



# Technische Grundlagen der Informatik

Sicherungsschicht  
(Data Link Layer)

Prof. Dr. phil. nat. habil. J. Haase, Dr.-Ing. Falko Schönteich

NORDAKADEMIE Hochschule der Wirtschaft

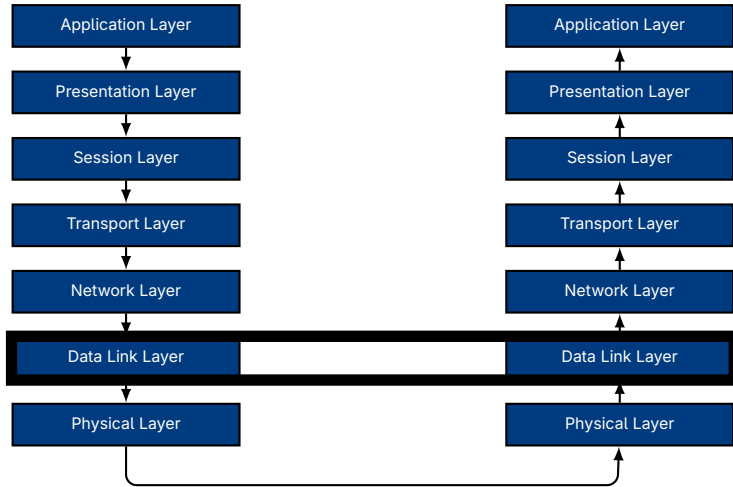
# Überblick

**1** Einleitung

**2** Medienzugriff

**3** L2-Netzwerkgeräte

# OSI-Referenzmodell



# Implementierung der Sicherungsschicht

Wo ist das Data-Link-Layer implementiert?

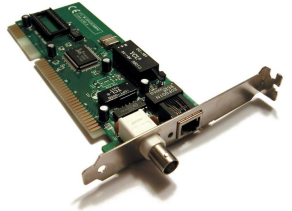
- in jedem Knoten
- Implementierung im Netzwerk-Adapter (NIC) oder im Netzwerk-Controller auf dem Chip

# NICs - Beispiele

WLAN:



Ethernet:



Infiniband:



# Begriffe

- Hosts sind *Knoten* im Netzwerk
- Verbindungen zwischen direkt verbundenen Knoten sind *Links*
- *Direktverbindungsnetze*:
  - alle Knoten im Netzwerk sind erreichbar
  - alle Knoten lassen sich über physikalische Adressen identifizieren
  - es findet keine Vermittlung der Pakete statt

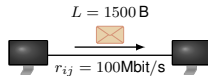
# Charakterisierung von Links

Die Verbindung zwischen zwei Netzwerkknoten kann aufgrund

- der Übertragungsrate
- der Übertragungsverzögerung
- der Übertragungsrichtung
- des Mehrfachzugriffs (Multiplexing)

charakterisiert werden.

Ausgangspunkt sei eine Point-to-Point-Verbindung:



# Serialisierung

## Definition (Übertragungsrate und Serialisierungszeit)

Die Übertragungsrate  $r_{ij}$  in  $\text{bit} \cdot \text{s}^{-1}$  gibt an, wieviele Bits pro Sekunde seriell auf ein Medium moduliert werden können. Daraus ergibt sich die Serialisierungszeit  $t_s$  für eine Nachricht der Länge  $L$  in Datenbits zwischen  $i$  und  $j$  gemäß

$$t_s = \frac{L}{r_{ij}}$$

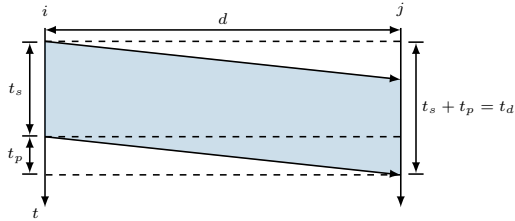
### Beispiel:

Eine Nachricht aus 1500 Bytes soll auf einer Leitung mit einer Übertragungsrate von 100 MBit/s übertragen werden.

$$t_s = \frac{1500 \cdot 8 \text{ bit}}{100 \cdot 10^6 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1}} = 120 \mu\text{s}$$



# Sequenzdiagramme



Offensichtlich gilt für das Senden und Empfangen einer Nachricht die Übertragungszeit  $t_d$  ist die Summe der Serialisierungszeit  $t_s$  und der Ausbreitungsverzögerung  $t_p$

$$t_d = t_s + t_p$$

# Übung: Übertragungszeit

Zwei Rechner A und B sind über ein 50 Meter langes Kupferkabel (10 MBit/s Ethernet) verbunden. Rechner A sendet ein Datenpaket mit der Länge von 1000 Byte und erwartet eine Antwort von Rechner B mit der Länge von 100 Byte.

- Zeichnen Sie ein Sequenzdiagramm des Vorgangs und beschriften Sie die einzelnen Zeiten.
- Wie lange benötigt der Vorgang vom Start des Sendens des Pakets durch Rechner A bis zum Empfang des letzten Bits des Antwortpakets auf dem Rechner A? Es wird davon ausgegangen, dass Rechner B das Antwortpaket sofort lossendet, wenn er das Paket von A erhalten hat.

# Übung: Übertragungszeit

# Mehrfachzugriff auf ein Medium

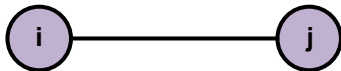
Mehrere Knoten können an einem Medium angeschlossen sein. Dabei entstehen eine Vielzahl verschiedener Topologien.

## Netzwerktopologien:

Der Begriff Topologie gibt wieder, wie Knoten in einem Netzwerk miteinander verbunden werden. Man unterscheidet dabei zwischen logischer und physikalischer Topologie.

# Punkt-zu-Punkt-Verbindungen (Point-to-Point)

Zum Beispiel Direktverbindung von zwei PCs über ein Crossoverkabel.



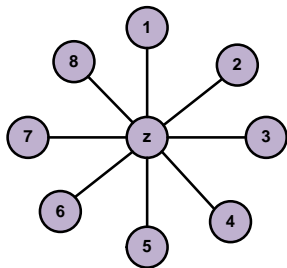
Die Darstellung erfolgt als Adjazenzmatrix  $A = (a_{ij})$  mit den Einträgen gemäß

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{gdw. es existiert eine Verbindung vom Knoten } i \text{ zum Knoten } j \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

# Stern (Star)

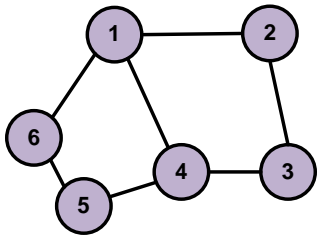
Zum Beispiel über einen Hub oder einen Switch



Es gilt  $z = 9$ .

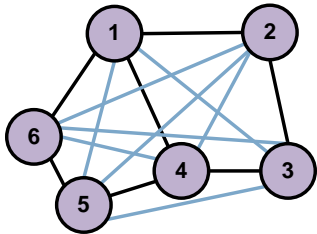
$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

# Vermaschung (Mesh)



$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

# Vollvermaschung

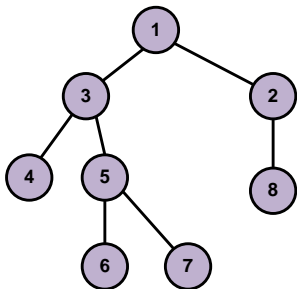


$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$



# Baum (Tree)

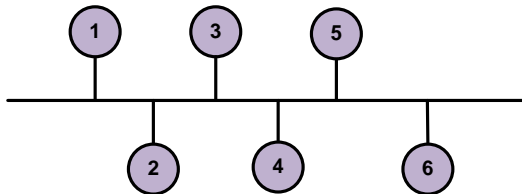
meist logische Topologie



$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

# Bus (Binary Unit System)

alle Teilnehmer sind über eine Busleitung physikalisch miteinander verbunden



Ausfall eines Teilnehmers hat keine Auswirkung auf den Bus.

# Probleme in Direktverbindungsnetzen

1. Kollisionen beim Senden von Nachrichten auf einer Busleitung mit mehreren Teilnehmern
2. Trotz Kanalkodierung treten Fehler beim Übermitteln und Empfangen der Nachrichten auf.
3. Welche Nachricht gelangt auf welche Weise an den richtigen Empfänger

## Definition (Aufgaben der Sicherungsschicht)

Die Aufgaben der Sicherungsschicht sind

- die Steuerung des Medienzugriffs
- die Prüfung übertragener Nachrichten auf Fehler
- die Adressierung innerhalb von Direktverbindungsnetzen

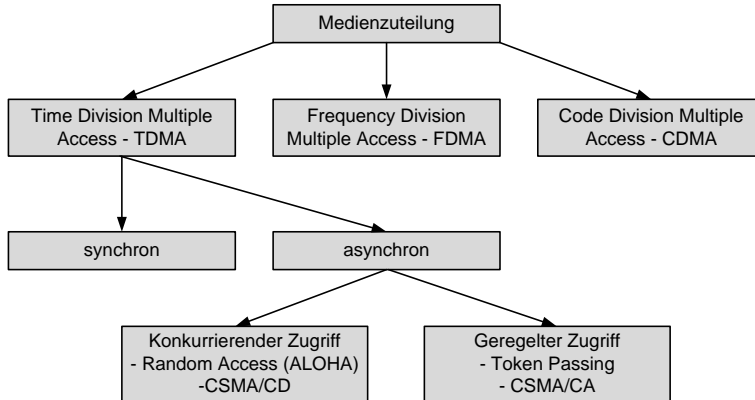
# Überblick

1 Einleitung

**2** Medienzugriff

3 L2-Netzwerkgeräte

# Medienzugriff



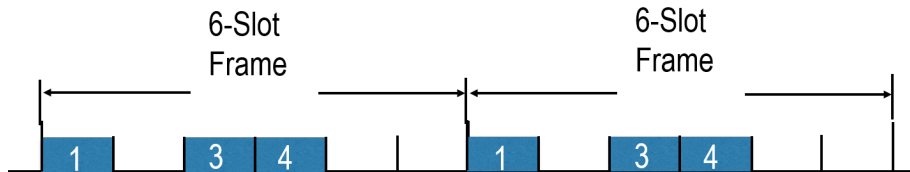
# Zeitmultiplex

## Time Division Multiple Access - TDMA

- Sender und Empfänger nutzen Medium für bestimmte Zeit
- Synchronisation notwendig: statisch oder dynamisch
- Zugriff kann erfolgen:
  - Deterministisch: z. B. Telefonnetz, ISDN, Mobilfunknetz
  - Nichtdeterministisch: konkurrierender Zugriff bei paketbasierten Netzwerken wie Ethernet, WLAN

# Beispiel - TDMA

- Beispiel mit 6 Knoten
- Jedem Knoten ist statisch ein Slot zugewiesen
- 1, 3, 4 haben ein Paket; 2, 5, 6 sind idle



# Frequenzmultiplex

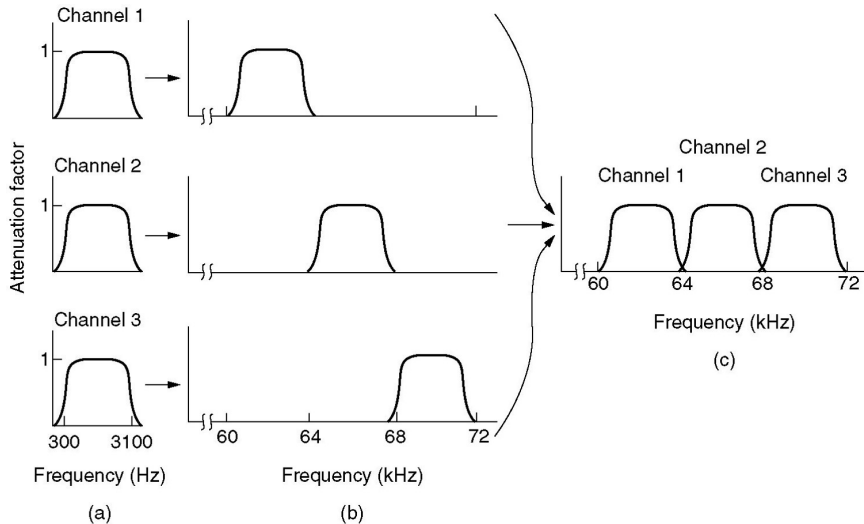
## Frequency Division Multiple Access, FDMA

Aufteilung des Kanals in unterschiedliche Frequenzbänder und Zuweisung der Bänder an die Kommunikationspartner

- Anwendung bei Funkübertragungen z. B. bei verschiedenen Radiosendern
- Einsatz bei Glasfaserübertragungen (Multimode mit unterschiedlicher Farbe).



# Beispiel - FDMA

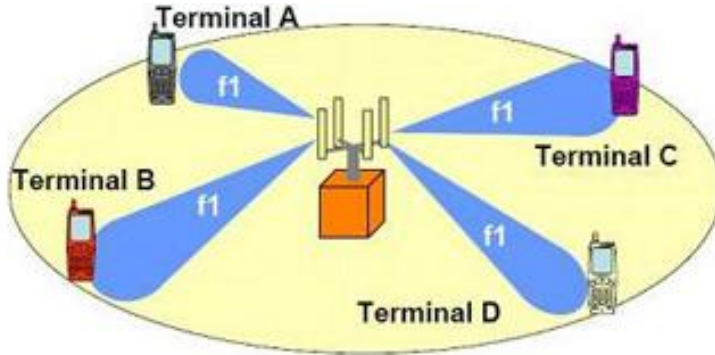


# Raummultiplex

## Space Division Multiple Access, SDMA

Verwendung mehrerer paralleler Kommunikationskanäle

- Verwendung mehrerer Adern bei kabelgebundener Übertragung
- Beamforming: Mehrere Antennen schaffen entsprechende Übertragungsräume
- Richtfunk



# Codemultiplex

## Code Division Multiple Access, CDMA

Verwendung orthogonaler Alphabete und Zuweisung der Alphabete an die Kommunikationspartner.

- UMTS benutzt den CDMA Ansatz

Gleichnis:

- Party mit Leuten aus verschiedenen Ländern, die unterschiedliche Sprachen sprechen
- alle sprechen gleichzeitig
- Leute mit gleicher Sprache können sich verstehen, da andere Sprachen in den Hintergrund treten

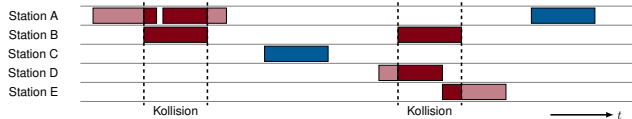
Im Folgenden liegt der Fokus auf TDMA-Verfahren.

# Random-Access-Protokolle

- Wenn ein Knoten senden möchte, sendet er
- sollten mehrere Knoten zeitgleich gestartet haben, gibt es eine Kollision auf dem Medium
- Random-Access-MAC Protokolle spezifizieren:
  - Wie Kollisionen erkannt werden
  - Wie Kollisionen behandelt werden
- Beispiele:
  - ALOHA
  - Slotted ALOHA
  - CSMA, CSMA/CD, CSMA/CA

# ALOHA

- ALOHA-Knoten senden sobald sie ein Paket senden wollen; keine Synchronisation
- Wahrscheinlichkeit einer Kollision steigt mit Anzahl von Knoten, Anzahl von Paketen und Länge der Pakete

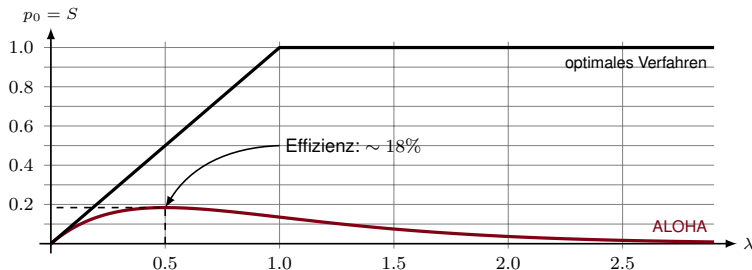


# ALOHA-Effizienz

Das Sendeverhalten lässt sich über ein Bernoulli-Experiment abbilden. Die Wahrscheinlichkeit für eine erfolgreiche Übertragung bestimmt sich über

$$p_0 = \lambda e^{-2\lambda}$$

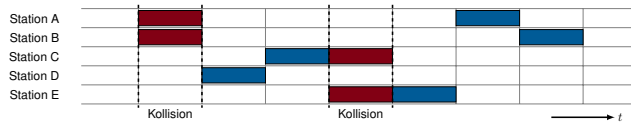
mit  $\lambda$  = Senderate



Die maximale Effizienz von ALOHA liegt bei nur 18 %.

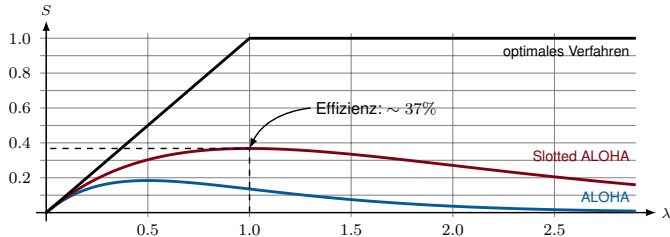
# Slotted ALOHA

- höhere Effizienz bei Einteilung der Zeit in Slots
- Senden nur am Anfang eines Slots
- bei Kollision warten auf nächsten Slot-Anfang und mit Wahrscheinlichkeit  $p$  senden



# Slotted ALOHA-Effizienz

Die Effizienz gesendeter Nachrichten liegt signifikant höher als beim normalen ALOHA.





# CSMA - Carrier Sense Multiple Access

Eine weitere Verbesserung des Slotted ALOHA-Prinzips sind CSMA-Verfahren

1. Zuerst wird das Medium geprüft, ob eine Nachricht gerade gesendet wird
2. Ist das Medium frei (Baseline bzw. Nullpegel), kann mit dem Senden einer Nachricht begonnen werden

Vergleichbar mit menschlichen Gesprächen: Unterbreche nie den anderen!

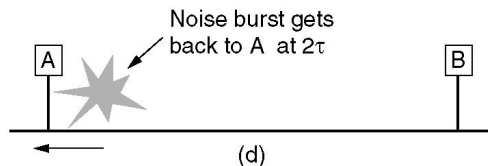
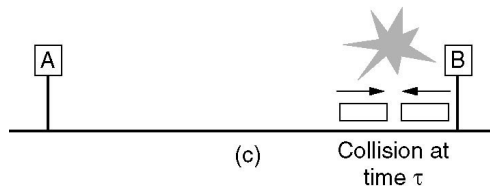
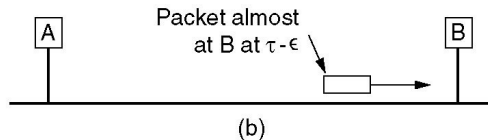
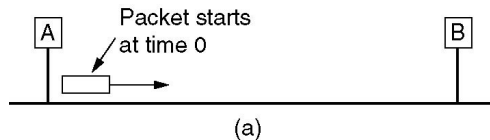
# CSMA/CD

## Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection

Arbeiten Sie mit Ihrem Nachbarn zusammen. Recherchieren Sie die Funktionsweise von CSMA/CD und zeichnen Sie ein Ablaufdiagramm, das verdeutlicht, wie CSMA/CD funktioniert.



# Kollisionen



Kollision können erst  $2 \cdot \tau$  nach dem Versenden erkannt werden. Dann muss die Station also noch dabei sein, das gleiche Paket zu versenden.

Also muss gelten:  $2 \cdot t_p < t_s$

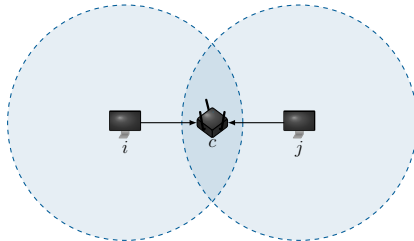
# Übung: Netzausdehnung

Berechnen Sie die max. Netzausdehnung in einem 10MBit/s-Ethernet-basierten Netzwerk, wobei die minimale Framegröße eines Ethernet-Frames 64 Byte sei. Die Kabel seien aus Kupfer.

# Übung: Netzausdehnung

# Funknetzwerke

In Funknetzwerken funktioniert dieser Ansatz leider nicht  $\Rightarrow$  Problem der Hidden Station!



- Übertragungen werden von der Basisstation gesteuert (z. B. Router)
- Bevor ein Knoten i eine Nachricht verschickt, sendet dieser ein Request to send (RTS)
- Antwortet die Basisstation mit einem Clear to send (CTS), kann Knoten i senden

### Vor-/Nachteile:

- insgesamt weniger Kollisionen
- Datenrate wird reduziert



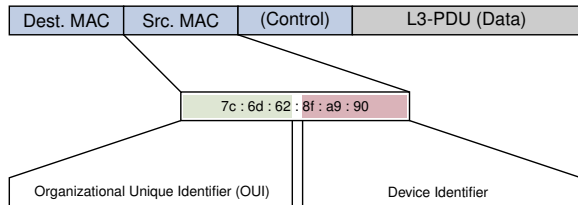
# Adressierung

Für Adressen gelten auf Schicht 2 folgende Anforderungen:

- Eindeutige Identifikation eines Knotens im Direktverbindungsnetz
- Eine Broadcast-Adresse, mit der alle Knoten im Direktverbindungsnetz adressiert werden können.

# MAC-Adressen

- Adressen auf Schicht 2 bezeichnet man als MAC-Adressen (Media Access Control)
- MACs sind 48 Bit breit
- Darstellung als 6 hexadezimale Bytes, die mit Doppelpunkt getrennt werden
- Broadcast-Adresse: `ff:ff:ff:ff:ff:ff`
- IEEE vergibt MAC-Adressräume an Unternehmen
- MAC-Adressen sollten weltweit einheitlich für jede Netzwerkschnittstelle sein
- MAC-Adressen (i. d. R. im ROM hinterlegt) sind wie folgt aufgebaut:



# Übung: MAC-Adressen

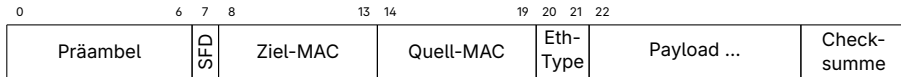
Recherchieren Sie, von welchen Herstellern Netzwerkschnittstellen mit den folgenden MAC-Adressen sind:

d4:25:8b:f0:61:c1	
54:ee:75:e3:eb:36	

Ermitteln Sie nun die MAC-Adresse der WLAN-Schnittstelle Ihres Rechners / Tablets und ermitteln Sie den Hersteller des Netzwerkcontrollers.

Nutzung z. B. von <https://macvendors.com/>

# Ethernet-Frame



- Präambel: Sequenz von Einsen und Nullen zur Taktsynchronisation (7 Byte)
- Start Frame Delimiter (SFD): Feste Bitsequenz zur Markierung des Ethernetrahmens (1 Byte im Fall IEEE 802.3)
  - 10101011 bei IEEE 802.3
  - 0000110010111101 bei IEEE 802.11 (WLAN)
- Ziel-MAC - Adresse des Empfängers (6 Byte)
- Quell-MAC - Adresse des Senders (6 Byte)
- EtherType - Protokoll der Schicht auf Layer 3 (2 Byte, z. B. 0x0800 für IPv4)
- Payload - Daten (PDU - Protocol Data Unit)
- Checksumme - z. B. CRC-32 (4 Byte)

(Präambel und SFD sind eigentlich Teil des L1-Frames)

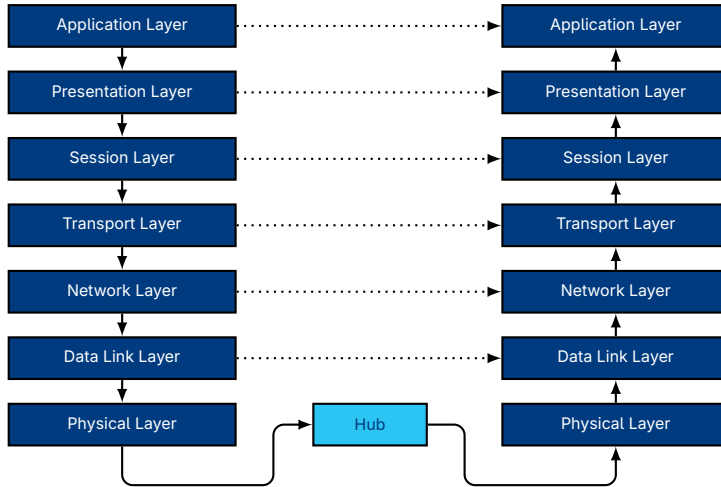
# Überblick

1 Einleitung

2 Medienzugriff

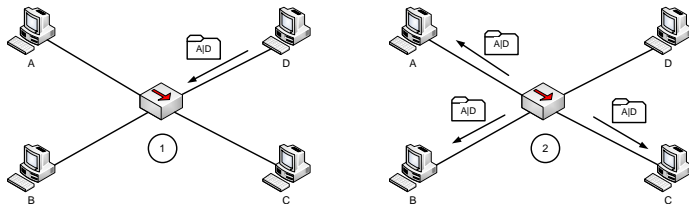
3 L2-Netzwerkgeräte

# Wiederholung Layer-1 Geräte (Hub)



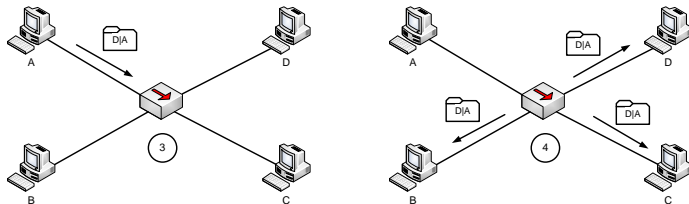
# Hubs: Kollisionsdomänen

- Knoten D sendet eine Nachricht an Knoten A
- Hub verbindet alle Knoten A,B,C und D physikalisch zu einem Bus
- Alle Knoten erhalten die Nachricht von D
- Kollisionen können somit auf dem gemeinsamen Medium auftreten



# Hubs: Kollisionsdomänen

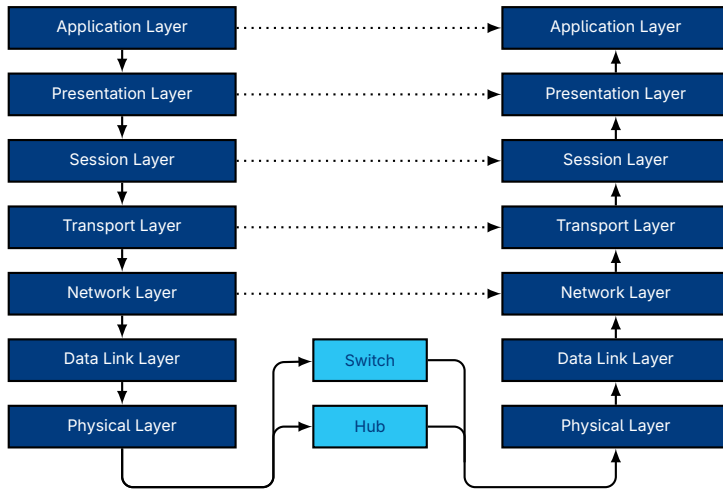
- Knoten A antwortet auf die Nachricht von D
- Hub verbindet alle Knoten A,B,C und D physikalisch zu einem Bus
- Alle Knoten erhalten wieder die Nachricht von A
- Kollisionen können somit auf dem gemeinsamen Medium auftreten



Bei Verwendung von Hubs als Netzwerkgeräte entsprechen Kollisionsdomänen auch Segmente. Ein Hub verbindet Kollisionsdomänen zu einer größeren Kollisionsdomäne.

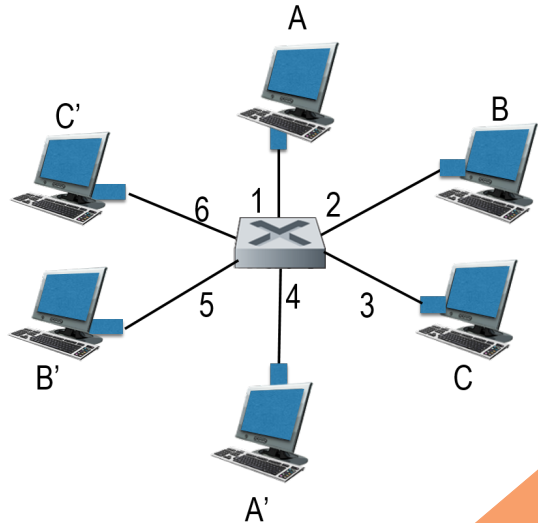


# Switches



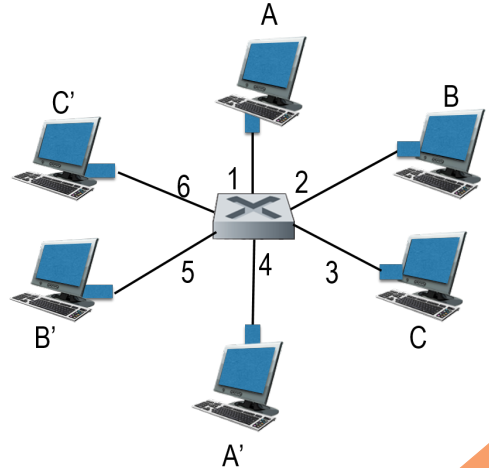
# Switch: Gleichzeitige Übertragungen

- jeder Port hat quasi eigene Kollisionsdomäne
- daher ist auch das gleichzeitige Senden zwischen Ports möglich, die sich nicht gegenseitig beeinflussen
- z. B. kann A mit A' kommunizieren und gleichzeitig B mit B' ohne sich zu beeinflussen



# Switch: Weiterleitungen

- Woher weiß der Switch, dass Rechner A' an Port 4 hängt?



# Switch: Weiterleitungen

- Woher weiß der Switch, dass Rechner A' an Port 4 hängt?
- Switches sind selbstlernend: Switch lernt anhand eintreffender Pakete, an welchem Port Interfaces mit welchen MAC-Adressen verbunden sind
- Daten werden in Source-Address-Table (SAT) eingetragen:

MAC	Interface
01:98:a3:87:ef:1e	1
...	
- Sollte eine Ziel-MAC nicht in der SAT zu finden sein, wird Paket an alle Ports weitergeleitet

