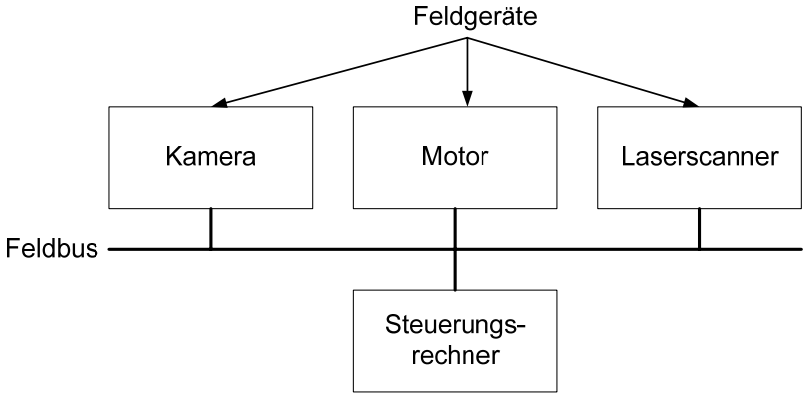
Anforderungen

- Echtzeitsysteme unterscheiden sich in ihren Anforderungen an die Kommunikation von Standardsystemen.
- Anforderungen speziell von Echtzeitsystemen:
  - vorhersagbare maximale Übertragungszeiten
  - kleiner Nachrichtenjitter
  - garantierte Bandbreiten
  - effiziente Protokolle: kurze Latenzzeiten
  - teilweise Fehlertoleranz
- Kriterien bei der Auswahl:
  - maximale Übertragungsrate
  - maximale Netzwerkgröße (Knotenanzahl, Länge)
  - Materialeigenschaften (z.B. für Installation)
  - Störungsempfindlichkeit (auch unter extremen Bedingungen)
  - Kosten, Marktproduktpalette

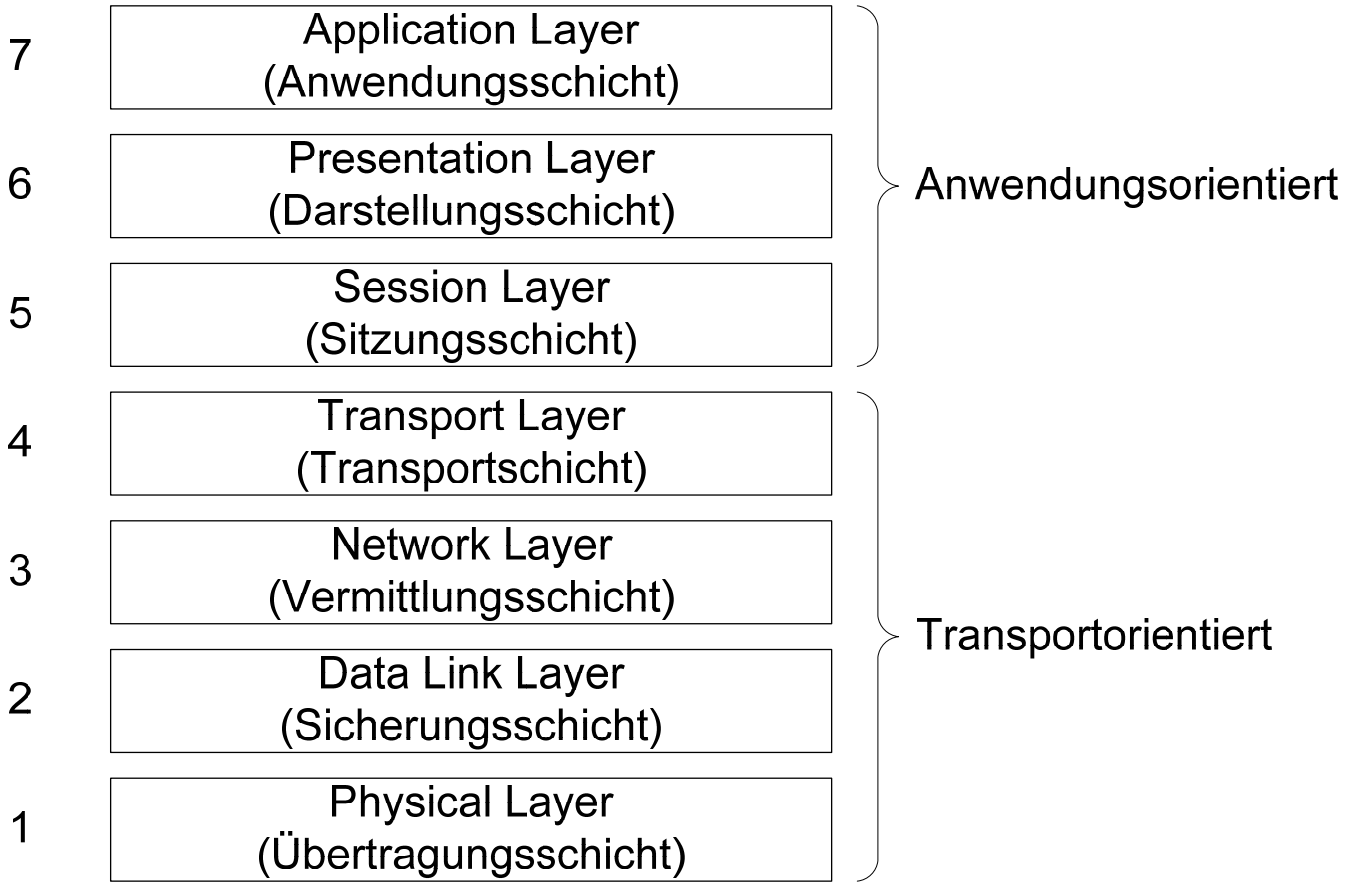
Definition Feldbus

- Die Kommunikation in Echtzeitsystemen erfolgt häufig über **Feldbusse**:



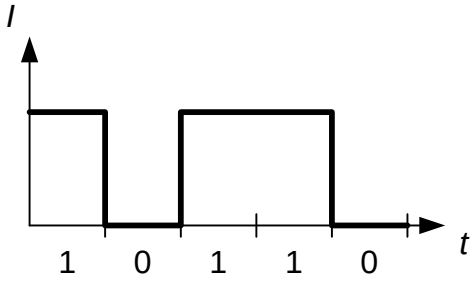
- Feldgeräte sind dabei Sensoren/Aktoren, sowie Geräte zur Vorverarbeitung der Daten.
- Der Feldbus verbindet die Feldgeräte mit dem Steuerungsgerät.
- Beobachtung: echtzeitkritische Nachrichten sind in der Regel kürzer als unkritische Nachrichten.
- Es existiert eine Vielzahl von Feldbus-Entwicklungen: MAP (USA - General Motors), FIP (Frankreich), PROFIBUS (Deutschland), CAN (Deutschland – Bosch), …

Schichtenmodell: ISO/OSI-Modell

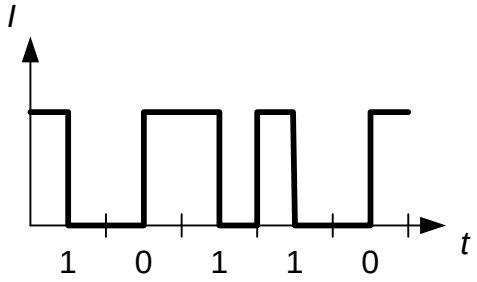


Beschreibung der einzelnen Schichten: Übertragungsschicht

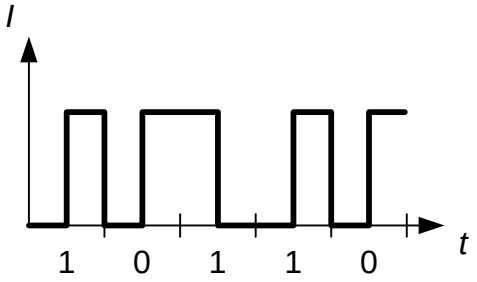
- Aufgaben:
  - Bitübertragung auf physikalischen Medium
  - Festlegung der Medien
    - elektrische, optische Signale, Funk
    - Normung von Steckern
  - Festlegung der Übertragungsverfahren/Codierung
    - Interpretation der Pegel
    - Festlegung der Datenrate



Non-return-to-zero Code



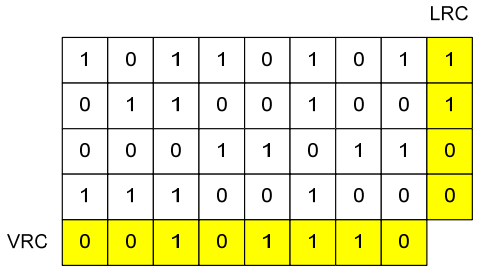
Manchester-Code



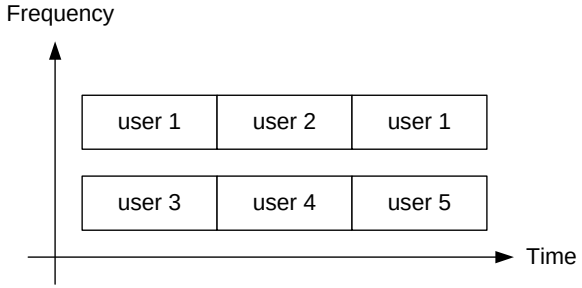
Differentieller Manchester-Code

Beschreibung der einzelnen Schichten: Sicherungsschicht

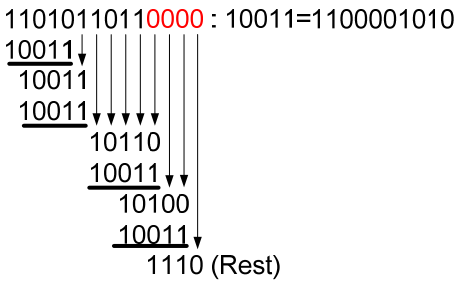
- Aufgaben:
  - Fehlererkennung
    - Prüfsummen
    - Paritätsbits
  - Aufteilung der Nachricht in Datenpakete
  - Regelung des Medienzugriffs
  - Flusskontrolle



Paritätsbits



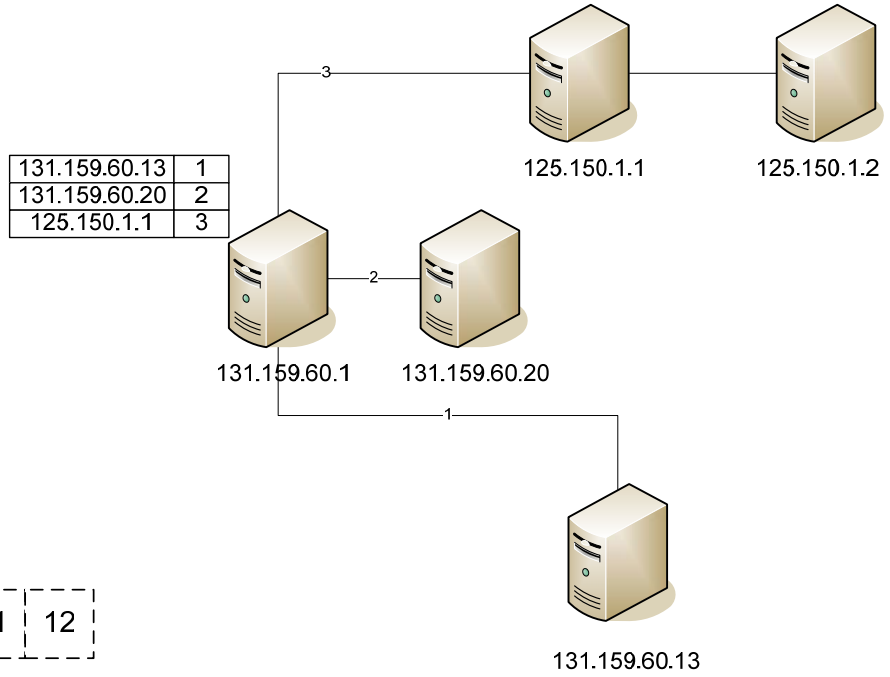
TDMA+FDMA

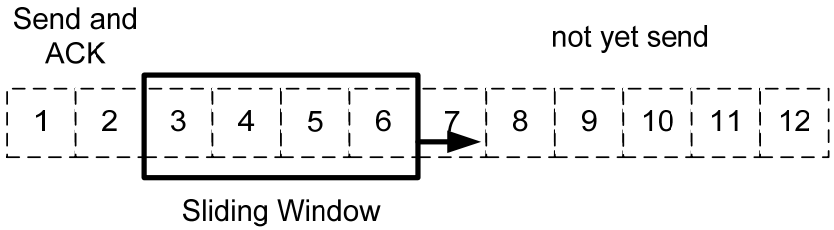


CRC-Verfahren

Beschreibung der einzelnen Schichten: Vermittlungsschicht

- Aufgaben:
  - Aufbau von Verbindungen
  - Weiterleitung von Datenpaketen
    - Routingtabellen
    - Flusskontrolle
    - Netzwerkadressen





Sliding Window Protokoll

Weitere Schichten

- Transportschicht:
  - Transport zwischen Sender und Empfänger (End-zu-End-Kontrolle)
  - Segmentierung von Datenpaketen
  - Staukontrolle (congestion control)
- Sitzungsschicht:
  - Auf- und Abbau von Verbindungen auf Anwendungsebene
  - Einrichten von Check points zum Schutz gegen Verbindungsverlust
  - Dienste zur Organisation und Synchronisation des Datenaustauschs
  - Spezifikation von Mechanismen zum Erreichen von Sicherheit (z.B. Passwörter)
- Darstellungsschicht:
  - Konvertierung der systemabhängigen Daten in unabhängige Form
  - Datenkompression
  - Verschlüsselung
- Anwendungsschicht:
  - Bereitstellung anwendungsspezifischer Übertragungs- und Kommunikationsdienste
  - Beispiele:
    - Datenübertragung
    - E-Mail
    - Virtual Terminal
    - Remote Login
    - Video-On-Demand
    - Voice-over-IP

Schichten in Echtzeitsystemen

- Die Nachrichtenübertragungszeit setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:
  - Umsetzung der Protokolle der einzelnen Schichten durch den Sender
  - Wartezeit auf Medienzugang
  - Übertragungszeit auf Medium
  - Entpacken der Nachricht in den einzelnen Schichten durch den Empfänger

⇒ Jede zu durchlaufende Schicht verlängert die Übertragungszeit und vergrößert die zu sendenden Daten.

⇒ in Echtzeitsystemen wir die Anzahl der Schichten zumeist reduziert auf:

  - Anwendungsschicht
  - Sicherungsschicht
  - Physikalische Schicht

Echtzeitfähige Kommunikation

Medienzugriffsverfahren

Problemstellung

- Zugriffsverfahren regeln die Vergabe des Kommunikationsmediums an die einzelnen Einheiten.
- Das Kommunikationsmedium kann in den meisten Fällen nur exklusiv genutzt werden, Kollisionen müssen zumindest erkannt werden um Verfälschungen zu verhindern.
- Zugriffsverfahren können dabei in unterschiedliche Klassen aufgeteilt werden:
  - Erkennen von Kollisionen, Beispiel: CSMA/CD
  - Vermeiden von Kollisionen, Beispiel: CSMA/CA
  - Ausschluss von Kollisionen, Beispiel: token-basiert, TDMA

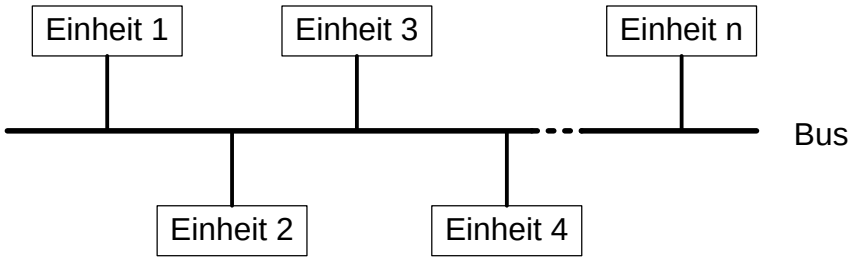
Echtzeitfähige Kommunikation

Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection (CSMA/CD)

Vertreter: Ethernet (nicht echtzeitfähig!)

CSMA/CD

- CSMA/CD: Carrier Sense Multiple Access - Collision Detection
  - alle am Bus angeschlossenen Einheiten können die aktuell versendeten Daten lesen (**Carrier Sense**).
  - mehrere Einheiten dürfen Daten auf den Bus schreiben (**Multiple Access**).



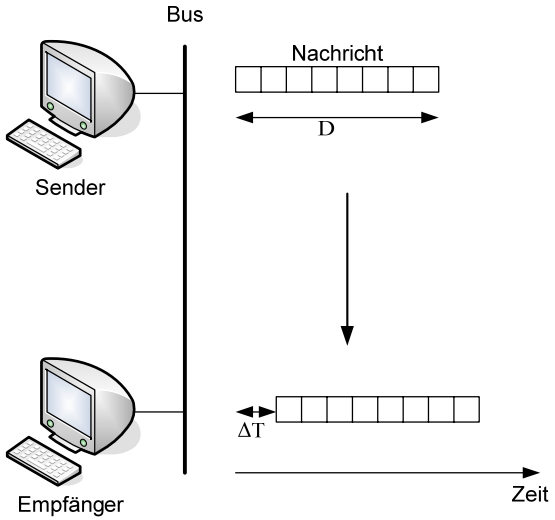
  - Während der Übertragung überprüft der sendende Knoten gleichzeitig das Resultat auf dem Bus, ergibt sich eine Abweichung, so wird eine Kollision angenommen (**Collision Detection**)

CSMA/CD: Ablauf

- Beschrieben wird im Folgenden das 1-persistente CSMA/CD- Verfahren (Spezifikation in der Norm IEEE 802.3)
- Ablauf zum Senden eines Paketes:
  1. Test, ob Leitung frei ist (**carrier sense**)
  2. Falls Leitung für die Zeitdauer eines IFS (**inter frame spacing**) frei ist, wird die Übertragung gestartet, ansonsten Fortfahren mit Schritt 5.
  3. Übertragung der Daten inklusive Überwachung der Leitung. Im Fall einer Kollision: senden eines **JAM**-Signals, fortfahren mit Schritt 5.
  4. Übertragung erfolgreich beendet: Benachrichtige höhere Schicht, Beendigung
  5. Warten bis Leitung frei ist
  6. Sobald Leitung frei: weitere zufälliges Warten (z.B. **Backoff-Verfahren**) und Neustarten mit Schritt 1, falls maximale Sendeversuchsanzahl noch nicht erreicht.
  7. Maximale Anzahl an Sendeversuchen erreicht: Fehlermeldung an höhere Schicht.

Kollisionen

- Um Kollisionen rechtzeitig zu erkennen muss die Signallaufzeit ΔT deutlich kleiner als die Nachrichtenübertragungsdauer D sein.
- Das Störsignal (JAM) wird geschickt um alle anderen Nachrichten auf die Kollision aufmerksam zu machen $\Rightarrow$ Verkürzung der Zeit zur Kollisionserkennung
- Würden die Rechner nach einer Kollision nicht eine zufällige Zeit warten, käme es sofort zu einer erneuten Kollision.
- Lösung im Ethernet: Die Sender wählen eine zufällige Zahl d aus dem Interval $[0...2^i]$, mit i = Anzahl der bisherigen Kollisionen (Backoff-Verfahren).
  $\Rightarrow$ Mit ansteigendem i wird eine Kollision immer unwahrscheinlicher.
  $\Rightarrow$ Bei i = 16 wird die Übertragung abgebrochen und ein Systemfehler vermutet.



TCP vs. UDP

- TCP (Transmission Control Protocol) ist ein zuverlässiges, verbindungsorientiertes Transportprotokoll:
  - Vor der Übertragung der Daten wird zunächst eine Verbindung zwischen Sender und Empfänger aufgebaut (Handshake).
  - Datenverluste werden erkannt und automatisch behoben durch Neuversenden des entsprechenden Datenpakets.

  ⇒ Aufgrund von unvorhersehbaren Verzögerungen (Backoff-Verfahren) und hohem Overhead ist TCP nicht für den Einsatz in Echtzeitsystemen geeignet.
  - Weiteres Problem: Slow Start der Congestion Control Strategie von TCP/IP ⇒ zu Beginn der Übertragung wird nicht die volle Bandbreite ausgenutzt
- UDP (User Datagram Protocol) ist ein minimales, verbindungsloses Netzprotokoll:
  - Verwendung vor allem bei Anwendungen mit kleinen Datenpaketen (Overhead zum Verbindungsaufbau entfällt)
  - UDP ist nicht-zuverlässig: Pakete können verloren gehen und in unterschiedlicher Reihenfolge beim Empfänger ankommen.

  ⇒ Einsatz in weichen Echtzeitsystemen, in denen der Verlust einzelner Nachrichten toleriert werden kann (z.B. Multimedia-Protokollen wie z.B. VoIP, VoD) möglich.

RTP, RTSP: Motivation

- Problem von UDP/IP in Multimediasystemen:
  - keine Möglichkeit zur Synchronisation
  - verschiedene Multimediaströme können kollidieren (z.B. in VoD)
  - Qualitätskontrolle ist wünschenswert

  $\Rightarrow$ in Multimediasystemen werden zusätzliche Protokolle (RTP, RTCP) verwendet.
- Multimediaverbindung mit RTP/RTCP
  - Zur Übertragung der **Steuerungsnachrichten** (in der Regel nicht zeitkritisch) werden zuverlässige Protokolle eingesetzt (z.B. TCP/IP)
  - Zur **Datenübertragung** wird ein **RTP** (**Real-Time Transport Protocol**)-Kanal eingesetzt.
  - Jeder RTP-Kanal wird mit einem **RTCP** (**Real-Time Control Protocol**)-Kanal zur Überwachung der Qualität verknüpft.
  - RTP/RTCP setzen in der Regel auf UDP/IP auf und sind End-zu-End-Protokolle

RTP, RTCP

- RTP:
  - Multicasting
  - Bestimmung des Datenformats (PT)
  - Zeitgebend durch Zeitstempel, die Berechnung des Jitters wird dadurch möglich
  - Möglichkeit zur Ordnung der Pakete und zum Erkennen von verlorenen Paketen durch Sequenznummer

Byte 0								Byte 1								Byte 2								Byte 3							
Bit 0	1	2	3	4	5	6	7	Bit 0	1	2	3	4	5	6	7	Bit 0	1	2	3	4	5	6	7	Bit 0	1	2	3	4	5	6	7
V=2			P	X	CC			M		PT						sequence number															
timestamp (in sample rate units)																															
sychronization source (SSRC) identifier																															
contributing source (CSRC) identifiers (optional)																															
Header Extension (optional)																															

RTP Header

- RTCP:
  - Überwachung der Qualität der Datenkanäl: versandte Daten/Pakete, verlorene Pakete, Jitter, Round trip delay
  - Unterschiedliche Pakete stehen zur Verfügung: Sender report, receiver report, source description und anwendungsspezifische Pakete

Zusammenfassung Ethernet

- Ethernet ist aufgrund des CSMA/CD Zugriffsverfahrens für harte Echtzeitsysteme nicht geeignet:
  - unbestimmte Verzögerungen durch Backoff-Verfahren
  - keine Priorisierung von Nachrichten möglich
- Aufgrund der starken Verbreitung ($\Rightarrow$ niedrige Kosten, gute Unterstützung) wird Ethernet dennoch häufig in Echtzeitsystemen eingesetzt:
  - Durch Verwendung von echtzeitfähigen Protokollen in weichen Echtzeitsystemen (z.B. Multimediakontrolle).
  - Durch Verringerung der Kollisionswahrscheinlichkeit durch Aufteilung des Netzes in verschiedene Kollisionsdomänen (z.B. switched ethernet).
- Mittlerweile werden auch diverse Implementierungen von Real-Time Ethernet eingesetzt, allerdings gibt es noch keinen allgemein anerkannten Standard (siehe Zusammenfassung/Trends).

Echtzeitfähige Kommunikation

Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance (CSMA/CA*)

Vertreter: CAN

Teilweise wird die hier vorgestellte Methode auch CSMA/CR (Collision Resolution) genannt.

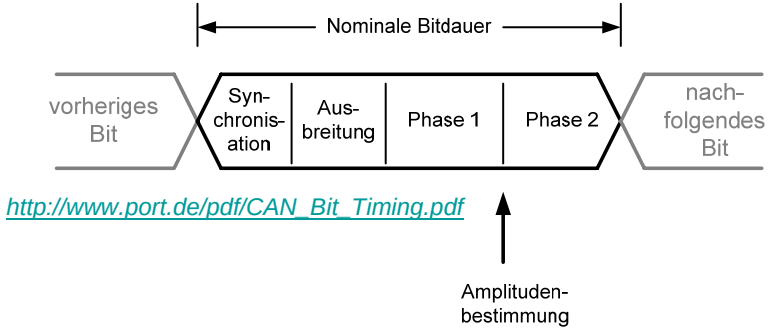
CAN-Protokoll

- Grundidee von Collision Avoidance:
  - Kollisionen werden rechtzeitig erkannt, bevor Nachrichten unbrauchbar werden
  - Wichtigere Nachrichten werden bevorzugt $\Rightarrow$ Priorisierung der Nachrichten
- Daten:
  - CAN (Controller Area Network) wurde 1981 von Intel und Bosch entwickelt.
  - Einsatzbereich: vor allem Automobilbereich, Automatisierungstechnik
  - Datenübertragungsraten von bis zu 1Mbit/s, Reichweite 1km
  - Implementierung der Schichten 1,2 und 7 des ISO/OSI-Modells

CAN: Schicht 1

- Busmedium:
  - Kupfer oder Glasfaser
  - Empfehlung Twisted Pair: Möglichkeit zur differentiellen Übertragung (robuster gegenüber Störungen)
- Codierung: NRZ-L (Non-Return-to-Zero-Level)
  - Problem mit NRZ-L: lange Sequenzen monotone Sequenzen von 0 oder 1 können zu Problemen bei der Synchronisation führen, in CAN wird deshalb nach fünf gleichen Bits ein inverses Bit eingefügt (**Bitstuffing**)
- Daten werden **bitsynchron** übertragen:

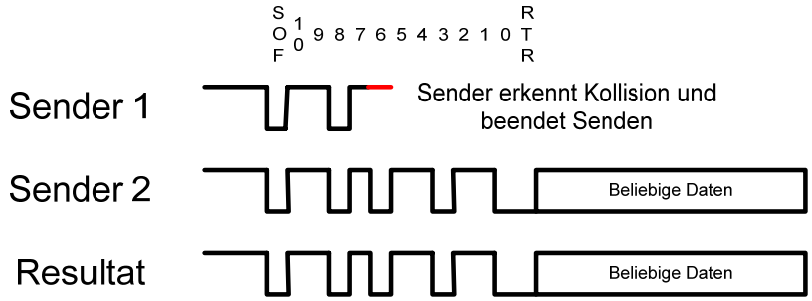
  ⇒ Datenübertragungsrate und maximale Kabellänge sind miteinander verknüpft.
  - Konfigurationsmöglichkeiten:
    - 1 MBit/s, maximale Länge: 40m
    - 500 kBit/s, maximale Länge: 100m
    - 125 kBit/s, maximale Länge: 500m
  - Maximale Teilnehmerzahl: 32-128



http://www.port.de/pdf/CAN_Bit_Timing.pdf

CAN: Schicht 2

- Realisierung eines CSMA/CA-Verfahrens:
  - Bei der Übertragung wirken Bits je nach Wert entweder **dominant** (typischerweise 0) oder **rezessiv** (1).
  - Dominante Bits überschreiben rezessive Bits, falls sie gleichzeitig gesendet werden.
  - Jedem Nachrichtentyp (z.B. Sensorwert, Kontrollnachricht) wird ein Identifikator zugewiesen, der die Wichtigkeit des Typs festlegt.
  - Jeder Identifikator sollte nur einem Sender zugewiesen werden.
  - Wie bei Ethernet wartet der Sender bis der Kanal frei ist und startet dann die Versendung der Nachricht.



  - Beim gleichzeitigen Senden zweier Nachrichten, dominiert der Identifikator des wichtigeren Nachrichtentyps, den Sender der unwichtigeren Nachricht beendet das Senden.

  ⇒ Verzögerung von hochprioren Nachrichten auf die maximale Nachrichtenlänge begrenzt (in Übertragung befindliche Nachrichten werden nicht unterbrochen)

CAN: Framearten

- Datenframe:
  - Versand von maximal 64bit Daten
- Remoteframe:
  - Verwendung zur Anforderung von Daten
  - Wie Datenframe, nur RTR-Feld auf 1 gesetzt

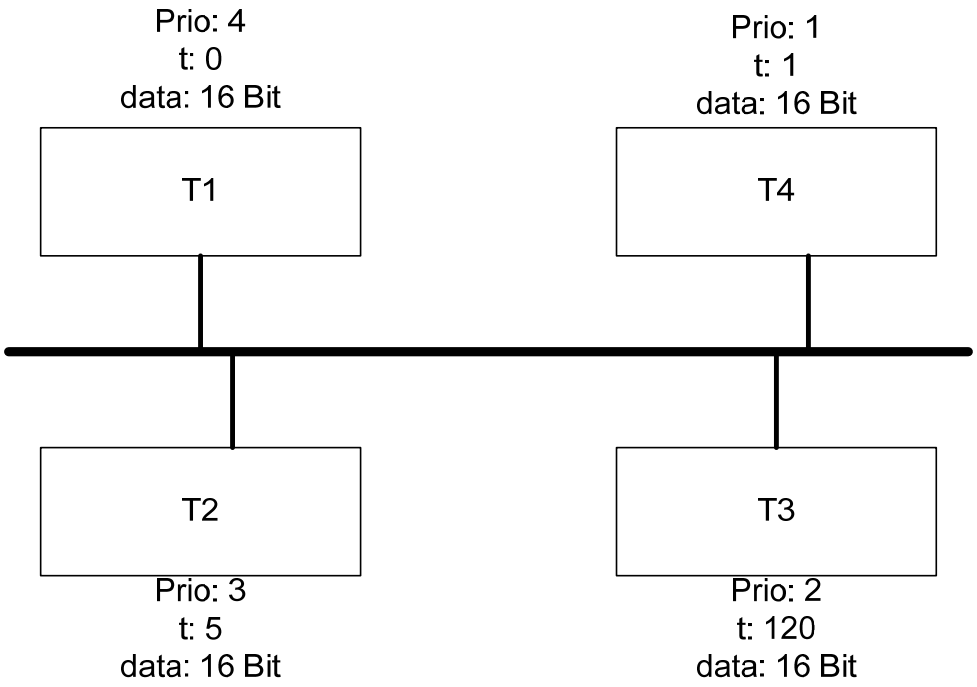
Länge in Bit	1	11	1	1	1	4	0...64	15	1	1	1	7	3
Zweck	Start of frame	Identifier (Extended CAN 27bit)	Remote Transmission Bit	Identifier Extension Bit	reserviert	Datenlängenfeld	Datenfeld	CRC-Prüfsumme	CRC Delimeter	Bestätigungsslot	Bestätigungsdelimeter	End of Frame	Intermission

- Fehlerframe:
  - Signalisierung von erkannten Fehlerbedingungen
- Überlastframe:
  - Zwangspause zwischen Remoteframe und Datenframe

CAN: Schicht 7

- Im Gegensatz zu Schicht 1 und 2 ist die Schicht 7 nicht in einer internationalen Norm spezifiziert.
- Es existieren jedoch diverse Implementierungen (z.B. CANOpen) für Dienste der Schichten 3-7 zur Realisierung von:
  - Flusskontrolle
  - Geräteadressierung
  - Übertragung größerer Datenmengen
  - Grunddienste für Anwendungen (Request, Indication, Response, Confirmation)
- Zudem gibt es Versuche eine Norm CAL (CAN Application Layer) einzuführen.
- Ziele:
  - Einheitliche Sprache zur Entwicklung von verteilten Anwendungen
  - Ermöglichung der Interaktion von CAN-Modulen unterschiedlicher Hersteller

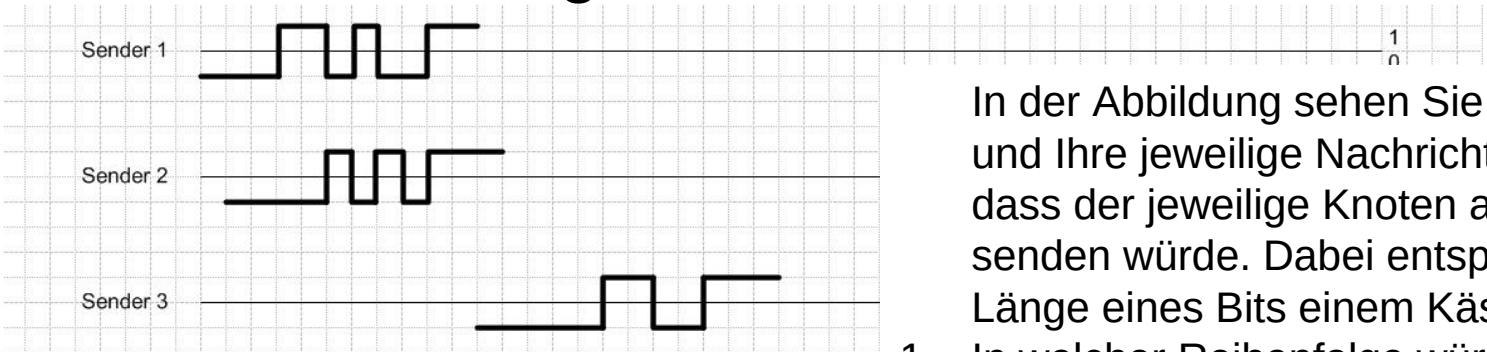
Klausur 06/07 (modifiziert) - CAN



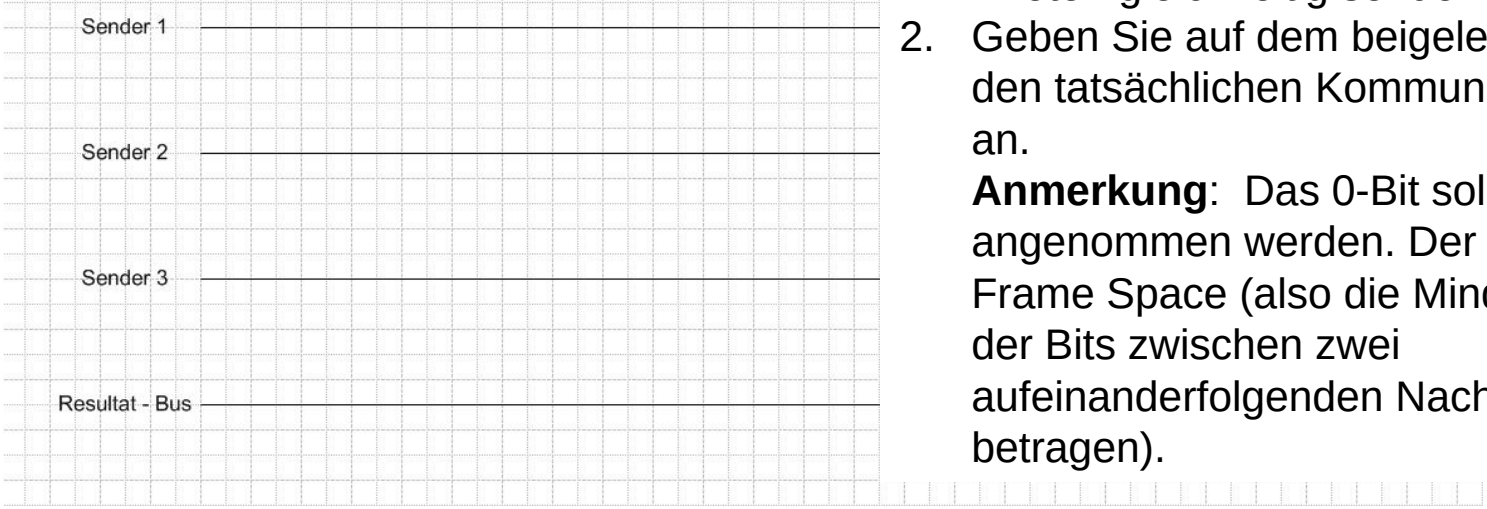
Annahmen: Bitsendedauer 1 Zeiteinheit
Priorität: 1 – hoch, 4 – niedrig

a) Geben Sie die Reihenfolge der Nachrichten an, die im Netzwerk bei Verwendung des CANProtokolls gesendet werden und begründen Sie ihre Antwort. **Zur Erinnerung**: Zusätzlich zu den Nutzdaten sind bei CAN 46 Bit Steuerungsdaten pro Nachricht notwendig. Zwischen den einzelnen Nachrichten ist eine Lücke von mindestens 3 Bit.

Wiederholungsklausur SS 07 – CAN-Protokoll



Tatsächlicher Kommunikationsablauf:



In der Abbildung sehen Sie drei Knoten und Ihre jeweilige Nachricht für den Fall, dass der jeweilige Knoten als einziger senden würde. Dabei entspricht die Länge eines Bits einem Kästchen.

1. In welcher Reihenfolge würden die Nachrichten gesendet werden, wenn alle Knoten gleichzeitig senden würden?
2. Geben Sie auf dem beigelegten Blatt den tatsächlichen Kommunikationsablauf an.
   Anmerkung: Das 0-Bit soll als dominant angenommen werden. Der Intermission Frame Space (also die Mindestanzahl der Bits zwischen zwei aufeinanderfolgenden Nachrichten soll 3 betragen).