

---

# Rechnernetze II

SoSe 2025

Roland Wismüller  
Betriebssysteme / verteilte Systeme  
roland.wismueller@uni-siegen.de  
Tel.: 0271/740-4050, Büro: H-B 8404

Stand: 1. April 2025

---

# Rechnernetze II

SoSe 2025

## 10 Netze für Automatisierungssysteme

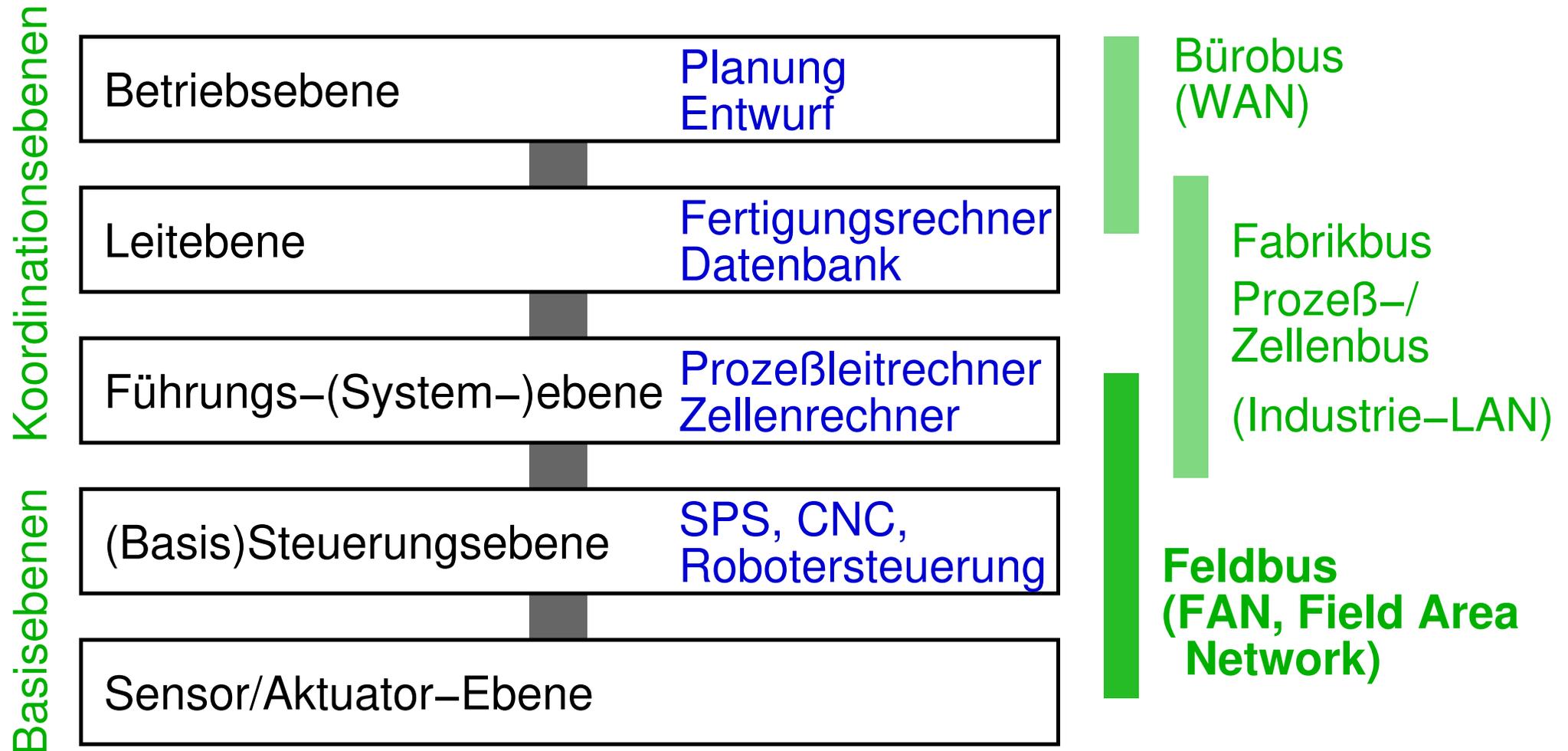


## Inhalt

- ➔ Einführung
- ➔ Typische Merkmale von Feldbussen
- ➔ CAN
- ➔ Echtzeit-Ethernet
  
- ➔ Gerhard Schnell: Bussysteme in der Automatisierungs- und Prozesstechnik, Vieweg Verlag.
- ➔ Vorlesung Prof. Varchmin, TU Braunschweig  
<https://docplayer.org/12583965-Industrielle-kommunikation-mit-feldbussen.html>



## Hierarchieebenen in der Automatisierung





## Einige spezielle Anforderungen an Feldbusse

- ➔ Zuverlässigkeit, geringe Störempfindlichkeit
  - ➔ Störungen durch elektrische Maschinen
- ➔ Einfache, kostengünstige Vernetzung
  - ➔ günstige Verkabelung und Endgeräte
- ➔ Übertragung von Prozeßdaten (Sensoren/Aktoren)
  - ➔ viele Teilnehmer, kleine Informationsmengen
  - ➔ zyklische Datenerfassung
  - ➔ Echtzeitanforderungen: konstante und vorhersagbare Abtastintervalle
- ➔ Sicherheitsanforderungen (z.B. Explosionsschutz)



## Echtzeit

- ➔ Information muß zu bestimmtem Zeitpunkt vorliegen
- ➔ Abstufungen:
  - ➔ weiche Echtzeit: Nutzen der Information sinkt nach der Deadline stetig
  - ➔ harte Echtzeit: Nutzen nach der Deadline ist sofort Null
    - ➔ Spezialfall: obere und untere Schranke
- ➔ Relevante Parameter im Netzwerk-Bereich:
  - ➔ Verzögerung
  - ➔ Jitter: Variation der Ankunftszeit
  - ➔ Determinismus des Medienzugangs

## Echtzeitklassen nach IAONA

Echtzeit-Klasse	1	2	3	4
Anforderung	gering	mittel	hoch	extrem hoch
typische Ebene	Leit-ebene	Führungs-ebene	Steuerungs-ebene	Sensor/Aktor-Ebene
Nutzdaten max.	500 KB	500 B	32(-200) B	20 B
Verzögerung max.	5 s	500 ms	5 ms	0,5 ms
Jitter max.	> 1 ms	0,1 - 3 ms	10 - 400 $\mu$ s	0,5 - 15 $\mu$ s

➔ IAONA: Industrial Automation Open Networking Alliance



- ➔ Busstruktur
  - ➔ geringer Verkabelungsaufwand bei hoher Teilnehmerzahl
- ➔ Deterministische Medienzugriffskontrolle:
  - ➔ meist zeitgesteuert
    - ➔ zentrale Zuteilung (Master/Slave)
    - ➔ dezentrale Zuteilung (Token-Bus bzw. -Ring, TDMA)
  - ➔ manchmal prioritätsgesteuert
    - ➔ (vollständige) Kollisionsvermeidung durch CSMA/CA
- ➔ Kurze Frames (**Telegramme**), oft nur wenige (8) Bytes
- ➔ Sehr zuverlässige Fehlererkennung



- ➔ Oft verschiedene Bandbreiten, abhängig von Leitungslänge
- ➔ Meist geschirmte Zweidrahtleitung, teilw. auch Lichtleiter
- ➔ Bei Sensor/Aktor-Bussen oft Zweidrahtleitung incl. Spannungsversorgung
- ➔ Meist nur OSI-Schichten 1, 2 und 7 implementiert
- ➔ Anwendungsprotokolle realisieren häufig Zugriff auf Objektverzeichnisse
  - ➔ Prozeßobjekte, z.B. Temperaturwerte, Schaltzustände, ...

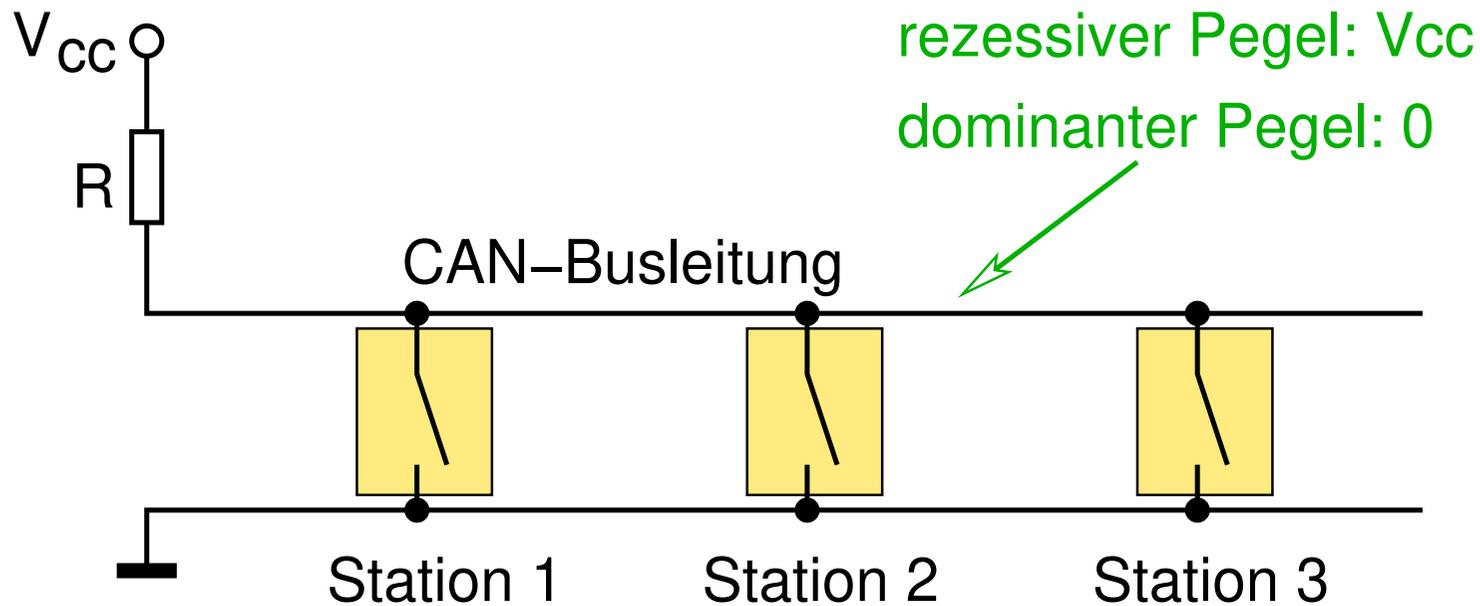


### Übersicht

- ➔ CAN: *Controller Area Network*
- ➔ Ursprünglich für Vernetzung in Fahrzeugen entwickelt, inzwischen auch im industriellen Bereich
- ➔ Adressierung erfolgt nachrichtenorientiert
  - ➔ Nachrichtentyp statt Sender-/Empfänger-Adresse
  - ➔ Geräte reagieren auf bestimmte Nachrichtentypen
- ➔ Bustopologie, keine Begrenzung der Teilnehmerzahl
- ➔ Medium: i.d.R. verdrehte Zweidrahtleitung
- ➔ Übertragungsraten:
  - ➔ 20 kb/s (max. 1000 m) bis 1 Mb/s (max. 40 m)
  - ➔ jedes Bit füllt die Leitung vollständig aus!

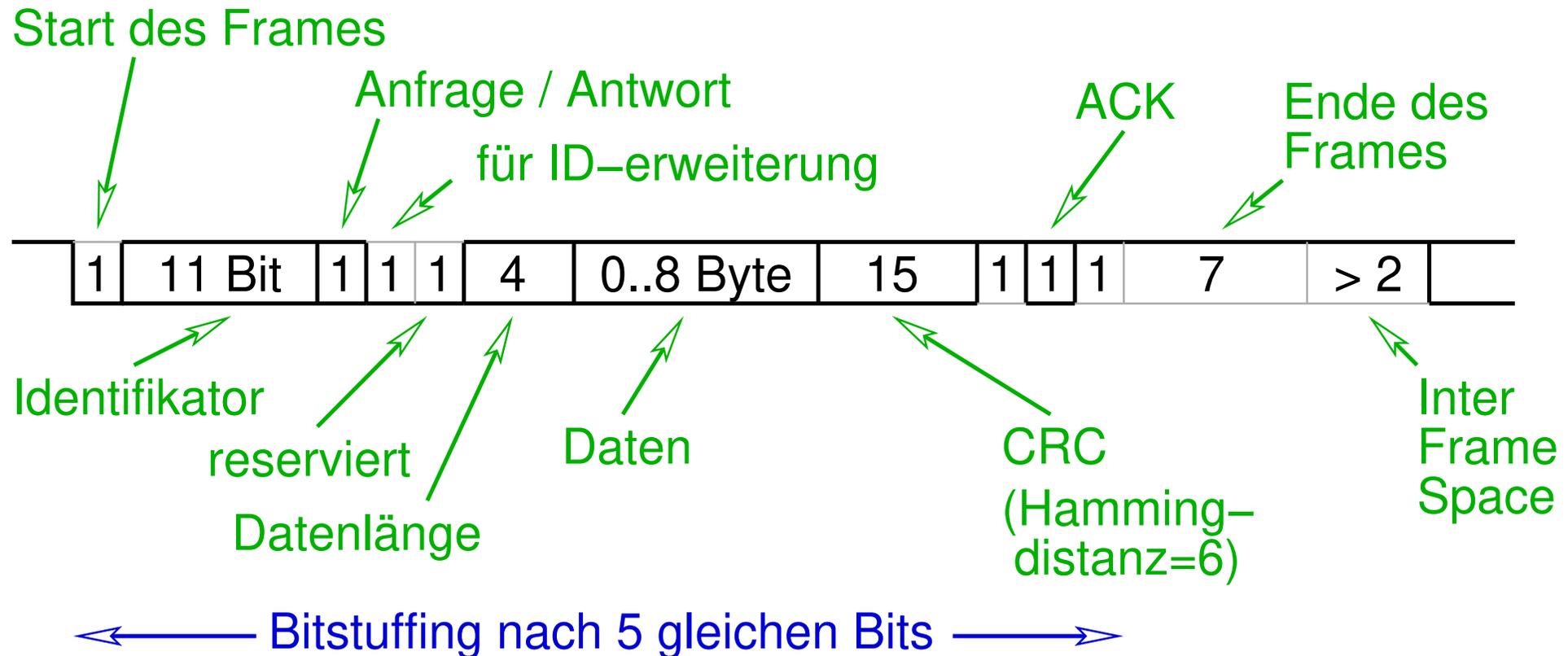
### Bitübertragung: rezessive und dominante Pegel

- ➔ Falls zwei Stationen gleichzeitig unterschiedliche Pegel an den Bus legen:
  - ➔ dominanter Pegel (0-Bit) setzt sich durch
- ➔ Prinzip-Bild:





## Frameformat



➔ ACK-Bit wird mit rezessivem Pegel gesendet

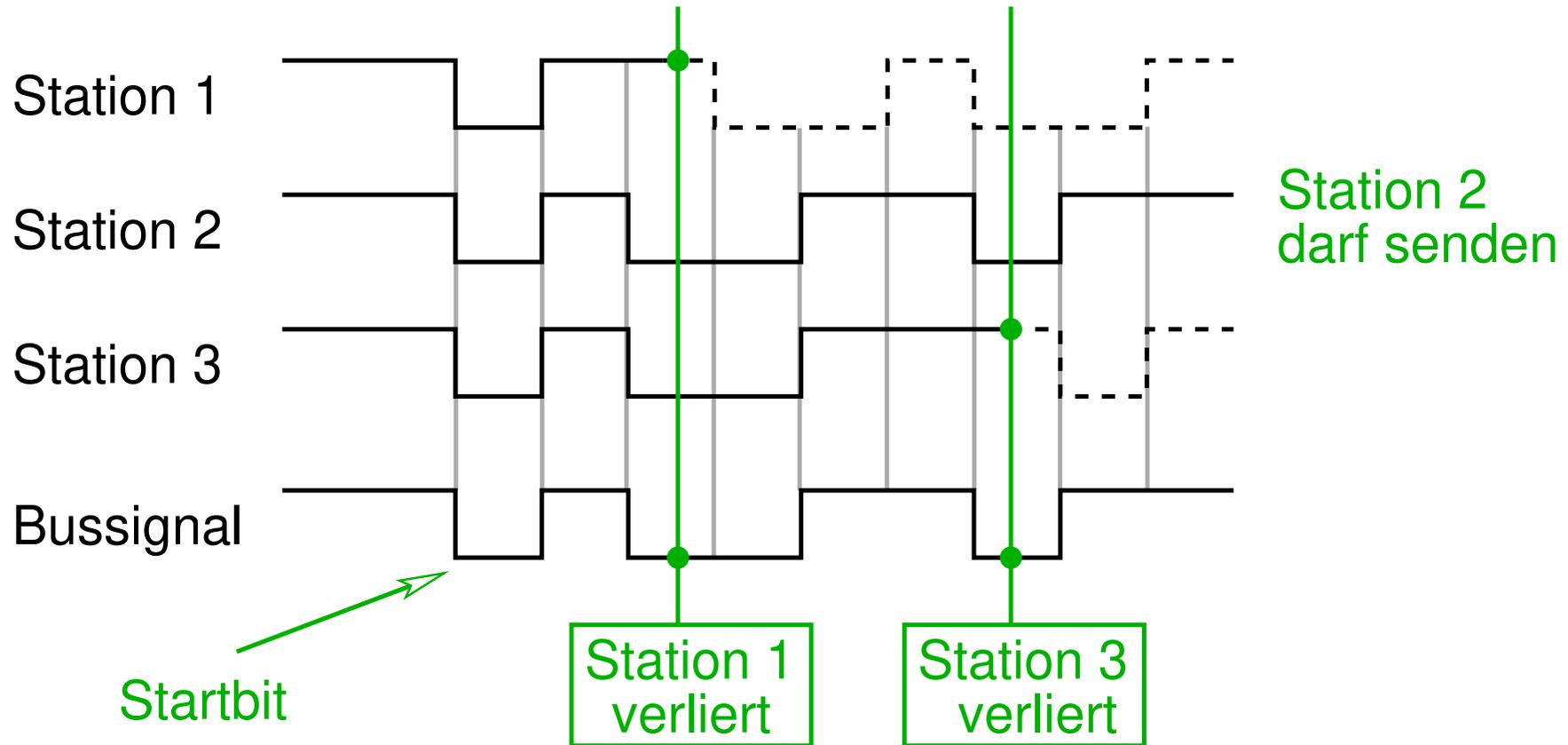
➔ Empfänger setzt (während d. Übertragung) dominanten Pegel

### Medienzugriffsverfahren

- ➔ Prioritätengesteuerte Arbitrierung
  - ➔ CSMA/CA, vollständige Vermeidung von Kollisionen
- ➔ Sender erkennen, wenn Bus unbenutzt ist
  - ➔ Bus liegt mehr als 5 Takte auf rezessivem Pegel
- ➔ Arbitrierung durch Mithören beim Senden des Identifikators und des Anfrage/Antwort-Bits
  - ➔ bitweiser Vergleich von gesendeten Daten und Buspegel
  - ➔ bei Abweichung: Senden sofort einstellen
  - ➔ Identifikator mit der ersten 0 gewinnt Arbitrierung
    - ➔ d.h. kleinster Identifikator hat höchste Priorität
    - ➔ bzw. bei gleichem Identifikator: Antwort hat Priorität



## Beispiel für die Busarbitrierung





- ➔ Ziel: durchgehende Verwendung von Ethernet in allen Ebenen
  - ➔ d.h. Koexistenz von Echtzeit und Nicht-Echtzeit-Verkehr
- ➔ Definition verschiedener Erweiterungen zur Echtzeitfähigkeit
  - ➔ Basis: *switched* Ethernet, vollduplex ohne CSMA/CD
- ➔ Problem: zeitliche Verzögerung von Frames in den Switches
- ➔ Lösungsansätze:
  - ➔ zeitgesteuerte Verfahren mit globalem Schedule
    - ➔ für periodische, zeitkritische Frames
  - ➔ prioritätsgesteuerte Verfahren (Tags nach 802.1Q)
- ➔ Beispiele:
  - ➔ *Time Triggered Ethernet*
  - ➔ *Time Sensitive Networking*



### 10.4.1 *Time Triggered Ethernet*

- ➔ Standardisiert durch Society of Automotive Engineers (SAE)
- ➔ Realisiert durch zusätzliche Schicht zwischen MAC und LLC
  - ➔ zeitliche Steuerung, incl. Uhrensynchronisation
  - ➔ Fehlertoleranz (durch Nutzung redundanter Wege)
- ➔ Drei Kommunikationsdienste:
  - ➔ *Time-triggered* Frames: periodisch
    - ➔ Knoten und Switches haben globalen TDMA-Schedule
  - ➔ *Rate-constrained* Frames: nicht periodisch, mit Prioritäten
    - ➔ Realisierung durch priorisierte Warteschlangen
    - ➔ Switches kennen minimale Zeit zwischen zwei Frames
  - ➔ *Best-effort* Frames: normale Ethernet-Frames



- ➔ Echtzeit-Dienste sind verbindungsorientiert (*one-to-many*)
  - ➔ Adressierung über Multicast MAC-Adressen
  - ➔ festes 32-Bit Feld + 16 Bit *Virtual Link Identifier*
- ➔ Mechanismen zur Konfliktauflösung bei der Weiterleitung:
  - ➔ *Shuffling*: keine Behandlung
  - ➔ *Timely Block*:
    - ➔ Einführung eines *Guarding Windows* vor TDMA-Slot
    - ➔ Länge: Zeit für maximal langen Frame
  - ➔ *Preemption*: Abbruch des übertragenen Frames
    - ➔ Problem: nicht von Übertragungsfehler unterscheidbar



### 10.4.2 *Time Sensitive Networking*

- ➔ Von der IEEE standardisierte Ergänzungen zu Ethernet (802.1)
- ➔ Basis: Prioritäten nach 802.1Q
  - ➔ für Prioritäten können unterschiedliche TDMA-Zeitfenster vorgesehen werden
  - ➔ damit ratenbeschränkte und synchrone Frames möglich
- ➔ Erweiterungen u.a. für:
  - ➔ Zeitsynchronisation (802.1AS)
  - ➔ Zeitgesteuertes Scheduling (802.1Qbv)
    - ➔ ermöglicht u.a. *time-triggered* Frames
  - ➔ *Frame Preemption* (802.1Qbu)
  - ➔ Frame Replikation zur Fehlertoleranz (802.1CB)
  - ➔ Wegewahl und Reservierung (802.1Qca)



- ➔ Hierarchieebenen in der Automatisierung:
  - ➔ unterschiedliche Anforderungen an Netze
- ➔ Feldbusse:
  - ➔ Leitrechner, Steuerungen, Sensoren/Aktoren
  - ➔ Zuverlässigkeit, Kosten, Echtzeitanforderungen
- ➔ Merkmale und Dienste der Netze werden durch Anwendungen und Einsatzumgebung bestimmt
- ➔ Verkabelungskosten  $\Rightarrow$  meist Busstruktur
- ➔ Umgebung  $\Rightarrow$  zuverlässige Fehlererkennung notwendig
- ➔ Anwendungen  $\Rightarrow$  Schichten 3-6 fehlen
  - ➔ Schicht 7: Objektverzeichnisse



- ➔ Anwendungen  $\Rightarrow$  Echtzeitfähigkeit
  - ➔ Übertragungsdauer und Jitter begrenzt
  - ➔ typisch: zyklische Übertragung mit fester Zykluszeit
- ➔ Medienzugriffssteuerung (MAC):
  - ➔ deterministisch
    - ➔ Zeitmultiplex (TDMA), Master/Slave, Token-Ring
  - ➔ nichtdeterministisch
    - ➔ z.B. CSMA/CA mit Prioritäten (CAN)
      - ➔ kleinste ID gewinnt
      - ➔ Voraussetzung: Bitzeit  $>$  RTT