zeigte an der SPS  
IPC Drives 2016 und Hannovermesse  
2017 Sercos in Verbindung mit TSN.

<https://www.pressebox.de/pressemitteilung/sercos-international-ev-suessen/Sercos-TSN-Demonstrator-erstmals-auf-der-Hannover-Messe/boxid/847183>

Das Institut für Steuerungstechnik der  
Werkzeugmaschinen und Fertigungs-  
einrichtungen (ISW) der Universität  
Stuttgart realisiert mit Unterstützung  
von Partnern (darunter die ZHAW) einen  
Demonstrator “Sercos over TSN”.



# TSN ist nicht genug: Es braucht eine L2/L3 Lösung

## IETF WG Deterministic Networking (DetNet)

- Der Bedarf für deterministisches Zeitverhalten ist nicht auf Layer 2 beschränkt
- Der Layer 3 ist das Territorium der IETF, wo der Scope ausgedehnt wird
  - die Working Group “Deterministic Networking” (DetNet) wurde ins Leben gerufen
  - die DetNet WG und die TSN Task Group arbeiten zusammen
- DetNet befasst sich mit Aspekten wie
  - Architecture
  - Layer 3 Data Plane Protokollen (IPv4, IPv6, MPLS)
  - Operation, Administration, and Maintenance (OAM)
  - Management
  - Control
  - Security

# Rolle von OPC Unified Architecture (OPC UA)

## Kommunikationsprotokoll für die höheren Schichten

- OPC UA ist unabhängig von TSN (und umgekehrt)
- Im Rahmen von Industrie 4.0 ist OPC UA gesetzt als Protokoll für den Datenaustausch zwischen allen Ebenen innerhalb eines Unternehmens und auch extern (z.B. Cloud Services)
  - ist herstellerunabhängig, plattformunabhängig, offen (IEC 62541)
  - findet im Bereich Factory Automation breite Akzeptanz (viele Feldbus-Organisationen bekennen sich zu OPC UA)
  - unterstützt Client/Server und Publisher/Subscriber Kommunikation
  - bietet neben dem Transport auch ein Datenmodell, das es erlaubt, Maschinendaten semantisch zu beschreiben (also deren Bedeutung und Zusammenhänge)
  - beinhaltet ein durchgängiges Security-Konzept
- Branchenorganisationen erarbeiten für Devices ihrer Anwendungsdomäne entsprechende Informationsmodelle
  - OPC UA Companion Spezifikationen

# Fazit

- Sowohl TSN wie OPC UA sind offene und breit akzeptierte Standards
  - können unabhängig voneinander verwendet werden
  - ergänzen sich jedoch ideal
  - bieten grosses Potential für Herstellerunabhängigkeit und Interoperabilität
- Interoperabilität setzt eine “gemeinsame Sprache”, also einen einheitlichen Protokollstack voraus
- Aus technischer Sicht kann TSN die heute etablierten real-time Ethernet Varianten ablösen
- Mit IIoT und Industrie 4.0 ist das Bewusstsein gestiegen, dass sich Kommunikationsprotokolle nicht als Alleinstellungsmerkmal eignen
- Feldbusse und herkömmliche real-time Ethernet-Varianten werden nicht einfach verschwinden
  - Investitionsgüter haben einen langen Lebenszyklen
  - kombinierte Lösungen können sinnvoll sein