



Technische  
Universität  
Braunschweig



Institut für Betriebssysteme  
und Rechnerverbund  
Connected and Mobile Systems



# Computernetze 1

## Übung 6

### Data Link Layer – Medienzugriff

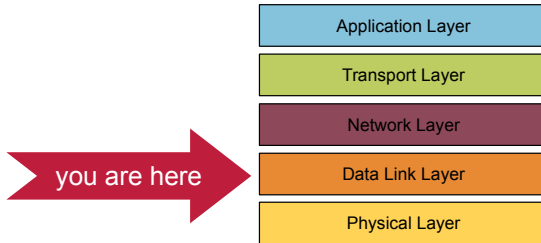
Fynn Schulze, 05. Juni 2025

Technische Universität Braunschweig, IBR

# Überblick

- 1) ALOHA
- 2) CSMA/CD
- 3) Binary Exponential Backoff
- 4) Ethernet und Token-Ring
- 5) Zwischensysteme

# Überblick



# Hintergrund: ALOHA

## Einordnung

- Medium Access Control (MAC) bzw. Medienzugriffssteuerung
- Verfahren um den Zugriff auf ein gemeinsames Medium zu koordinieren
- Teil der Sicherungsschicht (Data Link Layer)

## Alternative zu ...

- Polling
- TDMA
- Token-based
- CSMA

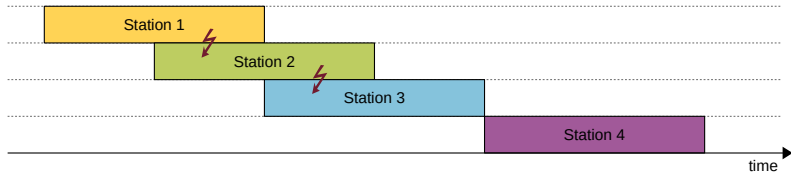
# Hintergrund: ALOHA

## ALOHA

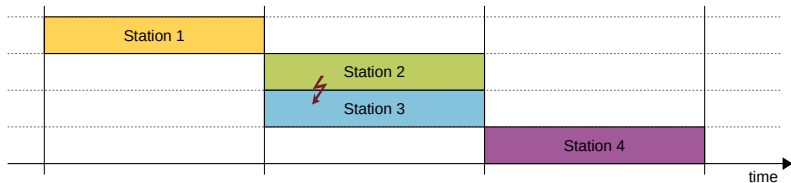
- Entwickelt 1971 an der Universität Honolulu (Hawaii)
- Ursprünglich Funknetz zwischen den Inseln → Zugriffskontrolle auf das geteilte Medium „Luft“
- Stochastisches Zugriffsverfahren in Netzen ohne Kanalabtastung
  - Pure ALOHA:  
Jeder Teilnehmer kann zu einem beliebigen Zeitpunkt etwas senden. Bei Kollision erneutes Senden nach jeweils zufälliger Zeit.
  - Slotted ALOHA:  
Jeder Teilnehmer kann nur noch zu Beginn einer Zeitscheibe (Slot) Daten senden, was zu weniger Kollisionen führt.
- Slotted ALOHA führt zu potentiell weniger Kollisionen und somit zu einem höheren Durchsatz.

# ALOHA

## Pure ALOHA:



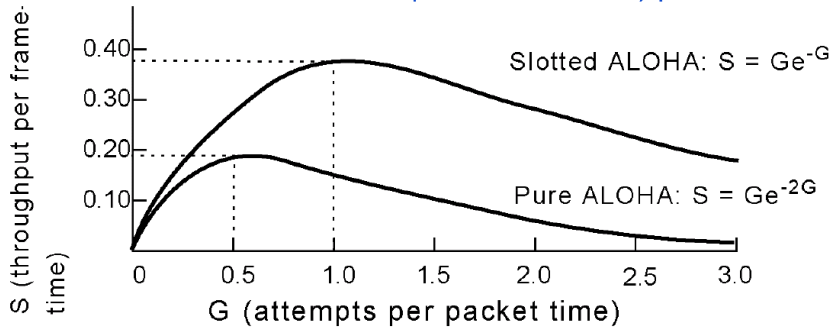
## Slotted ALOHA:



# Aufgabe 1: ALOHA

- a)  $N$  Stationen teilen sich einen *Pure-ALOHA*-Kanal mit 100 kBit/s. Jede Station sendet durchschnittlich alle 100 Sekunden einen 1000-Bit-Frame, auch wenn der vorherige noch nicht gesendet werden konnte. Berechnen Sie den maximalen Wert für  $N$ .

# 1 a) Maximaler Wert für N



## Hinweis

- Maximale Kanalauslastung von Pure ALOHA:  $\frac{1}{2 \cdot e} \approx 0.184 = 18.4\%$



# 1 a) Maximaler Wert für N

## Lösung

- Bei maximaler Kanalauslastung können 18.4 % der Bandbreite (100 kBit/s) verwendet werden:

$$0.184 \cdot 100 \text{ kBit/s} = 18.4 \text{ kBit/s}$$

- Eine Station sendet in 100 Sekunden durchschnittlich 1000 Bit:

$$\frac{1000 \text{ Bit}}{100 \text{ s}} = 10 \text{ Bit/s}$$

- Wieviele Stationen zu 10 Bit/s lasten den Kanal mit 18.4 kBit/s aus?

$$N = \frac{18.4 \text{ kBit/s}}{10 \text{ Bit/s}} = \frac{18400 \text{ Bit/s}}{10 \text{ Bit/s}} = \mathbf{1840}$$

# 1 b) Delay

b) Vergleichen Sie das Delay von *Pure ALOHA* und *Slotted ALOHA* sowohl bei niedriger als auch bei hoher Last. Erläutern Sie auch den Grund für die jeweilige Verzögerung.

## Lösung

- niedrige Last
  - Pure ALOHA hat niedrigeres Delay
  - Grund: bei Slotted ALOHA muss zunächst auf den Beginn des nächsten Slots gewartet werden.
- hohe Last
  - Slotted ALOHA hat niedrigeres Delay
  - Grund: Slotted ALOHA führt zu weniger Kollisionen und damit zu einer geringeren durchschnittlichen Verzögerung.

# 1 c) Kanalauslastung

- c) 10000 Flugreservierungssysteme konkurrieren um einen einzelnen *Slotted-ALOHA*-Kanal. Eine durchschnittliche Station macht pro Stunde 18 Reservierungsanfragen. Ein Slot dauert  $125 \mu\text{s}$ . Bestimmen Sie die ungefähre Kanalauslastung.

# 1 c) Kanalauslastung

## Lösung

- Jedes Flugreservierungssystem benötigt 18 Slots pro Stunde.  
Benötigte Slots pro Sekunde:

$$10000 \cdot 18 \text{ Slots/h} = \frac{180000}{3600} \text{ Slots/s} = 50 \text{ Slots/s}$$

- Anzahl der verfügbaren Slots pro Sekunde:

$$\frac{1}{\text{Slotdauer}} = \frac{1}{125 \frac{\mu\text{s}}{\text{Slot}}} = \frac{1}{0.000125 \frac{\text{s}}{\text{Slot}}} = 8000 \text{ Slots/s}$$

- Kanalauslastung:

$$\frac{\text{Anz. benötigter Slots}}{\text{Anz. verfügbarer Slots}} = \frac{50 \text{ Slots/s}}{8000 \text{ Slots/s}} = 0.00625 = \mathbf{0.625 \%}$$

## Aufgabe 2: Minimale Framelänge in CSMA/CD-Netzen

Gegeben sei ein CSMA/CD-Netz mit einer Datenrate von 10 MBit/s. Zwei Stationen befinden sich maximal 2,5 km voneinander entfernt. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit auf dem Medium sei  $2 \cdot 10^8$  m/s.

- a) Begründen Sie, warum in CSMA/CD-Netzen eine minimale Framelänge existieren muss.
- b) Berechnen Sie die minimale Framelänge für die beschriebene Konfiguration.

*Hinweis: In diesem Beispiel entspricht die minimale Framelänge nicht derjenigen aus dem IEEE 802.3 Standard*

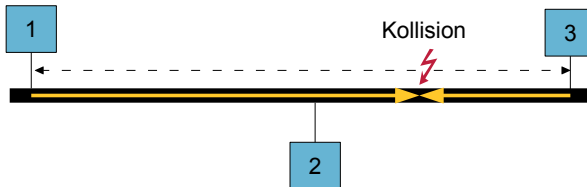
- c) Berechnen Sie die minimale Framelänge, wenn die Datenrate auf 100 MBit/s erhöht wird.
- d) Beschreiben Sie den Nachteil welcher aus Erhöhung der Datenrate resultiert und wie dieser Nachteil vermieden werden kann.

## 2 a) Grund für minimale Framelänge

- a) Begründen Sie, warum in CSMA/CD-Netzen eine minimale Framelänge existieren muss.

### Erklärung

- Kollisionserkennung *während(!)* der Übertragung
- Auch bei maximaler Entfernung und minimaler Framelänge müssen die Sender die Kollision noch erkennen können
  - dafür muss der Frame schon überall auf der Leitung sichtbar sein, während noch gesendet wird



## 2 b) Berechnung der minimalen Framelänge

Gegeben sei ein CSMA/CD-Netz mit einer Datenrate von 10 MBit/s. Zwei Stationen befinden sich maximal 2,5 km voneinander entfernt. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit auf dem Medium sei  $2 \cdot 10^8$  m/s.

b) Berechnen Sie die minimale Framelänge für die beschriebene Konfiguration.

*Hinweis: In diesem Beispiel entspricht die minimale Framelänge nicht derjenigen aus dem IEEE 802.3 Standard*

## 2 b) Berechnung der minimalen Framelänge

### Berechnung

- $l$  : minimale Framelänge

$$l = \frac{2 \cdot d \cdot r_B}{v}$$

- $r_B$  : Datenrate
- $d$  : max. Distanz zwischen je 2 Stationen
- $v$  : Ausbreitungsgeschwindigkeit
- Worst Case: Eine Kollision durch einen zweiten Sender muss den ersten Sender erreichen können, bevor dieser das Senden beendet hat → Faktor 2



## 2 b) Berechnung der minimalen Framelänge

### Lösung

- $r_B : 10 \text{ MBit/s}$
- $d : 2.5 \text{ km}$
- $v : 2 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

$$l = \frac{2 \cdot d \cdot r_B}{v} = \frac{2 \cdot 2500 \text{ m} \cdot 10^7 \frac{\text{bit}}{\text{s}}}{2 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 250 \text{ bit} \approx \mathbf{32 \text{ Byte}}$$

# Minimale Framelänge in CSMA/CD-Netzen

## Hinweis

In IEEE802.3 ist die minimale Framelänge doppelt so groß:

- Zusätzliche Verzögerungen in den Repeatern, Transceivern, Verstärkern und für den Signalpegelanstieg
- $\Rightarrow$  Maximalverzögerung 46,4  $\mu$ s (464 Bit) bei 10 Mbit/s
- + 48Bit langes JAM-Signal im Falle einer Kollision beim letzten gesendeten Bit
- $\Rightarrow$  minimale Framelänge von 512 Bit = 64 Byte

## 2 c) Berechnung der minimalen Framelänge

c) Berechnen Sie die minimale Framelänge, wenn die Datenrate auf 100 MBit/s erhöht wird.

### Lösung

- $r_B$  : 100 MBit/s
- $d$  : 2.5 km
- $v$  :  $2 \cdot 10^8$  m/s

$$l = \frac{2 \cdot d \cdot r_B}{v} = \frac{2 \cdot 2500 \text{ m} \cdot 10^8 \frac{\text{bit}}{\text{s}}}{2 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 2500 \text{ bit} \approx \mathbf{312 \text{ Byte}}$$

⇒ Wenn man  $r_B$  verzehnfacht, so verzehnfacht sich auch die minimale Framelänge.

## 2 d) Nachteil der minimalen Framelänge

d) Beschreiben Sie den Nachteil welcher aus Erhöhung der Datenrate resultiert und wie dieser Nachteil vermieden werden kann.

### Lösung

- Der Nachteil ist eine Verschwendung von Bandbreite bei kleinen Frames, da diese bis zur Minimallänge aufgefüllt werden müssen (Padding)
- Alternativ zu einer größeren minimalen Framelänge kann auch die maximale Entfernung zwischen zwei Stationen verringert werden
  - was auch in der Realität bei 100 Mbit/s Ethernet gemacht wird, dort verringert sich dieser Abstand auf 250 m

## Aufgabe 3: Binary Exponential Backoff

- a) Beschreiben Sie Einsatzzweck und Funktionsweise des Binary Exponential Backoff Algorithmus. Geben Sie auch ein Beispiel an.
- b) Erläutern Sie die Vorteile gegenüber eines zufälligen oder konstanten Backoffs.
- c) Berechnen Sie die Wahrscheinlichkeit dafür, dass sich zwei Stationen erst nach der dritten Kollision nicht mehr gegenseitig bei der Übertragung stören.

## 3 a) Einsatz und Funktion

- a) Beschreiben Sie Einsatzzweck und Funktionsweise des Binary Exponential Backoff Algorithmus. Geben Sie auch ein Beispiel an.

### Lösung

- Auflösen von Kollisionen  
→ *Wie lange warte ich bis ich es erneut versuche?*
- Nach erster Kollision: Einteilung in Zeitschlitzze  
→ Erneuter Sendeversuch nach 0 oder 1 Zeitschlitzzen
- Nach zweiter Kollision, Sendeversuch nach  $[0,3]$  Zeitschlitzzen
- Nach dritter Kollision, Sendeversuch nach  $[0,7]$  Zeitschlitzzen
- usw.

## 3 a) Einsatz und Funktion

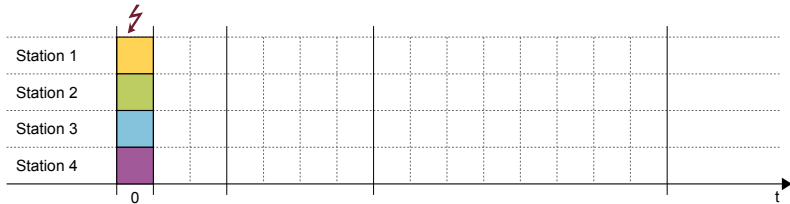
### Allgemein

Jede Station wählt nach der  $i$ -ten Kollision ( $0 \leq i \leq 16$ ) eine zufällige Zahl  $k$  aus dem Intervall  $[0, 2^i - 1]$  für  $i \leq 10$ , bzw.  $[0, 1023]$  für  $10 < i \leq 16$ , und wartet  $k$ -mal die Länge eines zuvor definierten Zeitschlitzes ab. Im schlechtesten Fall beträgt die Länge eines Zeitschlitzes die volle Round-Trip-Signalübertragungszeit ( $2\tau$ ).

Ethernet:  $51,2 \mu s$

Abbruch nach 16 Kollisionen und Fehlerbehandlung durch höhere Schichten.

## 3 a) Beispiel

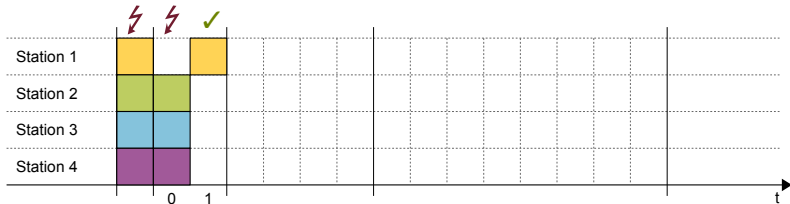


### Schritt 1

- 4 sendebereite Stationen ( $S_1, S_2, S_3, S_4$ )
- Alle 4 Stationen belegen Medium
  - Alle Frames kollidieren



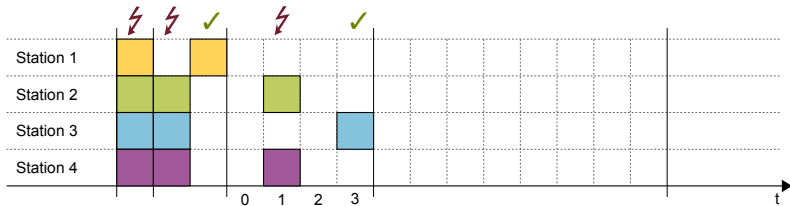
## 3 a) Beispiel



### Schritt 2

- Alle Stationen wählen zufällige Zeitschlitz im Intervall  $[0,1]$
- $S_1$  wählt  $t = 1$ 
  - Frame kann gesendet werden
- $S_2$ ,  $S_3$  und  $S_4$  wählen  $t = 0$ 
  - Ihre Frames kollidieren

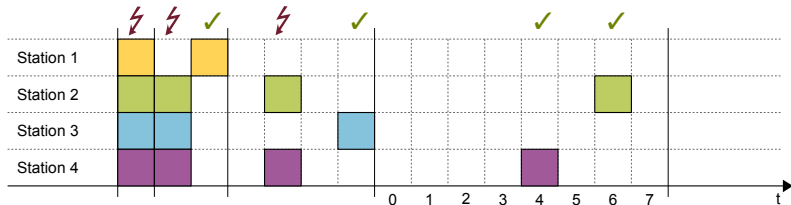
## 3 a) Beispiel



### Schritt 3

- $S_2$ ,  $S_3$  und  $S_4$  wählen neue zufällige Zeitschlitz im Intervall  $[0,3]$
- $S_3$  wählt  $t = 3$ 
  - Frame kann gesendet werden
- $S_2$  und  $S_4$  wählen  $t = 1$ 
  - Ihre Frames kollidieren

## 3 a) Beispiel



### Schritt 4

- $S_2$  und  $S_4$  wählen neue zufällige Zeitschlitz im Intervall  $[0,7]$
- $S_2$  wählt  $t = 6$ 
  - Frame kann gesendet werden
- $S_4$  wählt  $t = 4$ 
  - Frame kann gesendet werden
- **Alle Kollisionen sind aufgelöst**

## 3 b) Vorteile

b) Erläutern Sie die Vorteile gegenüber eines zufälligen oder konstanten Backoffs.

### Lösung

Zufälliges/festes Intervall:

- Wahl einer geeigneten Größe des Kollisionsfensters schwierig
  - Großes Kollisionsfenster: Lange durchschnittliche Wartezeiten
  - Kleines Kollisionsfenster: Langsame Kollisionsauflösung

Binary Exponential Backoff:

- Kollisionsfenster wächst exponentiell mit der Anzahl der Kollisionen

### 3 c) Kollisionswahrscheinlichkeit

- c) Berechnen Sie die Wahrscheinlichkeit dafür, dass sich zwei Stationen erst nach der dritten Kollision nicht mehr gegenseitig bei der Übertragung stören.

#### Wahrscheinlichkeit

- $P(k_x) \rightarrow$  Wahrscheinlichkeit einer Kollision beim  $x$ -ten Versuch
- $P(k_1) = 1$
- $P(k_2) = P(k_1) \cdot \frac{1}{2}$
- $P(k_3) = P(k_2) \cdot \frac{1}{4}$
- $P(k_4) = P(k_3) \cdot \frac{1}{8}$
- $P(k_x) = P(k_{x-1}) \cdot \frac{1}{2^{x-1}}$  mit  $P(k_1) = 1$

### 3 c) Kollisionswahrscheinlichkeit

#### Lösung

- KEINE Kollision beim 4-ten Versuch

$$\begin{aligned}P(k_{x-1}) \cdot \left(1 - \frac{1}{2^{x-1}}\right) &= P(k_3) \cdot \left(1 - \frac{1}{2^3}\right) \\&= 1 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{4} \cdot \left(1 - \frac{1}{8}\right) \\&= 1 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{7}{8} \\&= \frac{7}{64} \approx 11\%\end{aligned}$$

- Mit einer Wahrscheinlichkeit von **11 %** ist genau der 4. Versuch erfolgreich

## Aufgabe 4: Ethernet und Token-Ring

Es sollen die Techniken Ethernet und Token-Ring zum Aufbau von lokalen Netzen verglichen werden.

- a) Erklären Sie den grundlegenden Unterschied beider Techniken beim Anschluss an das Medium.
- b) Beschreiben Sie die Quittierungsmechanismen beider Techniken.
- c) Bewerten Sie, welche der Techniken prinzipiell für den Realzeitbetrieb geeignet ist.
- d) Erklären Sie, wie das Ende bzw. die Länge eines Frames bei beiden Techniken erkannt wird.

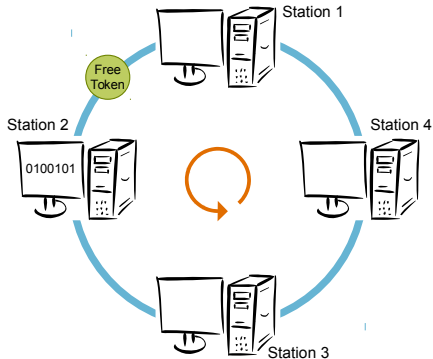
# Token-Ring

## Token-Ring / Token-Passing-Verfahren (Prinzip)

- Ein Token zirkuliert ständig im Ring
- Zum Senden markiert eine Station das Token als „belegt“
- Adresse des Empfängers und Daten werden angefügt und Frame wird weitergesendet
- Empfänger kopiert die Daten und markiert den Frame als „erhalten“
- Erreicht der Frame wieder den Sender, gibt dieser das Token wieder frei



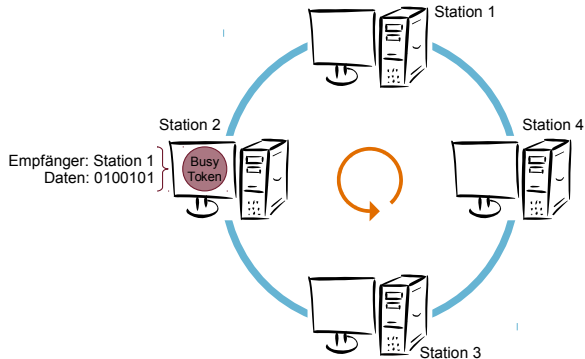
# Token-Ring Beispiel



## Schritt 1

- Token zirkuliert und ist nicht belegt

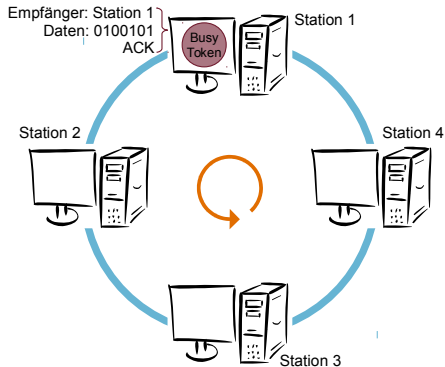
# Token-Ring Beispiel



## Schritt 2

- Token wird von Station 2 belegt und Daten angehängt

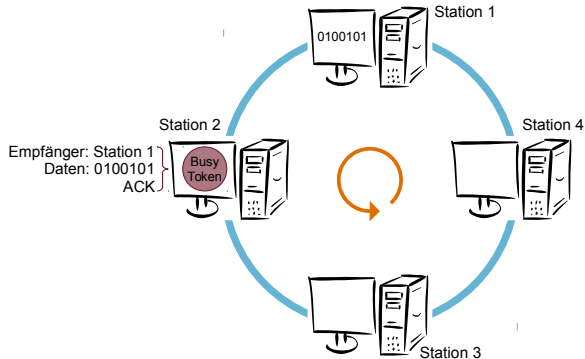
# Token-Ring Beispiel



## Schritt 3

- Token mit Daten erreicht Station 1, ACK wird angehängt

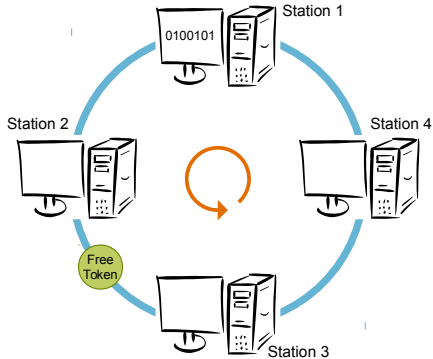
# Token-Ring Beispiel



## Schritt 4

- Station 2 erhält „sein“ Token zurück und sieht Bestätigung

# Token-Ring Beispiel



## Schritt 5

- Station 2 gibt Token wieder frei

## 4 a) Anschluss an das Medium

a) Erklären Sie den grundlegenden Unterschied beider Techniken beim Anschluss an das Medium.

### Lösung

- Token-Ring**
- Aktiver Anschluss an das Netz
  - Regenerierung des Signals in jedem Ringadapter
  - 1-Bit-Verzögerung
  - Bei Ausfall eines Ringadapters: Ring unterbrochen (wenn keine zusätzliche technische Abhilfe vorhanden, z.B. durch Relais oder zentrales Verkabelungszentrum)
- Ethernet**
- Passiver Anschluss an das Netz
  - Jede Station hört alles, kann keine Daten verändern oder stoppen

## 4 b) Quittierung in CSMA/CD und Token-Ring

b) Beschreiben Sie die Quittierungsmechanismen beider Techniken.

## 4 b) Quittierung – Token-Ring

### Token-Ring

- Bestätigung wird im Frame-Status-Feld (FS) des Tokens markiert
- Sender prüft Frame-Status, wenn Token ihn wieder erreicht

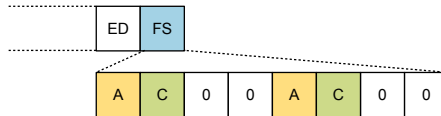
A Adressbit → Token ist beim Ziel angekommen

C Kopierbit → Daten wurden vom Ziel kopiert

A=0, C=0 Ziel nicht vorhanden oder nicht eingeschaltet

A=1, C=0 Ziel vorhanden, Frame nicht angenommen

A=1, C=1 Ziel vorhanden, Frame kopiert (eigentliche Bestätigung)





## 4 b) Quittierung – CSMA/CD

### CSMA/CD

- Keine Bestätigung im gleichen Frame, da kein Rückkehren des Frames zum Sender
- ⇒ Absenden eines neuen Frames als Bestätigung
- alternativ: einen Slot nach dem Senden für Bestätigung freihalten  
→ WLAN (IEEE 802.11)

## 4 c) Realzeitbetrieb – Token-Ring

- c) Bewerten Sie, welche der Techniken prinzipiell für den Realzeitbetrieb geeignet ist.

### Token-Ring

- Prinzipiell geeignet durch Begrenzung der Sendeerlaubnis für eine Station auf eine bestimmte Zeit (Token Holding Time)
- Spätestens nach  $(n - 1) \cdot THT + U$  erhält eine Station das Token
  - $n$  Anzahl der Stationen im Ring
  - $U$  „Ring Circulation Time“ ( $n \cdot t_s + n \cdot t_1$ )
  - $THT$  Token Holding Time
- Aber: keine Berücksichtigung von evtl. Warteschlangen in höheren Schichten!

## 4 c) Realzeitbetrieb – CSMA/CD

- c) Bewerten Sie, welche der Techniken prinzipiell für den Realzeitbetrieb geeignet ist.

### CSMA/CD

- Ungeeignet, da bei hoher Netzauslastung häufige Kollisionen und danach große und nicht deterministische Wartezeiten entstehen können  $\Rightarrow$  u.U. unendlich große Wartezeit!

## 4 d) Ende/Länge erkennen

d) Erklären Sie, wie das Ende bzw. die Länge eines Frames bei beiden Techniken erkannt wird.

### Lösung

**Token-Ring** End-Delimiter kennzeichnet Ende. Der End-Delimiter enthält Symbole, die in der Codierung (Differential Manchester) nicht erlaubt sind (kein Wechsel in der Mitte des Taktes).

**CSMA/CD** Längensfeld gibt die Länge des Datenfeldes an. Ende des Frames: Länge plus 4 Bytes für CRC; evtl. Padding berücksichtigen.

## Aufgabe 5: Zwischensysteme

Sie möchten ein IEEE 802.11-Netzwerk (WLAN) mit einem IEEE 802.3-Netzwerk (Ethernet) verbinden.

- a) Nennen Sie die Schicht, auf der Sie ein Zwischensystem zur Übersetzung ansiedeln würden. Nennen Sie auch den Namen eines solchen Zwischensystems.
- b) Nennen Sie die Aufgaben, die ein solches Zwischensystem bewältigen muss.
- c) Nennen Sie die Aufgaben, die ein solches Zwischensystem bei der Übersetzung von IEEE 802.3 in IEEE 802.5 (Token-Ring) bewältigen muss.
- d) Beurteilen Sie, ob ein solches Zwischensystem auch zwischen gleichartigen Netzen eingesetzt werden kann und erläutern Sie mögliche Vorteile.

## 5 a) Schicht des Zwischensystems

- a) Nennen Sie die Schicht, auf der Sie ein Zwischensystem zur Übersetzung ansiedeln würden. Nennen Sie auch den Namen eines solchen Zwischensystems.

### Lösung

- Schicht 2: Data Link Layer

⇒ Bridge

## 5 b) Aufgaben des Zwischensystems

b) Nennen Sie die Aufgaben, die ein solches Zwischensystem bewältigen muss.

### Lösung

- Übersetzung zwischen den Frameformaten
- Puffern von Frames, da unterschiedliche Datenraten
- Wegwerfen von Frames, die zu lang sind (max. Framelänge von WLAN größer)
- Anpassen der Prüfsummen
- Ver-/Entschlüsselung
- Dienstgüteparameter (PCF / DCF und 802.11e)

## 5 c) Aufgaben des Zwischensystems (Token-Ring)

- c) Nennen Sie die Aufgaben, die ein solches Zwischensystem bei der Übersetzung von IEEE 802.3 in IEEE 802.5 (Token-Ring) bewältigen muss.

### Lösung

- Übersetzung zwischen den Frameformaten
- Puffern von Frames, da unterschiedliche Datenraten
- Wegwerfen / Fragmentieren von Frames, die zu lang sind (Framelänge von Token-Ring nur durch THT begrenzt)
- Anpassen der Prüfsummen
- Entfernen von Token-Ring-Prioritäten
- Behandlung von Token-Ring-Acknowledgements



## 5 d) Zwischensystem zwischen gleichartigen Netzen

- d) Beurteilen Sie, ob ein solches Zwischensystem auch zwischen gleichartigen Netzen eingesetzt werden kann und erläutern Sie mögliche Vorteile.

## 5 d) Zwischensystem zwischen gleichartigen Netzen

### Lösung

- Ja
- Verbindung von LANs in mehreren Gebäuden
- Logische Aufteilung des LANs zur Lastverteilung
- Vergrößerung der Reichweite (z.B.  $> 2,5$  km bei Ethernet)
- Schutz vor „wildgewordenen“ Geräten
  - Defekte Geräte können das Netz mit sinnlosen Daten überfluten
  - Bridges können beschränkt filtern  
(im Gegensatz zu Repeatern, die physikalische Signale wiederholen)
- Sicherheit
  - Sämtliche Daten in einer Kollisionsdomäne können mitgelesen werden
  - Bridges können sensiblen Datenverkehr isolieren

# Nächste Übung

## 03. Juli 2025