



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

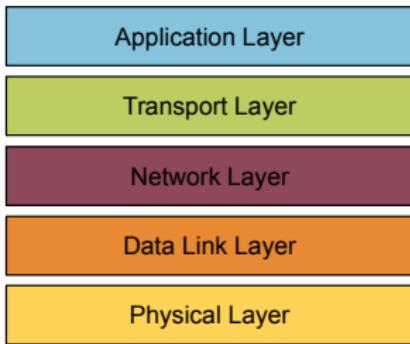
Überblick

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



Überblick

you are here



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

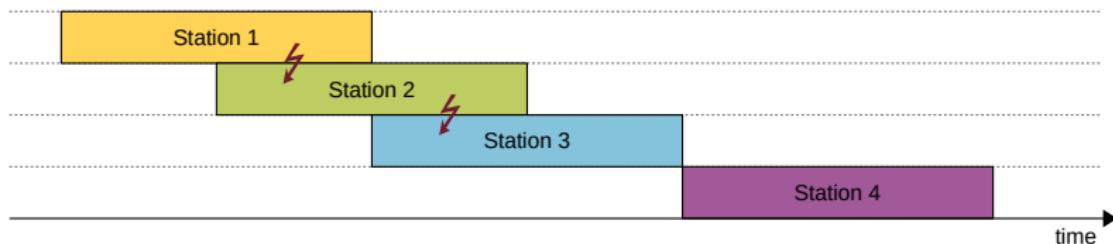
ALOHA

- 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.

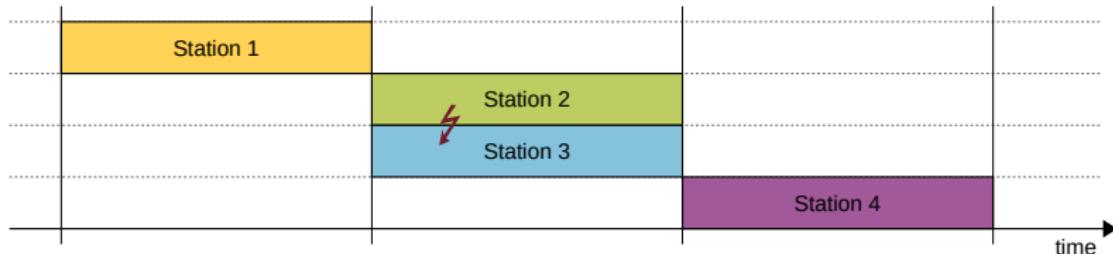


ALOHA

Pure ALOHA:



Slotted ALOHA:

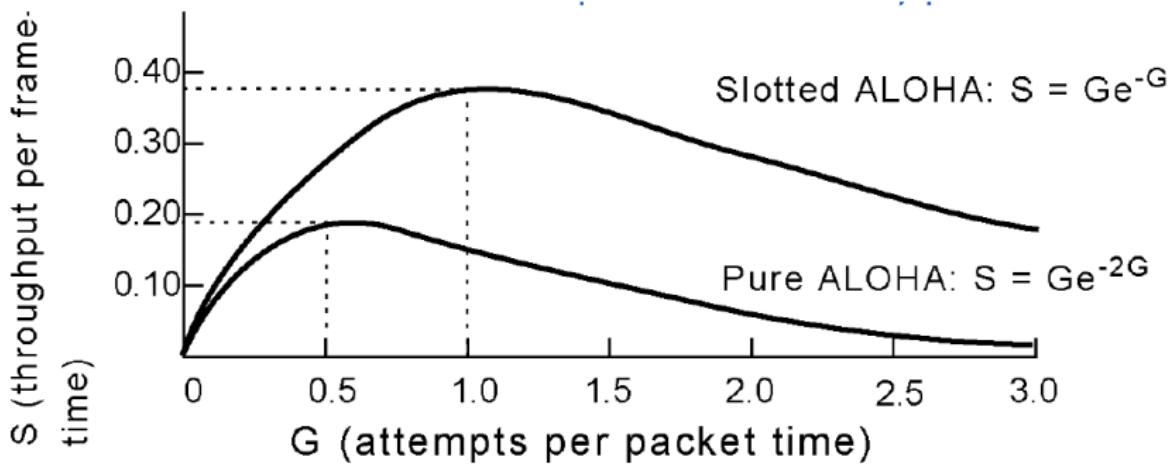


Aufgabe 1: ALOHA

- 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:

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

- 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.

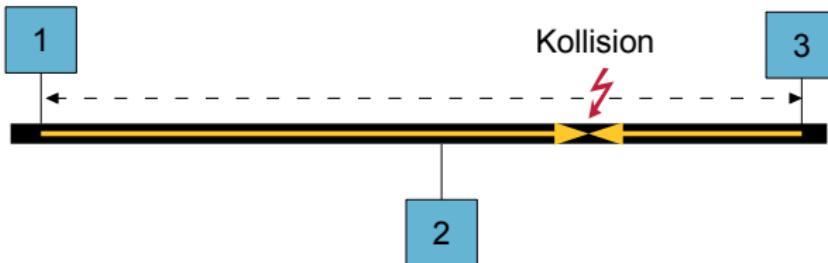
- Begründen Sie, warum in CSMA/CD-Netzen eine minimale Framelänge existieren muss.
- Berechnen Sie die minimale Framelänge für die beschriebene Konfiguration.
Hinweis: In diesem Beispiel entspricht die minimale Framelänge nicht derjenigen aus dem IEEE 802.3 Standard
- Berechnen Sie die minimale Framelänge, wenn die Datenrate auf 100 MBit/s erhöht wird.
- 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

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

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



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
- ⇒ Maximalverzögerung 46,4 us (464 Bit) bei 10 Mbit/s
- + 48Bit langes JAM-Signal im Falle einer Kollision beim letzten gesendeten Bit
- ⇒ 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

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

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

⇒ 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 Verschwendungen 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 Zeitschlitzte
 - Erneuter Sendeversuch nach 0 oder 1 Zeitschlitzten
- Nach zweiter Kollision, Sendeversuch nach $[0,3]$ Zeitschlitzten
- Nach dritter Kollision, Sendeversuch nach $[0,7]$ Zeitschlitzten
- usw.

3 a) Einsatz und Funktion

Allgemein

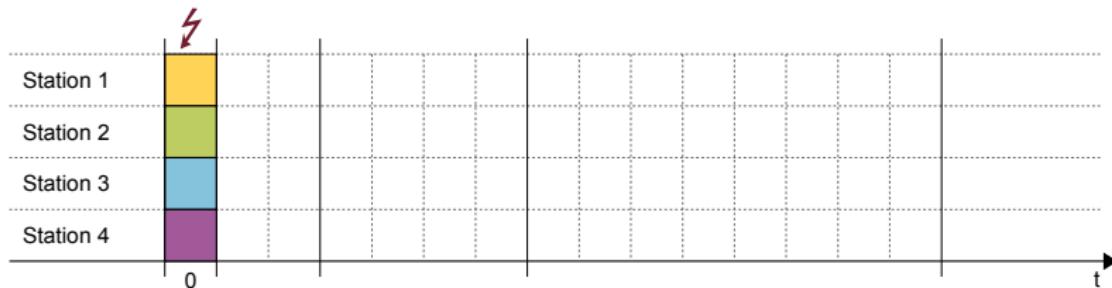
Jede Station wählt nach der i-ten Kollision ($0 \leq i \leq 16$) eine zufällige Zahl k aus dem Intervall $[0, 2^i - 1]$ für $i \leq 10$, bzw. $[0, 1023]$ für $10 < i \leq 16$, und wartet k-mal die Länge eines zuvor definierten Zeitschlitzes ab. Im schlechtesten Fall beträgt die Länge eines Zeitschlitzes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

Ethernet: $51,2 \mu s$

Abbruch nach 16 Kollisionen und Fehlerbehandlung durch höhere Schichten.



3 a) Beispiel

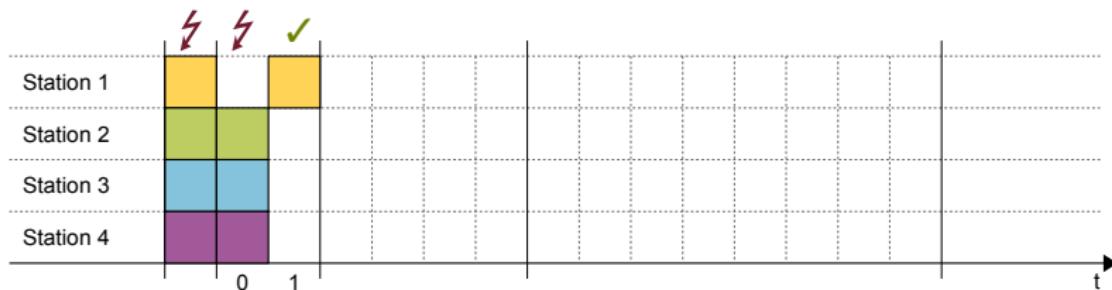


Schritt 1

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



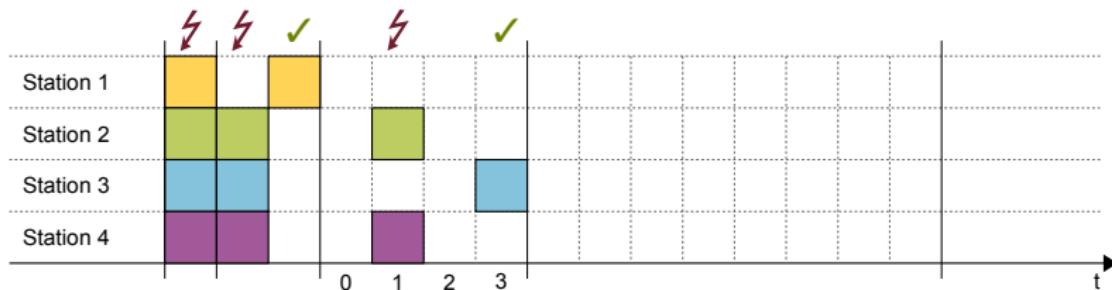
3 a) Beispiel



Schritt 2

- Alle Stationen wählen zufällige Zeitschlüsse 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

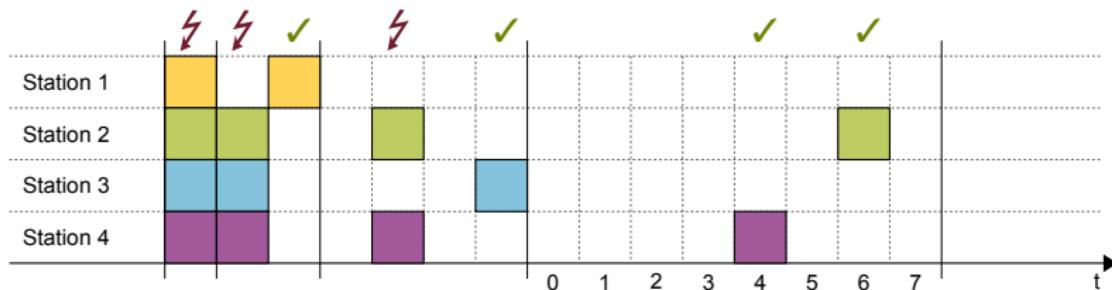
3 a) Beispiel



Schritt 3

- S_2, S_3 und S_4 wählen neue zufällige Zeitschlüsse 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 Zeitschlüsse 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

- $P(k_x)$ → 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.



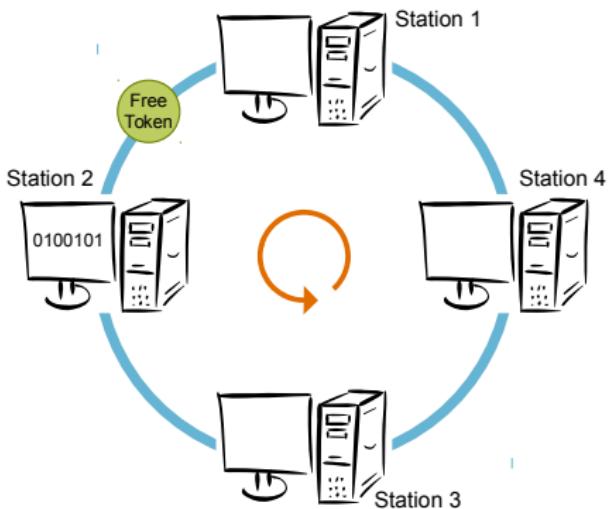
Token-Ring

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

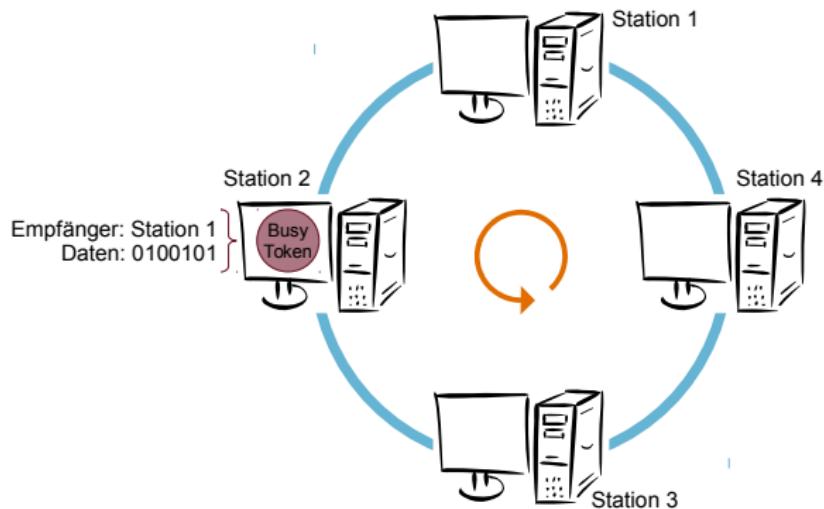


Schritt 1

- Token zirkuliert und ist nicht belegt



Token-Ring Beispiel

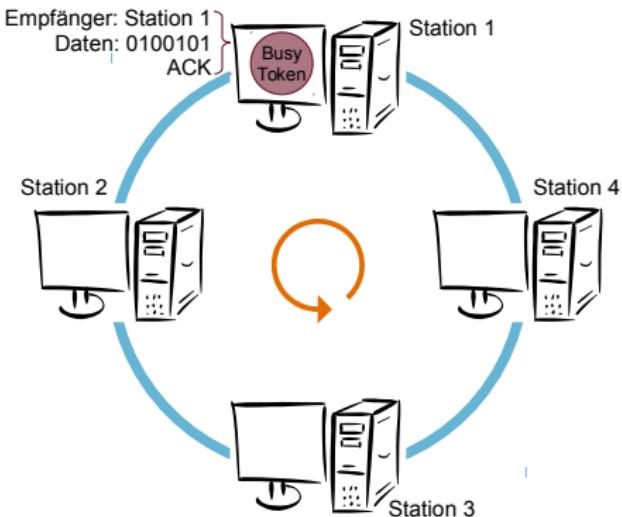


Schritt 2

- Token wird von Station 2 belegt und Daten angehängt



Token-Ring Beispiel

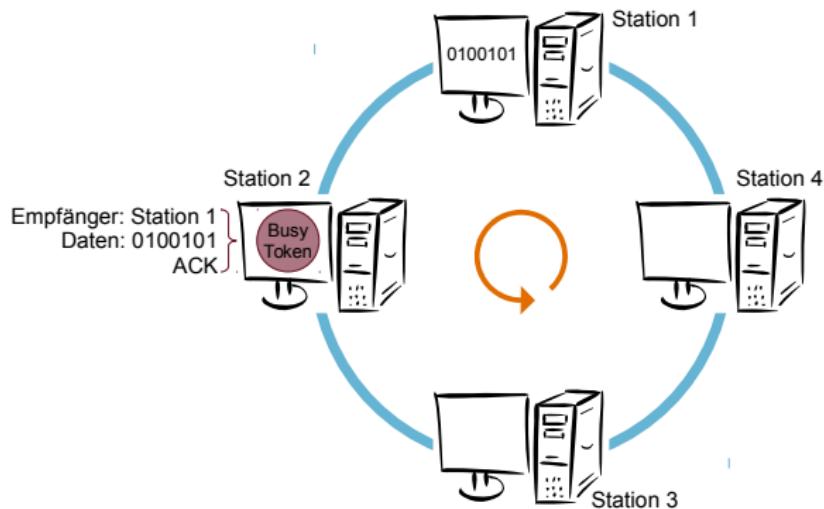


Schritt 3

- Token mit Daten erreicht Station 1, ACK wird angehängt



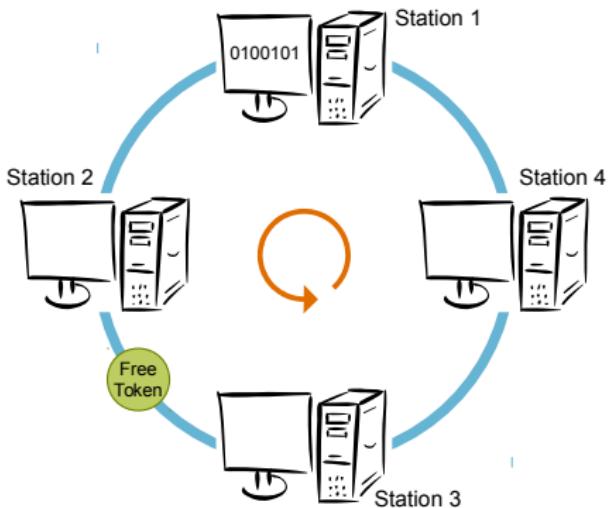
Token-Ring Beispiel



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 | <ul style="list-style-type: none">■ 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 | <ul style="list-style-type: none">■ 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

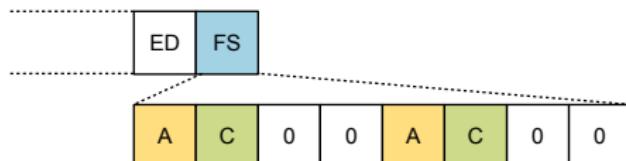
Token-Ring

- 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 $(n - 1) \cdot \text{THT} + U$ erhält eine Station das Token
 - n Anzahl der Stationen im Ring
 - U „Ring Circulation Time“ ($n \cdot t_s + n \cdot t_l$)
 - 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 ⇒ 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 Längenfeld 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.

- Nennen Sie die Schicht, auf der Sie ein Zwischensystem zur Übersetzung ansiedeln würden. Nennen Sie auch den Namen eines solchen Zwischensystems.
- Nennen Sie die Aufgaben, die ein solches Zwischensystem bewältigen muss.
- Nennen Sie die Aufgaben, die ein solches Zwischensystem bei der Übersetzung von IEEE 802.3 in IEEE 802.5 (Token-Ring) bewältigen muss.
- 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 sensitiven Datenverkehr isolieren

Nächste Übung

03. Juli 2025

