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

10 Netze für Automatisierungssysteme ...

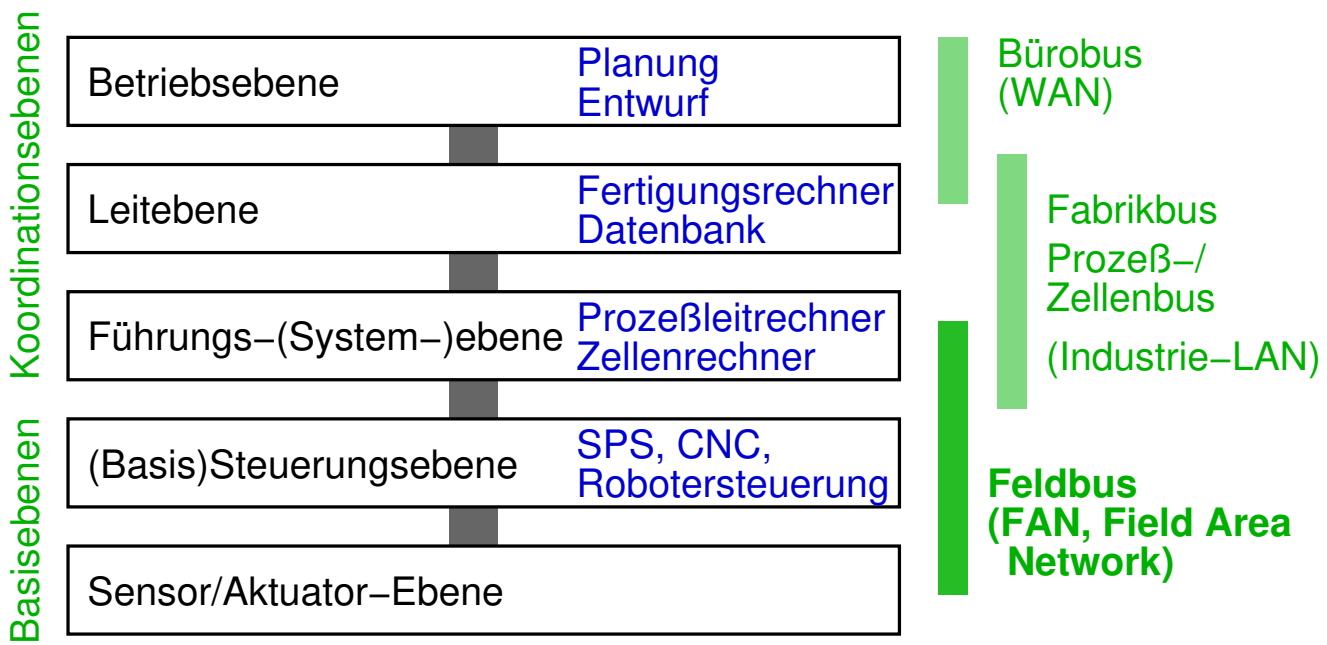
Inhalt

- 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

10.1 Einführung

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 μs	0,5 - 15 μs

- IAONA: Industrial Automation Open Networking Alliance

10.2 Typische Merkmale von Feldbussen

- Busstruktur
  - geringer Verkabelungsaufwand bei hoher Teilnehmerzahl
- Deterministische Medienzugangskontrolle:
  - 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

10.2 Typische Merkmale von Feldbussen ...

- 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, ...

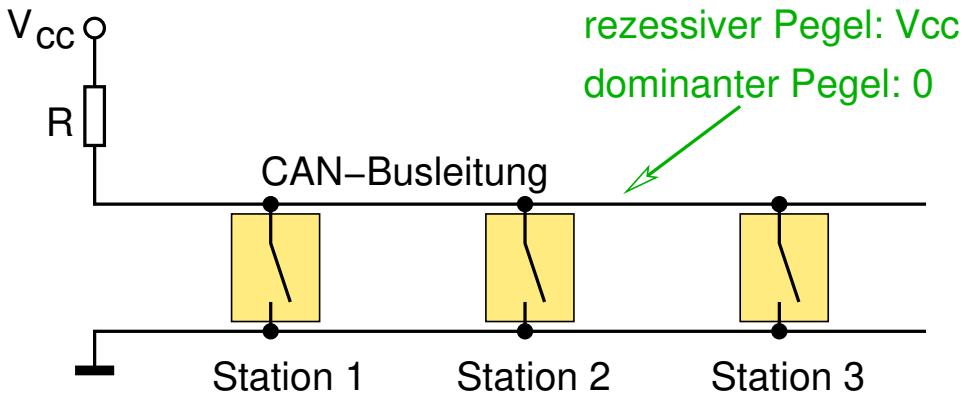
10.3 CAN

Übersicht

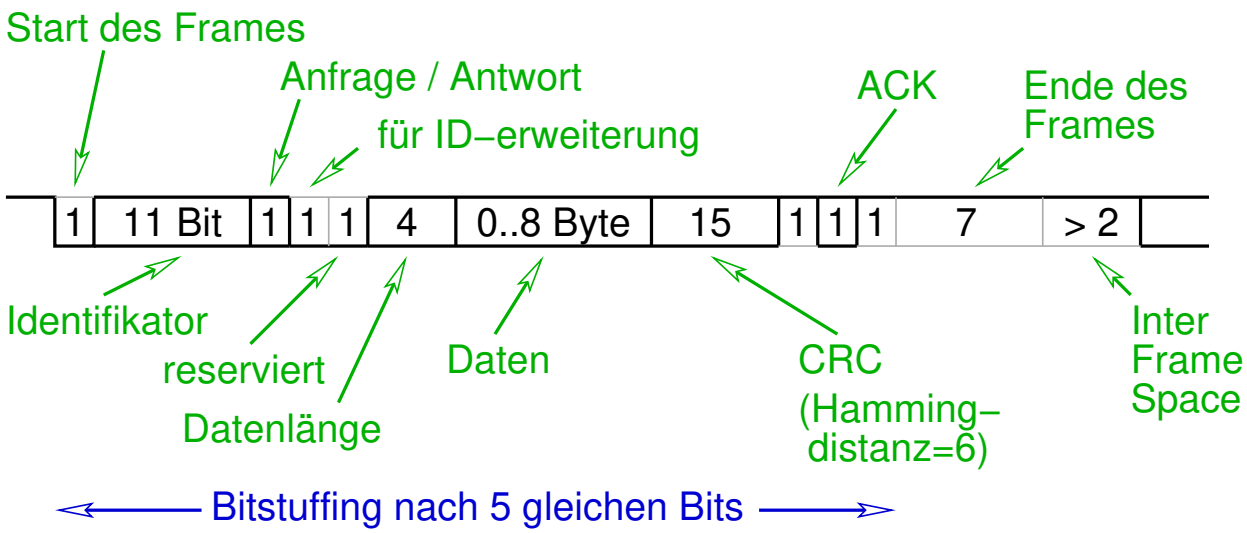
- CAN: *Controller Area Network*
- Ursprünglich für Vernetzung in Fahrzeugen entwickelt, inzwischen auch im industriellen Bereich
- Adressierung erfolgt nachrichtenorientiert
  - Nachrichtentyp statt Sender-/Empfänger-Adresse
  - Geräte reagieren auf bestimmte Nachrichtentypen
- Bustopologie, keine Begrenzung der Teilnehmerzahl
- Medium: i.d.R. verdrillte 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

Anmerkungen zu Folie 346:

Das Arbitrierungsverfahren wird teilweise auch als CSMA/CR (*Collision Resolution*) bezeichnet.

Die Adressierung erfolgt bei CAN immer nur über den Nachrichtentyp!

Prinzipiell könnte es noch Kollisionen unterschiedlicher Nachrichten mit demselben Nachrichtentyp geben. Kollisionen zwischen einem Remote-Frame (Anfrage) und einem Datenframe (Antwort) werden dabei über RTR aufgelöst:

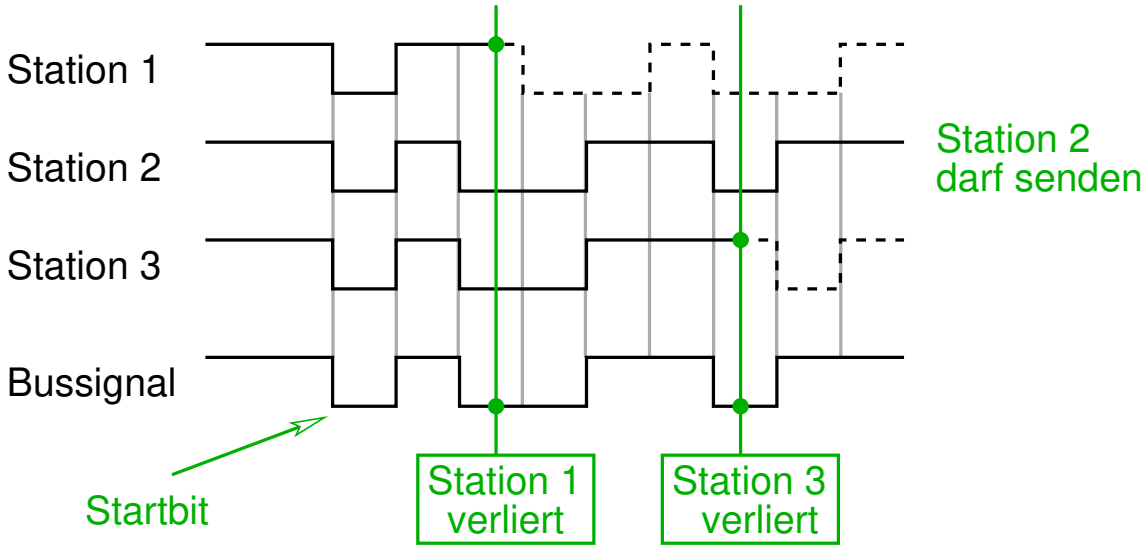
- Remote-Frame (RTR = 1): Datenanforderung, kein Datenteil!
- Datenframe (RTR = 0): Antwort, ID ist antwortendes „Objekt“

Die Antwort hat damit Priorität vor der Anfrage.

Werden zwei Remote-Frames mit derselben ID gleichzeitig gesendet, ist das kein Problem, da diese Frames bitweise identisch sind (und es egal ist, ob ein Wert einmal oder zweimal angefordert wird).

Da immer nur ein Gerät auf einen Nachrichtentyp antworten darf (da ja genau ein Gerät ein Objekt zur Verfügung stellen sollte), kann es nicht vorkommen, daß zwei Datenframes mit derselben ID gleichzeitig gesendet werden.

Beispiel für die Busarbitrierung



10.4 Echtzeit-Ethernet

- 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 Echtzeit-Ethernet ...

10.4.1 *Time Triggered Ethernet*

- Standardisiert durch Society of Automotive Engineers (SAE)
- Realisiert durch zuzätzliche 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

10.4.1 *Time Triggered Ethernet* ...

- 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)

10.5 Zusammenfassung / Wiederholung

- 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

10.5 Zusammenfassung / Wiederholung ...

- Anwendungen ⇒ Echtzeitfähigkeit
  - Übertragungsdauer und Jitter berenzt
  - 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