

# 3. Link Layer

---

## 3.1 Übersicht

## 3.2 LANs

### 3.2.1 Adressierung

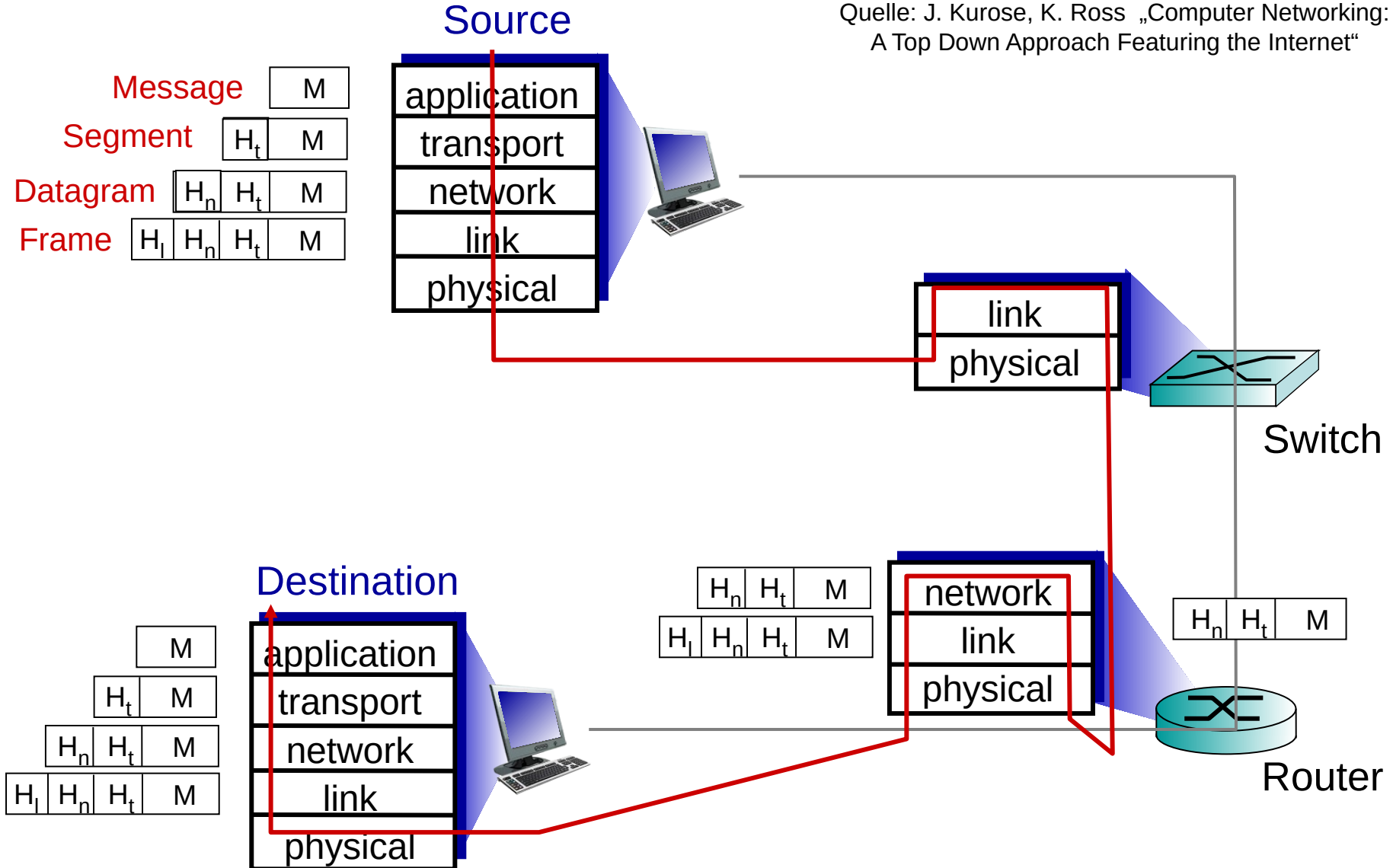
### 3.2.2 Ethernet

### 3.2.3 Hubs und Switches

Some slides are adapted from  
*Computer Networking: A Top Down Approach Featuring the Internet*,  
3rd - 6rd edition. Jim Kurose, Keith Ross, Addison-Wesley. All material  
copyright 1996-2012, J.F Kurose and K.W. Ross, All Rights Reserved

# Datenfluss im Schichtenmodell

Quelle: J. Kurose, K. Ross „Computer Networking:  
A Top Down Approach Featuring the Internet“

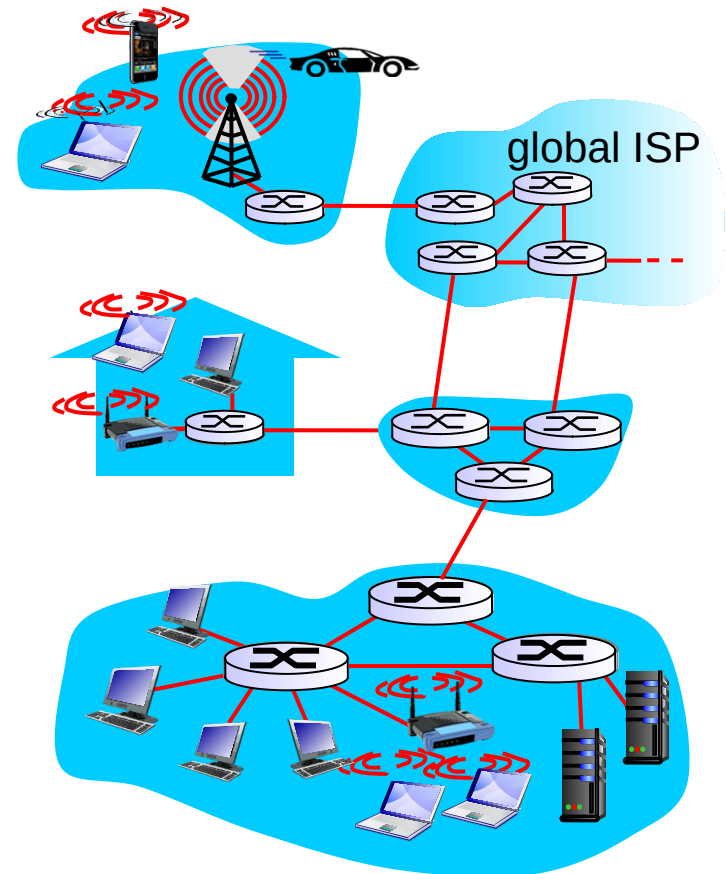


## 3.1 Overview

Die “*Data*”-*Link Layer* ist verantwortlich für die Übertragung von Datagrammen von einem Knoten zu einem **physisch** benachbarten Knoten über eine Verbindung

### Terminologie:

- Knoten (Nodes): Hosts & Router
- Links(Verbindungen): Kommunikationskanäle die benachbarte Knoten auf einem Kommunikationspfad verbinden
  - Kabelgebundene / kabellose Verbindungen
  - LANs (können Switches beinhalten)
- Frame (Rahmen): Layer-2-Paket
  - enthält Datagramm (L3)



# Link Layer Services

---

## ▪ Framing

- Kapselt ein Datagramm in einen Frame, fügt Header (H) und Trailer (T) hinzu



## ▪ Link Access

- Medium access control (MAC) wird benötigt wenn es sich um einen geteilten (shared) Kanal handelt
- “MAC”-Adressen werden in Frame-Headern genutzt um die Quelle (src) und das Ziel (dst) zu identifizieren
  - Unterscheiden sich von IP-Adressen!

## ▪ Half-duplex und full-duplex

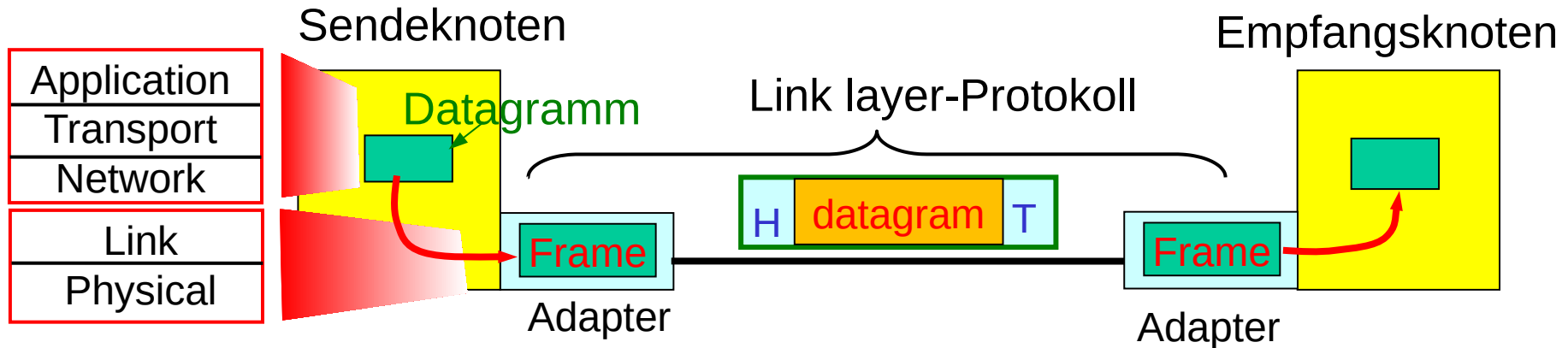
- Bei Halbduplex können Knoten auf beiden Seiten der Verbindung senden, jedoch nicht gleichzeitig (z.B. Sprache im Raum)

# Link Layer Services

---

- Verlässliche Zustellung zwischen benachbarten Knoten
  - **Fehlererkennung**
    - Fehler werden durch Signaldämpfung und Störungen (Rauschen) verursacht
    - Empfänger erkennt Existenz von Fehlern und signalisiert dem Sender, dass erneute Übertragung nötig ist, oder verwirft den Frame
  - **Fehlerkorrektur**
    - Empfänger identifiziert und korrigiert Bitfehler ohne Neuübertragung
    - Selten auf Verbindungen mit geringer Fehlerrate (fiber, twisted pair)
    - Wird auf Drahtlosverbindungen mit hoher Fehlerrate genutzt
- Flow control
  - Mechanismus der verhindert, dass der empfangende Knoten Daten von einem benachbarten, sendenden Knoten schneller erhält als er verarbeiten kann
  - Ist für Layer 2 durch ISO-OSI Protokolle definiert

# Link Layer Services – Implementation Issues



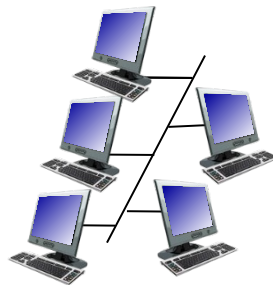
- Link layer ist in Ethernet “Adapterkarte” (NIC) implementiert
  - Adapter ist semi-autonomous und implementiert link & physical layers
- Senderseite:
  - Kapselt das Datagramm in Frame
  - Fügt Header (H) und Trailer (T) bits hinzu um:  
src/dst-Adressen zu identifizieren  
Error checking bits, etc. hinzuzufügen
- Empfängerseite
  - Fehlererkennung oder Korrektur
  - extrahiert Datagramm, übergibt an Empfangsknoten
  - flow control (ISO-OSI)

# Link Layer and Interconnection Networks

- Point-to-point links
  - PPP für Einwählverbindungen (weitgehend obsolet)
  - point-to-point link zwischen Ethernet-Switch und Host
- Broadcast links (geteiltes Kabel oder Medium)
  - Old-fashioned Ethernet
  - 802.11 wireless LAN
  - upstream HFC (=Fernsehkabel, DOCSIS)



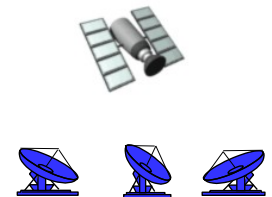
humans at a  
cocktail party  
(shared air, acoustical)



shared wire (e.g.,  
cabled Ethernet)



shared RF  
(e.g., 802.11 WiFi)



shared RF  
(satellite)

# 3. Link Layer

---

## 3.1 Übersicht

## 3.2 LANs

### 3.2.1 Addressierung

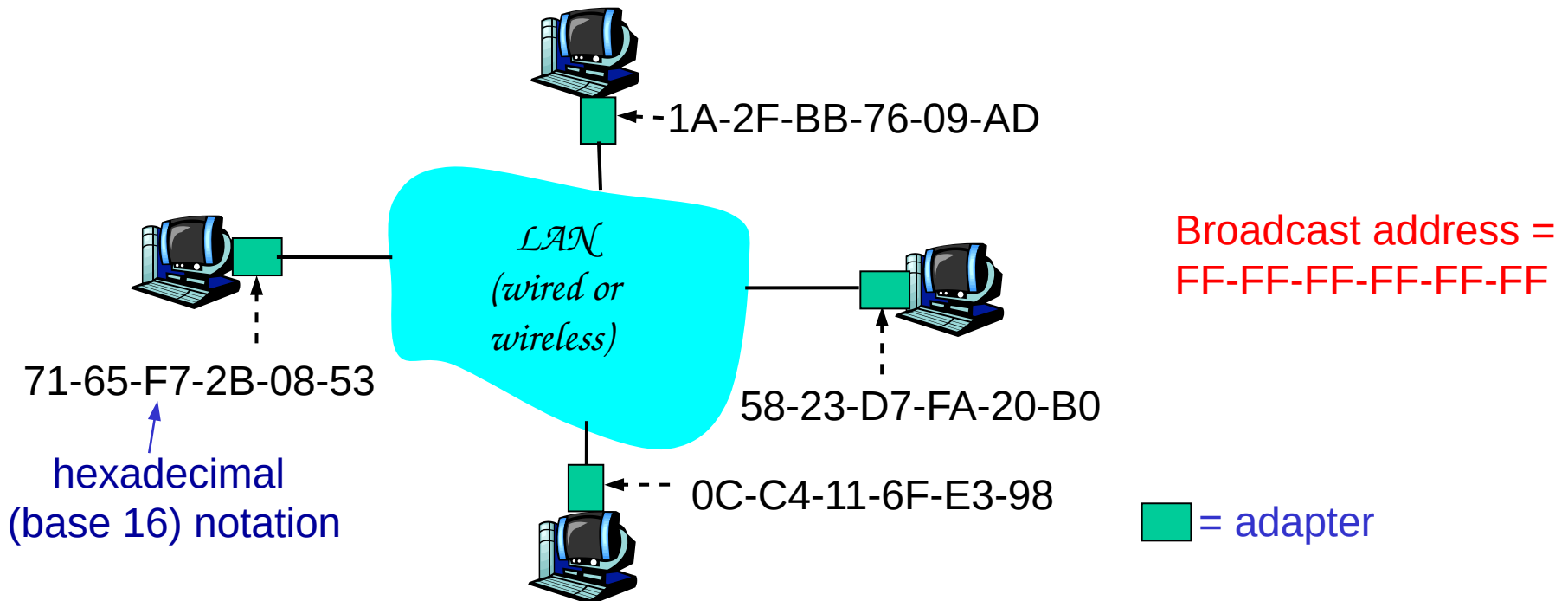
### 3.2.2 Ethernet

### 3.2.3 Hubs und Switches



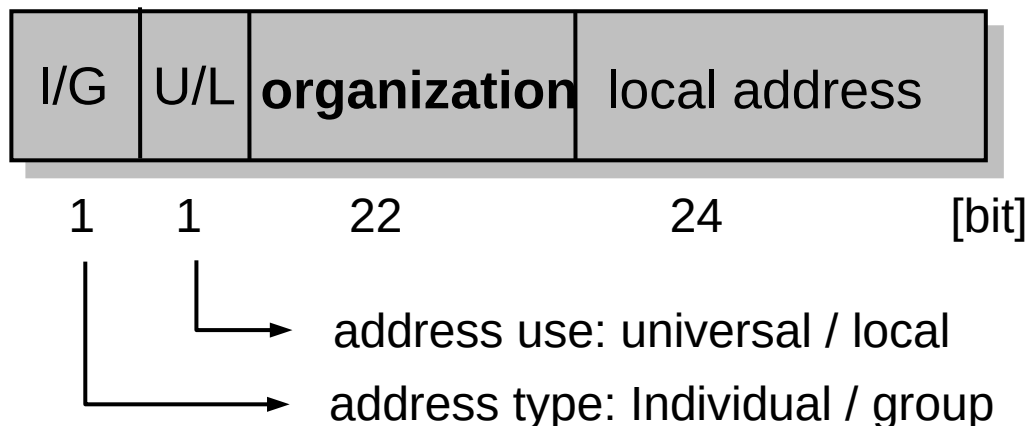
# MAC Adressen

- MAC (oder LAN oder physical oder Ethernet)-Adresse
  - Genutzt um Frame von einem Interface zu einem anderen physisch verbundenen Interface zu übertragen (selbes L2-Netzwerk)
  - 48 Bit MAC-Adresse (6 Byte) „burned“ in Adapter-ROM
  - Jeder Adapter im LAN hat eine eigene einzigartige LAN-Address



# MAC Adressen - 2

- Globale Adressen
  - Gesamtlänge 48 Bit (EUI-48); neu: EUI-64 (24+40 bit)
- MAC-Adressverteilung wird von IEEE administriert
- **Hersteller** kauft ein Stück MAC-Adressraum (um Einzigartigkeit der Adressen zu garantieren)
- MAC flat address → portability
  - LAN-Karte kann von einem LAN zu einem anderen bewegt werden während die selbe MAC-Adresse benutzt wird



# 3. Link Layer

---

## 3.1 Übersicht

## 3.2 LANs

### 3.2.1 Adressierung

### 3.2.2 Ethernet

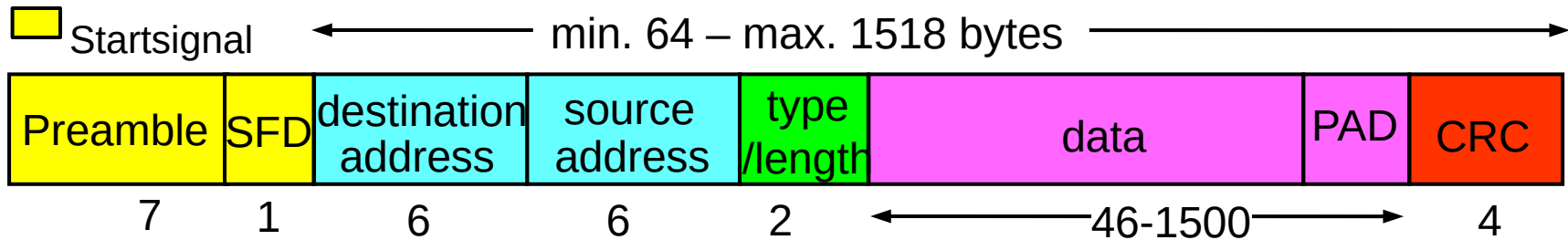
### 3.2.3 Hubs und Switches

# Unzuverlässiger, Verbindungsloser Dienst

---

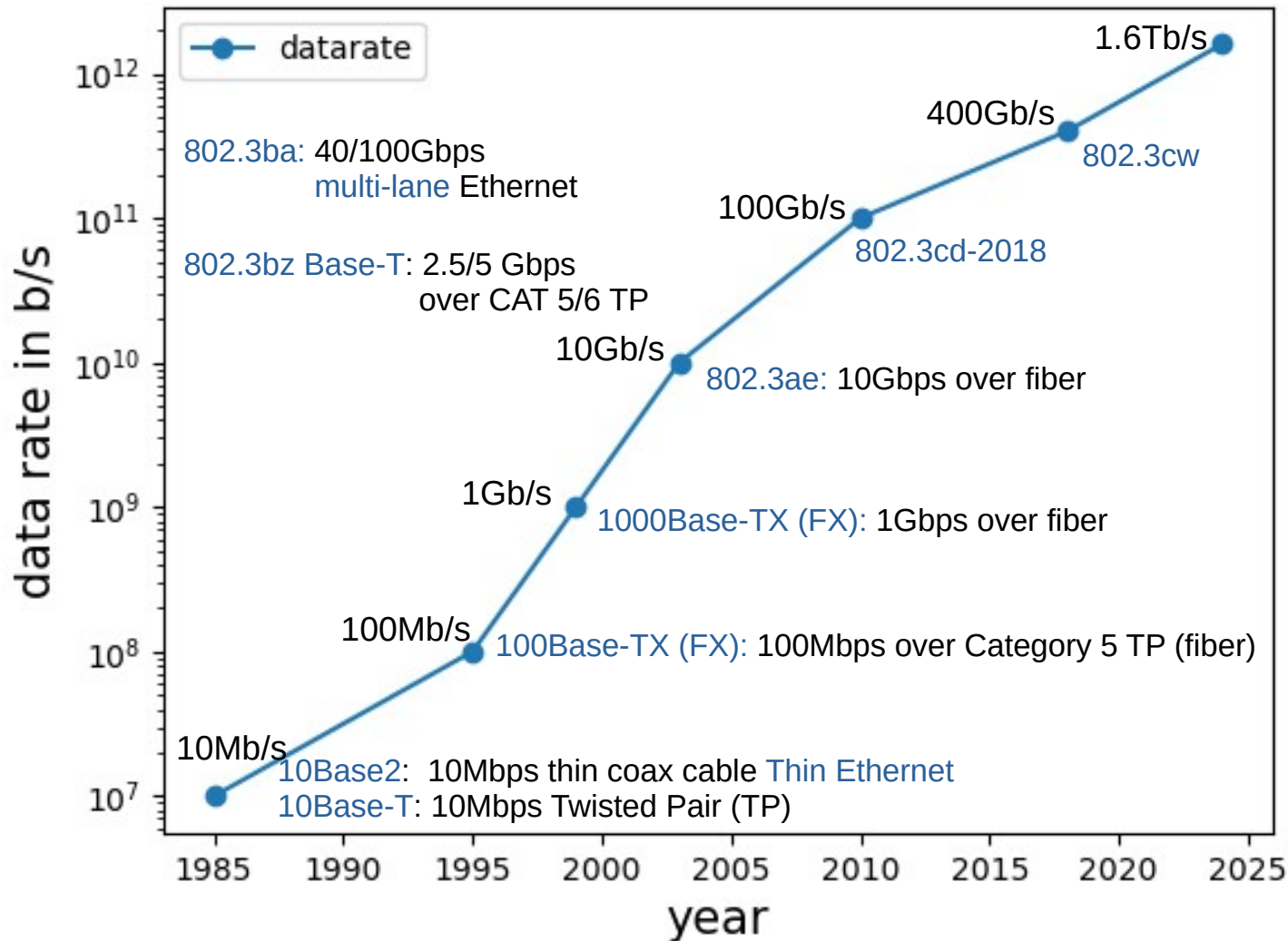
- Verbindungslos:
  - Kein Verbindungsaufbau oder handshaking zwischen sendendem und empfangendem Adapter
  
- Unzuverlässig:
  - Empfangender Adapter sendet keine ACKs oder NACKs zum sendenden Adapter
  - Keine Neuübertragung wird ausgelöst wenn der empfangene Rahmen Bitfehler aufweist (falsche CRC, Cyclic Redundancy Check)
  - Neuübertragung wird aber im Falle von Kollisionen ausgelöst
  - Stream von Datagrammen der an die Network Layer weitergegeben wird kann Lücken aufweisen
  
- MAC-Protokoll
  - Ethernet nutzt CSMA/CD mit Exponential-Backoff-Retransmission Algorithmus

# Struktur von Ethernet Frames - IEEE 802.3



- Preamble and SFD
  - 7 Byte Preamble (10101010) wird genutzt um die Taktraten zu synchronisieren, gefolgt von einem Byte (10101011) Start of Frame Delimiter (SFD).
- Adressen:
  - Wenn Adapter einen Frame mit passender Zieladresse oder mit Broadcastadresse erhält, wird der Frame verarbeitet, ansonsten wird der Frame verworfen
- Type/length
  - Zeigt das Protokoll der höheren Schicht an (e.g. IP, Novell IPX, AppleTalk)
  - length gibt die Anzahl an Bytes im Data-Feld an
- PAD:
  - Wird hinzugefügt wenn weniger als 46 Byte an Daten vorhanden sind
  - Minimale Frame-Länge von 512 Bit/64 Bytes wird für Collision detection benötigt
- CRC (Cyclic Redundancy Check):
  - Wird am Empfänger geprüft, Frame wird verworfen wenn Fehler erkannt wird

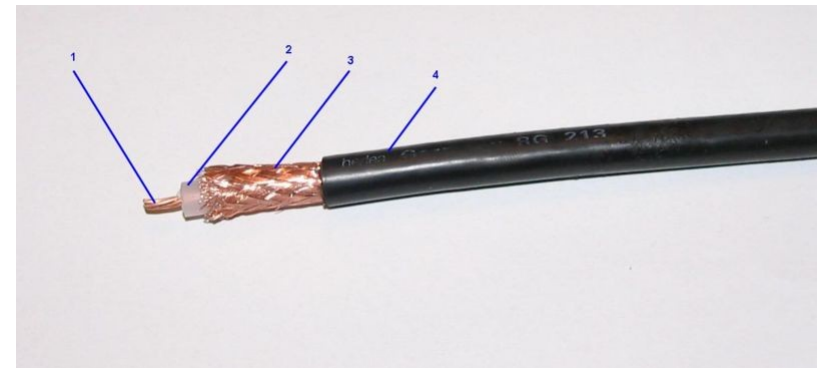
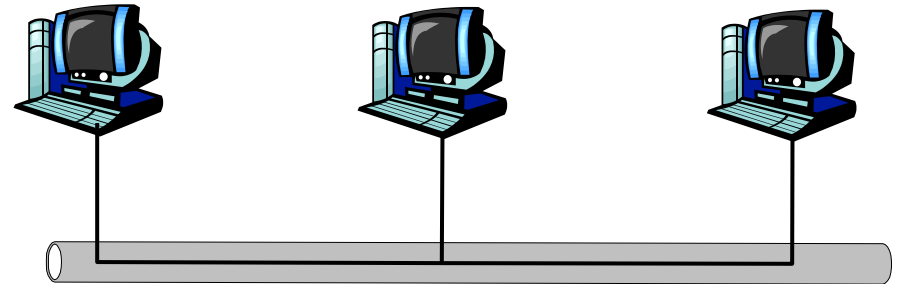
# Ethernet Standardisierung



# Ethernet Bus Topologie

## 10Base5 und 10Base2

- 10 Mbps Datenrate
- Bus-Topologie weit verbreitet in den 90ern
- Nutzt Koaxialkabel zur Geräteverbindung
- Um die 2500m  
Maximaldistanz zwischen Endgeräten
- MAC-Protokoll:  
Carrier Sense Multiple Access  
with Collision Detection  
(CSMA/CD)

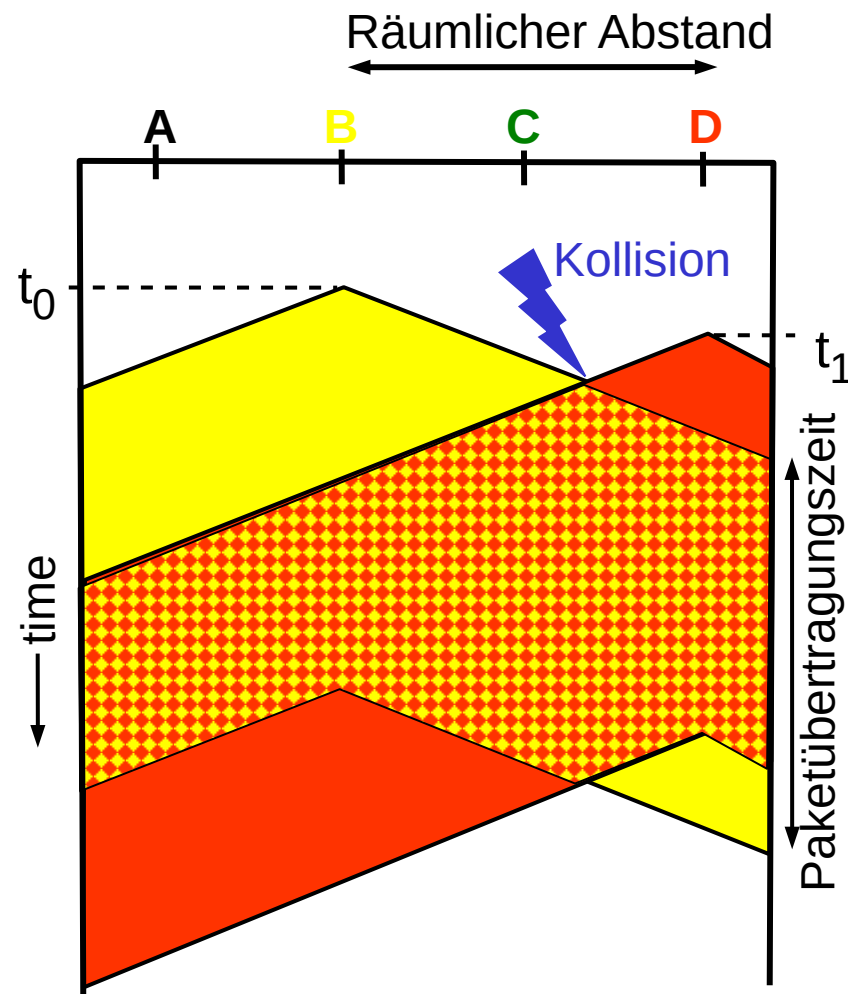


# Carrier Sense Multiple Access (CSMA)

## CSMA – Prinzip

- „Hören“ vor dem Senden:
- Wenn Kanal als belegt erkannt wird, Übertragung verschieben
- Wenn Kanal als frei erkannt: Übertragung des gesamten Rahmens
- Kollisionen können trotzdem passieren:
  - Dies liegt an der propagation delay, da zwei Knoten ihre Übertragungen unter Umständen nicht hören können
  - Gesamte Übertragungszeit ist verschwendet

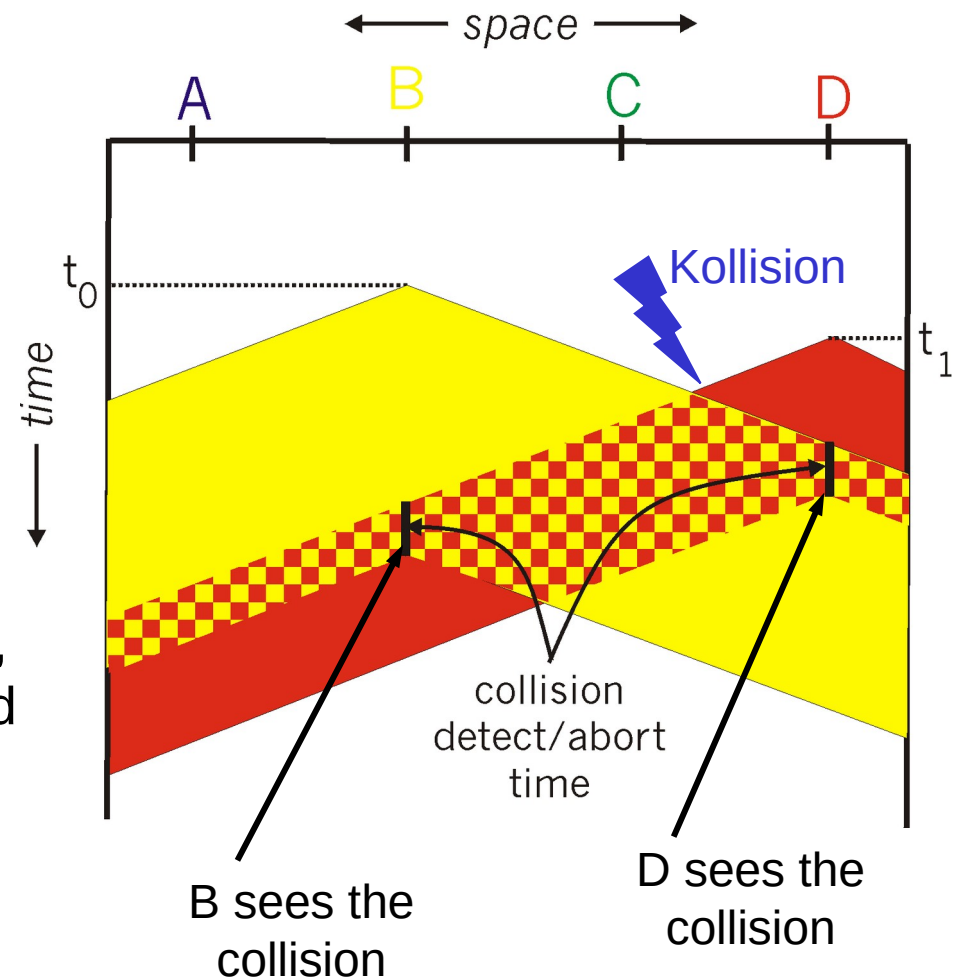
## Räumliches Layout der Knoten



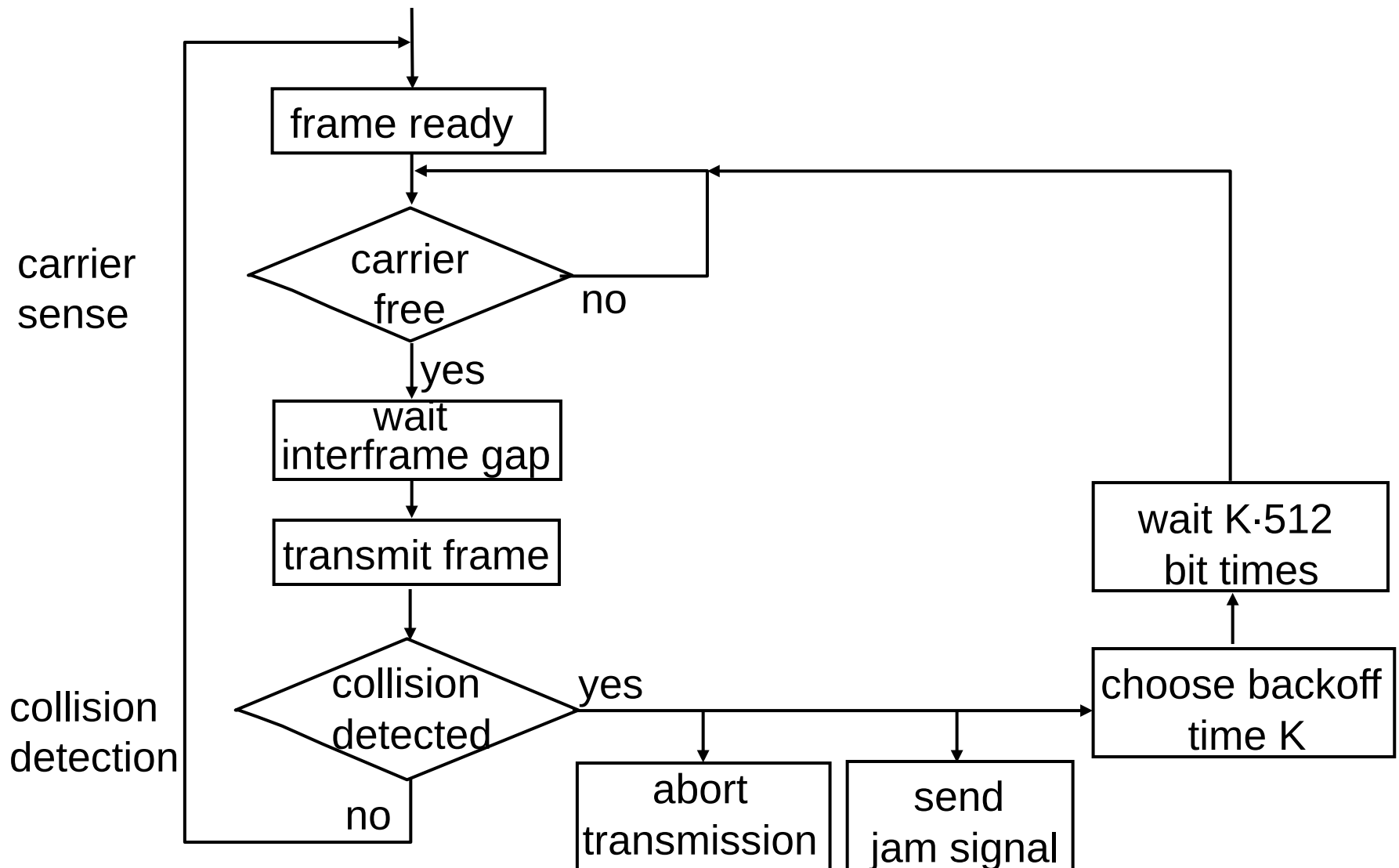


# CSMA/CD Collision Detection

- Kollisionserkennung (CD)
  - Wenn Kollision innerhalb kurzer Zeit erkannt wird, werden die kollidierenden Übertragungen abgebrochen
  - Hieraus folgt eine reduzierte „Kanalverschwendung“
- Implementierung von CD
  - Einfach in kabelgebundenen LANs: messen der Signalstärke, vergleichen des gesendeten und empfangenen Signals
  - Schwierig in drahtlosen LANs: Sender wird während des Sendens abgeschaltet



# Ethernet CSMA/CD Algorithmus



# Ethernet CSMA/CD Algorithmus

---

- Keine Synchronisation, z.B. Time Slots

1. Adapter empfängt Datagramm vom Netzwerk-Layer und erzeugt ein Frame, z.B. gespeichert im Puffer

- Carrier Sense

2. Wenn der Adapter sieht, dass der Kanal „idle“ ist, beginnt er mit der Übertragung des Frames nach dem Interframe Gap (IFG)

- Sieht er, dass der Kanal belegt ist, wartet er bis der Kanal wieder „idle“ ist.
- Der Interframe Gap beträgt 96 Bit Zeiten ( $9.6\mu\text{s}$  für 10Mbit/s LAN) um vorangegangene Zustände zu bearbeiten (Wechsel zwischen Senden und Empfangen)
- Der Interframe Gap stellt ebenfalls Fairness zwischen den Stationen sicher.

3. Wenn der Adapter ein gesamtes Frame übertragen hat, ohne eine andere Übertragung zu detektieren, ist dieses erfolgreich abgeschlossen.

# Ethernet CSMA/CD Algorithmus

---

## ■ Collision Detection

4. Detektiert der Adapter eine andere Übertragung während er selber sendet, bricht er diese ab und sendet ein **Jam Signal**.
  - Das Jam Signal stellt sicher, dass alle anderen Teilnehmer von der Kollision erfahren; 48 Bit groß
  - Die minimale Framelänge (512 Bit) ist für Collision Detection notwendig
    - Stellt sicher, dass die Signaldauer größer ist als die Round Trip Time

## ■ Retransmission Strategie

5. Nach Abbruch der Übertragung wechselt der Adapter zum **Exponential Back-Off**:
  - nach der m-ten Kollision wählt der Adapter ein zufälliges K aus dem Intervall  $\{0, 1, 2, \dots, 2^m-1\}$
  - Bemerkung: m ist auf  $m \leq 10$  begrenzt
6. Adapter wartet  $K \cdot 512$  Bit Zeiten und kehrt zu Schritt 2 zurück.

# Exponential Back-Off

---

## Ziel:

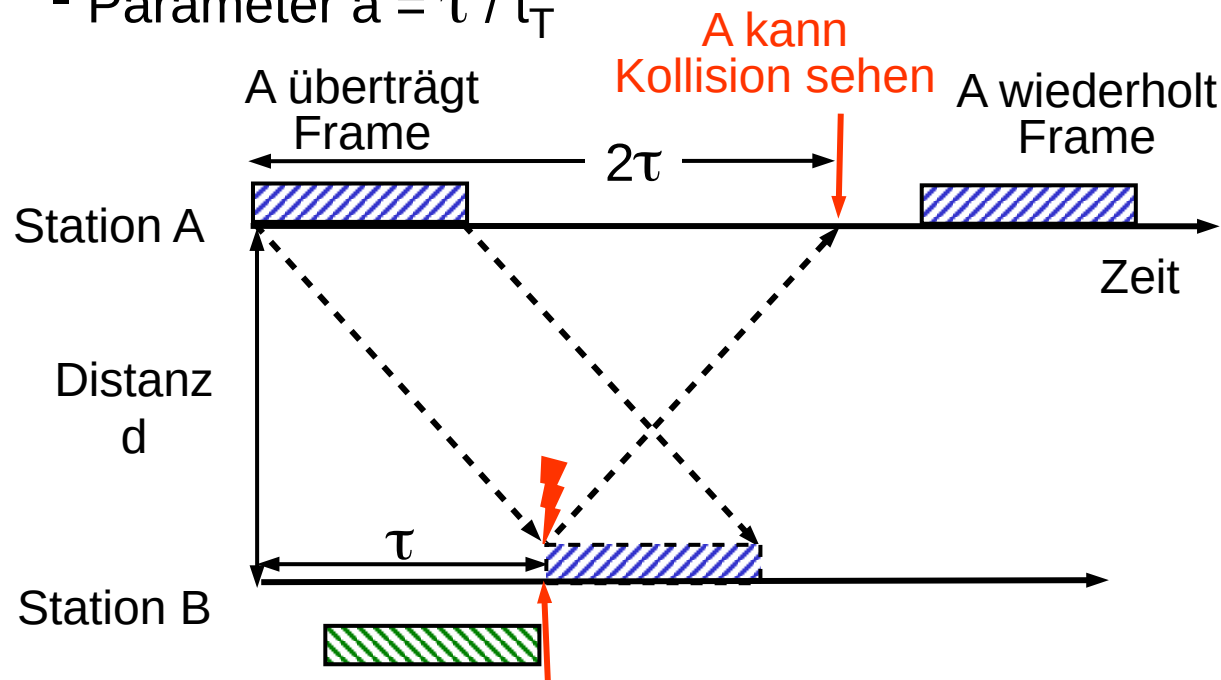
- Passt die Anzahl der Übertragungswiederholungen an die geschätzte aktuelle Netzwerkauslastung an.
  - Starke Auslastung: zufällige Wartezeit länger
- Erste Kollision: wähle  $K$  aus  $\{0, 1\}$ ; Delay ist  $K \cdot 512$  Bitübertragungszeiten
- Nach der zweiten Kollision: wähle  $K$  aus  $\{0, 1, 2, 3\}$ , ...
- Nach der zehnten Kollision: wähle  $K$  aus  $\{0, 1, 2, 3, \dots, 1023\}$

## Nachteile:

- Für 10Mbps Ethernet ist die Bitzeit  $0.1\mu\text{s}$ 
  - für  $K = 1023$  beträgt die Wartezeit ca. 50ms

# Worst-case collision detection in Bus Topologien

- $v_B$  = Kanalübertragungsrate [bit/s]
- $\tau$  = maximale propagation delay zwischen 2 Knoten im LAN
- $t_T = L / v_B$  Zeit um maximalgroßen Frame der Länge  $L$  [bits] zu übertragen
- Parameter  $a = \tau / t_T$



- Slot time  
Worst-case collision  
detection time

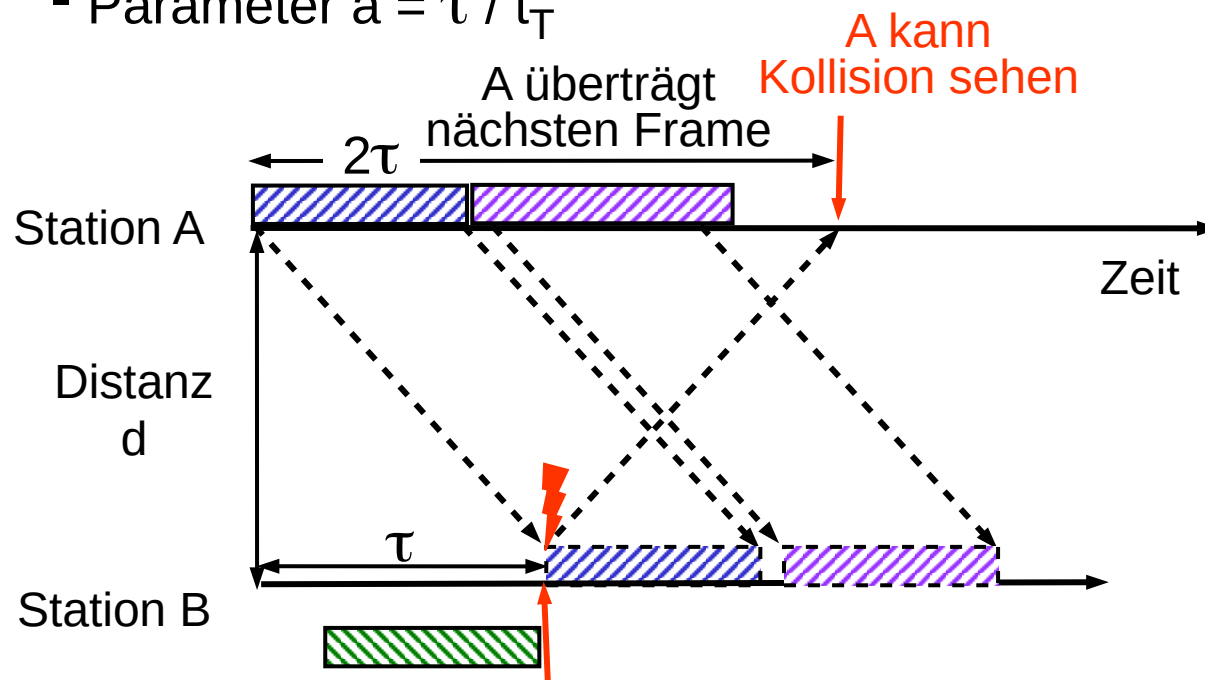
$$T_{SL} = 2\tau$$

Frage:  
In welchem Fall  
schlägt dieser Ansatz  
fehl?

B erkennt Kanal als frei kurz bevor der Frame  
ankommt und fängt an zu senden → Kollision

# Worst-case collision detection in Bus Topologien

- $v_B$  = Kanalübertragungsrate [bit/s]
- $\tau$  = maximale propagation delay zwischen 2 Knoten im LAN
- $t_T = L / v_B$  Zeit um maximalgroßen Frame der Länge  $L$  [bits] zu übertragen
- Parameter  $a = \tau / t_T$

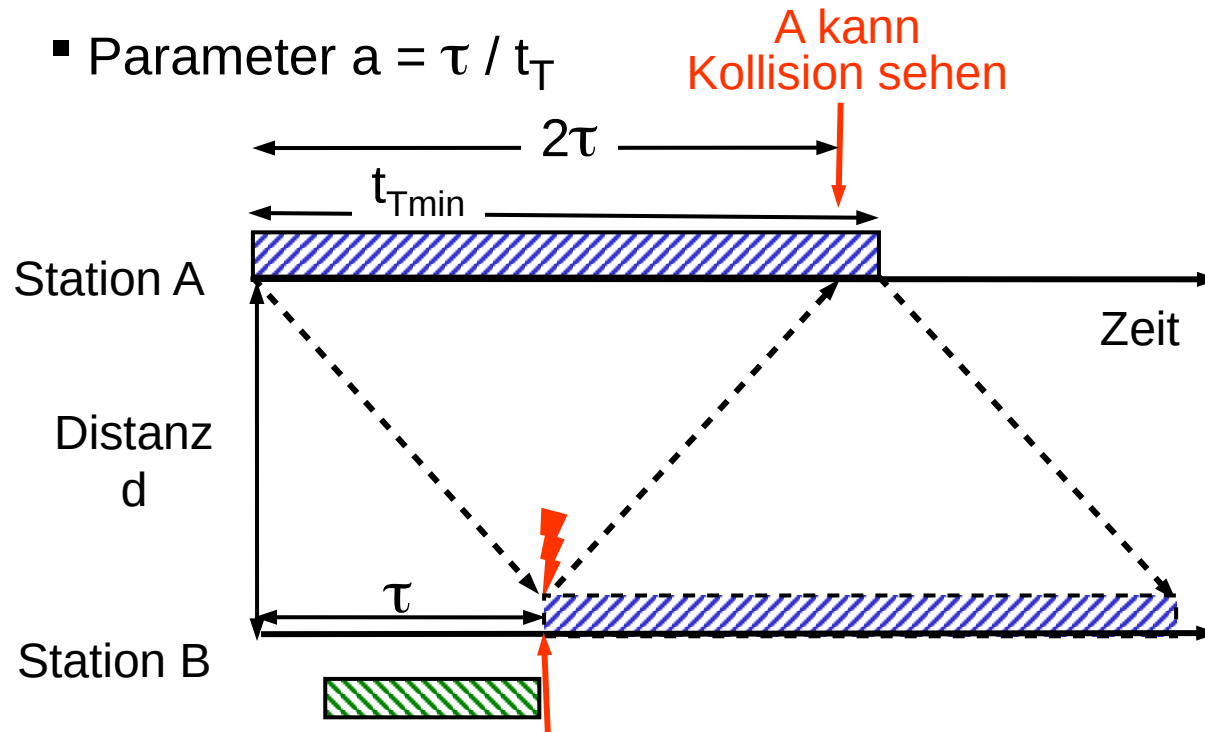


A kann nicht feststellen ob der erste oder der zweite Rahmen kollidiert ist.  
Problemanalyse: die im Beispiel genutzte Framelänge ist zu kurz für CSMA/CD

B erkennt Kanal als frei kurz bevor der Frame ankommt und fängt an zu senden → Kollision

# Worst-case collision detection in Bus Topologien

- $v_B$  = Kanalübertragungsrate [bit/s]
- $\tau$  = maximale propagation delay zwischen 2 Knoten im LAN
- $t_T = L / v_B$  Zeit um maximalgroßen Frame der Länge  $L$  [bits] zu übertragen
- Parameter  $a = \tau / t_T$



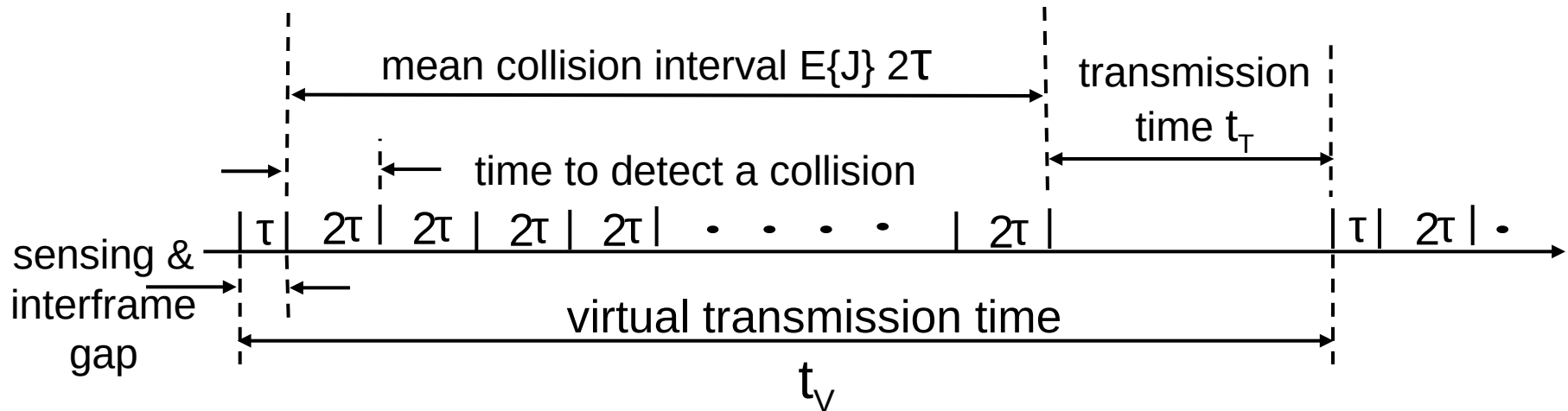
A kann nicht feststellen ob der erste oder der zweite Rahmen kollidiert ist.

Problemanalyse: die im Beispiel genutzte Framelänge ist zu kurz für CSMA/CD

B erkennt Kanal als frei kurz bevor der Frame ankommt und fängt an zu senden → Kollision



# Throughput in Bus Topologies



- Mittleres Kollisionsintervall  $E\{J\}$

- $E\{J\}$  ist die durchschnittliche Anzahl an Übertragungswiederholungen, vorausgesetzt, dass Kollisionen aufgetreten sind.

- Virtuelle Übertragungsdauer

- Dauer um ein Frame erfolgreich zu übertragen, wenn Kollisionen aufgetreten sind:

$$t_v = t_T + \tau + 2 \tau \cdot E\{J\} = t_T \cdot \left(1 + \frac{\tau}{t_T} + \frac{2 \tau}{t_T} \cdot E\{J\}\right) = t_T (1 + a + 2 a \cdot E\{J\})$$

# Erfolgswahrscheinlichkeit

---

## Annahmen:

- Im Netzwerk sind  $N \gg 1$  aktive Stationen
- Jede Station hat immer eine Dateneinheit zum übertragen
- Sei die Wahrscheinlichkeit, dass eine beliebige Station in einem  $2\tau$  Intervall übertragen möchte gleich  $p$ .
  - Die Wahrscheinlichkeit, dass  $k$  von  $N$  Stationen überträgt ist dann

$$P_k = \binom{N}{k} p^k (1-p)^{N-k}$$

- Die Wahrscheinlichkeit, dass genau eine Station überträgt (erfolgreiche Übertragung) ist

$$\hat{p} = P_1 = Np (1-p)^{N-1}$$

- Der Wert  $p = 1/N$  maximiert die Erfolgswahrscheinlichkeit

$$\hat{p}_{\max} = \left(1 - \frac{1}{N}\right)^{N-1} \xrightarrow{N \rightarrow \infty} e^{-1}$$

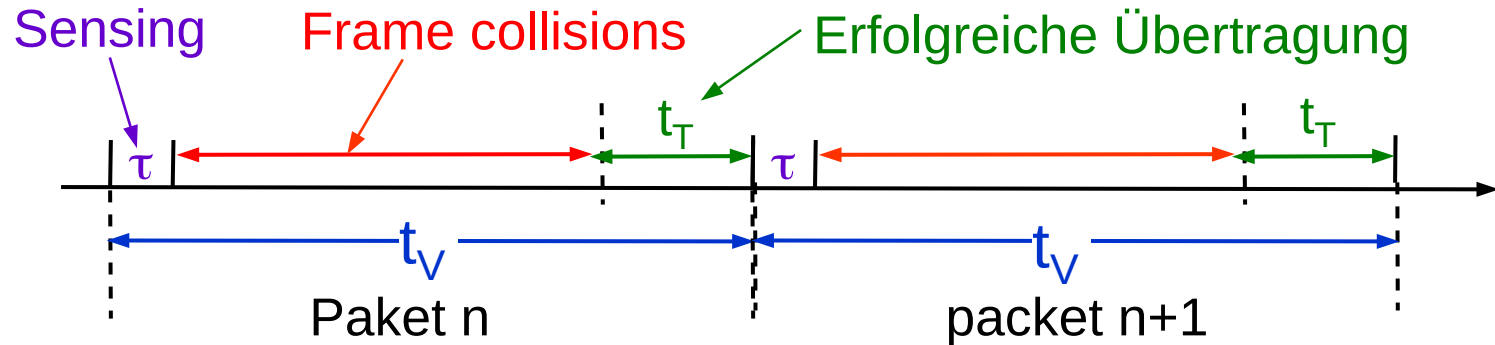
# Länge des Kollisionsintervalls J

- Keine Kollisionen:  $j = 0$ 
  - Nur eine Station sendet im Intervall  $2\tau$  mit der Wahrscheinlichkeit  $\hat{p}_{max}$
- Eine Kollision ist aufgetreten ( $j > 0$ ); der Exponential Back-Off Algorithmus wird wie folgt approximiert:
  - Das Kollisionsintervall ist eine Einheit ( $2\tau$ ) lang wenn während dieses Intervalls genau eine Station ihre Übertragung wiederholt (Wahrscheinlichkeit  $P(j = 1) = \hat{p}_{max}$ )
  - Ist das Intervall 2 Einheiten lang:  $P(j = 2) = \hat{p}_{max} (1 - \hat{p}_{max})$
  - Ist das Intervall  $j$  Einheiten lang:  $P(J = j) = \hat{p}_{max} (1 - \hat{p}_{max})^{j-1}$   
(Geometrische Verteilung)
- Durchschnittliches Kollisionsintervall:

$$E\{J\} = \sum_{j=0}^{\infty} j \cdot P\{J = j\} = \sum_{j=1}^{\infty} j \cdot \hat{p}_{max} (1 - \hat{p}_{max})^{j-1} = \frac{1}{\hat{p}_{max}}$$

$$\xrightarrow{N \rightarrow \infty} e$$

# Maximum Throughput and Utilization



- Tatsächliche Paketübertragungszeit  $t_V$

$\cong$  Sensing + collision time + transmission time

$$t_V = \tau + 2\tau \cdot e + t_T = t_T (1 + a(1 + 2e)) \quad (a = \tau/t_T)$$

- Maximale Paketdurchsatzrate

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{t_V} \quad [\text{Pakete pro Sekunde (pps)}]$$

- Maximale Auslastung

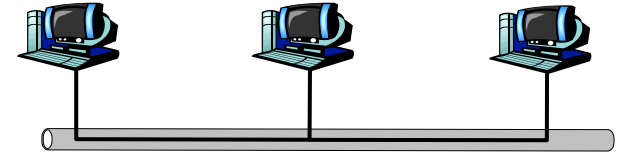
$$\rho_{\max} = \frac{t_T}{t_V} = \frac{1}{1 + a(1 + 2e)} \approx \frac{1}{1 + 6.44a}$$

Geht gegen 1  
wenn  $\tau$  gegen 0 geht

# Beispiel

## ▪ Bus Topologie 10 Mbit/s Ethernet

- $N = 40$  Stationen
- $d = 2500\text{m}$ ;  $v_A = 2.3 \times 10^8 \text{ m/s} \rightarrow \tau = d / v_A \approx 11 \text{ ms}$
- $L = 2200 \text{ bit}$ ;  $v_B = 10 \text{ Mbit/s} \rightarrow t_T = L / v_B = 220 \text{ ms}$
- $a = \tau / t_T = 0.05$
- Maximale Auslastung:  $\rho_{\max} \approx \frac{1}{1 + 6.44a} = 0.756$
- effektive Bitrate (für alle  $N$  Stationen):  $v_{\max} = v_B \rho_{\max} = 7.56 \text{ Mbit/s}$
- maximale mittlere Bitrate pro Station:  $v_N = v_{\max} / N = 189 \text{ kbit/s}$



## ▪ Upgrade des Bus auf 100 Mbit/s Ethernet

- $L = 2200 \text{ bit}$ ;  $v_B = 100 \text{ Mbit/s} \rightarrow t_T = L / v_B = 22 \text{ ms}$
- $a = \tau / t_T = 0.5$ ,  $\rho_{\max} = 0.237$
- $v_{\max} = v_B \rho_{\max} = 23.7 \text{ Mbit/s}$
- $v_N = 592 \text{ kBit/s}$

# 3. Link Layer

---

## 3.1 Übersicht

## 3.2 LANs

### 3.2.1 Addressierung

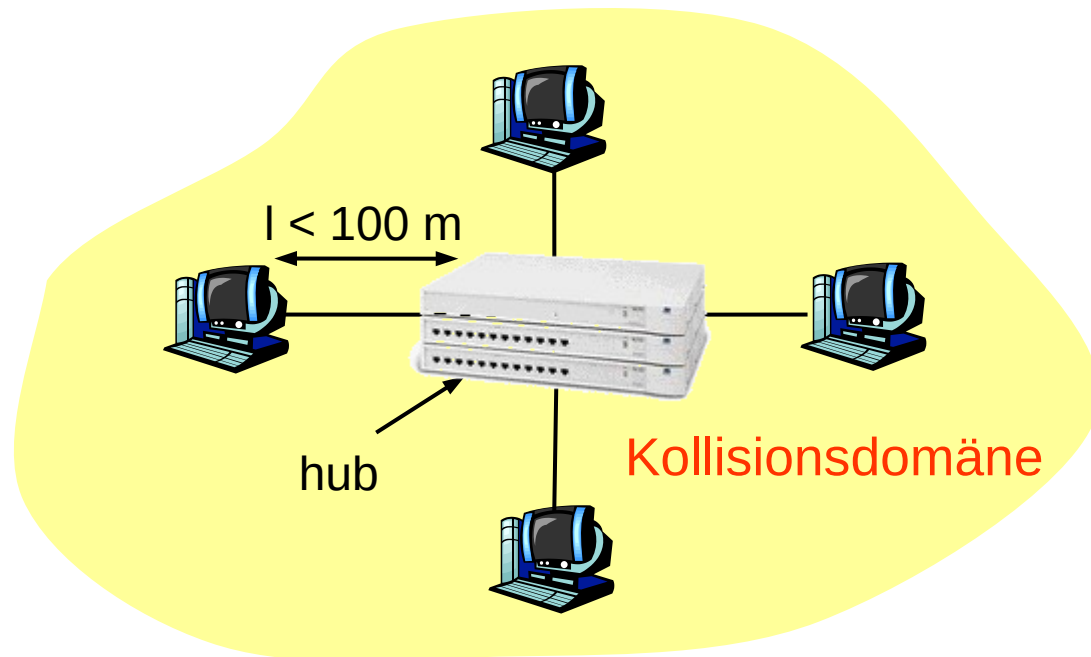
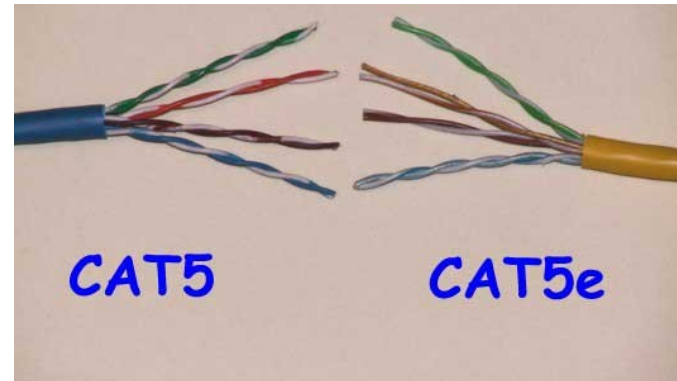
### 3.2.2 Ethernet

### 3.2.3 Hubs und Switches

# Star – Netzwerk mit Hub

## 10BaseT und 100BaseT

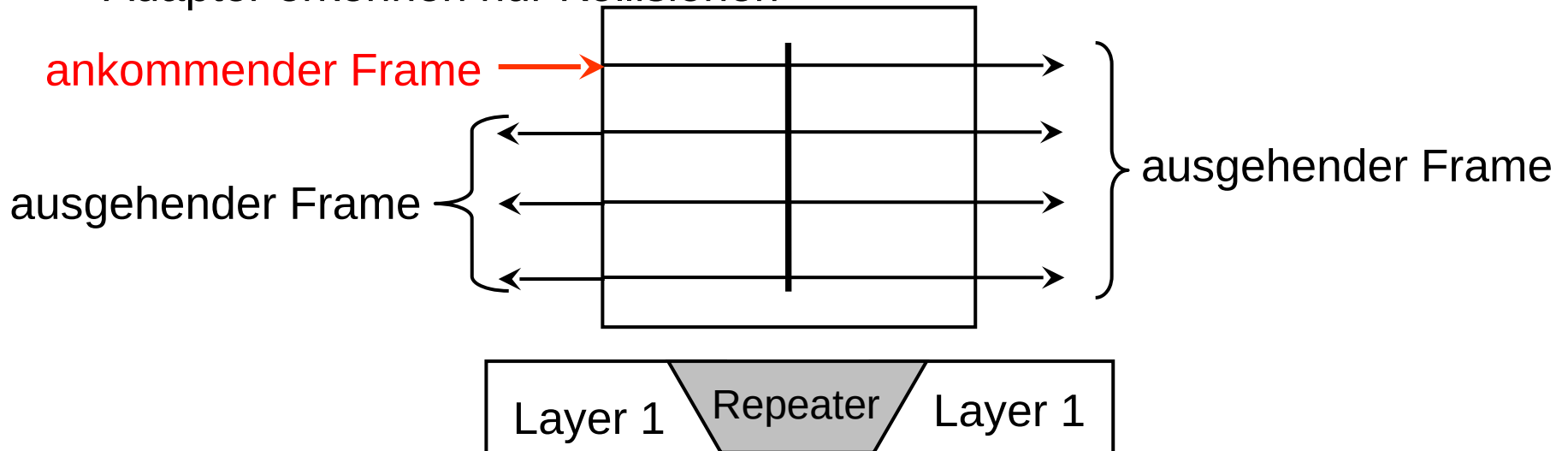
- Rate von 10/100 Mbps, später als “Fast Ethernet” bezeichnet
- T steht für Twisted Pair
- Knoten verbunden mit einem Hub:
  - “Sterntopologie”; 100 m maximale Entfernung zwischen Knoten und Hub
    - 5m pro Seite für Anschlussleitung, 90m Kabel dazwischen
- Alle Hosts sind in der selben Kollisionsdomäne (denn Hub=Layer1, terminiert Layer1 also nicht)



# Ethernet - Hubs

## Hubs sind de-facto physical-layer Repeater

- Bits kommen auf einer Verbindung an und werden auf allen anderen Verbindungen wiederholt
  - Mit der selben Rate
  - Kein Frame buffering (kein Zwischenspeichern)
- Kein CSMA/CD am Hub
  - Kollisionen treten auf wenn zwei Frames zur selben Zeit ankommen
  - Adapter erkennen nur Kollisionen





# Beispiel Sterntopologie

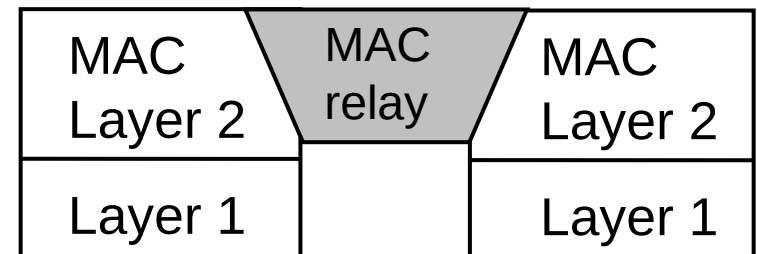
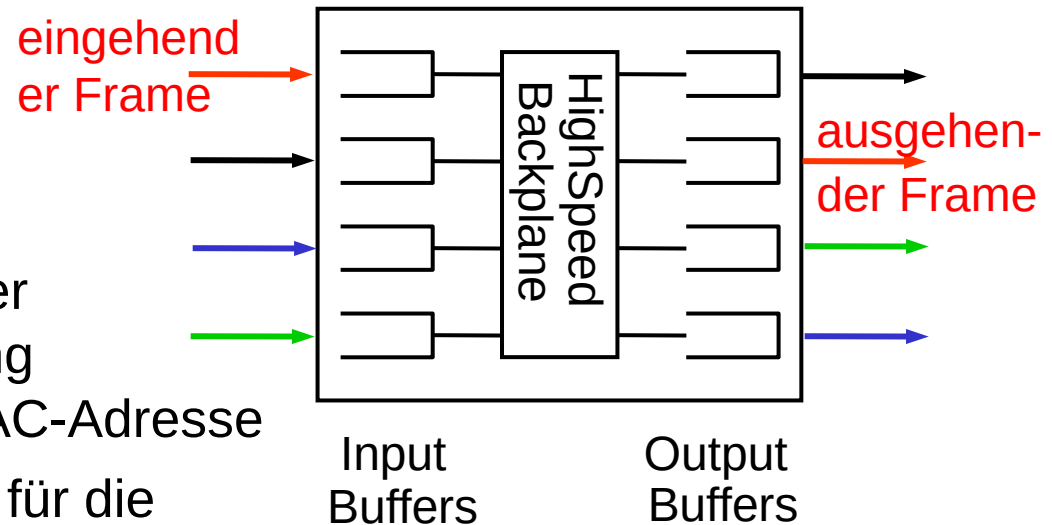
---

- Sterntopologie 100 Mbit/s Ethernet
  - $N = 40$  Stationen
  - $d = 2 * l = 200\text{m}$ ;  $v_A = 2.3 \times 10^8 \text{ m/s} \rightarrow \tau = d / v_A \approx 1 \text{ ms}$
  - $L = 2200 \text{ bit}$ ;  $v_B = 100 \text{ Mbit/s} \rightarrow t_T = L / v_B = 22 \text{ ms}$
  - $a = \tau / t_T = 0.0455$
  - maximale Auslastung:  $\rho_{\max} = 0.773$
  - effektive Bitrate (für alle  $N$  Stationen):  $v_{\max} = v_B \rho_{\max} = 77.3 \text{ Mbit/s}$
  - maximale mittlere Bitrate pro Station:  $v_N = v_{\max} / N = 1.93 \text{ Mbit/s}$
- Welchen Preis hat der höhere Durchsatz?
  - Zusätzliches zentrales Gerät: der Hub
  - Teurere Verkabelung und deutlich kürzere Distanz (200m)

# Ethernet Switches – Verbessern der Performance

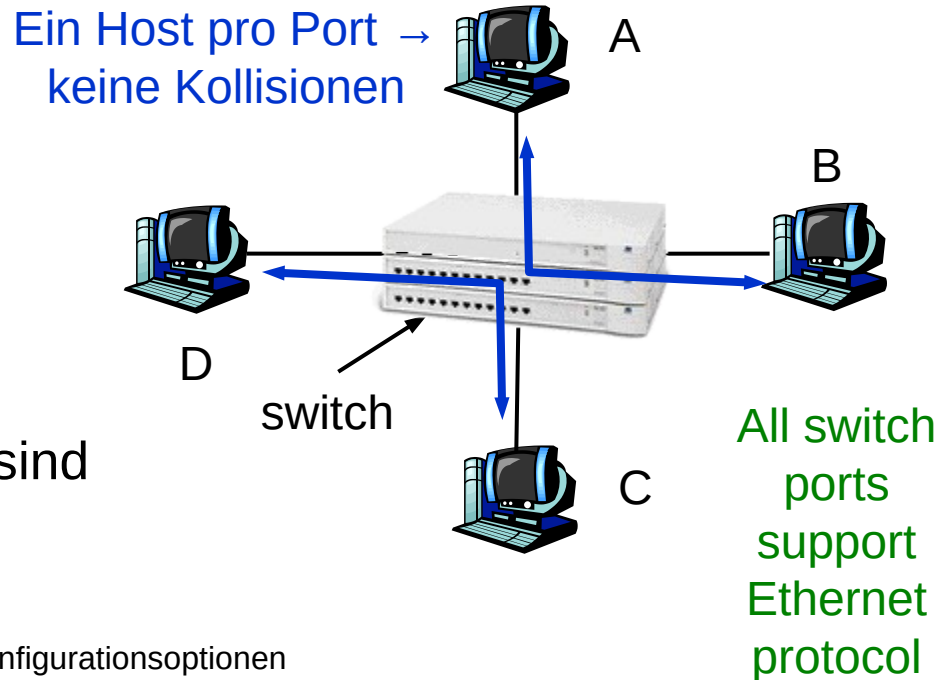
## ▪ Ein Ethernet Switch ist ein Paket-Switch auf der Link Layer (L2)

- „Stores and forwards“  
Ethernet Frames
- Buffering von Frames  
verhindert Kollisionen
- Auswerten der Frame Header  
und selektive Weiterleitung  
basierend auf der Ziel-MAC-Adresse
- Nutzt das Ethernet-Protokoll für die  
Verbindungen der Interfaces
- Unterstützt heterogene Verbindungen
  - Verschiedene Medien auf Layer 1
  - Kombinationen von geteilten/  
dedizierten  
10/100/1000 Mbps-Interfaces



# Stern-Netzwerk mit Ethernet Switch

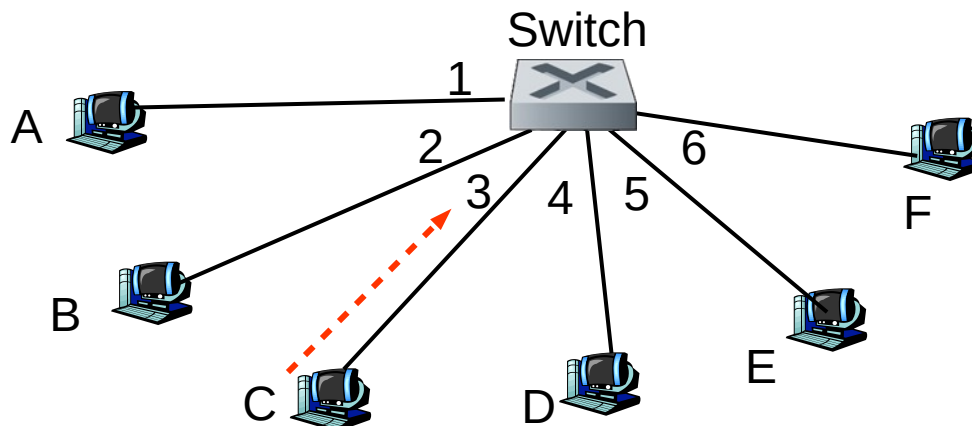
- Jedes Interface ist isoliert und bildet seine eigene Kollisionsdomäne
- Wenn Hosts dedizierten Zugang zum Switch haben:
  - Vollduplexübertragung mit Leitungsgeschwindigkeit zwischen zwei Hosts
  - Beispiel; switching: A-zu-B und C-zu-D simultan, keine Kollisionen
- Ein Switch ist transparent
  - Hosts wissen nichts von der Existenz des Switches
- Plug-and-play, self-learning
  - Switches benötigen keine Konfiguration\*
  - Switch lernt welche Hosts über welches Interface erreichbar sind



\*Manageable Switches können über eine Reihe an Konfigurationsoptionen verfügen, sind jedoch nicht Gegenstand der Vorlesung

# Self-Learning

- Ein Switch verfügt über eine Hardware Address Table (HAT oder „L2 Forwarding Table“) mit folgenden Einträgen:
  - (MAC Address, Interface, Time Stamp)
  - Abgelaufene Einträge werden gelöscht (TTL kann bis zu 60 min sein)
- Switch erlernt die Einträge und speichert sie in der Address Table
- Beispiel: Switch empfängt Frame von C auf Interface 3
  - sieht C's Quelladresse in Frame
  - Fügt C's Quelladresse zur Address Table als "learned" Zieladresse, die über Interface 1 erreicht werden kann, hinzu

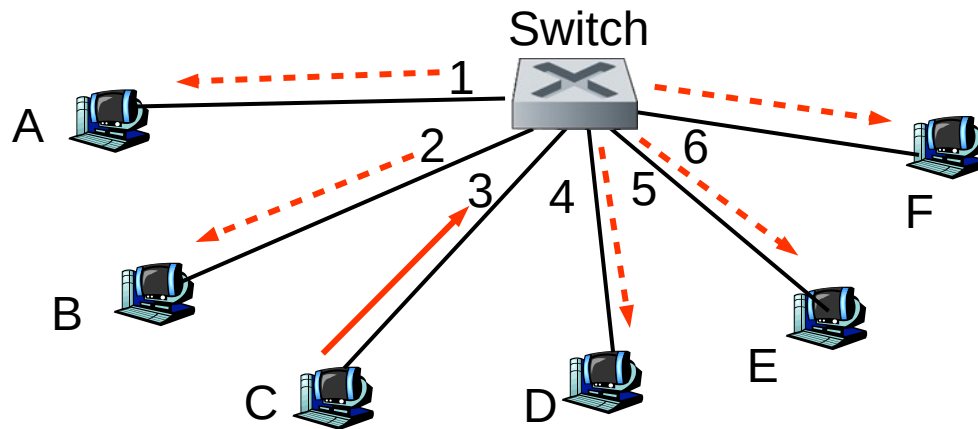


**Hardware Address Table**

MAC-Addr	Interface	TTL
C	3	60

# Forwarding Beispiel

- C sendet Frame zu D

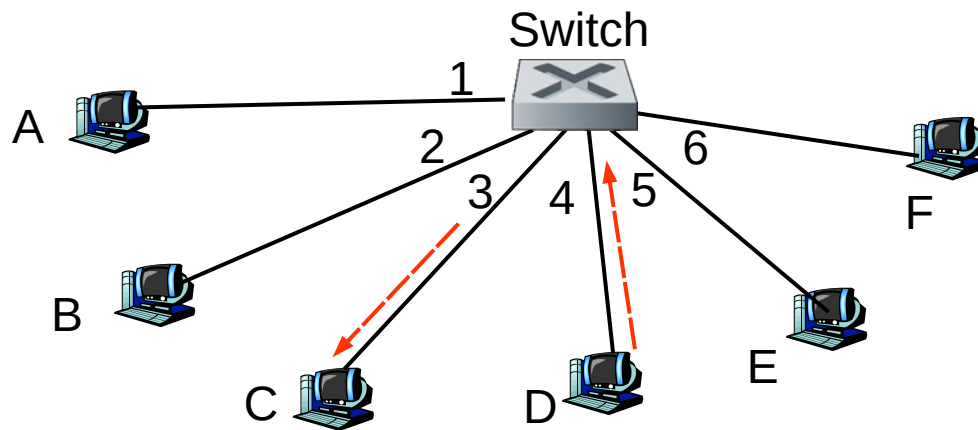


MAC-add	Interface
C	3
A	1
B	2
E	5

- Switch erhält Frame von C
  - Vermerkt in Address Table, dass C an Interface 3 verbunden ist
  - Weil D nicht in der Table ist, leitet der Switch den Frame zu den Interfaces 1, 2, 4, 5 und 6 mit Ausnahme des Empfangs-Ports (flooding)
- Frame wird von D empfangen

# Forwarding Beispiel

- D antwortet C



MAC-add	Interface
C	3
A	1
B	2
E	5
D	4

- Switch erhält Frame von D
  - Vermerkt, dass D über Interface 4 erreichbar ist
  - Weil C schon in der Table ist, leitet der Switch den Frame nur zu Interface 3
- Frame wird von C empfangen

# Self-Learning

---

Wenn Switch einen Frame empfängt:

Durchsuche Address Table nach Ziel-MAC-Adresse

**if** Eintrag für Ziel gefunden

**then{**

**if** Ziel am selben Interface auf dem Frame erhalten wurde

**then** Frame verwerfen

**else** weiterleiten des Frames zum angegebenen Interface

**}**

**else flood**



Weiterleiten zu allen Interfaces  
außer dem, auf dem Frame  
erhalten wurde

# Verbinden von LANs über Switches

- Installation von Switches bricht große LANs in LAN-Segmente
  - Segmente werden separate **Kollisionsdomänen**
  - Heutzutage bestehen diese Segmente auch wieder aus Switches
- Switch **filtert** Pakete auf Basis der MAC-Adresse
  - Verkehr innerhalb des selben Segments wird normalerweise nicht in andere LAN-Segmente weitergeleitet (außer bei unbekannter MAC), e.g. HTTP/TCP-basierter end-to-end traffic
  - **Traffic isolation zwischen verschiedenen Segmenten**

