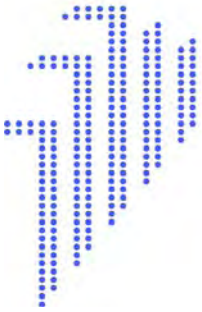
Master Studiengang



h_da
HOCHSCHULE DARMSTADT
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

fbi
FACHBEREICH INFORMATIK

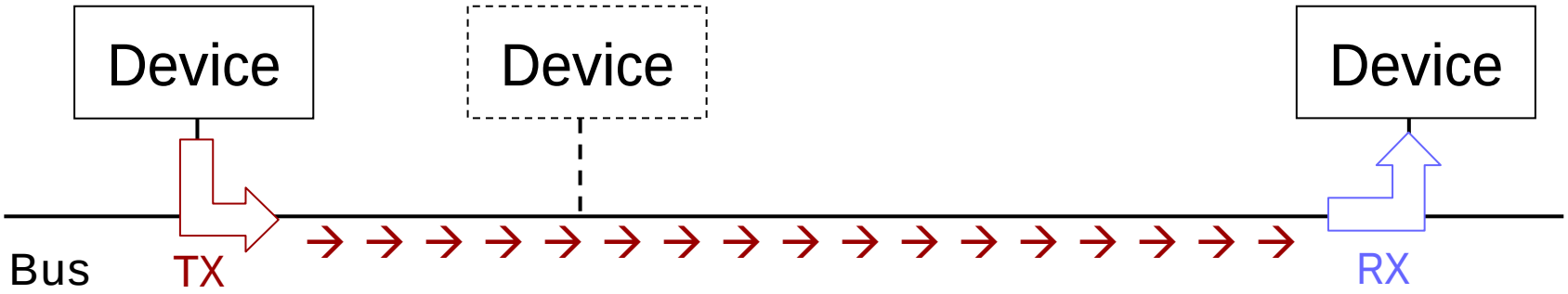
5. Bus-, verteilte Systeme u. Eigenschaften

Prof. Dr. Ralf S. Mayer,
Prof. Dr. Peter Altenbernd
Fachbereich Informatik, h_da

Art/Eigenschaften verteilter Systeme

- Eigenschaften verteilter Systeme
  - Signallaufzeit
  - Buszuteilung
  - Bandbreite
  - Priorisierung
  - Zeitverhalten
- Bussysteme
  - Standards
  - Eigenschaften bezüglich OSI
  - Einsatz

Verteilte Systeme und Bussysteme

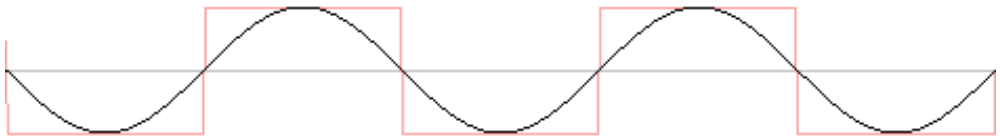


- Bei der Verbindung von Geräten über ein Medium muss die Signallaufzeit berücksichtigt werden
- Maximale mögliche Ausbreitungsgeschwindigkeit:
  - Lichtgeschwindigkeit c_0 = 299.792.458 m/s ≈ 3 x 10^8 m/s im Vakuum
  - Geschwindigkeit im Medium: $c_m < c_0$
    - In elektrischen Leitern (Kabeln) geht man von c_m = 17 – 20 cm/ns aus. → $c_m \approx 2/3\ c_0$
    - Geschwindigkeit im Medium in der Regel frequenzabhängig: $c_m = c_m(f)$ → Dispersion
    - Dämpfung im Medium ist frequenzabhängig
    - Reflexion an Kabelenden ist möglich. → Abschluss-Widerstände (Beispiel: Entspiegelung einer Brille)

Signalausbreitung im Medium

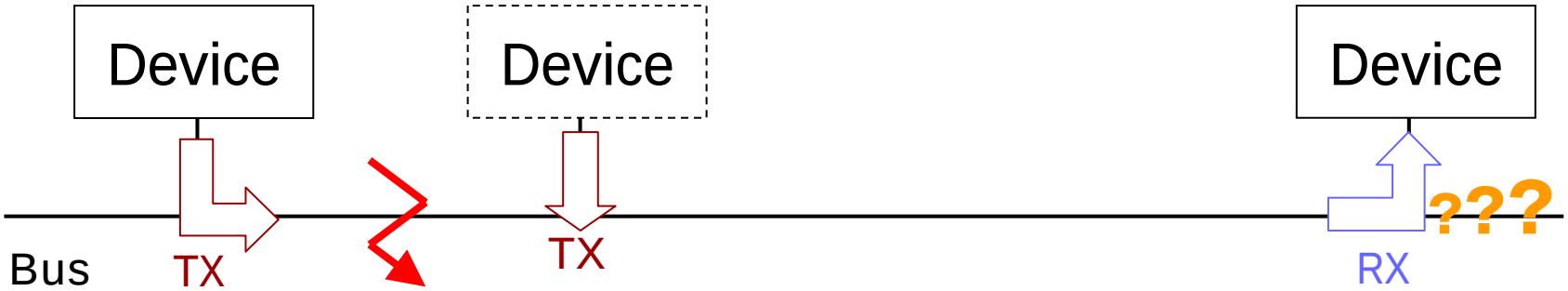
- Ein Rechtecksignal (binäre Übertragung) kann aus einer Überlagerung von Sinusfunktionen dargestellt werden, wobei
  - f_0 die Frequenz des Rechteck-Signals ist und (unendlich viele) ungerade Harmonische f_{n+1} dies Frequenz in geeigneter Amplitude a_{n+1} hinzuaddiert werden: `harmonics: 1` → Fourier-Synthese

$$x_{rechteck}(t) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin\left((2n+1)t\right)}{2n+1}$$



  - Bei einem realen Übertragungsmedium (Kabel, Lichtleiter etc) muss man aufgrund der Dispersion, Dämpfung und Reflexion davon ausgehen, dass ein ausgesandtes Rechtecksignal nicht mehr als Rechteck beim Empfänger ankommt.
  - Auswirkung auf das System
    - sorgfältiges Design (elektrisch, physikalisch) notwendig
    - Reale Bandbreite kleiner als theoretische
    - Störeinflüsse von außen minimieren
    - Störung der Umgebung beachten (**E**lektro**M**agnetische **V**erträglichkeit)

Bus-Zugriff (Arbitration)



Buszuteilung – Erkennung/ Vermeidung von Kollisionen:

- Master kontrollierte Netzwerke
- Token-basierter Zugriff: Token-Passing in Ringnetzen. Token wird von Knoten zu Knoten weitergeleitet. Knoten der Frei-Token erhält, darf senden. Token-Ring, ARCNET, Profibus, ...
- Feste / auf Anfrage zugeteilte Bandbreite
  - TDM(A): Zeitschlitz in Funknetzen (GSM), Kabelnetzen (ISDN)
  - FDM(A): Frequenzzuteilung (Rundfunk: Stereo), Kabel: ISDN/ADSL
- Multimaster-Netzwerke: mehrere Teilnehmer können „beliebig“ senden. → Gefahr von Kollisionen
  - Ethernet: Kollisionserkennung
  - CAN: Kollisionsvermeidung

→**?** Frage nach Determinismus der Verfahren.

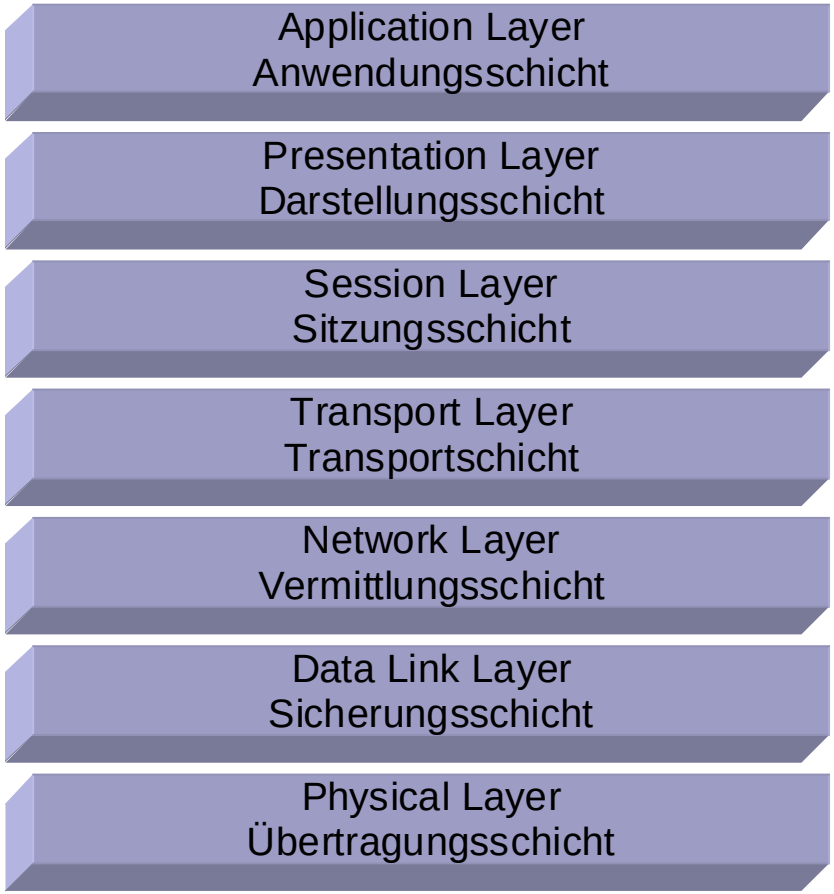
Echtzeitkommunikation

Aufgaben der Sicherungsschicht:

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

Aufgaben der Vermittlungsschicht:

- Aufbau von Verbindungen
- Weiterleiten von Datenpaketen
  - Routingtabellen
  - Netzwerkadressen

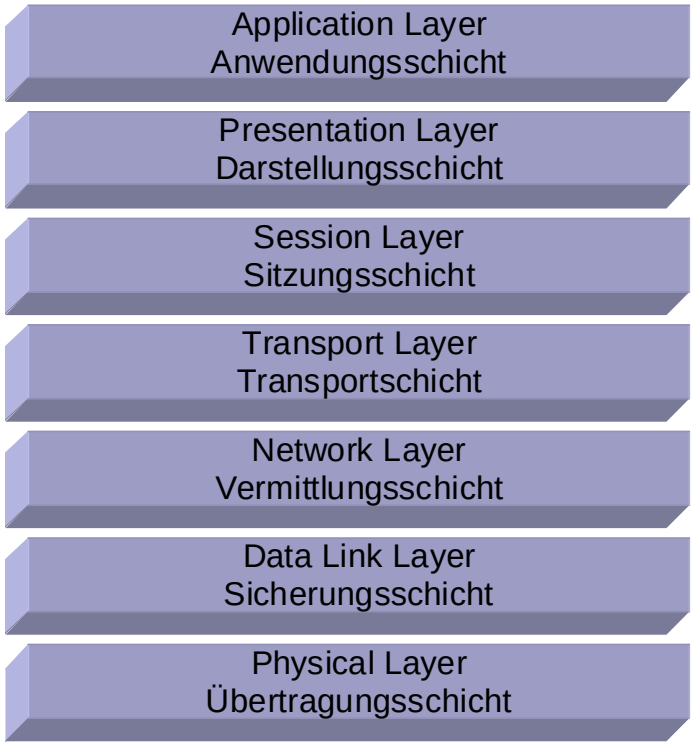


Echtzeitkommunikation

Aufgaben der Transportschicht:
- Segmentierung von Datenpaketen
- Transport zwischen Sender und Empfänger
- Staukontrolle

Aufgaben der Sitzungssicht:
- Auf- und Abbau, Aufrechterhalten von Verbindungen auf Anwendungsebene
- Dienste zur Synchronisation der Kommunik.
- Sicherheitsmechanismen (Passwörter, etc.)

Aufgaben der Darstellungsschicht:
- Datenkonvertierung ("Marshalling")
- Datenkompression
- Verschlüsselung



Aufgaben der Anwendungsschicht:
- Anwendungsspezifische Kommunikationsdienste
  - Email, remote login, VoIP, ...

Echtzeitkommunikation

Die gesamte Übertragungszeit einer Nachricht setzt sich damit zusammen aus:

- Zeit für die Umsetzung der Protokolle auf den einzelnen Schichten beim Sender (Schicht 7 bis 1)
- Wartezeit für Medienzugriff
- Signallaufzeit auf dem Medium
- Zeit für die Umsetzung der Protokolle auf den einzelnen Schichten beim Empfänger (Schicht 1 bis 7)

D.h. mit jeder Schicht vergrößert sich die Übertragungszeit. Zusätzlich erhöht jede Schicht auch den benötigten Speicher, da eine Nachricht typischerweise auf jeder Schicht konvertiert und zwischengespeichert werden muss.

Daher reduziert man die Anzahl der Schichten in einem Echtzeitsystem meist auf:

- Anwendungsschicht
- Sicherungsschicht
- Übertragungsschicht

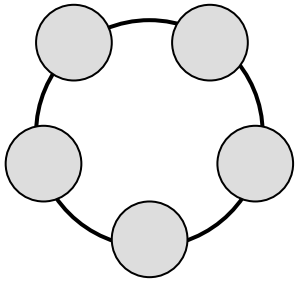
Echtzeitkommunikation - Netzwerktopologien

Die **Topologie** eines Netzwerks, d.h. die Struktur der Verbindungen zwischen den Knoten, hat insbesondere Einfluss auf seine

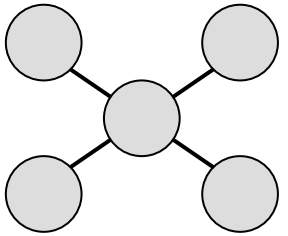
- Ausfallsicherheit,
- Performance,
- Kosten,
- Skalierbarkeit.

Mögliche Topologien:

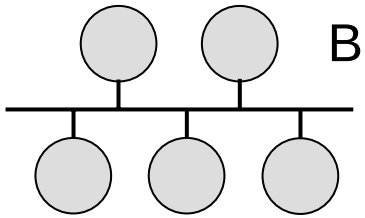
Ring



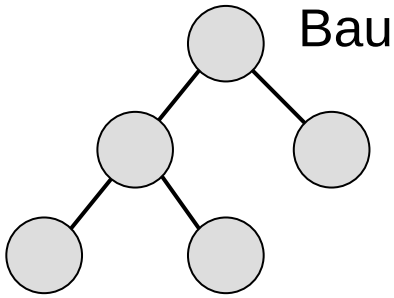
Stern



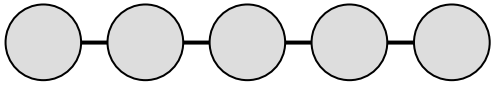
Bus



Baum



Linie

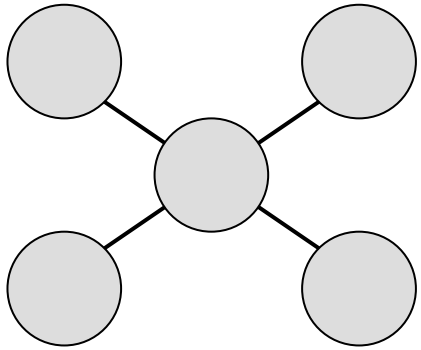


Echtzeitkommunikation - Netzwerktopologien

- Charakteristische Eigenschaften einer Topologie:
  - Durchmesser
    - maximale direkte Entfernung zwischen 2 Knoten in Hops. Der Durchmesser ist damit ein Maß für die maximale Übertragungszeit.
  - Grad
    - Anzahl Verbindungen je Knoten. Kann für alle Knoten gleich oder unterschiedlich sein. Je höher der Grad, desto mehr Verbindungen und damit höherer Verkabelungsaufwand (Kosten, Platz, Gewicht).
  - Skalierbarkeit
    - Aufwand (Anzahl Links + Knoten) für die Erweiterung des Netzwerks unter Beibehaltung seiner Topologie
  - Konnektivität
    - minimale Anzahl von Links, die getrennt werden müssen, um das Netz zu zerstören. Die Konnektivität ist ein Maß für die Ausfallsicherheit des Netzes.

Echtzeitkommunikation - Netzwerktopologien

Stern-Topologie



Vorteile:

- Ausfall eines Endgeräts hat keine Auswirkungen auf den Rest
- leicht skalierbar
- kein Routing erforderlich

Nachteil:

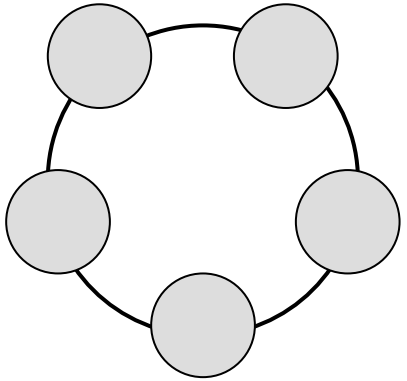
- Ausfall des Verteilers bewirkt Ausfall des gesamten Netzes

Beispiel:

- Telefonnetz

Echtzeitkommunikation - Netzwerktopologien

Ring-Topologie



Vorteile:

- einfaches Routing
- leicht skalierbar, Grad bleibt konstant
- Jeder Knoten fungiert als Verstärker

Nachteile:

- niedrige Konnektivität; Ausfall eines Knotens unterbricht die Kommunikation (in einer Richtung).
- hoher Durchmesser; lange Übertragungszeit zu entfernten Knoten
- hoher Verkabelungsaufwand

Beispiel:

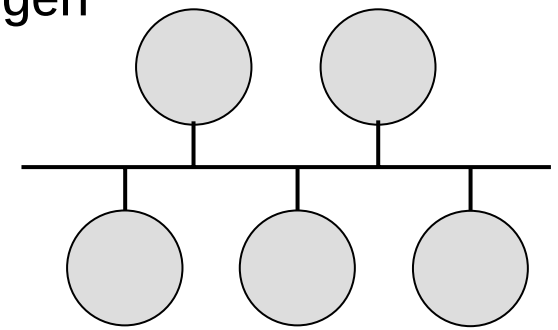
- Token Ring

Echtzeitkommunikation - Netzwerktopologien

Bus-Topologie

Vorteile:

- Ausfall eines Knotens hat keine Auswirkungen auf den Rest
- leicht skalierbar
- einfache Verkabelung



Nachteile:

- geringe Konnektivität; nur ein Kabel
- Es kann immer nur eine Station senden; Datenstau
- Jeder Knoten muss jede Sendung mithören
- Stromverbrauch des Senders steigt mit der Anzahl der Knoten am Bus

Beispiel:

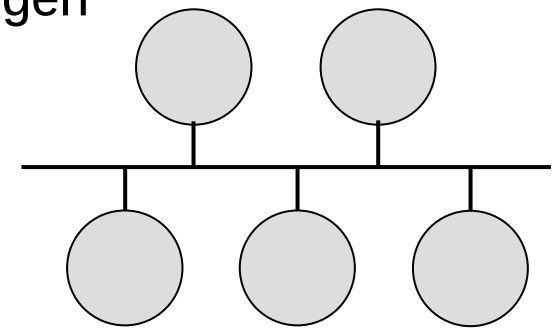
- CAN

Echtzeitkommunikation - Netzwerktopologien

Bus-Topologie

Vorteile:

- Ausfall eines Knotens hat keine Auswirkungen auf den Rest
- leicht skalierbar
- einfache Verkabelung



Nachteile:

- geringe Konnektivität; nur ein Kabel
- Es kann immer nur eine Station senden; Datenstau
- Jeder Knoten muss jede Sendung mithören
- Stromverbrauch des Senders steigt mit der Anzahl der Knoten am Bus

Beispiel:

- CAN

Echtzeitkommunikation - Netzwerktopologien

- **Bemerkung:**

- Die physikalische Topologie eines Netzes muss nicht zwangsläufig mit seiner logischen Topologie übereinstimmen.
- Z.B. kann sich ein Stern-Netzwerk auch wie ein Ring verhalten. Dabei leitet der Verteiler eine Nachricht immer an den jeweils nächsten Knoten weiter.

Verteilte Systeme - Busszugriff

- **CSMA/CA** - Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance - Protokollvariante von CSMA/CD, bei der Kollisionen durch Vorausmassnahmen vermieden werden
- **CSMA/CD** - Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection - Protokollstrategie, bei der nach Feststellen einer offenen Leitung jeder Teilnehmer senden kann und bei einer waehrend des Sendens auftretenden Kollision fuer unterschiedl. (per Zufallsgenerator bestimmte) Zeit unterbricht (Konkurrenzbetrieb)
- **CSMA/CE** - Carrier Sense Multiple Access with Collision Elimination - Protokollvariante von CSMA/CD, bei der Kollisionen automatisch erkannt und behoben werden
- **CSMA/CP** - Carrier Sense Multiple Access with Collision Prevention - Protokollvariante von CSMA/CD, bei der Kollisionen durch Vorausmassnahmen verhindert werden.

Beispiele:

- CSMA/CD: Ethernet
- CSMA/CA: RS232 mit RTS/CTS, CAN
- CSMA/CE und /CP: bei LAN-Protokollen

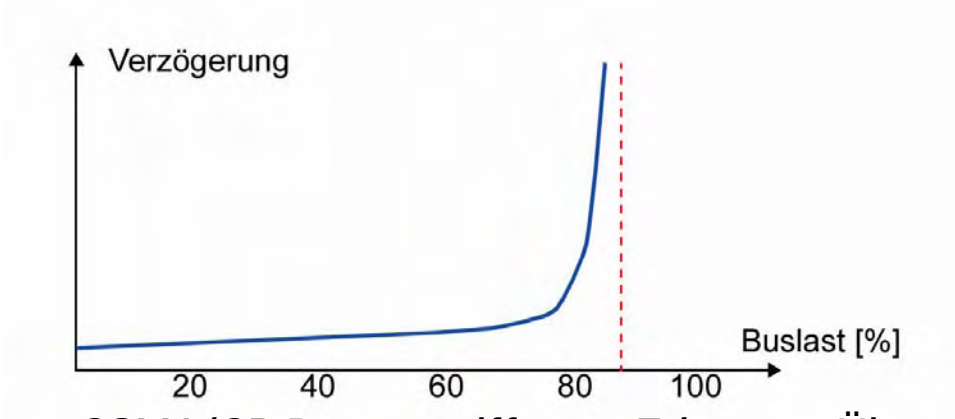
Anforderungen an Bussysteme

Randbedingungen für echtzeitfähige Bussysteme:

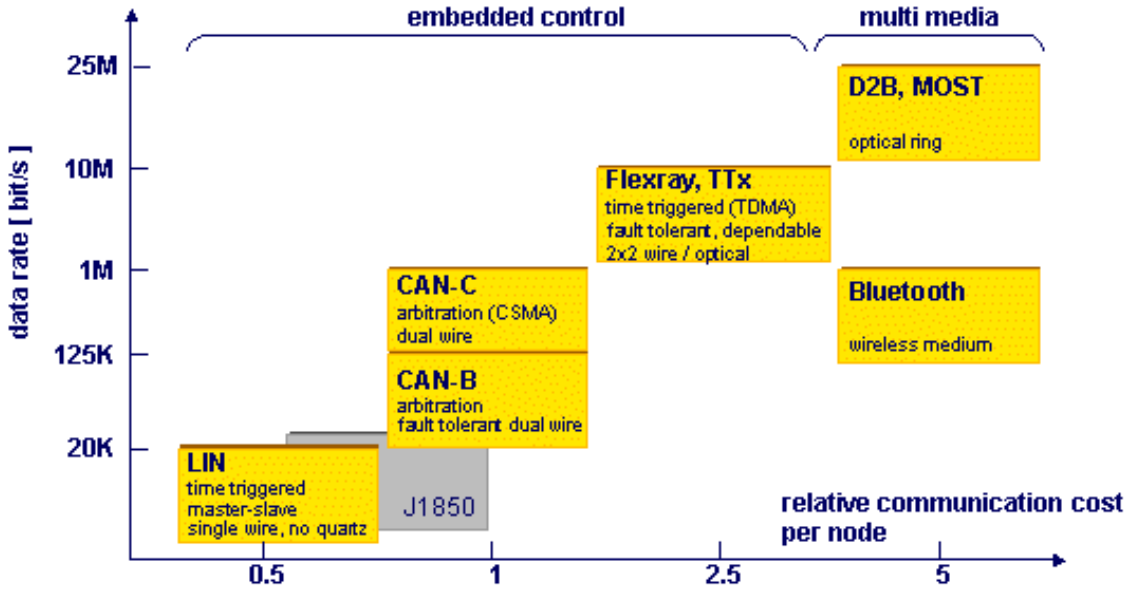
- Reaktionszeit
- deterministisch
- Bandbreite
- Sicherheit

Weiterhin:

- Kosten
- Störanfälligkeit
- Redundanz



CSMA/CD-Busszugriff von *Ethernet:* Übertragungszeiten nehmen mit steigender Buslast stark zu



Eigenschaften von CAN

Control **A**rea **N**etwork (1981 von Intel und Bosch entwickelt)

- Ereignisgesteuert: Alle Knoten sind zu jedem Zeitpunkt gleichberechtigt auf das Kommunikationsmedium zuzugreifen.
- **C**arrier **S**ense, **M**ultiple **A**ccess / **C**ollision **D**etection + Methode zum Erkennen und Auflösen von Kollisionen
  - Senden können, sobald Bus frei ist (Carrier Sense), mehrerer Knoten gleichzeitig (Multiple Access)
  - Dabei werden mögliche Kollisionen erkannt (CD) und behoben.
- Bitweise Arbitrierung: Alle aktuellen Sender legen bitweise nacheinander die Bits ihrer Priorität auf den Bus
  - die höhere Priorität sendet weiter
  - die niedrigere(n) schalten sofort auf Empfang um
  - realisiert durch dominante („0“) / rezessive Bits („1“)
- Beachte Gegensatz zu Ethernet (CSMA/CD)
  - bei entdeckter Kollision nehmen **alle** Sender ihre Signale vom Bus
  - die sendewilligen Knoten warten jeweils eine zufällig gewählte Zeit und greifen dann erneut auf den Bus zu

  → Probleme bei hoher Netzlast:
  - unbestimmte Reaktionszeit
  - Bandbreite nimmt ab

Steckbrief CAN

- Implemetierung der OSI-Schichten 1, 2 und 7
- Broadcast-Bus bis 1 MBit/s
- Nachrichten (message) 0-8 Byte
  - Daten Message
  - **R**emote **T**ransmission **R**equest Message
  - Jeder Knoten versendet aus seiner Queue zuerst die Nachricht mit der höchsten Priorität
- Eindeutiger Identifier (unique identifier)
  - kein expliziter Empfänger
  - Empfänger implementieren Filter für Nachrichten
  - **C**ollission **D**etection +
  - **C**ollission **R**esolution: höhere Priorität erhält Vorrang
- CAN message format:
  - 47 Kontroll-Bits
  - 0-64 Daten-Bits
  - 0-19 Stopf-Bits (stuffing bits)

Hörsaalübung

Wenn jeder Teilnehmer des Busses ein Bit erhalten und quittiert haben muss, bevor das nächste Bit gesendet wird, wie hoch darf die Bitrate bei einer gegebenen Buslänge sein?

Buslänge d [m]	f Bits/s	CAN-Spezifikation
40 m	< 2.5 Mbit/s	1 Mbit/s
100 m	< 1 Mbit/s	500 kbit/s
500 m	< 200 kbit/s	125 kbit/s

$$\frac{2}{3}\cdot c = \frac{d}{t} \quad \Leftrightarrow \quad t = \frac{d}{c}\cdot\frac{3}{2} \quad \Leftrightarrow \quad f = \frac{1}{2t} = \frac{c}{d}\cdot\frac{1}{3} \qquad \text{(Gl. 1-3)}$$

Bitraten/Buslänge-Beziehung (CAN)

Bus d

Bei CAN wird die Reaktion anderer Busteilnehmer auf das Aussenden einer Bitfolge erwartet. Ein von einem zweiten Sender ausgesandtes Bit muss in ca. 2/3 der Bit-Zeit wieder beim ersten Sender eingetroffen sein, um dort eine Entscheidung zu ermöglichen. Bei verlorener Arbitrierung muss der erste Knoten innerhalb von 1/3 der Bitzeit auf Empfang umstellen.

Weiterhin ist die zu beachten:

- die Laufzeit auf der Busleitung
- Die Laufzeit durch die Sende/Empfangs-Treiber

Daraus ergibt sich die Abschätzung:

$$\tau_{Line} = \frac{d}{c} \cdot \frac{3}{2} \qquad \text{(Gl. 1)}$$

$$\frac{2}{3} \cdot t_{Bit} \geq 4 \cdot \tau_{TX/RX} + 2 \cdot \tau_{Line} \qquad \text{(Gl. 4)}$$

Bitraten/Buslänge-Beziehung (CAN) (2)

Buslänge [m]	max. Bitrate
40	1 MBit/s
100	500 kBit/s
500	125 kBit/s

Tab. 1: CAN Spezifikation

Geht man von τ_{Line} aus c_{Line} = 17 cm/ns und τ_{TXRX} = 25 ns aus, erhält man folgende „Worst-Case-Designregel“:

Buslänge x Bitrate < 40 m x 1 Mbit/s

(Gl. 2)

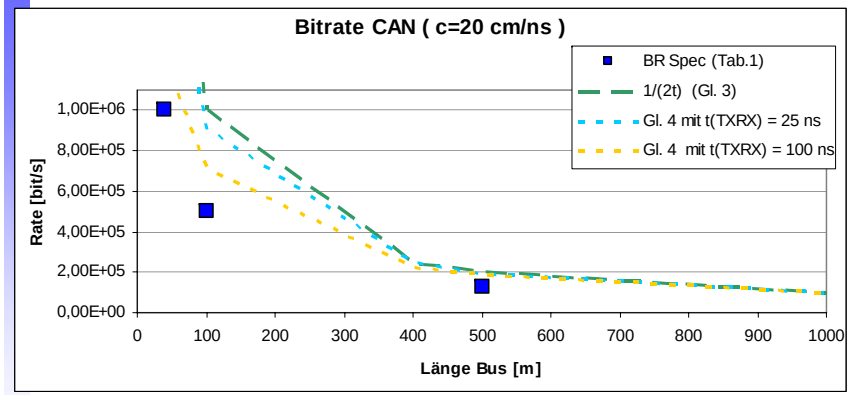
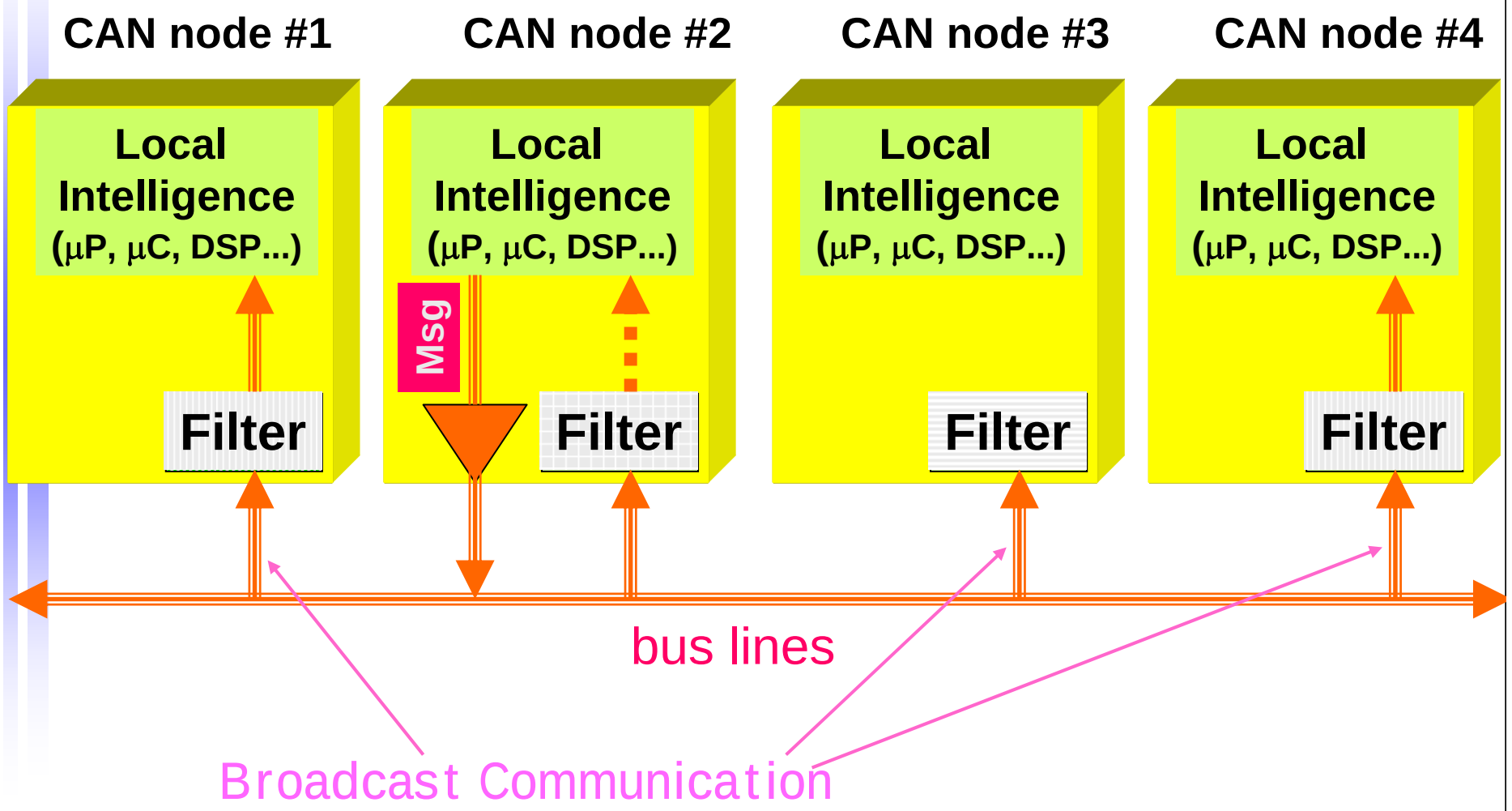


Bild: Maximal möglichen Bitrate in Abhängigkeit von der Kabellänge für CAN

Länge [m]	Max Rate (τ_{TXRX}=25ns)	Max Rate (τ_{TXRX}=100ns)
10	*< 5 Mbit/s*	*< 2 Mbit/s*
40	*< 2 Mbit/s*	*< 1,25 Mbit/s*
100	*< 900 kbit/s*	*< 710 kbit/s*
500	*< 195 kbit/s*	*< 185 kbit/s*

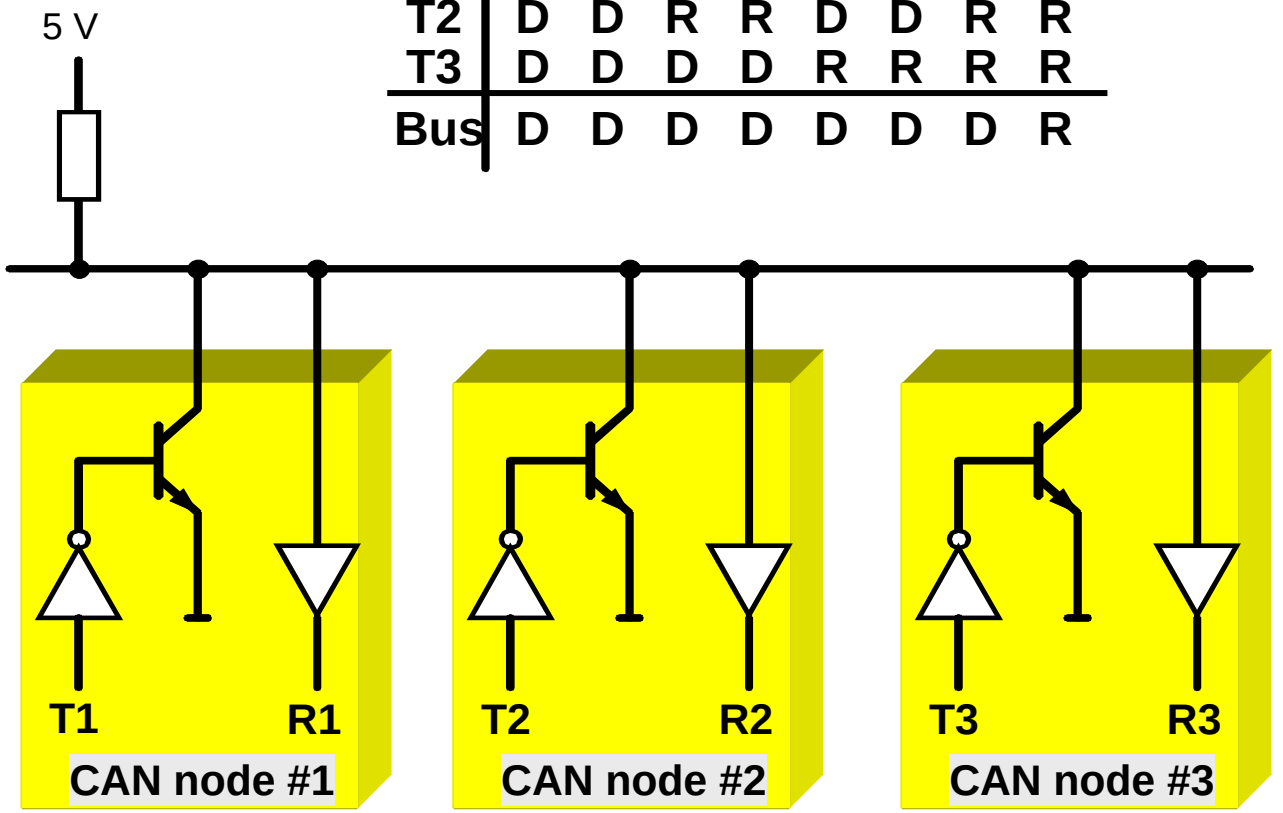
Praktisches Limit für 1 MBit/s:
Buslänge ca. 9 m

CAN: Broadcast-Prinzip, Filter



CAN: Realisierung bitweise Arbitrierung

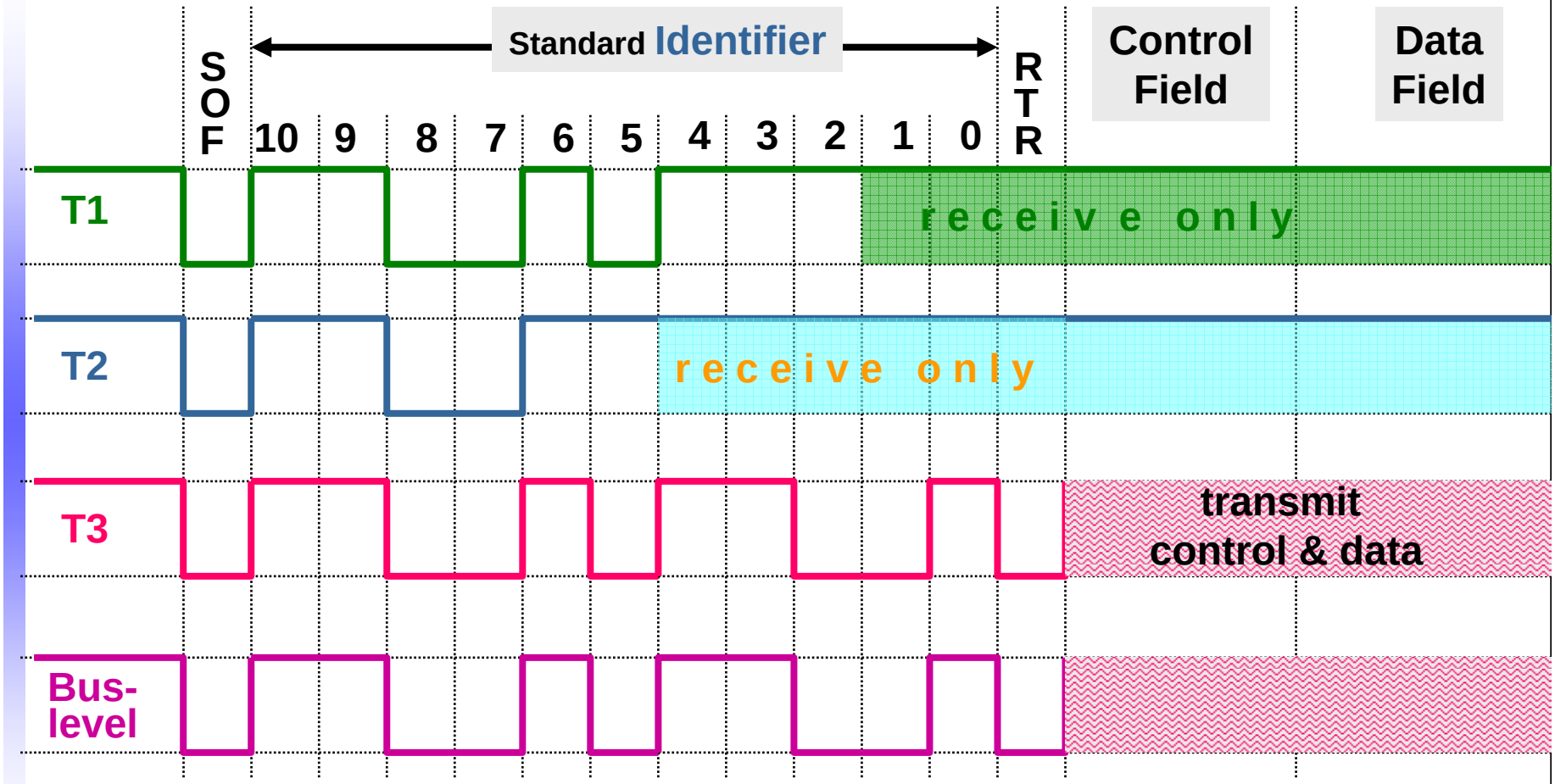
	Level							
T1	D	R	D	R	D	R	D	R
T2	D	D	R	R	D	D	R	R
T3	D	D	D	D	R	R	R	R
Bus	D	D	D	D	D	D	D	R



Verschaltung der Open-Collector-Ausgänge wirkt wie ein „wired“ AND.
Dominantetes Bit „0“ setzt sich gegenüber rezessivem Bit „1“ durch.

→ CSMA/CD + **A**rbitration on **M**essage **P**riority

CAN: Realisierung bitweise Arbitrierung (2)

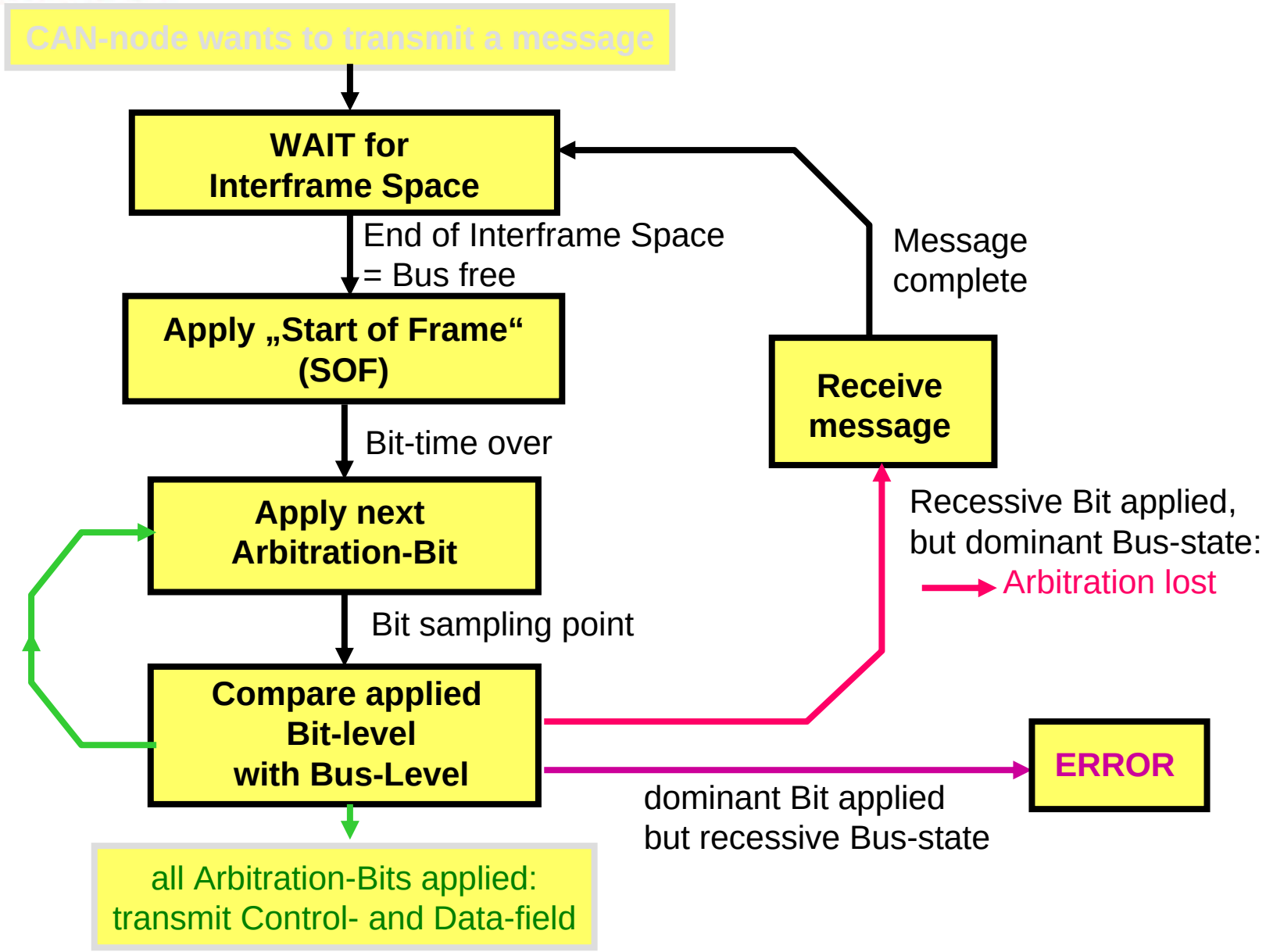


SOF: Start-of-Frame

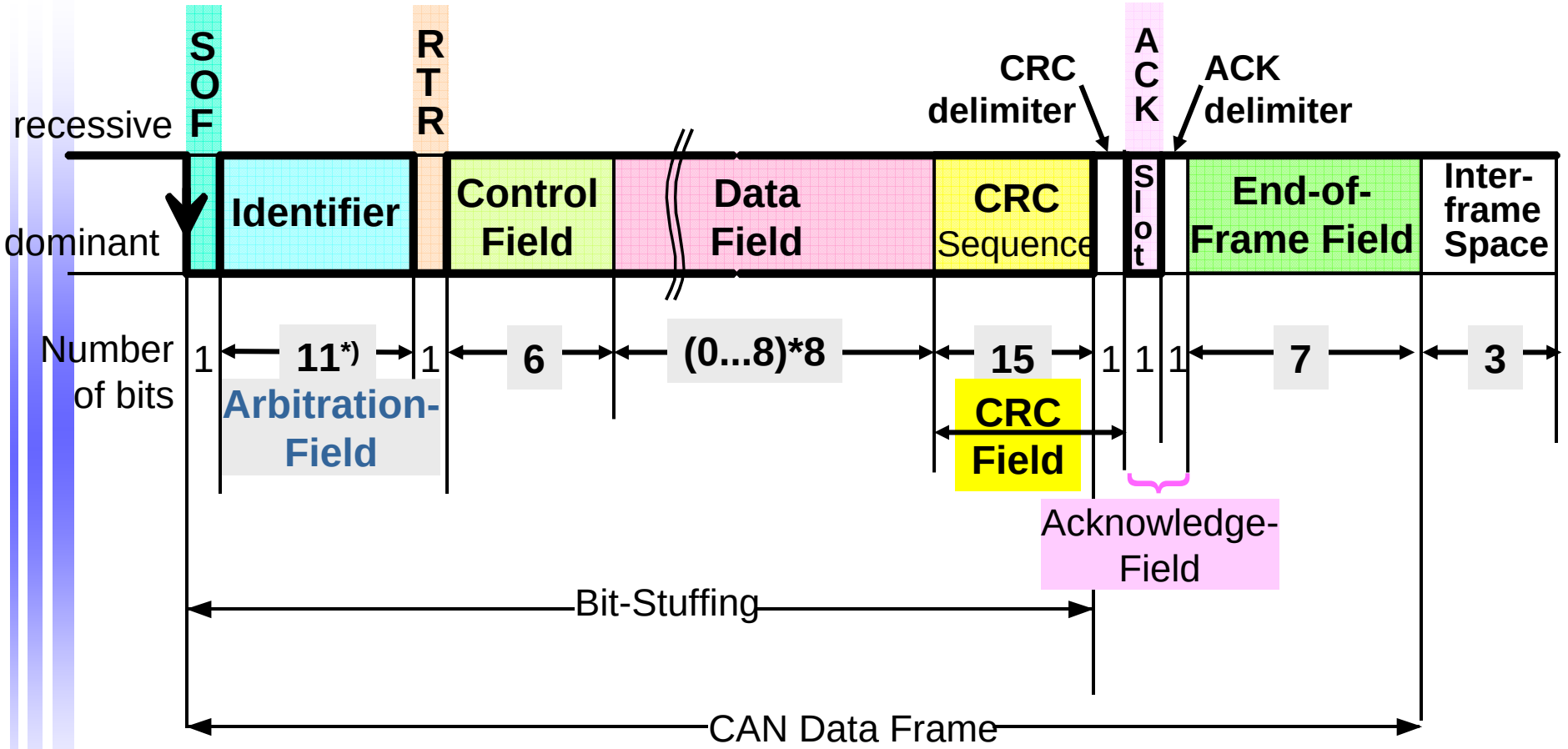
Identifier. 11 Bit (CAN 2.0A)
29 Bit (CAN 2.0B)

RTR: Remote Transmission Request
enthält Daten oder
fordert zum Senden entspr. Daten auf

CAN: Ablauf Arbitrierung



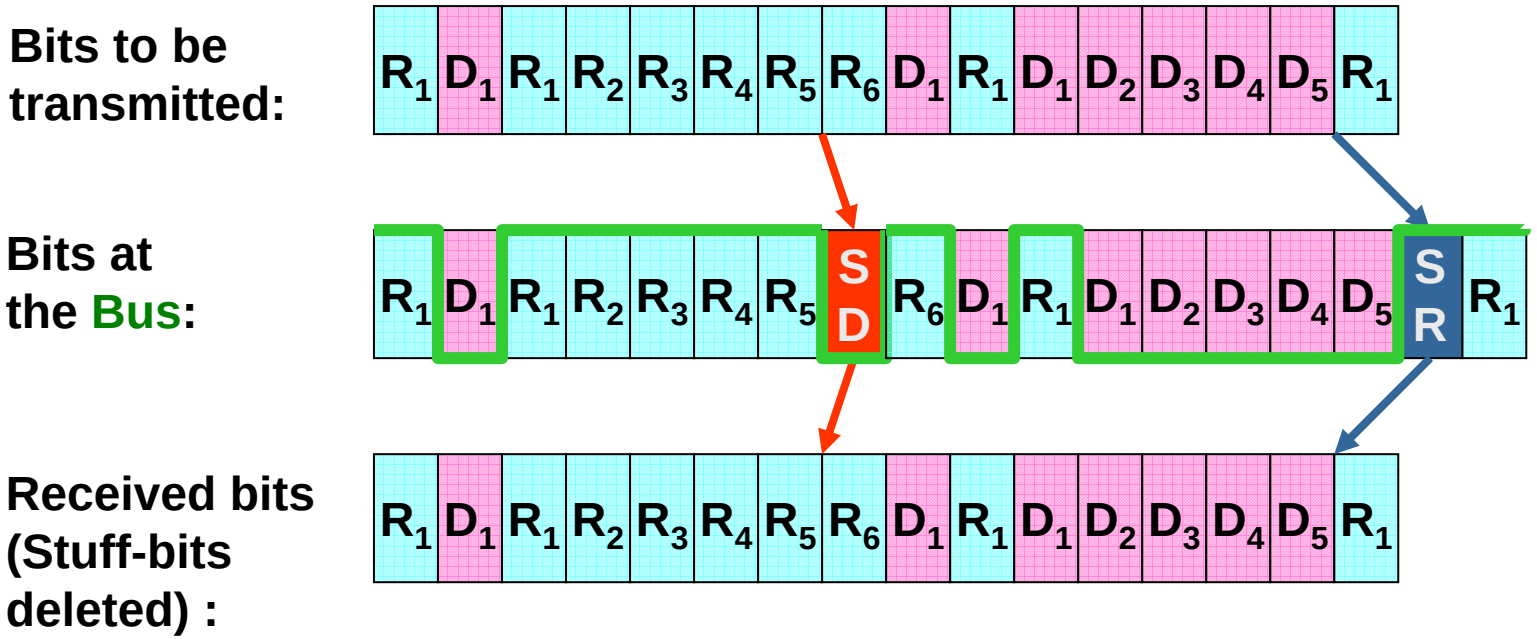
CAN: Frame Format



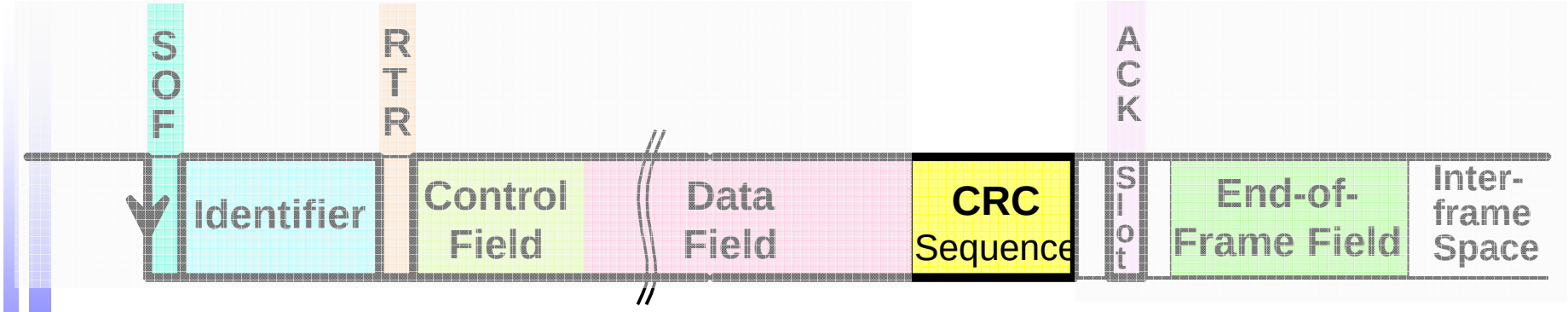
*) Standard-Format: 11 Bit
Extended: 29 Bit

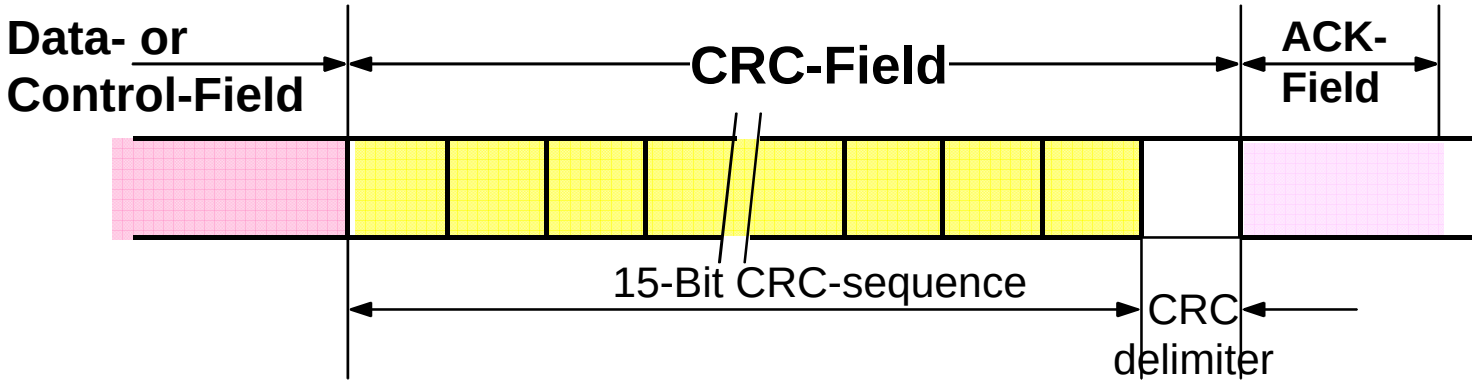
Synchronisation auf dem Bus (bit stuffing)

Um eine zeitliche Synchronisation zu gewährleisten, sind hin und wieder Flanken (Übergänge 0→1 oder 1→0) notwendig. Bei Folgen von 5 und mehr gleichen Bits werden vom Sender ein inverses Bit eingefügt (*stuffing bit*) welches beim Empfänger wieder entfernt wird.



CAN: Cyclic Redundancy Check

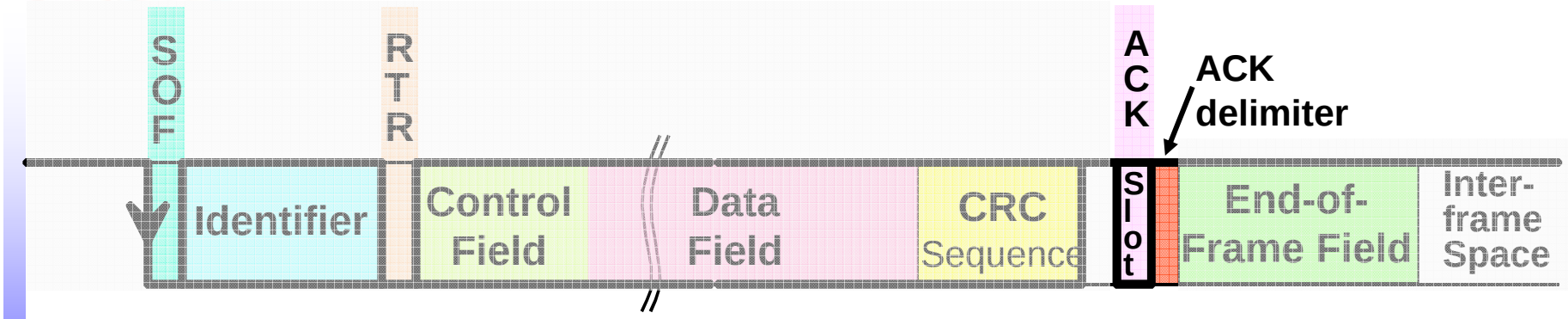


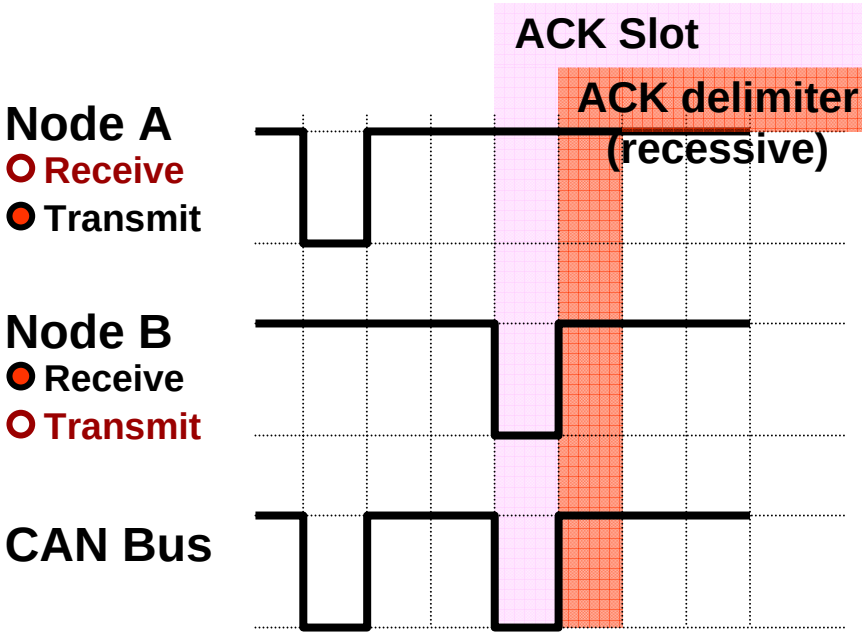


15 Bit CRC → Hamming-Distanz 6

→ Bis zu 5 Bit-Fehler können erkannt *und* korrigiert werden

CAN: Acknowledge

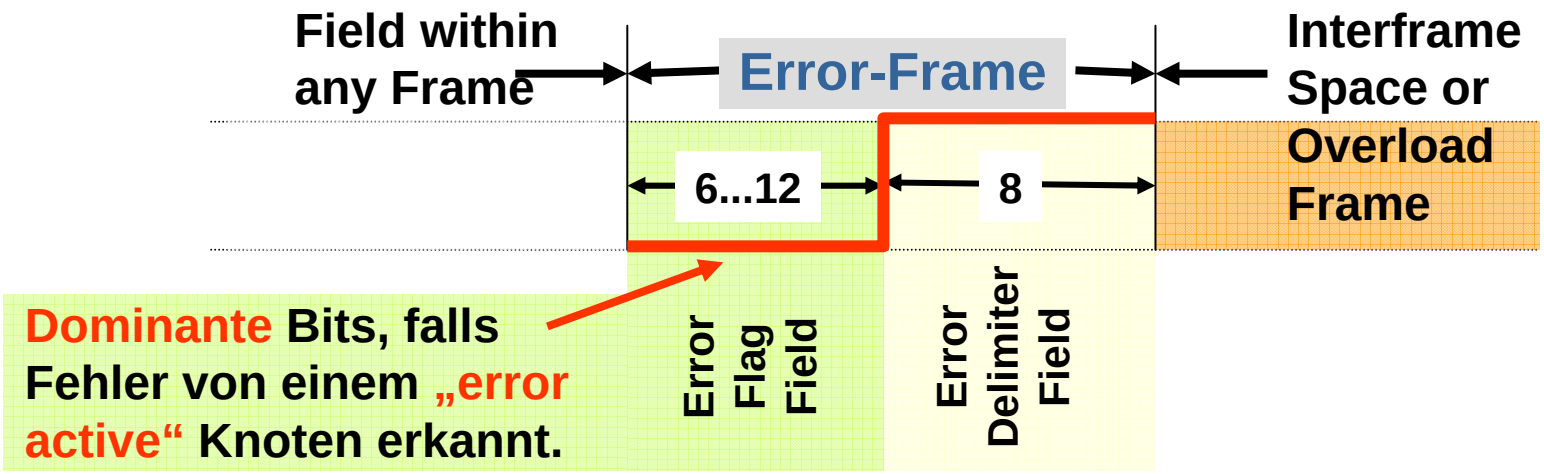




- Alle Knoten checken CRC, Stuffing-Bits etc.
- Alle empfangenden Knoten quittieren – ungeachtet Korrektheit – mit einem dominaten Bit
- D.h. mindestens 1 Knoten hat korrekt empfangen
- Falls nicht, wird Sendung wiederholt
- Kein Error-Frame!

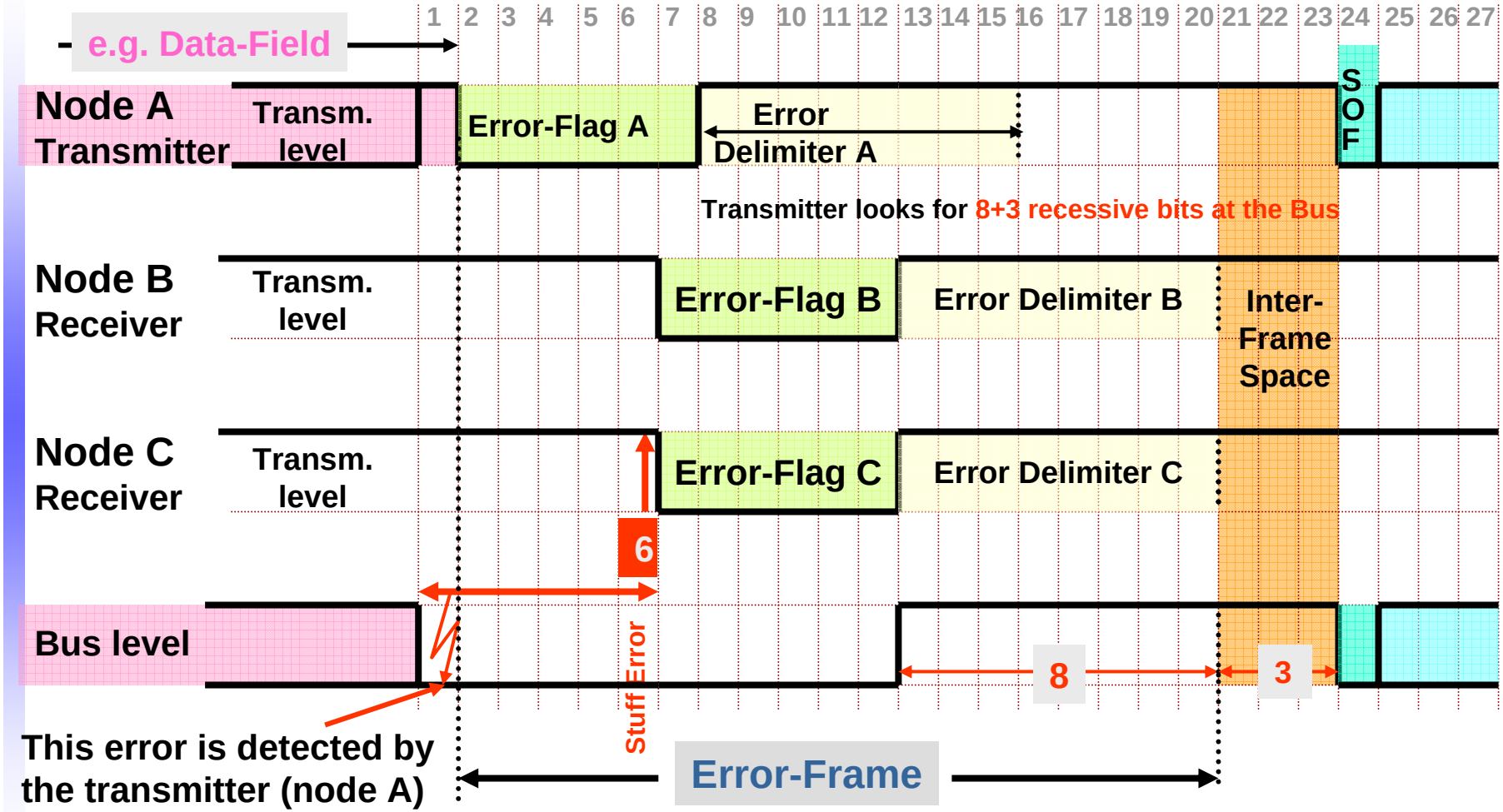
- End-of-Frame: 7 rezessive Bits
- Entdeckt ein Knoten einen Fehler, sendet er einen Error-Frame aus

CAN: Fehlerbehandlung



- „error active“ Knoten unterbricht bei Erkennung eines Fehler die Übertragung durch das Senden eines Error-Flags.
- „active error flag“ besteht aus 6 aufeinanderfolgenden dominanten Bits
- Alle Knoten erkennen eine Verletzung der Stopf-Bit (stuffing) Regel und senden ihrerseits einen Fehler-Rahmen
- → 6-12 dominante aufeinanderfolgende Bits auf dem Bus
- Nach Senden des „error delimite“-Feldes → normaler Busbetrieb

CAN: Fehlerbehandlung (2)



CAN: Fehlererkennung

- Die Wahrscheinlichkeit ρ, dass ein fehlerhafter CAN-Standard-Frame nicht erkannt wird, beträgt:

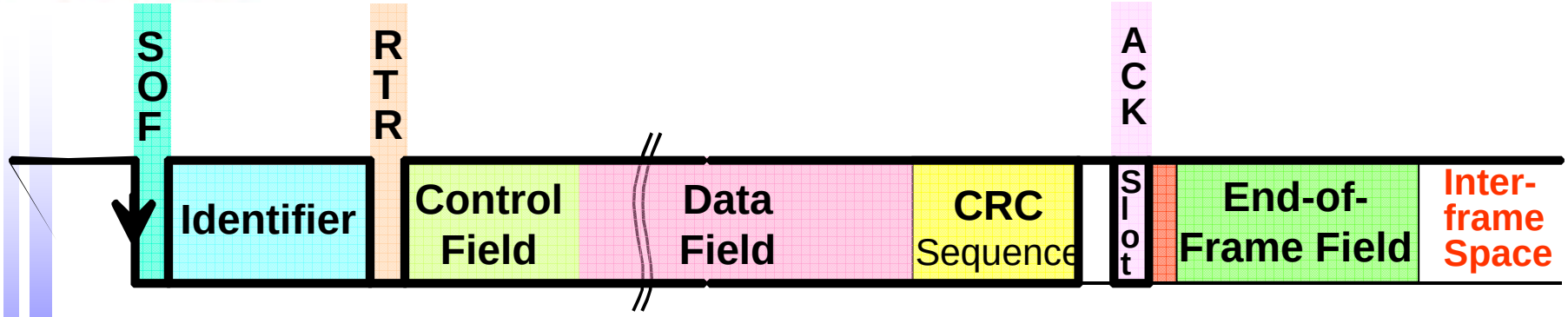
  $$\rho = 4.7 \times 10^{-11} \times Fehlerrate$$

- Beispiel:
  1 Bit-Fehler pro 0.7 s,
  Übertragungsrate: 500 kBit/s,
  Betrieb: 8 h / d, 365 d / a (d:Tag, a:Jahr)

  ➔ statistisch: **1** unerkannter Fehler in **1000** Jahren

- Extended CAN etwas schlechter als Standard CAN

CAN: Rahmen Format




```
    1 Startbit
+  11 Identifierbits
+   1 RTR Bit
+   6 Controlbits
+  64 Datenbits
+  15 CRC Bits
+   1 CRC Delimiter
+  19 (maximale Anzahl) Stuffbits
+   1 ACK Slot
+   1 ACK Delimiter
+   7 EOF Bits
+   3 IFS (Inter Frame Space) Bits
= 130 Bit
```

CAN 2.0A Identifier = 11 Bit

➔ Summe ≤ 130 Bit

CAN 2.0B Identifier = 29 Bit

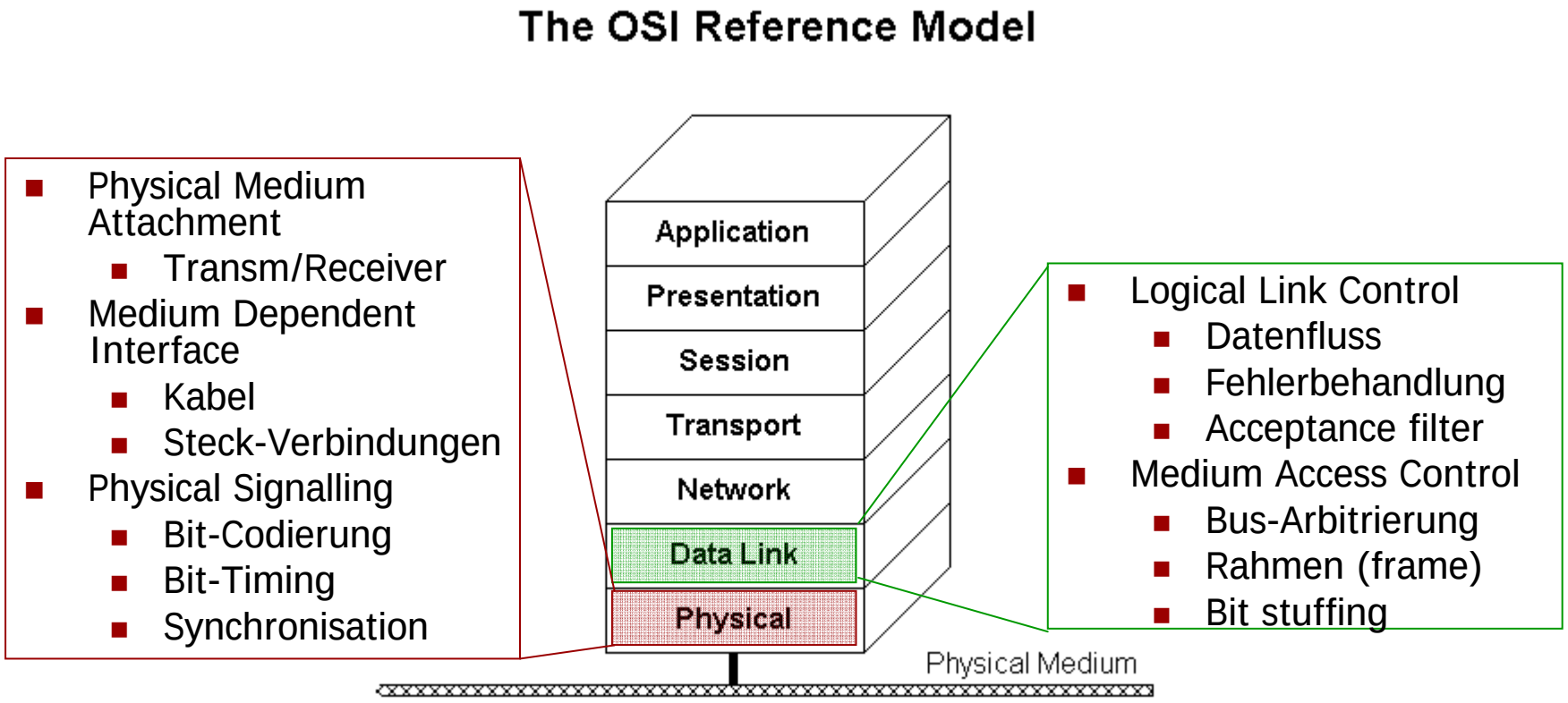
➔ Summe ≤ 154 Bit

Bei 1MBit pro Sekunde (1 bit/µs):

Übertragungsdauer bei

- Standard-Frame: ≤ 130 µs
- Extended Frame: ≤ 154 µs

CAN: die physikalische Schicht



CAN: Bit-Timing und Synchronisation

Prinzipiell müssen folgende Fälle bei der Kommunikation zwischen Knoten berücksichtigt werden:

- Oszillator des Empfängers läuft etwas schneller/langsamer
- Laufzeit des Signals auf dem Bus

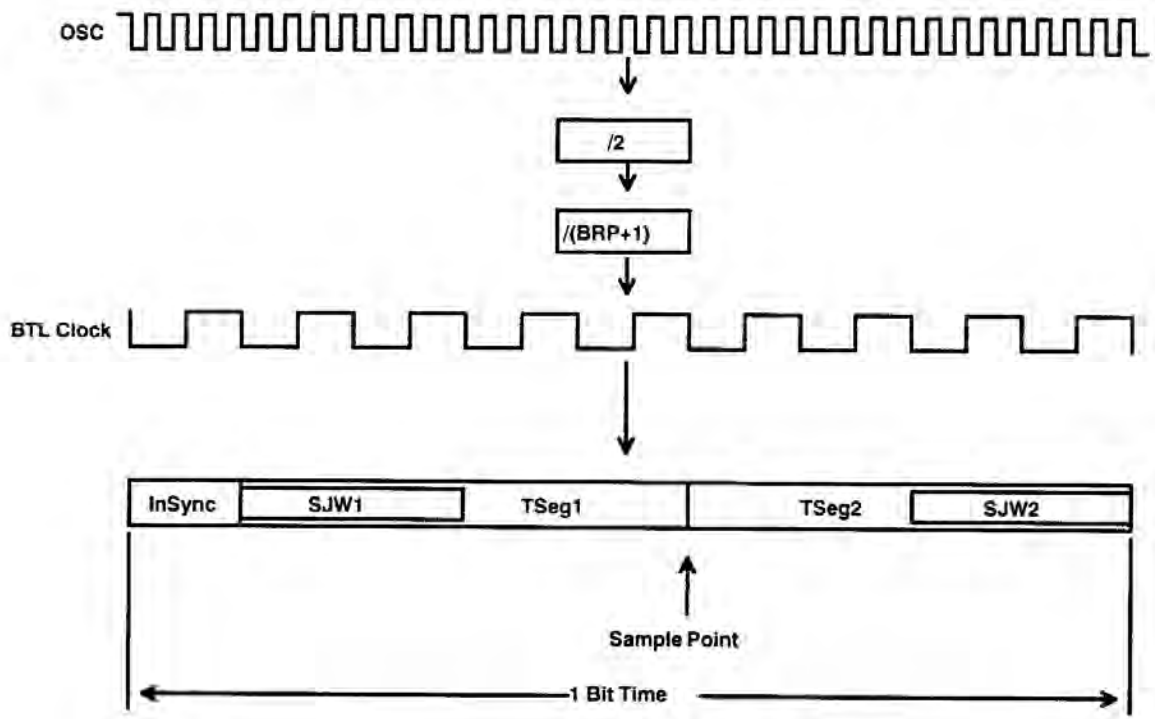
Man unterscheidet zwei Arten der **Synchronisation**:

- harte Synchronisation: wird an der fallenden Flanke des Startbits durchgeführt (oder an weiteren fallenden Flanken). Legt den absoluten Beginn eines Bits fest.
- weiche Synchronisation: wird innerhalb des CAN-Telegramms an Flanken durchgeführt, um die zeitliche Länge von Bits anzupassen.

Frage: Warum ist fallende Flanke dafür günstiger als ansteigende?

(siehe S. 24)

Prinzip: Bit-Timing und Synchronisation



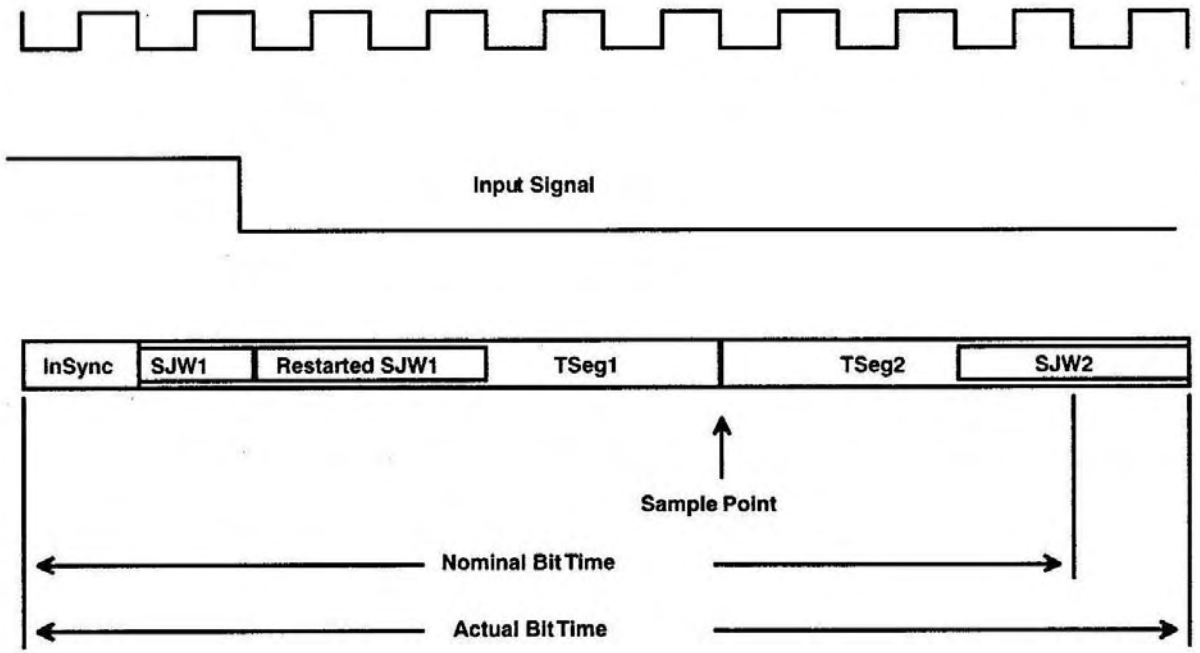
BTL: Bit Timing Logic

BRP: Baud Rate Prescaler

SJW: Synchronisation Jump Width

- Bitzeit ist in drei Segmente unterteilt: InSynch, TSEG1 und TSEG2
- Der Abtastzeitpunkt (Sample) ist immer genau zwischen TSEG1 und TSEG2
- Die programmierbaren Teile jedes Zeitsegments – das Synchronisationssegment SJW – werden zur Synchronisation benutzt.
- Die Flanke wird innerhalb des InSynch-Segments erwartet. In diesem Fall startet Empfänger TSEG1 und tastet an dessen Ende ab. Danach wird TSEG2 gestartet. Nach dessen Ablauf wird das nächste Bit erwartet.

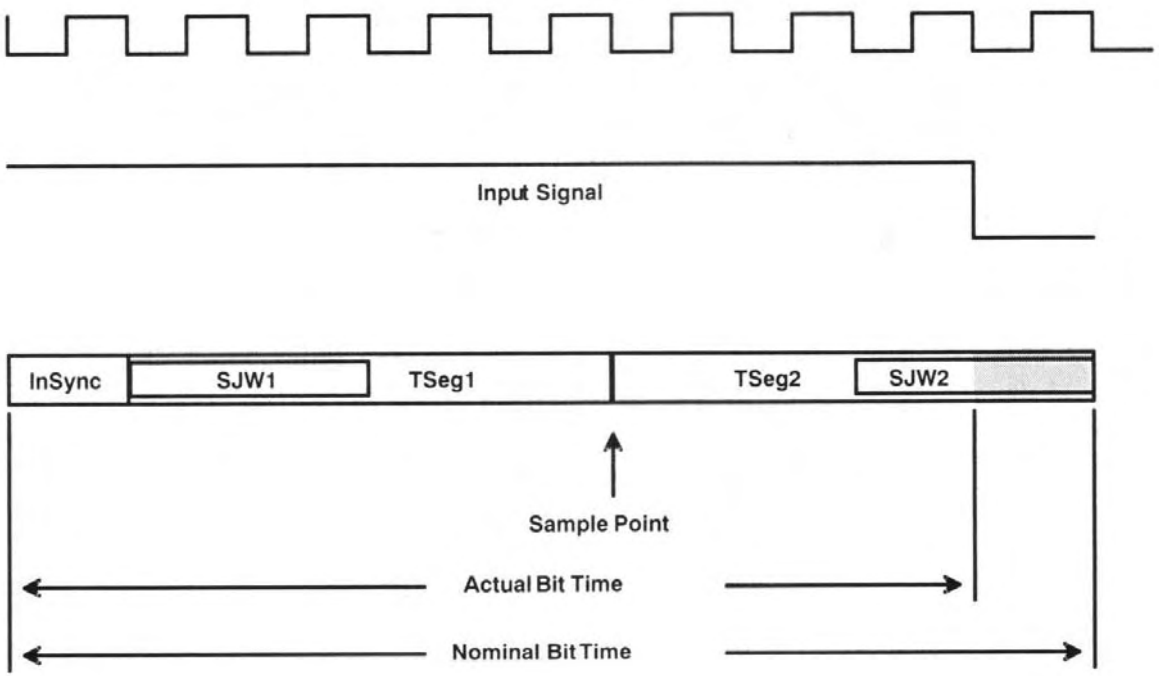
Synchronisation langsamerer Sender



- Bitzeit des Senders länger als die des Empfängers (Sender hat niedrigere Übertragungsrate)
- Flanke wird erst im SJW1-Segment detektiert
- SJW1 wird erneut gestartet.

- Resynchronisation nur bei Flankenwechsel, sonst läuft normales Bit-Timing ab

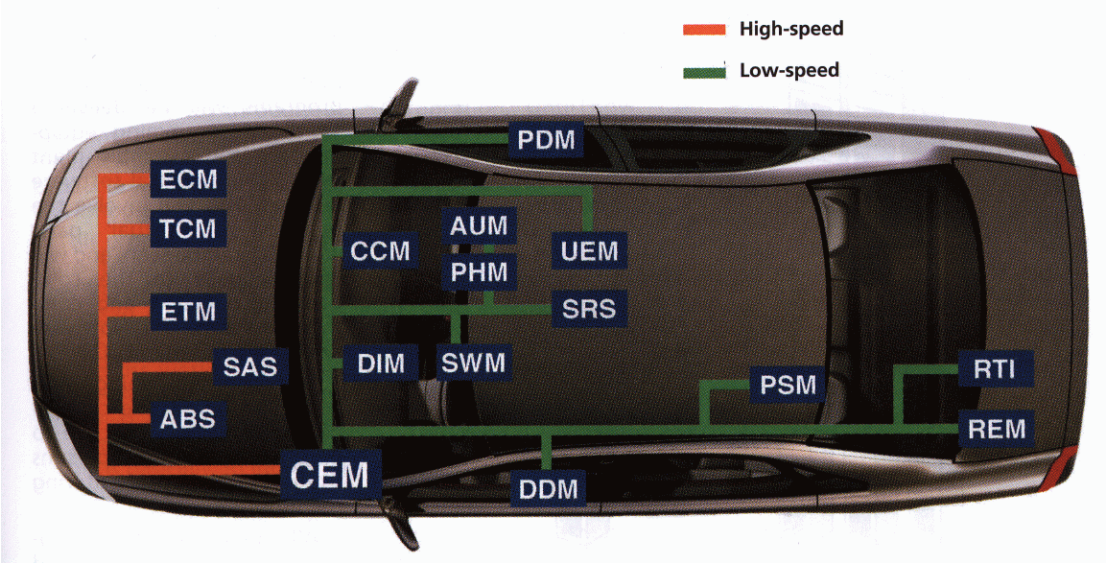
Synchronisation schnellerer Sender



- Bitzeit des Senders kürzer als die des Empfängers (Sender hat höhere Übertragungsrate)
- Flanke am Ende des Bits wird schon im SJW2-Segment detektiert
- SJW2 wird sofort gestoppt und
- Empfänger startet Bitzeit für das nächste Bit gestartet.

- Erneute Synchronisation erfolgt erst wieder mit einer Flanke

Verteilte Systeme



Warum verteilte Systeme?

- Komponenten sind physikalisch verteilt
- Verteilte Systeme sind leistungsfähiger/preiswerter als eine einzige zentrale CPU
- Sicherheit: Ausfall betrifft einzelne Komponente nicht das ganze System.
- Redundanz einfacher möglich
- System skaliert: einzelne Komponenten können hinzugefügt werden.

Response Time Analysis bei CAN

Modell: *(s.a. Peter Altenbernd, Foliensatz 3, S. 24 ff.)*

- Die Prozesse $P_j \in \boldsymbol{P}$ versenden Nachrichten
- Prozess P_j lässt sich beschreiben zu $P_j = <T_j , C_j, , J_j >$, dabei ist
  - T_j die Periode (minimale Zeit zwischen zwei Sendungen)
  - C_j minimale Übertragungsdauer für einen Rahmen (Frame)
  - J_j der Jitter (Schwankung in der Periodizität T_j)
  - R_j ist die Response Zeit des Prozesses P_j

Für die Berechnung der Response-Zeit auf dem CAN-Bus kann gut das Modell des **F**ixed **P**riority **S**cheduling auf einem Prozessor herangezogen werden.

Sei Priorität $\pi_i < \pi_j$, ist die Anzahl n_i der Interferenzen, die P_i durch den Prozess P_j mit höherer Priorität erleiden kann

$$n_i = \left\lceil \frac{R_i}{T_j} \right\rceil$$

*(die Klammer bedeutet die **Ceiling**-Funktion: kleinste Ganzzahl größer oder gleich der gebrochenen Zahl in der Klammer)*

Response Time Analysis bei CAN (2)

Die maximale Interferenz I_i beträgt also:

$$I_i = \left\lceil \frac{R_i}{T_j} \right\rceil C_j$$

In einem realen System kann aber nicht davon ausgegangen werden, dass alle Sendeprozesse zur gleichen Zeit und mit konstanter Periode gestartet werden ➔ Jitter.

Betrachten wir den Fall, dass P_j um J_j früher startet: Dann hat P_i
- 2 Interferenzen, wenn $R_i > T_j - J_j$,
- 3 Interferenzen, wenn $R_i > 2T_j - J_j$, ... ,
- n Interferenzen, wenn $R_i > (n-1)\, T_j - J_j$

Daraus folgt: $\frac{R_i + J_j}{T_j} > (n-1)$ oder $(n-1) = \left\lceil \frac{R_i + J_j}{T_j} \right\rceil - 1$

Die maximale Interferenz I_i mit **Jitter** J_j beträgt also: $I_i = \left\lceil \frac{R_i + J_j}{T_j} \right\rceil C_j$

RTA bei CAN

Scheduling bei CAN ist Fixed Priority und nicht-preemptiv:

- Die Prozesse $P_j \in \boldsymbol{P}$ versenden Nachrichten
- Prozess P_j lässt sich beschreiben zu $P_j = <T_j, C_{j,}, J_j>$, dabei ist
  - T_j die Periode (minimale Zeit zwischen zwei Sendungen)
  - C_j minimale Übertragungsdauer für einen Rahmen (Frame)
  - J_j der Jitter in Queuing oder Release
  - B_j die Blockierung durch alle Prozesse kleiner Priorität
  - w_j die Interferenz durch alle Prozesse höherer Priorität
  - $R_i = J_i + w_i + C_i$: Response Zeit des Prozesses P_i
  - τ_{bit}, τ_{res} die Zeit(unschärfe) für 1 Bit. Bei 1MBit/s → 1 µs

$$R_m = J_m + w_m + C_m$$

(Gl. 3) worst case Release Time

$$w_m = B_m + \sum_{\forall j \in hp(m)} \left\lceil \frac{w_m + J_j + \tau_{bit}}{T_j} \right\rceil C_j$$

(Gl. 4) wobei hp(m) alle Nachrichten mit höherer Priorität als m sind

RTA bei CAN (2)

In Gl. 4 kann die Blockierung im worst case Fall wie folgt angegeben werden:

$$B_m = \max_{\forall k \in lp(m)} (C_k)$$

(Gl. 4) wobei lp(m) die Nachrichten mit kleinerer Priorität als m sind

(Gl. 2) Gl. 4 kann rekursiv beschrieben werden:

$$w_i^{n+1} = B_i + \sum_{\forall j \in hp(i)} \left\lceil \frac{w_i^n + J_j + \tau_{res}}{T_j} \right\rceil C_j$$

Dabei wird $w_i^0 = 0$ gesetzt. Iteration ist beendet, wenn $w_i^{n+1} = w_i^n$

C_m ist die maximale Zeit, die zur Übertragung der Nachricht m benötigt wird. CAN-Rahmen haben einen Overhead von 47 Bit, eine Stuffing-Breite von 5 Bit, jedoch werden nur maximal 34 von 47 Bits des Overhead gestopft.

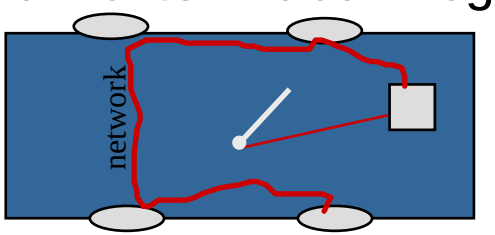
s_m: Anzahl Daten-Bytes (0-8)

$$C_m = \left(\left\lfloor \frac{34 + 8s_m}{5} \right\rfloor + 47 + 8s_m \right) \tau_{bit}$$

(Gl. 6)

Problem bei eventgesteuertem Bus

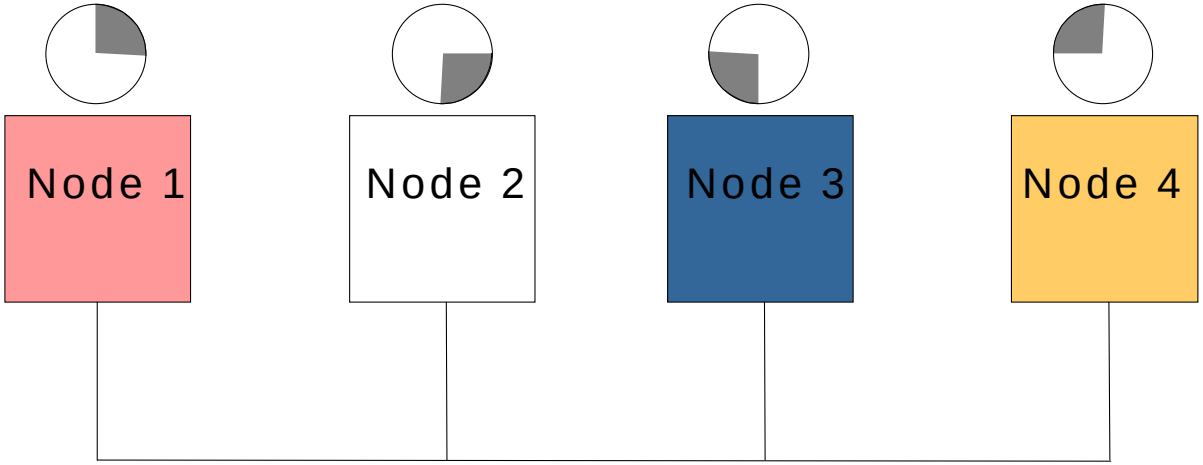
- nur Nachricht mit höchster Priorität ist determiniert.
- niedrige Prioritäten können verdrängt werden
- höhere Prioritäten können durch niedrigere zeitweilig blockiert werden.
- Reihenfolge von Nachrichten nicht determiniert
- Einfluss von Jitter
  - selbst kleine Schwankungen der Periodizität der einzelnen Nachrichten haben ungünstigen Einfluss auf Response-Zeit
  - nicht periodisch auftretende Nachrichten haben negativen Einfluss

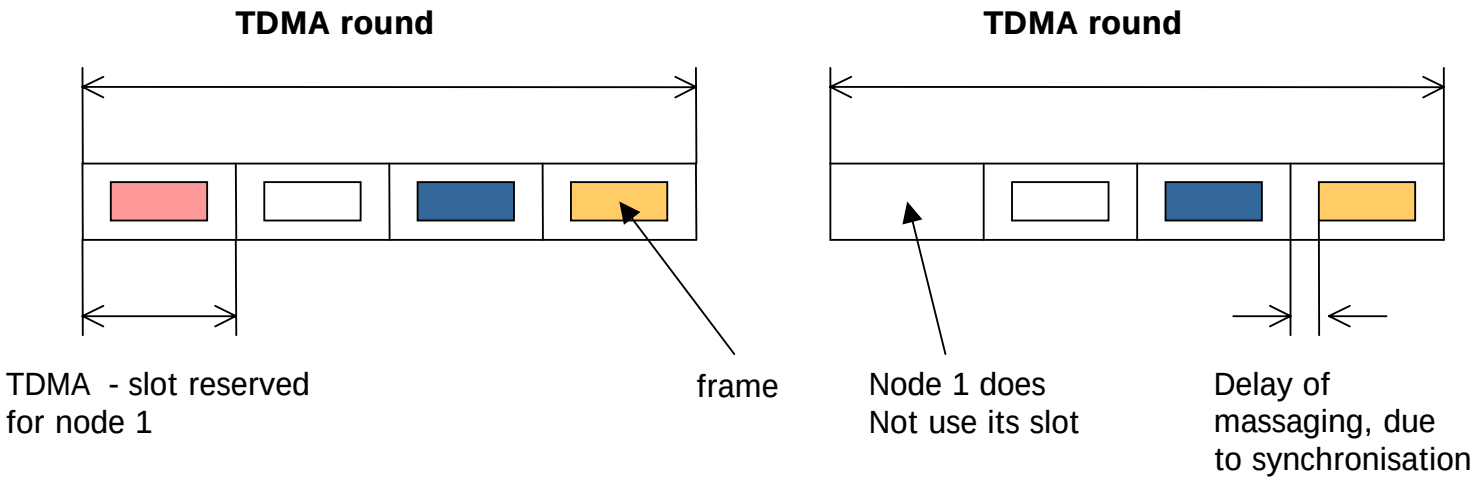


→ Übergang zu zeitgesteuerten Protokollen bei kritischen Anwendungen (z.B. drive-by-wire, X-by-wire)

Zeitgesteuerte Protokolle

Zeitsteuerung (**T**ime **T**riggered **P**rotocol) kann beispielsweise durch TDMA (**T**ime **D**ivision **M**ultiplex **A**ccess) erreicht werden





Zeitgesteuerte Protokolle

- Übergang von Ereignissteuerung (event triggered) → Zeitsteuerung (**T**ime **T**riggered **P**rotocol)
- Sicherheitskritische Anwendungen besser beherrschbar
- Zeitgesteuert := alle Aktivitäten werden durch das Fortschreiten der Zeit ausgelöst
- Abhängigkeit von einer Systemzeit.
- Sendezeitpunkt aller Nachrichten von vornherein bekannt „Bus-Fahrplan“
- Entlastung der Anwendungssoftware
- Bei CAN Übergang zu TTCAN
  Erweiterung des Protokolls um einen **Session Layer** (OSI)
  Datentransport und Physikalische Schicht bleiben gleich.

TTCAN: Erweiterung von CAN zum TTP

Beispiel: TTCAN

- TTCAN ist vollständig rückwärtskompatibel zu CAN, da CAN physical + link layer verwendet wird
- Somit auch CAN-Knoten direkt als Empfänger/Sender verwendbar
- Standardisierung erfolgt unter ISO 11898-4
- Damit aber auch Beschränkung der Datenrate auf 1 Mbps (Brutto!)

Grundprinzip der Erweiterung erfolgt in 2 Schritten

- Schritt 1:
  - Einführung einer Referenznachricht einer Zeitbasis
  - Ausfallsicherheit wird durch Redundanz dieser Zeitbasen erreicht
- Schritt 2:
  - Eine globale Zeitbasis wird eingeführt
  - Korrektur der zeitlichen Drift zwischen den CAN Controllern wird eingeführt

TTCAN Mechanismen

TTCAN Mechanismen

- Verfügungstellen von Zeitbasen
  - Local_Time, Cycle_Time, and Global_Time
- Drei verschiedene Arten von Zeitfenstern:
  - Exklusive, arbitrierend, frei
- Zeitgesteuerte und periodische Kommunikation werden durch eine zeitgesteuerte Referenznachricht gesteuert
- Die System Matrix beschreibt die zeitliche Abfolge der Nachrichten in jedem Grundzyklus

Einführung von Zeitfenstern ("TDMA")

- Exklusive Zeitfenster
- Exklusiv reserviert für eine Nachricht, keine konkurrierenden Netzwerkzugriffe möglich
- Nachrichten im exklusiven Zeitfenster werden nicht verzögert (=deterministisch)

Arbitrierungsfenster

- Während dieses Zeitfensters erfolgt die klassische bitweise Arbitrierung

Freie Fenster

- Reserviert für mögliche zukünftige Erweiterungen

TTCAN Referenznachricht

Referenznachricht

- Die Referenznachricht wird durch ihren Identifier gekennzeichnet

Im Schritt 1

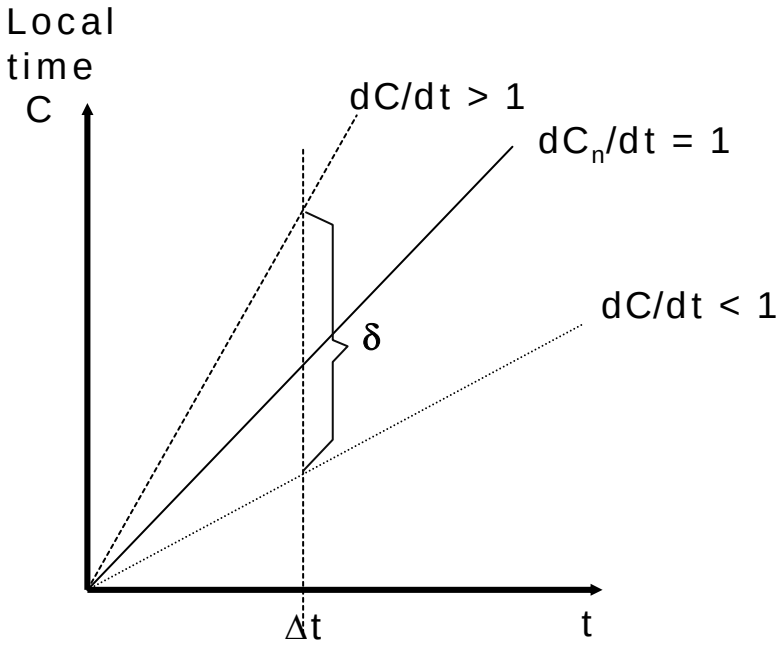
- Die Referenznachricht enthält 1 Byte Kontrollinformation. Der Rest der CAN Nachricht kann für Datentransfer genutzt werden

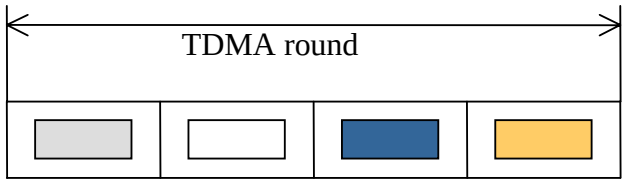
Im Schritt 2

- Die Referenznachricht enthält zusätzliche Kontrollinformation, wie bspw. die globale Zeitbasis des TTCAN Zeitmasters
- Die Referenznachricht enthält 4 Bytes an Kontrollinformation. Die verbleibenden 4 Bytes können für Datentransfer genutzt werden.

TTP Uhren-Synchronisation

- Uhren synchronisiert in den Grenzen δ
- Justierung der Uhren der Knoten hoch oder runter (Uhren sind durch Zähler realisiert)
- MSGs für Synchr.
  - Expected arrival (EA)
  - Real arrival (RA)
  - Alle Uhren auf Mittelwert





EA	0	25	50	75
RA	0	23	52	79
Diff	0	2	-2	-4

TTCAN Beschreibung

- Systemweit synchronisierte Zeitbasis
- Referenznachricht mit bestimmten Identifier
- Alle Knoten synchronisieren damit ihre eigene Uhr
- Sobald jeder Knoten seine Zeitmarke erreicht hat, versendet er seine Nachricht
- Zeit zwischen zwei Referenznachrichten bildet Basiszyklus
- Mehrere Basiszyklen sind erlaubt.
- Abfolge aller Basiszyklen bilden Gesamtzyklus
- → unterschiedliche Wiederholzyklen sind damit realisierbar
- Sogar nichtperiodische Referenznachrichten sind möglich
  z.B. Drehzahl der Kurbelwelle → Berechnung Einspritzzeitpunkt
- TTCAN ist Hybrid: neben Zeitsteuerung auch weiterhin ereignisgesteuerte Nachrichten möglich

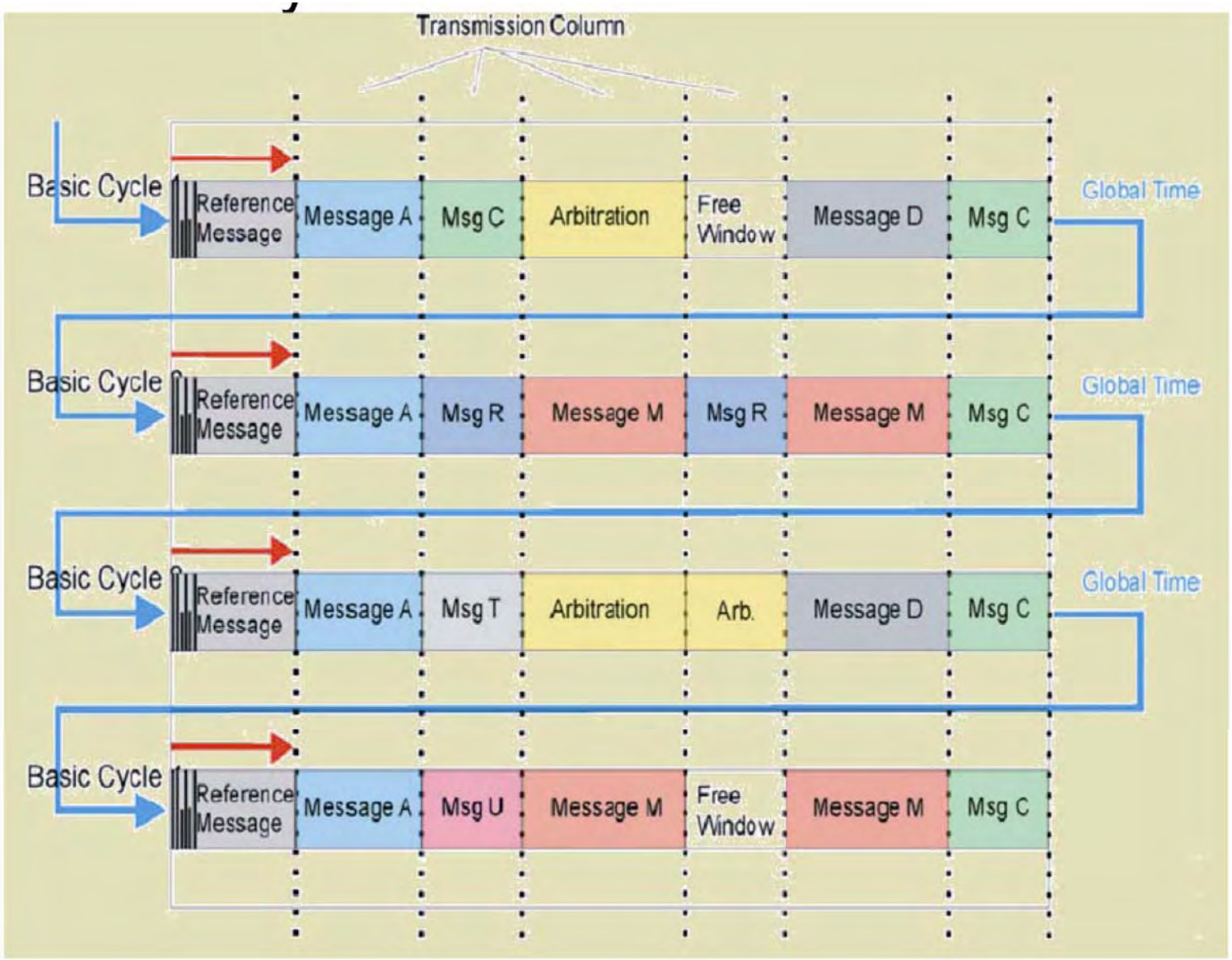
- Uhren dennoch immer leicht unterschiedlich
- TTCAN bietet Möglichkeit Uhren auch zwischen zwei Referenznachrichten zu resynchronisieren.
  → Genauigkeit bis 1 µs möglich

TTCAN Systemmatrix

TTCAN System Matrix

- Bei TTCAN müssen nicht alle Grundzyklen gleich sein
- Unterschiedliche Grundzyklen werden durch den Zyklenzähler unterschieden
- Der Zyklenzähler wird in jedem Takt erhöht bis zu einem Maximalwert. Danach erfolgt ein Zurücksetzen
- Die System Matrix ergibt sich aus der Kombination aller unterschiedlicher Zyklen, und
- gibt einen Überblick über die Konfiguration des TTCAN Netzwerkes

TTCAN Systemmatrix (2)



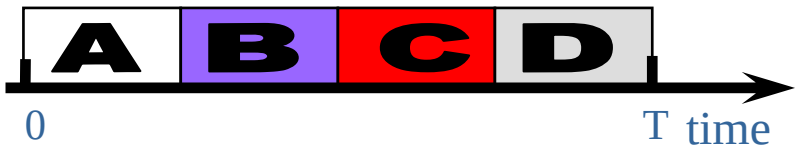
TTCAN Systemmatrix (3)

- TTCAN Erweiterung erfolgt durch 2 zusätzliche funktionale Blöcke:
  - Trigger Memory
  - Frame Synchronization Entity (FSE)
- Trigger Memory speichert die Zeitpunkte der Systemmatrix, die zu den Nachrichten im RAM gehören
  - Diese Daten werden der Frame Synchronization Entity zur Verfügung gestellt
- Die FSE ist eine Zustandsmaschine, welche die TT Kommunikation kontrolliert. Sie synchronisiert sich mit den Referenznachrichten und kontrolliert die Zyklen. Die FSE besteht aus 6 Blöcken:

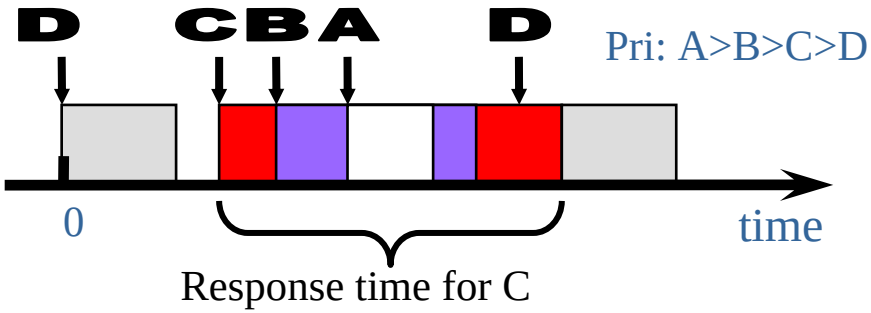
TBB: Time Base Builder
TSO: Time Schedule Organizer
AOM: Application Operation Monitor
CTC: Cycle Time Controller
MSA: Master State Administr.
GTU: Global Time Unit

Vergleich event-/zeitgesteuert

- **Time triggered**
  - TDMA
  - Pre-Scheduled
    - Predictable
    - Testable
  - Static
  - e.g. TTP



- **Event driven**
  - CSMA/CR
  - Priority driven
    - Online Scheduling
    - Flexible
    - e.g. CAN

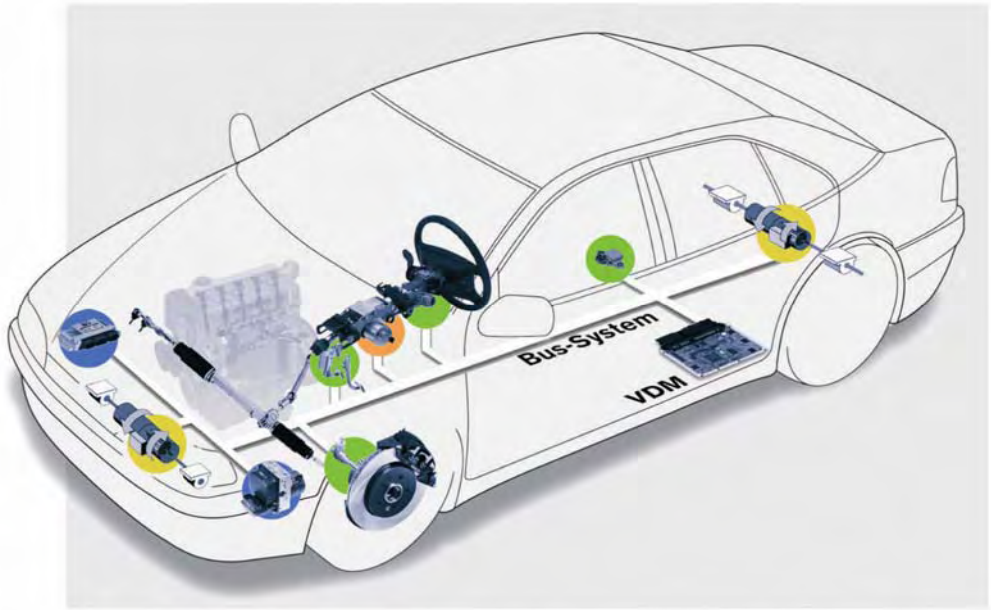


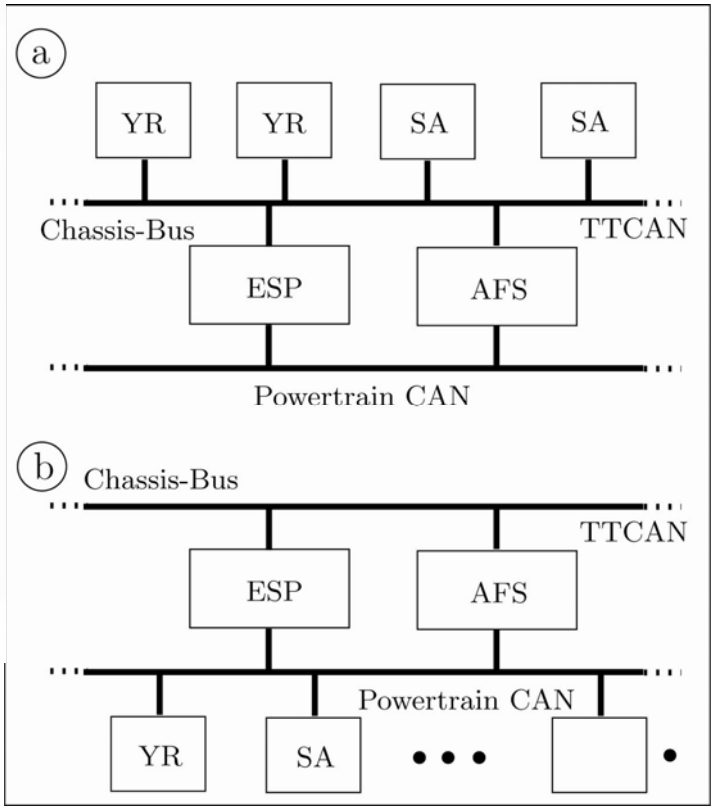
TTP - CAN: A comparison

- **TTP**
- time triggered: Static TDMA
- Complete package (costly)
- easy to analyse
- high overhead for simple systems
- overhead not as bad for complex systems
- Ultra-reliable systems
- Includes DS-functionality
  - Clock synchronisation
  - Fault tolerance

- **CAN**
- event driven: CSMA/CR
- Priority-based
- just a protocol (cheap)
- difficult to analyse
- efficient for simple systems
- efficiency lower with complex systems
- -> FlexRay: combination

TTCAN: Anwendungen und Redundanz





VDM Vehicle Dynamics Management

ESP Electronic Stability Program

YR Yaw Rate Sensor

SA Steering Angle Sensor

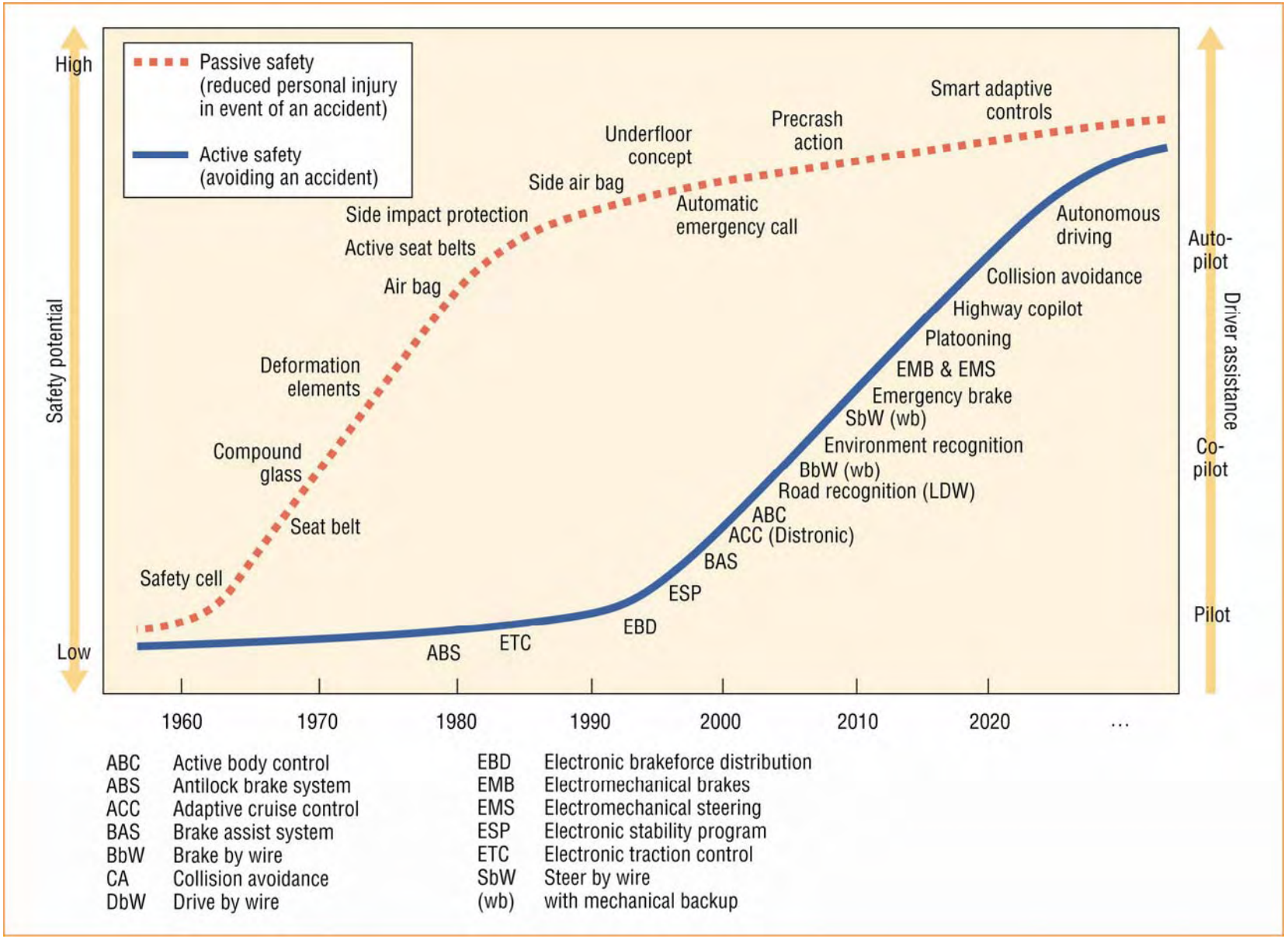
AFS Active Front Steering

EAR Electronic Active Roll Stabilizer

Kritische Systeme können redundant miteinander vernetzt werden

→ *Ausfallsicherheit*

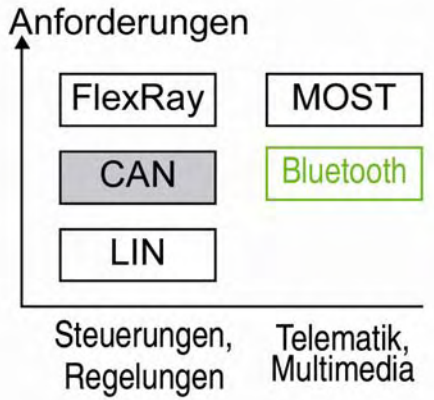
Ausblick auf zukünftige Automotive Syst.



Feldbusse im Automobilbau

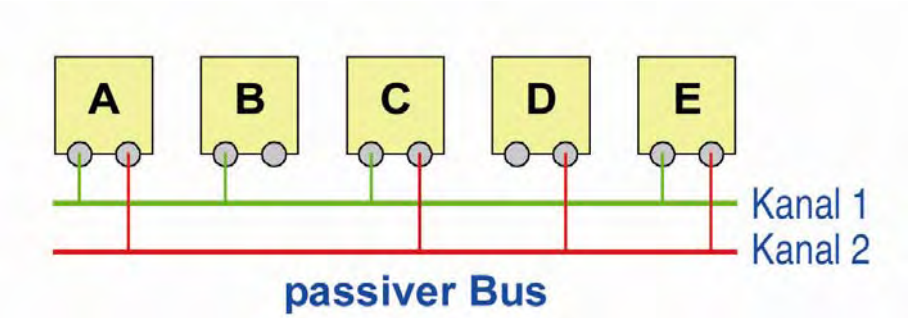
Weitere Busse im Automobilbau

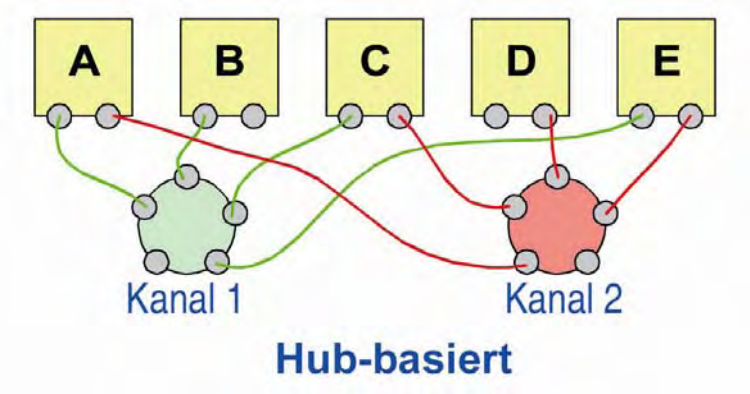
- CAN ist derzeit dominierend
- MOST (Media Oriented System Transport) für Infotainment und (Verkehrs-)Telematik-Bereiche
- LIN (Local Interconnect Network)
  - Einsatz wo geringe Kosten und dafür auch geringere Leistung nötig,
  - lose Ankopplung von Sensoren und Aktuatoren
- FlexRay: Konsortium vieler Automobil-Firmen zum Einsatz eines neuen Busses
  - 10 MBit/s Übertragungsgeschwindigkeit
  - echtzeitfähig
  - fehlertolerante Konfiguration möglich



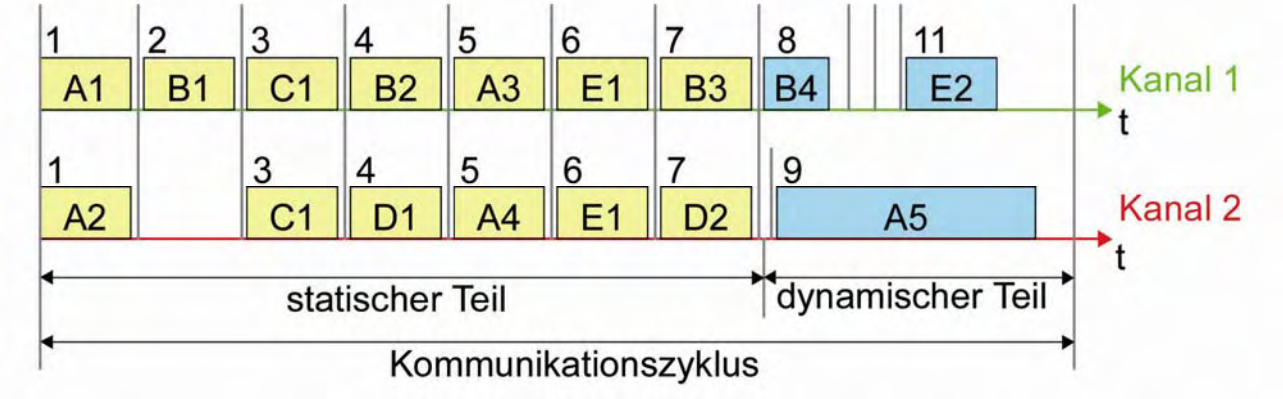
FlexRay: Funktionsweise

- von *BMW* und *DaimlerChrysler* für X-by-Wire-Systeme entwickelt
- ähnlich zu TTCAN von *Bosch (ebenfalls für X-by-Wire-Systeme)*
  - → hat sich durchgesetzt *(Bosch unterstützt auch FlexRay)*
- High-End-Bus im KFZ-Steuerungsbereich:
- synchrone und asynchrone Übertragung von bis zu 10 MBit/s
- Kupfer- und Lichtwellenleiter möglich
- Topologie: - passiver Bus (bis 3 MBit/s)
  - - sternförmig über Hubs (bis 10 MBit/s)
  - - optionaler zweiter Kanal für - Redundanz (Ausfallsicherheit)
  - - Erhöhung der Bandbreite





FlexRay: Übertragungszyklus



- in mehrere Zeitfenster unterteilt (vgl. *TDMA*)
- Zyklus beginnt mit einem *SYNC*-Signal einer zentralen Station zur Synchronisation aller Stationen (exakte globale Zeitbasis)
- statischer Teil mit fester Zuordnung der Zeitschlitze zu Nachrichten
- dynamischer Teil für prioritätsbasierte Übertragung asynchroner Nachrichten
- → zur Busauslastung in diesem Teil beginnen die Stationen nach kurzer Timeout-Zeit mit neuem Zeitschlitz, wenn kein Übertragungswunsch vorliegt
- deterministisch für kritische X-by-Wire-Daten *(feste Zeitschlitze im statischen Teil)*, als auch der maximalen Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Bandbreite

MOST: Media Oriented System Transport

Systembusebene: MOST (Media Oriented Systems Transport)

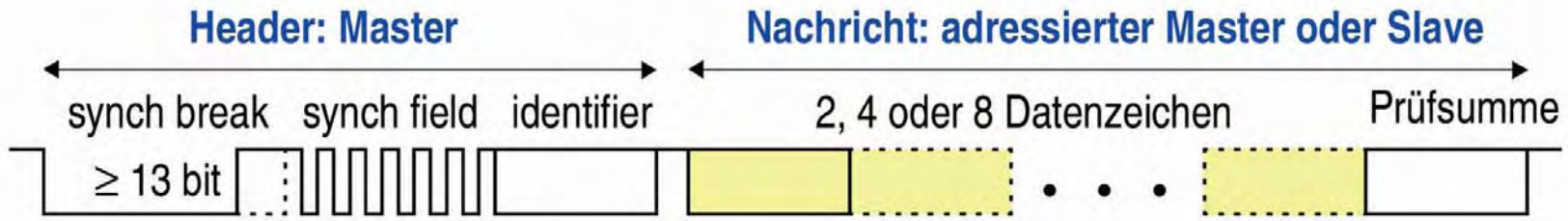
- seit 1998 für Multimedia und Telematik *(Infotainment-Systeme)*
  → Festlegung aller Protokollschichten *(inkl. Anwendungsschicht)*
- Medium: preisgünstigen Kunststoff-Lichtwellenleiter *(polymer optical fiber, POF)*
- Topologie: - Ring-, Stern- und Kettenstrukturen
  - bis 64 Knoten (*Plug&Play*)
  - eindeutige Sende- und Empfangsadressen für asynchrone Daten
- Unterstützung von synchroner und asynchroner Übertragung
  - synchrone Echtzeitdaten: Reservierung fester Kanäle *(vgl. TDMA bei FlexRay)*
    (Daten werden ohne vorgegebenes Format und Zieladresse verschickt, damit alle interessierten Empfänger dieselben Daten annehmen können [z. B. zwei Fond-Displays das selbe Bild])
  - asynchronen Daten- und Kontrollnachrichten: CSMA/CA über Adressen
- Datenrate: - 24 MBit/s für synchr. Audio- und Videodaten *(150 MBit/s bereits als Prototyp)*
  - 14 MBit/s für asynchrone Daten
  - asynchroner Steuerkanal mit 700 kBit/s zur Gerätesteuerung und MMI

LIN: Local Interconnect Network

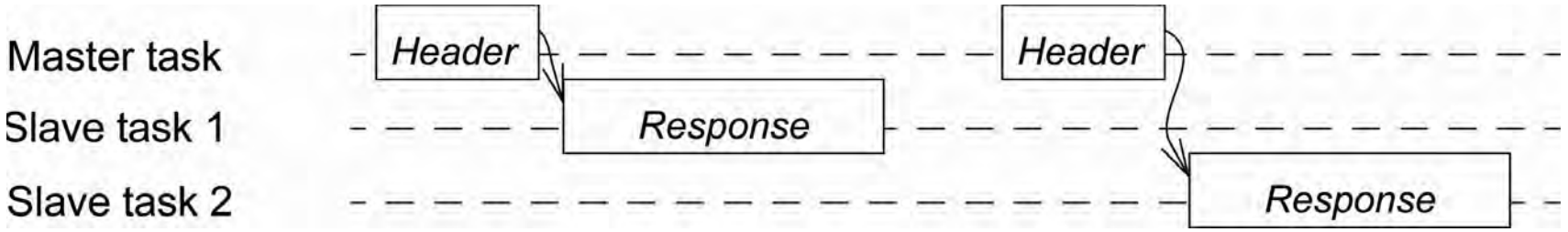
Sensor-Aktuator-Ebene: LIN (Local Interconnect Network)

- „Billigbus“ unterhalb von *CAN* für Vernetzung von einfachen Sensoren *(z. B. Temperatur- und Feuchtigkeitssensoren)* und Aktuatoren *(z. B. Beleuchtungselemente)* einzelner Subsysteme
- Einsatz: wo Bandbreite und Flexibilität von *CAN* nicht benötigt wird bzw. wo *CAN*-Controller aus Platz- und Kostengründen nicht sinnvoll
  → im Allg. werden die mit *LIN* vernetzten Sub-Systeme *(z. B. Türen, Sitze, Lenkrad)* an übergeordnete, *CAN*-basierte Netzwerke *(Body, Cassis)* angeschlossen
- Master-Slave-Bus *(eine Master-Station)*
  → Echtzeitfähigkeit durch Master-Slave-Kommunikation und Rahmenformat
- Medium: 12 V-Eindrahtbus
- Topologie: Linienbus mit typ. bis zu 16 Stationen *(keine feste Obergrenze)*
- Bandbreite: max. 20 kBit/s
- Kodierung: *UART*-Zeichen
- Nachrichten: keine Zieladressen, sondern nachrichtenorientiert *(wie CAN)*

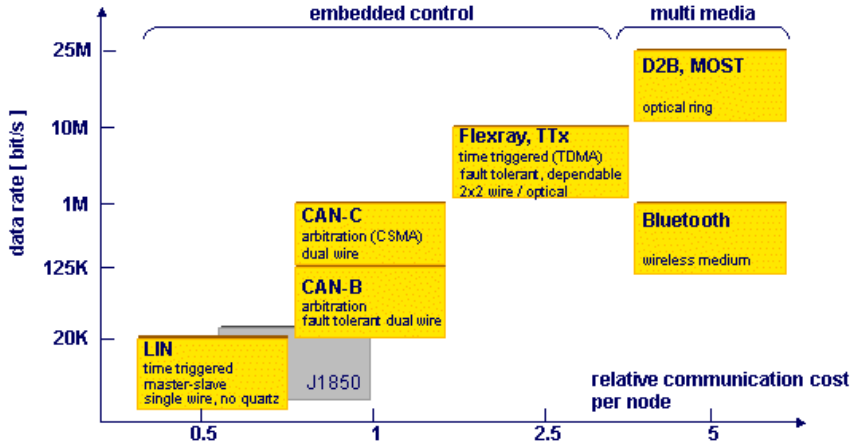
LIN: Local Interconnect Network



- 1. Master:
  - Rahmenbeginn: 13 Bit langer dominanter Pegel (*sync break*)
  - Synchronisation: wechselnde 1-0 Folgen (*sync field*)
  - 6 Bit lange Nachrichten-ID
- 2. Master oder ein Slave, der über die Nachrichten-ID angesprochen wird:
  - 1 bis 8 Datenbytes
  - Prüfsumme.
- Kommunikationsmöglichkeiten *(immer vom Master initiiert)*
  - vom Master zu einem oder mehreren Slaves
  - von einem Slave zum Master und/oder anderen Slaves
  - → direkte Slave-to-Slave-Übertragung möglich

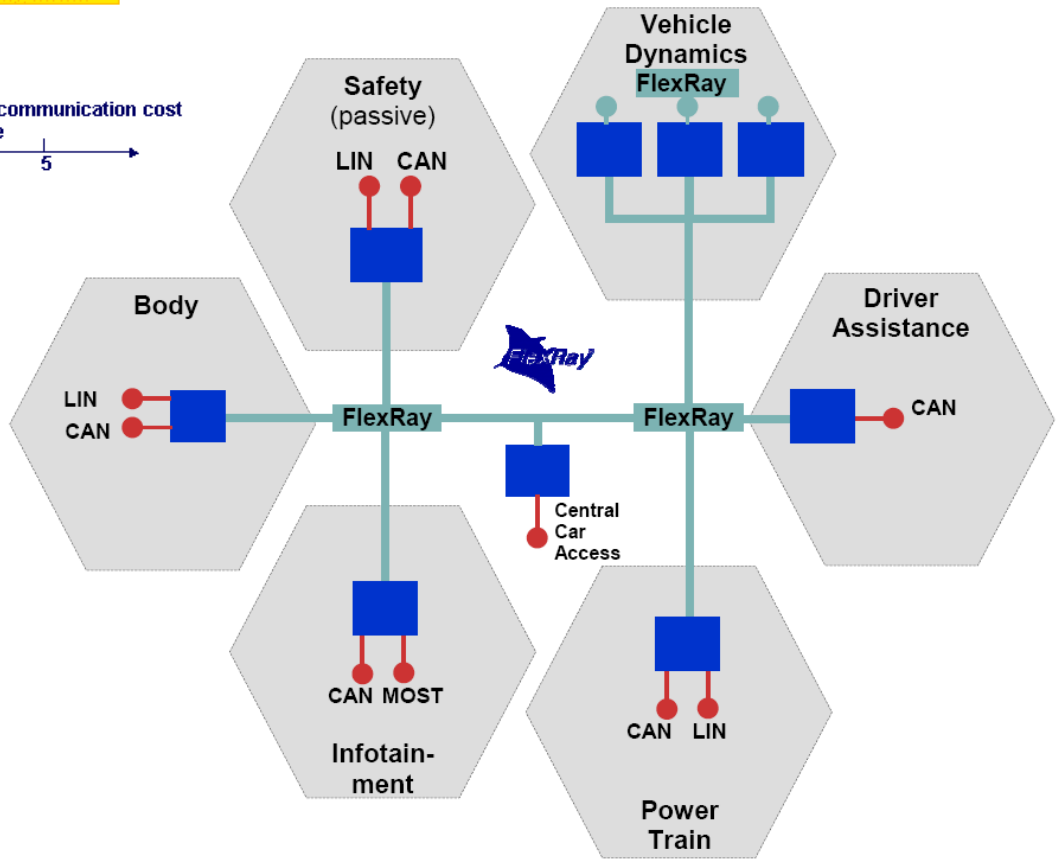


Automotive Distributed Systems



Kosten

Visionen



Literatur und Quellen

[1] Real-Time Systems and Programming Languages; Alan Burns, Andy Wellings; Pearson-Addison Wesley; 3rd Ed 2001

[2] Hard Real-Time Computing Systems; Giorgio C. Buttazzi; Springer; 2005

[3] Analysing Real-Time Communications: Controller Area Network (CAN); K. W. Tindell†, H. Hansson A. J. Wellings; 1994

[4] Informations- und Kommunikationstechnik im Kraftfahrzeug, Michael Bolle

[5] Echtzeitkommunikation, Bernd Schürmann

[6] Friedhelm Stappert, RTS-Vorlesung SS09

[7] Echtzeitanwendungen und Kommunikation mit Mikrocontrollern, P. Mutschler