



Rechnernetze

Eine (kurze) Einführung

Cluj, Wintersemester 2019/20

Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut König

IV. Lokale Netze

(Local Area Networks, LANs)



Tanenbaum / Wetherall 4
Stallings 15
Kurose / Ross 5.3 – 5.6



Was sind LANs?

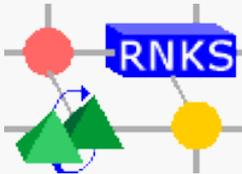
LANs sind private Netze für den Einsatz im lokalen Bereich (<10km). Sie beschränken sich in der Regel auf das Grundstück des Eigentümers, z. B. Büros, Produktionsanlagen, Universitätscampus u. a. LANs können im Prinzip ohne Vorschriften und Nutzungsgebühren installiert und betrieben werden. Trotzdem sind sie in ihrem Aufbau weitgehend standardisiert !

- Endsysteme von WANs sind häufig in LANs eingebunden
- **Ursprünglich:** Alle Rechner (Stationen) sind am Medium angeschlossen
 - **Shared Medium LAN**
 - Topologie-bedingt passieren alle Nachrichten alle angeschlossenen Stationen
 - ↪ „Broadcast“-Übertragung
- ☞ Im Prinzip keine Vermittlungsfunktion (Routing) notwendig !!!

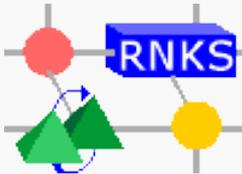


IV.1

Einige Grundlagen



A) Merkmale Lokaler Netze



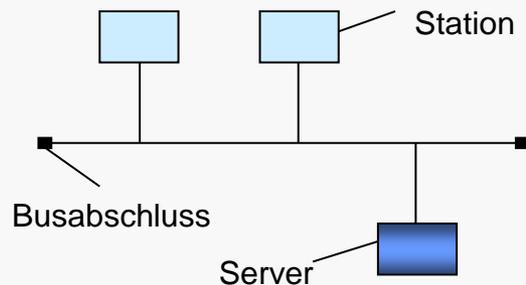
Typische Merkmale (1)

● Begrenzte räumliche Ausdehnung

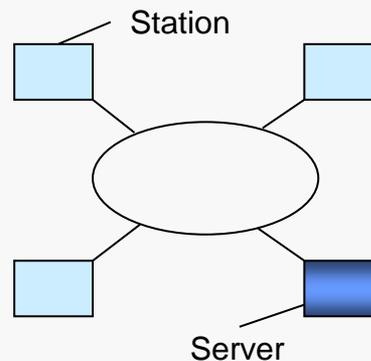
- Bereich: 10 m - 10 km
- Ausdehnung Produktionsstätten, Universitätscampus, Forschungsinstitute, Kaufhäuser, Bürohäuser usw.

● Spezifische topologische Struktur

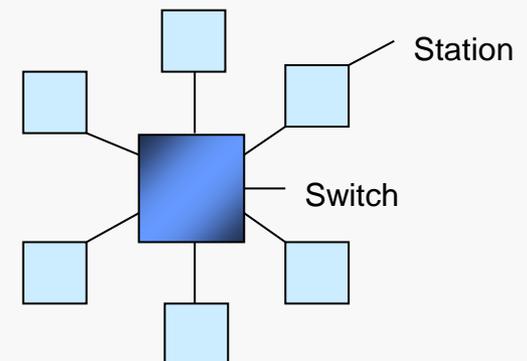
- Bus
- Ring
- Stern
- (Baum)



Bus



Ring



Stern

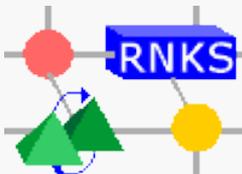
Typische Merkmale (2)

● Übertragungsraten

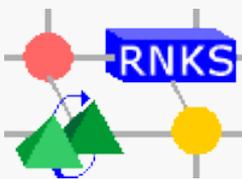
- Klassische LAN: 10 Mbit/s (Ethernet), 4 -16 Mbit/s (Tokenverfahren)
- Hochgeschwindigkeits-LAN (HS-LAN): 100 Mbit/s - 10 Gbit/s

● Übertragungsmedien

- Koaxialkabel
- verdrehte Telefonleitungen (*twisted pair*)
- Lichtwellenleiter
- Funkkanäle
 - ↳ Wireless LAN (WLAN)



C) LAN-Arten



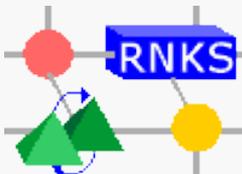
LAN-Arten

● Shared Medium LAN

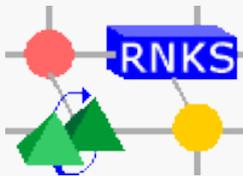
- Alle Stationen/Server nutzen einen gemeinsamen Übertragungskanal (*shared medium*)
 - ↪ Bus, Ring
 - ↪ Funkkanal (→ WLAN)
- Spezielle Zugriffsverfahren erforderlich
 - ↪ CSMA/CD, Tokenring
 - ↪ CSMA/CA (WLAN)

● Switched LAN

- Direkte Kopplung von Sender und Empfänger über einen Switch
- Stern-Topologie
- Vorrangig für Ethernet (auch Tokenring)



D) LAN-Schichtenmodell



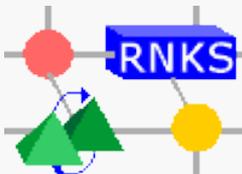
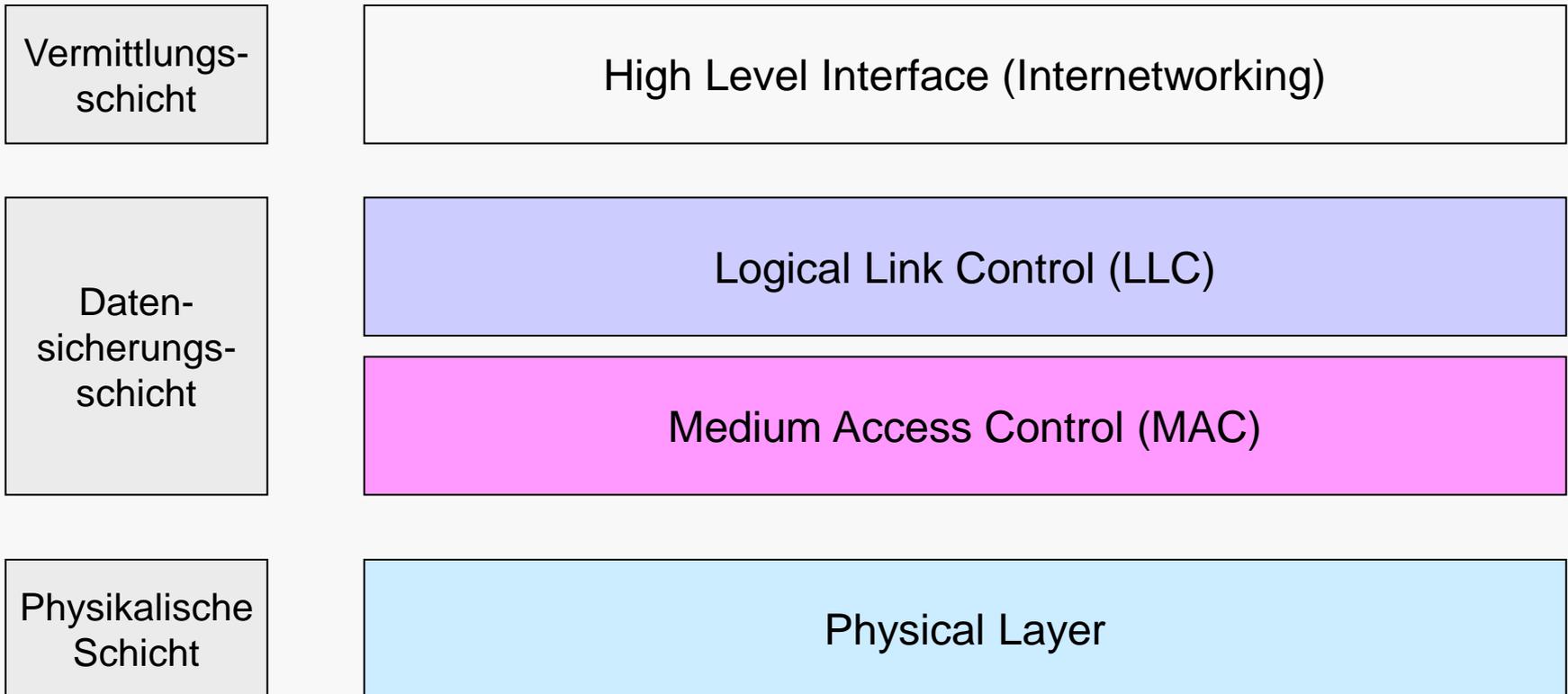
LAN-Schichtenmodell

WAN-Kommunikationsarchitekturen (OSI/RM, TCP/IP) berücksichtigten LAN-Erfordernisse nicht, da LAN später entstanden ist (ab Mitte der 70er Jahre)

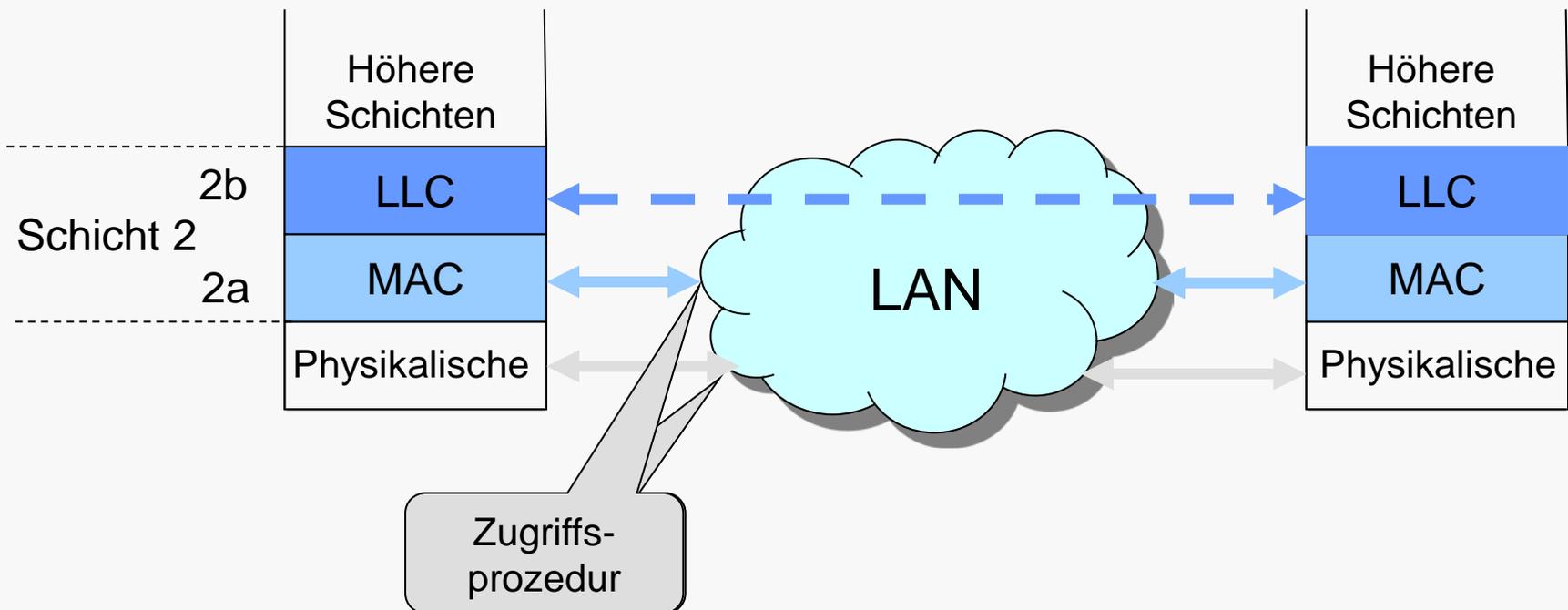
- heute verwendet: Schichtenmodell nach IEEE 802
 - OSI-Kompromisslösung
 - Unterteilung der Datensicherungsschicht in 2 Subschichten
 - ↳ LLC (*Logical Link Control*)
 - ↳ MAC (*Medium Access Control*)
 - Zugriffsverfahren wird in der MAC-Schicht und der physikalischen Schicht implementiert



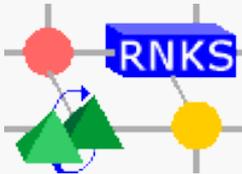
IEEE LAN-Schichtenmodell



LAN-Schichtenmodell



E) WAN-LAN-Kopplung

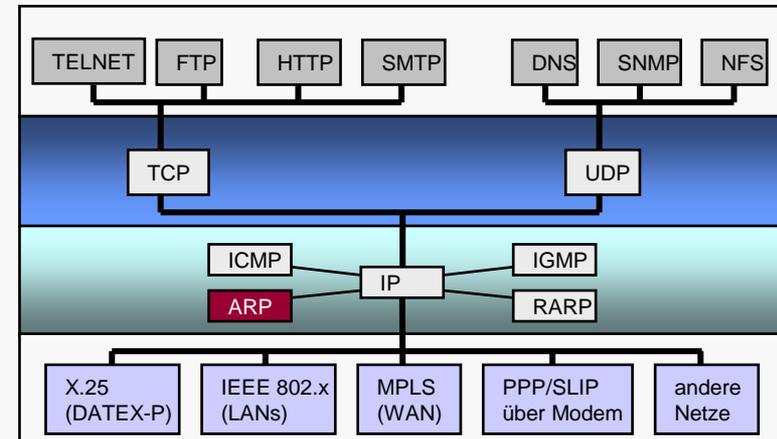


WAN-LAN-Kopplung

Wenn sich ein Endsystem eines WANs in einem lokalen Netz befindet, kann der Router das IP-Paket nicht ohne weiteres weiterleiten, da er von der IP-Adresse des Endsystems nicht dessen MAC-Adresse kennt.

● Unterschiedliche Kommunikationsparadigmen

- WAN
 - ↪ Punkt-zu-Punkt-Kommunikation (Schicht 3)
 - ↪ IP-Adresse
- LAN
 - ↪ „Broadcast“-Kommunikation (Schicht 2)
 - ↪ flache MAC-Adressen



Router kann Nachrichten in ein LAN erst weiterleiten, wenn er die MAC-Adresse des Empfängers kennt !!!



IP-Adressen vs. flache Adressen

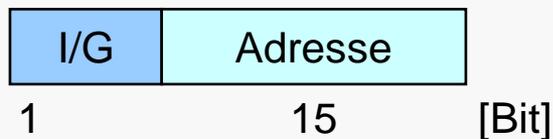
● IP-Adresse

- enthält Informationen, in welchem Netz sich der Host befindet (Netz-ID)

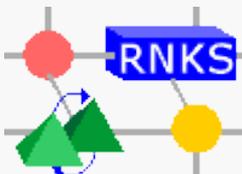


● Flache Adressen

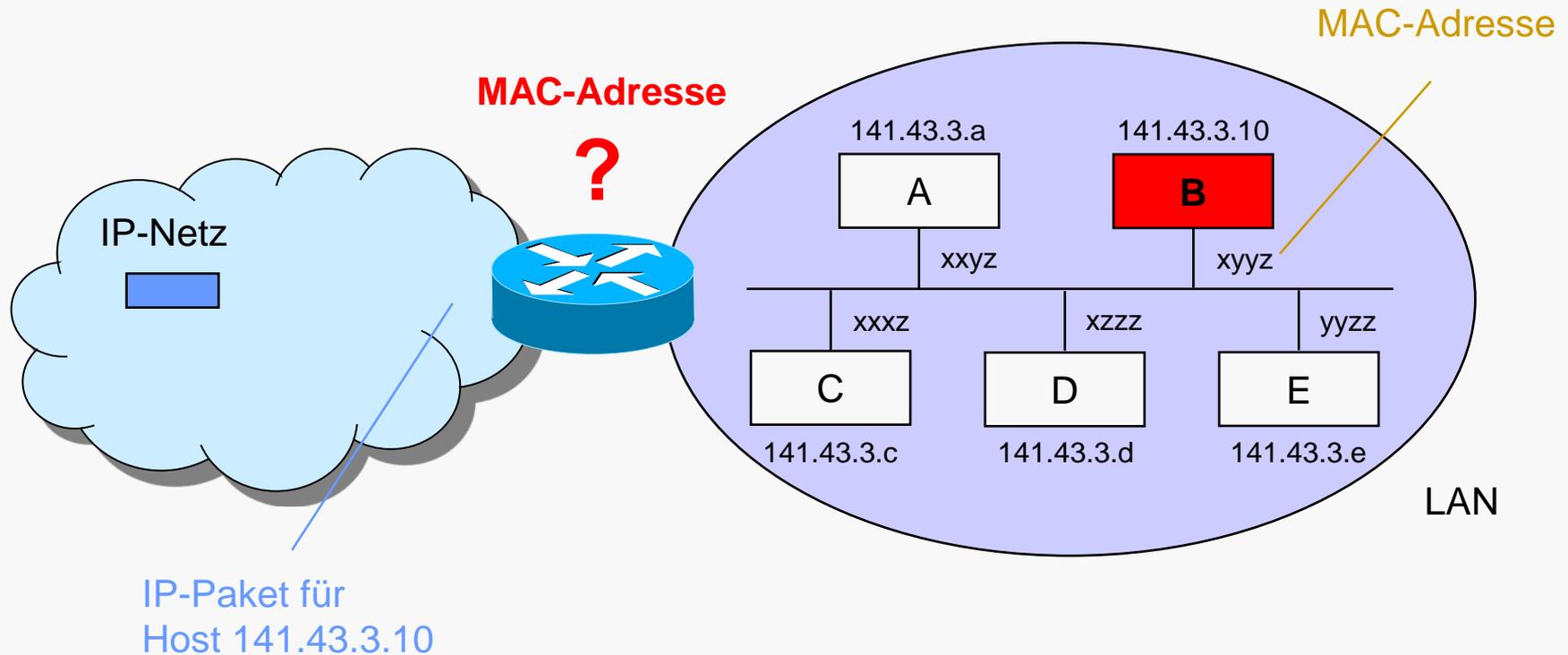
- IEEE 802 MAC-Adressen
- enthalten keine Informationen über die Lokalisation des Host im LAN
- Vergabe bei der Herstellung der Netzwerkkarte
 - ↳ weltweit eindeutig



Legende:
I/G – Individual/Group

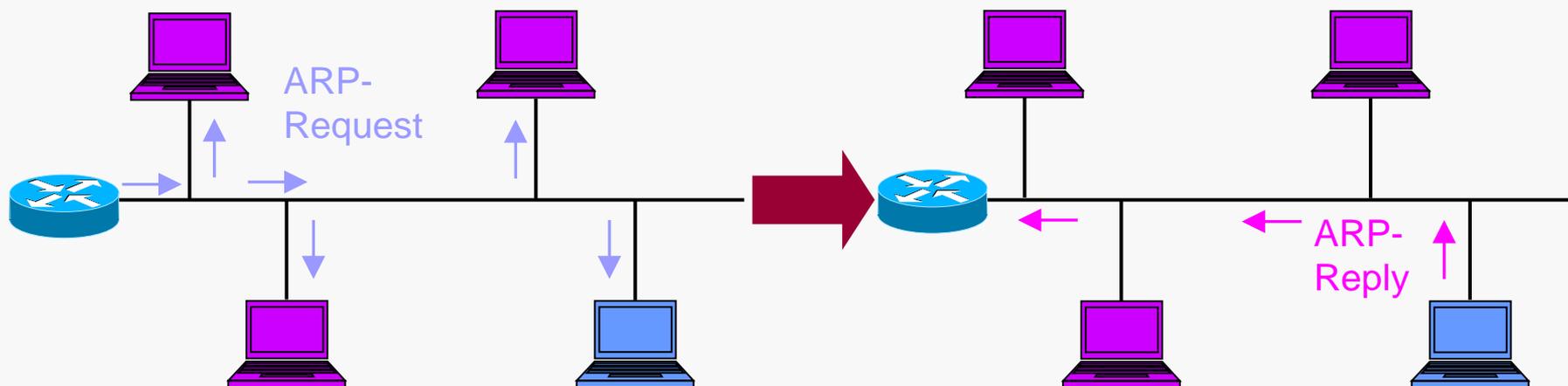


Adress-Abbildung IP-Netz/LAN



👉 Lösung: Address Resolution Protocol (ARP) (RFC 826, RFC 1027)

Prinzip des ARP¹



 **bekannte Zuordnungen werden im Router abgespeichert !!!**

 ARP Cache

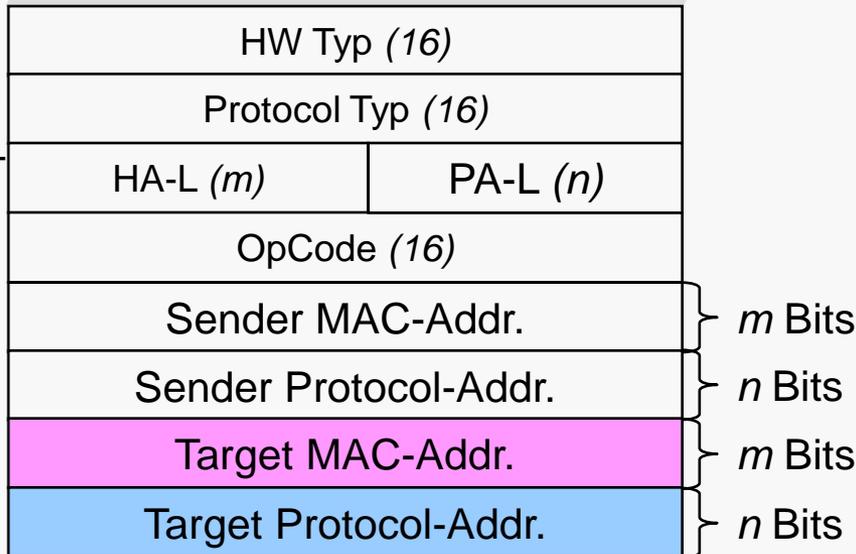
1. nach: Badach, A.; Hoffmann, E.: Technik der IP-Netze. TCP/IP incl. IPv6. Hanser-Verlag, 2007.

Aufbau *ARP Request* und *ARP Reply*¹



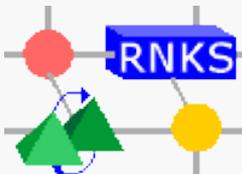
OpCode:
 1 = ARP Request
 2 = ARP Reply
 3 = RARP Request
 4 = RARP Reply

Welcher LAN-Typ ?
 Welches Protokoll ?
 Länge MAC/Protokoll-Adresse



gesuchte
 MAC-Adresse
 IP-Adresse der
 gesuchten Station

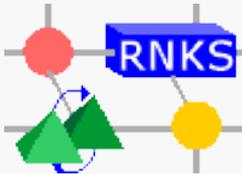
1. entnommen: Badach, A.; Hoffmann, E.: Technik der IP-Netze. TCP/IP incl. IPv6. Hanser-Verlag, 2007.



IV.2

Zugriffsverfahren

(Access Procedures)



Zugriffsverfahren

Zugriffsverfahren sind Prozeduren, mittels derer sendewillige Stationen in **Shared Medium LAN** um den Zugang zum physikalische Kommunikationsmedium konkurrieren. Ihre Notwendigkeit ergibt sich aus der Nutzung eines gemeinsamen Übertragungskanals. Sie werden in Schicht 1+2 der LAN-Kommunikationsarchitektur realisiert !!!

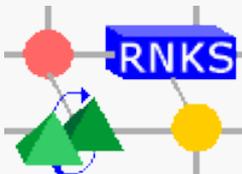
● Arten von Zugriffsverfahren

● **Stochastische Verfahren**

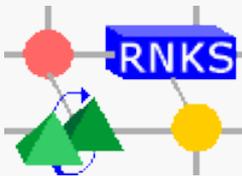
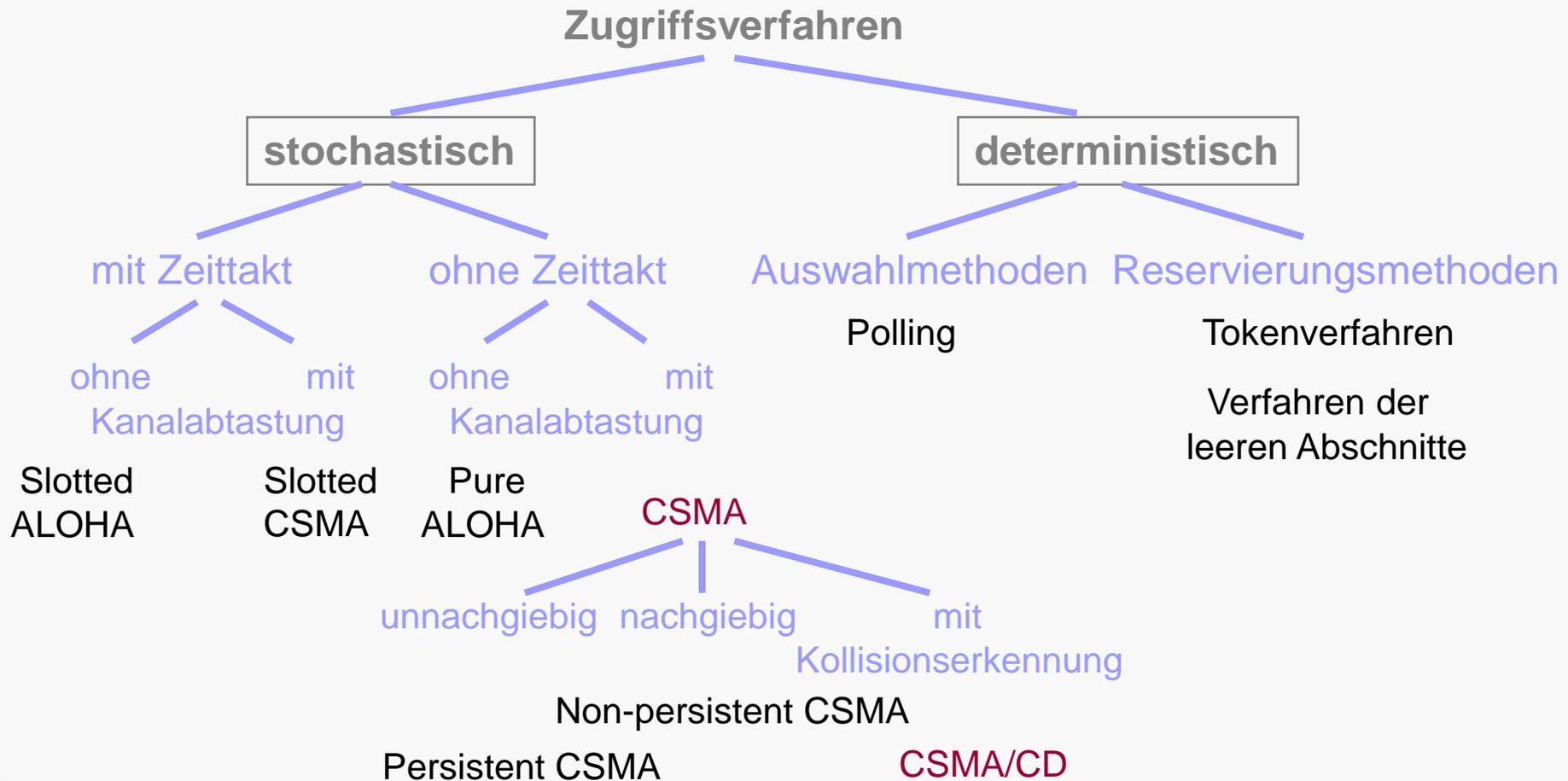
↪ sendewillige Station greift spontan auf das Medium zu

● **Deterministische Verfahren**

↪ sendewillige Station greift erst nach dem Erteilen einer Zugangserlaubnis zu



Klassifikation der Zugriffsverfahren



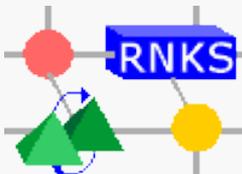
IV.2.1

CSMA/CD

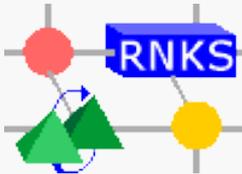
(Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection)



Tanenbaum / Wetherall 4.2.1+2
Stallings 16.2



A) Der Weg zu CSMA/CD



Vorläuferverfahren: ALOHA

- 1971/72: Kopplung Rechenzentrum der Universität von Honolulu/Hawaii mit mehreren intelligenten Terminals auf Hawaii-Insel Oahu über Satellit
 - ALOHANET, Anschluss ans ARPANET

- **Reines ALOHA** (*pure ALOHA*)

- Die Sendestation übergibt Rahmengleicher Länge mit der Frequenz f_1 an einen geostationären Satelliten. Der Satellit verstärkt die Nachrichten und sendet sie mit der Sendefrequenz f_2 zur Erde zurück, wo sie durch die mitgeführten Adressen ihre Empfängerstation erreichen.
 - ↪ Sendestation wartet auf Bestätigung (CRC-Check beim Empfänger)
 - ↪ Kollisionen (Verstümmelung der Nachrichten) bei gleichzeitigem Zugriff
 - ↪ bei Kollision: Sendewiederholung
 - ↪ bestmöglicher Ausnutzungsgrad: 18,4 %

- **Zeitgeteiltes ALOHA** (*slotted ALOHA*)

- Senden ist nur zu bestimmten Taktzeiten
 - ↪ Übertragung erfolgreich, wenn zwischen zwei Takten keine weiteren Belegungen erfolgen



Nächster Schritt: CSMA

- Mehrfachzugriff mit Signalabtastung (*Carrier Sense Multiple Access*)

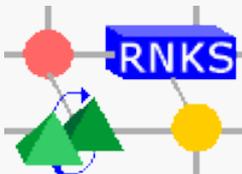
- **Anwendung:** - LAN (→ Bus-Topologien)
- terrestrische Funkübertragung

- **Prinzip:**

Die sendewillige Station “hört“ vor dem Senden den Übertragungskanal ab. Durch Abtasten einer Trägerfrequenz stellt eine sendewillige Station im Kanal bereits Nachrichtenübertragungen durch andere Stationen fest, so hält sie ihre eigene Nachricht zurück bis der Kanal frei ist.

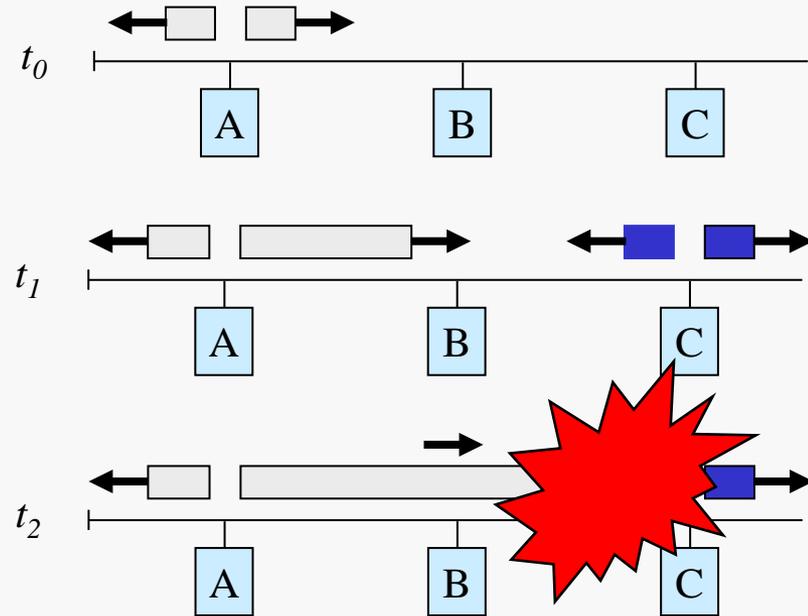


erhebliche Reduzierung der Kollisionen

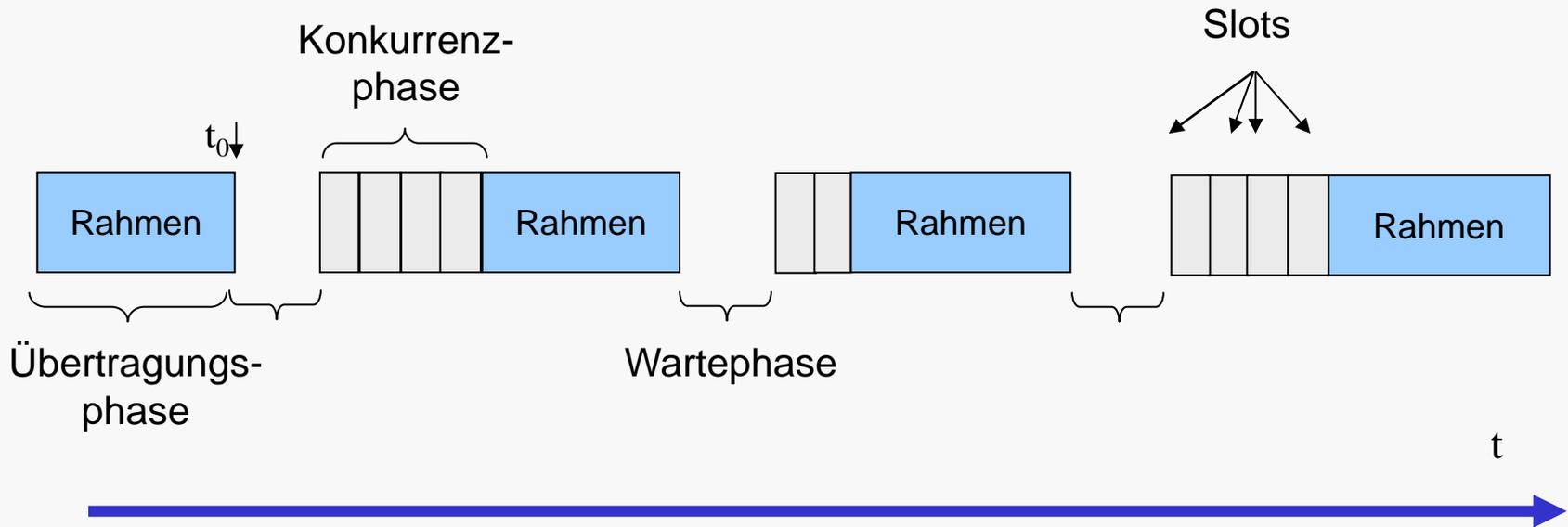


Kollisionsentstehung

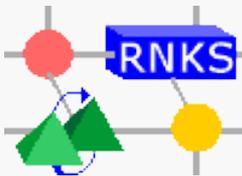
- *entscheidender Faktor*: Laufzeit der Signale im Medium
 - ↪ Ausbreitungsverzögerungszeit
- zwei Stationen senden fast gleichzeitig
 - ↪ beide stellen einen freien Kanal fest
- **Verwundbarkeitsintervall** oder **Kollisionsfenster**
 - Zeit bis alle Stationen über das Vorhandensein einer Nachricht auf dem Kanal informiert sind.



Prinzip des CSMA-Zugriffs¹

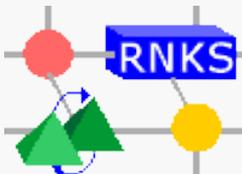
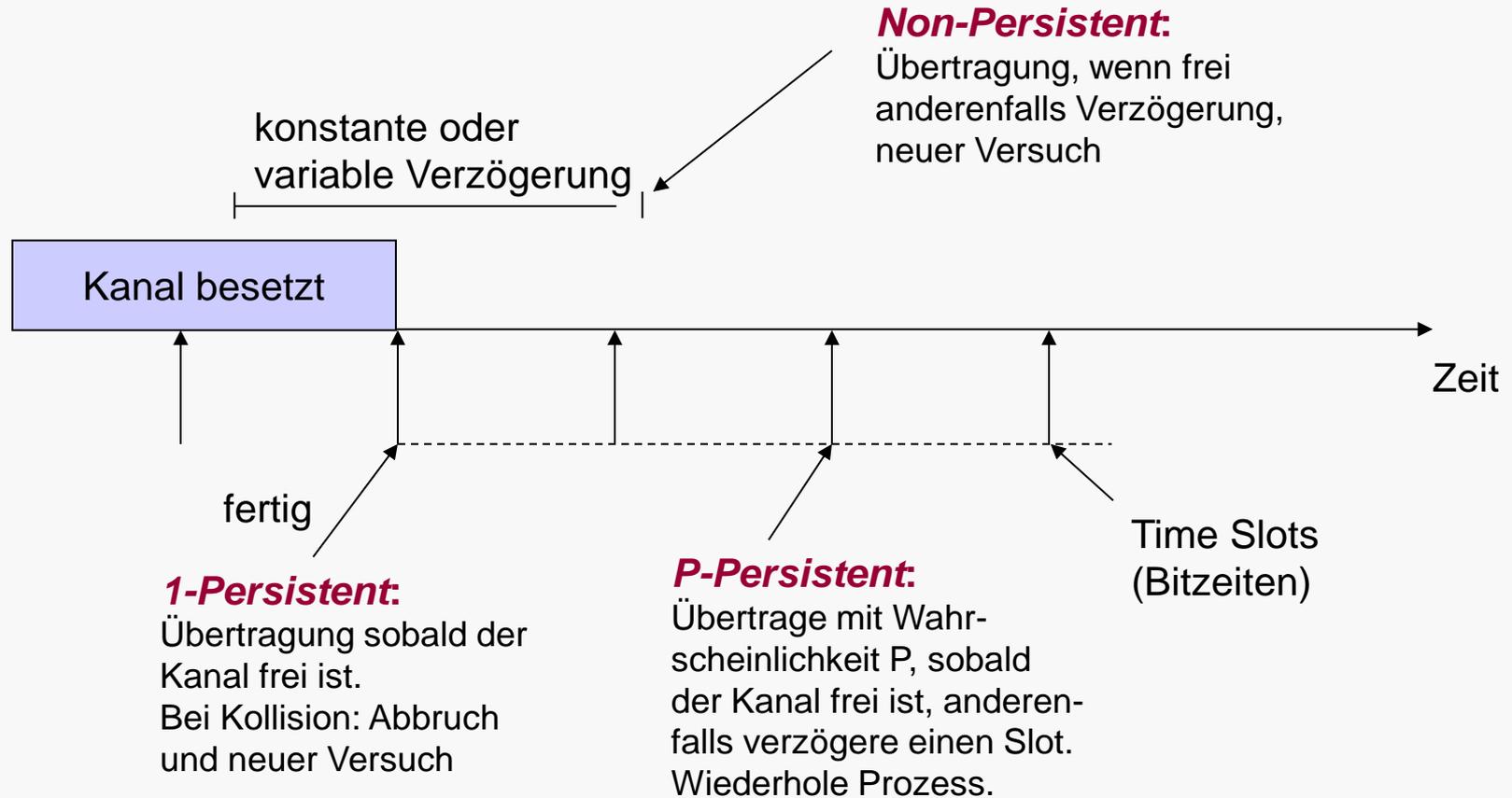


1) **Beachte:** Die Größe der Abschnitte entspricht nicht den zeitlichen Relationen !!!



CSMA-Varianten

Wann auf den Kanal zugreifen?



p-Persistent CSMA vs. Non-Persistent CSMA

(*p*-starres CSMA) (nachgiebiges CSMA)

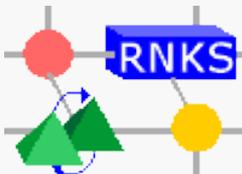
```
loop{
  Abhören des Kanals
  if (Kanal frei)
    {Senden mit Wahrscheinlichkeit p1)
      if (keine Kollision)
        {exit loop}
    }
}
```

1) bzw. zurückstellen um ein Zeitintervall mit der Wahrscheinlichkeit $q = 1 - p$

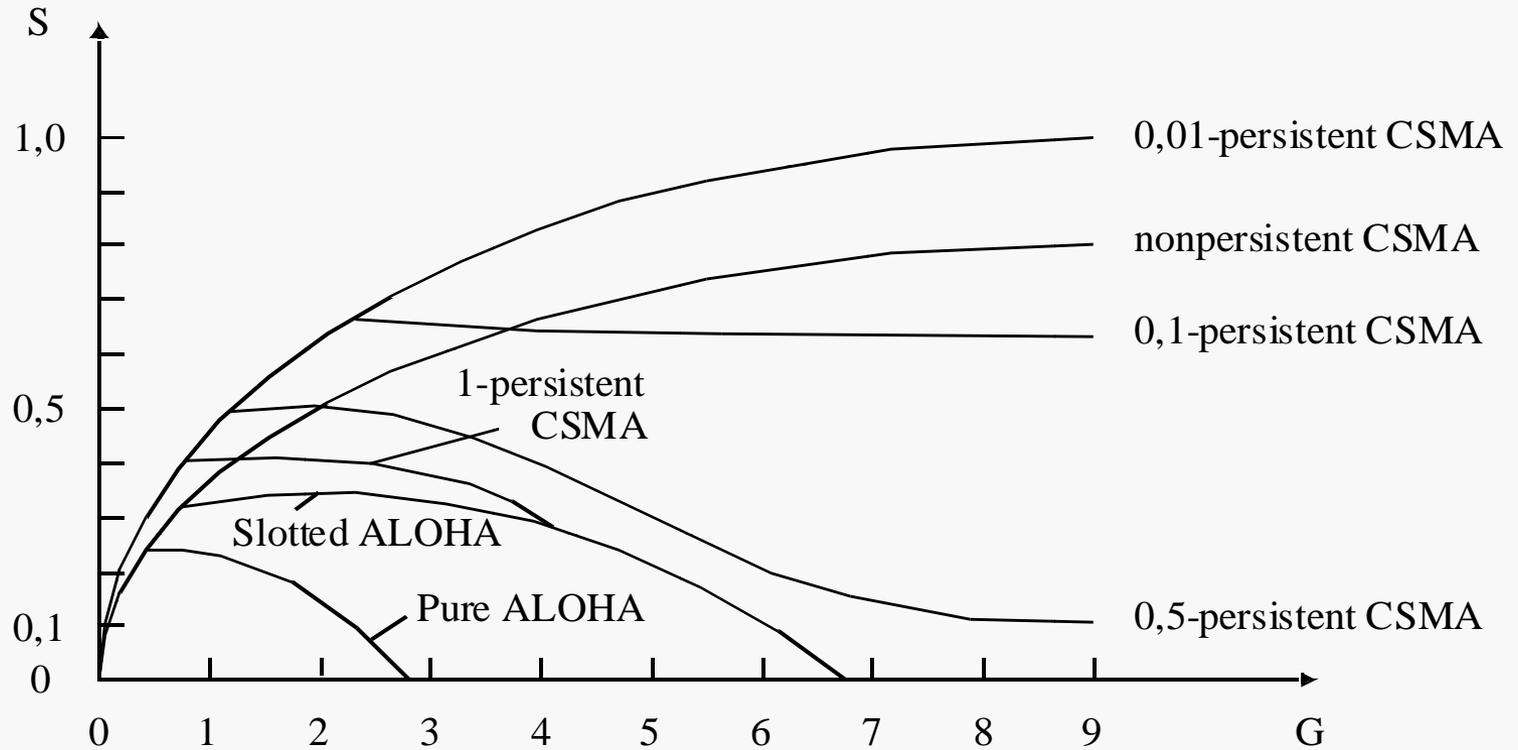
 Die sendewillige Station bewirbt sich mit der Wahrscheinlichkeit p starr um den Kanal !!!

```
loop{
  Kanal abhören
  if (Kanal frei)
    {Senden
      if (keine Kollision)
        {exit loop}
      else gewisse Zeit warten
    }
  else gewisse Zeit warten
}
```

 Wartezeit entspricht der Dauer einer Kollisionsauflösung !



Durchsatz ALOHA/CSMA¹



Durchsatz: $S=1/(1+1/G)$

G = Last (Poisson-Verteilung)

¹) entnommen: Stallings, W.: Data and Computer Communications (6th ed.). Prentice Hall, 2000.



Von CSMA zu CSMA/CD

● CSMA

● keine explizite Kollisionsanzeige

- ↪ bei Kollision bleibt Medium für die Dauer des Sendens beider Rahmen unbenutzbar
- ↪ beträchtlicher Zeitverlust bei großen Frames

● CSMA/CD

● explizite Kollisionsanzeige

↪ CD – Collision Detection

- ↪ bei Kollision Aussenden eines JAM-Signals, das alle Stationen über Kollision informiert

↪ Abbruch Sendevorgang

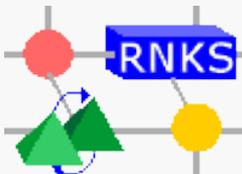
● exponentieller Backoff-Algorithmus für die Entscheidung für den erneuten Buszugriff



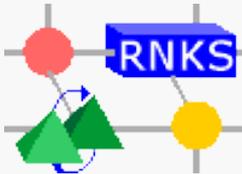
CSMA/CD

```
loop{  
  Abhören des Kanals  
  if (Kanal frei)  
    {Nachricht senden  
    Abhören Kanal beim Senden  
    if (Kollision innerhalb  $\Delta t$  )  
      {Stoppen Übertragung  
      Aussenden JAM-Signal, um Kollision anzuzeigen  
      wait  $T_v$  // → Exponentieller Backoff-Algorithmus  
      }  
    else exit loop  
  }  
}
```

 Δt entspricht der doppelten Signallaufzeit (Kollisionsfenster)



B) MAC-Prozedur – Konfliktbehafteter Betrieb



Anzeigen einer Kollision

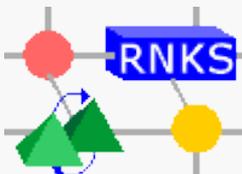
Sendedatenverwaltung

● Anzeige einer Kollision

- Senden eines **JAM-Signals** an **alle** Stationen durch Station, die Kollision zuerst erkennt

↳ *Ziel:* Kollisionsverstärkung

☞ Kollisionserkennung erfordert, dass die minimale Sendedauer eines MAC-Frames mindestens doppelt so groß sein muss wie die Signalausbreitungszeit zwischen den 2 maximal entfernten Stationen !!!

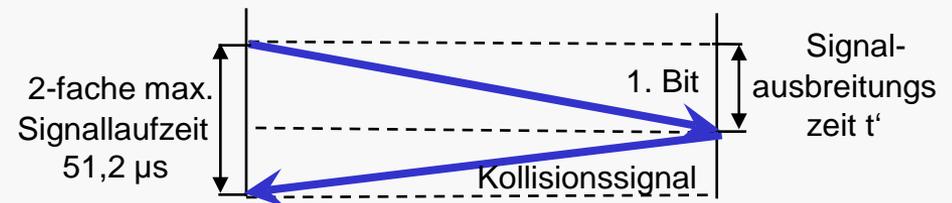


Kollisionsfenster¹

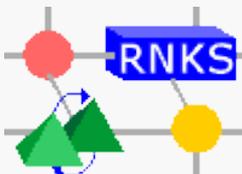
- **Problem: Kollision am Ende des Busses**

- t' - Signalausbreitungszeit
- Die sendende Station erkennt eine Kollision erst nach der doppelten Signallaufzeit: $\tau = 2t'$
- Kollisionssignal muss ankommen, bevor das letzte Frame-Bit gesendet wird

↪ **Kollisionsfenster**



1. entnommen: Badach, A.; Hoffmann, E.; Knauer, O.: High Speed Internetworking. Addison-Wesley, 1994.



Minimale Framelänge

● Problem: Kollision am Ende des Busses

- Konfliktparameter K

$$K = \frac{\text{zweifache Signallaufzeit}}{\text{Frameübertragungszeit}}$$

$$K = \frac{\text{zweifache Signallaufzeit}}{\text{Framelänge/Übertragungsrate}}$$

↳ es muss gelten $K \leq 1$ ¹⁾

☞ Minimale Framelänge erforderlich !!!

$$LF_{\min} = \mu * \tau$$

$$= 10^7 \text{ Bit/s} * 51,2 * 10^{-6} \text{ s}$$

$$= 512 \text{ Bit} = \mathbf{64 \text{ Byte}}$$

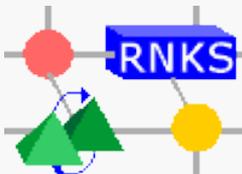
mit - LF_{\min} - minimale Framelänge

- τ - Kollisionsfenster

↳ 2-fache max. Signallaufzeit

- μ - Übertragungsrate für ein 2000 m Segment (Bit/s)

1) bei $K > 1$ kann der Sender die gesamte Nachricht senden, ohne dass eine Kollision erkannt wird



Übertragungsrate, minimale Framelänge versus Segmentlänge

Übertragungsrate (Mbit/s)	10	100	1000	
			entweder	oder
Minimale Framelänge (byte)	64	64	64	640
Segmentlänge (m) (Kollisionsdomäne)	2000	200	20	200

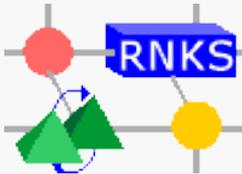
Ethernet

Fast Ethernet

Gigabit-Ethernet



C) IEEE 802.3-Parameter

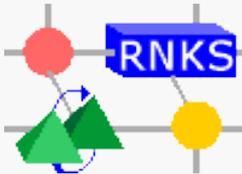


IEEE 802.3-Parameter (CSMA/CD)

Parameter	Wert
2-fache max. Signallaufzeit (<i>Slot time</i>)	51,2 μ s
Inter Frame Gap	9,6 μ s
Attempt Limit	16
Backoff Limit	10
max. Framegröße	1.518 byte
min. Framegröße	64 byte
Adressgröße	16/48 bit

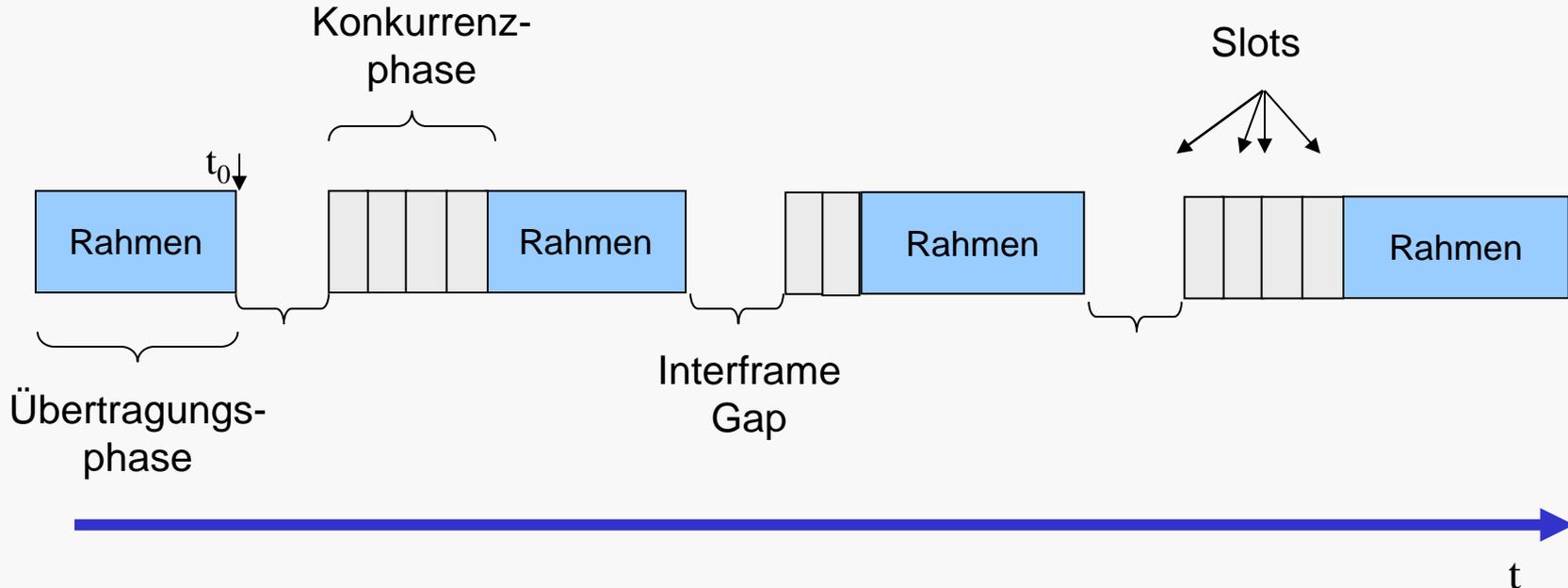


D) Binärer Exponentieller Backoff-Algorithmus



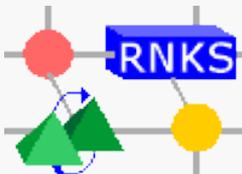
CSMA/CD-Zugriff¹

(Wiederholung)



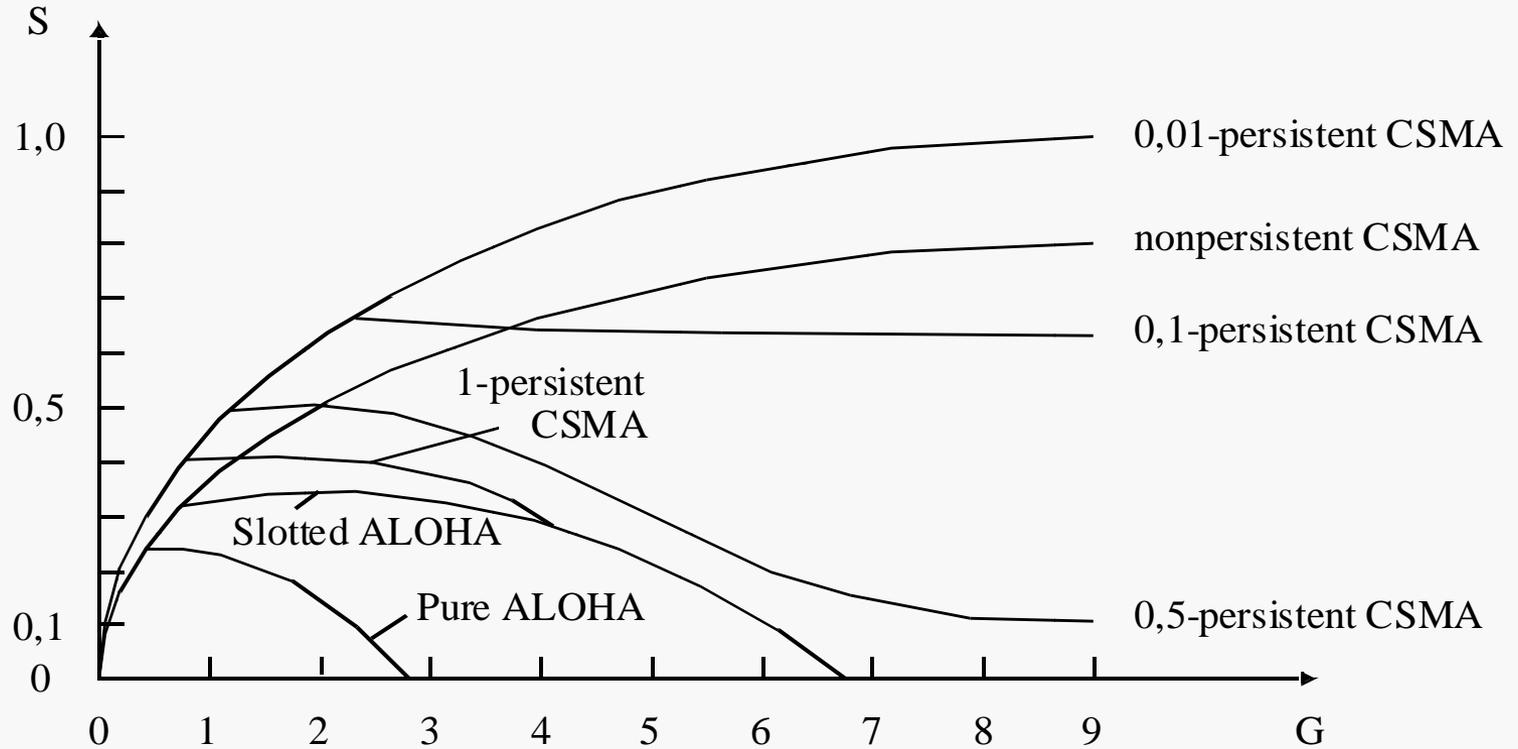
Wie kann die Konkurrenzphase gestaltet werden, damit Stationen nach einer Kollision eine faire Zugriffschance erhalten ?

1) **Beachte:** Die Größe der Abschnitte entspricht nicht den zeitlichen Relationen !!!



Durchsatz ALOHA/CSMA¹

(Wiederholung)

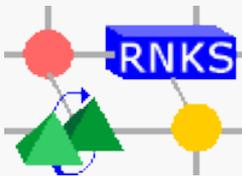


Durchsatz: $S=1/(1+1/G)$

$G = \text{Last (Poisson-Verteilung)}$

Nachgiebige Verfahren zeigen ein besseres Leistungsverhalten !!!

¹⁾ entnommen: Stallings, W.: Data and Computer Communications (6th ed.). Prentice Hall, 2000.



Binärer Exponentieller Backoff-Algorithmus

Algorithmus zur Bestimmung des Zeitintervalls für einen erneuten Sendeversuch einer Station nach einer Kollision.

- **Sendepause:** Vielfaches eines Slots

- nach 1. Kollision: Stationen warten 0 oder 1 Slot ($0 - (2^1 - 1)$)

☞ Wenn zwei Stationen zufällig die gleiche Zahl von Slots warten, kollidieren sie wieder !!!

- nach 2. Kollision ($p = 0,5$): Stationen warten zufällig $0 - (2^2 - 1)$ Slots

- nach 3. Kollision ($p = 0,25$): Stationen warten zufällig $0 - (2^3 - 1)$ Slots

- nach i . Kollision: Stationen warten zufällig $0 - (2^i - 1)$ Slots

- ab 10. Kollision: Einfrieren der max. Slotanzahl auf 1023 (*backoff limit*)

- max. Anzahl von Versuchen: 16 (→ Fehlermeldung)

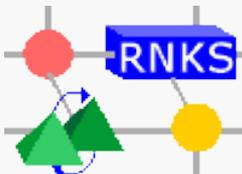


IV.2.2

Tokenverfahren



Tanenbaum / Wetherall 4.2.3



Tokenverfahren

Tokenverfahren sind deterministische Verfahren (d.h. kollisionsfrei), bei denen ein spezielles Datenpaket – das **Token** – rotiert. Der Besitzer des Token hat Senderecht. Die Haltezeit eines Tokens ist begrenzt.

● Verfahren

● mit logischem Ring

- ↪ Tokenbus (IEEE 802.4) (Praktische Einsatz: ARCNET (80er Jahre))
- ↪ nicht mehr eingesetzt

● mit physikalischem Ring

- ↪ Tokenring (IEEE 802.5)

● Zusätzlicher Managementaufwand zur Funktionserhaltung

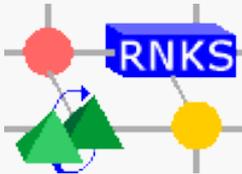
- Ringinitialisierung (Netz-Start, Neustart nach Zusammenbruch)
- Einschluss/Ausschluss von Stationen
- Fehlerbehandlung (Tokenverlust, Tokenduplizierung, “gebrochener“ Ring)



A) Tokenbus

(IEEE 802.4)

(im Rückblick)



Tokenbus

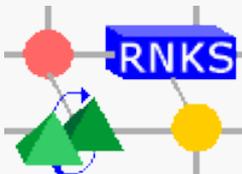
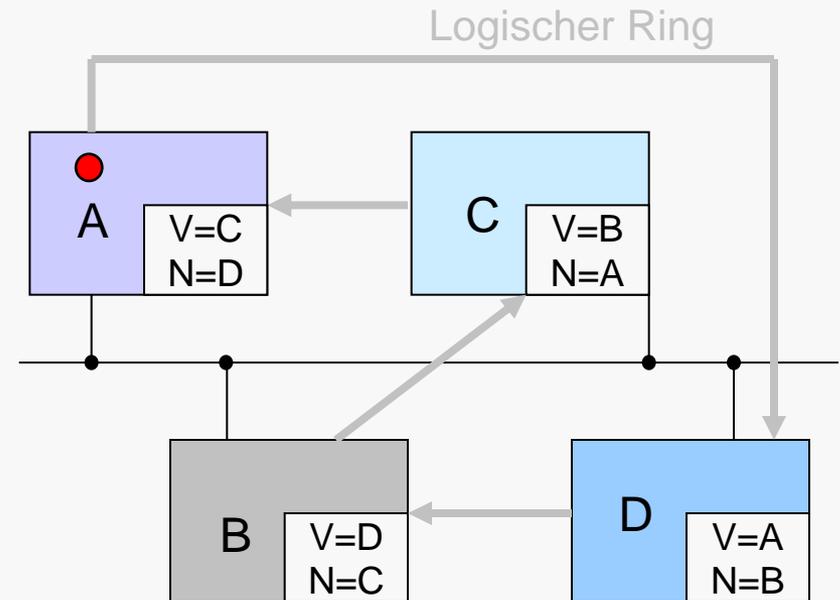
- Stationen bilden einen logischen Ring

- Jede Station kennt Vorgänger und Nachfolger
 - ↪ spezielles Datenpaket
- Auf dem Ring rotiert ein Token (Marke)
 - ↪ spezielles Datenpaket
- Besitz des Tokens erlaubt den Buszugriff
 - ↪ Senden eines oder mehrerer Rahmen
 - ↪ Abfragen von Stationen / Empfang von Antworten
 - ↪ Stationen ohne Token dürfen Bus nur zur Beantwortung von Anfragen benutzen
 - ↪ Weitergabe des Tokens nach fester Zeit



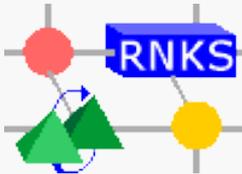
Obwohl im LAN-Bereich nicht mehr genutzt, nach wie vor wichtiges Konzept in verteilten Systemen !!!

↪ z. B. geordnete Kommunikation



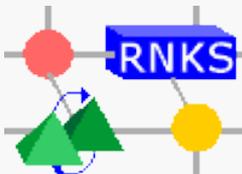
B) Tokenring

(IEEE 802.5)



Tokenring

- Ringtopologie mit kreisendem Token
- aktive Monitor-Station (→ Auswahl einer Station am Ring)
 - *Aufgaben*
 - ↳ Tokenverwaltung
 - ↳ *Behandlung* Tokenverlust/-dopplung
- **Verfahren**
 - Single Token-Verfahren (4 MBit/s)
 - Early Token Release (16 MBit/s)



Single Token

- Sendewillige Station wartet auf (Frei-)Token
- Token wird vom Ring genommen und Daten werden gesendet
- Jede Station, die die Daten passieren, empfängt und überprüft die Daten.
 - wenn nicht Zielstation: Weiterleiten
 - **wenn Zielstation:** Kopieren der Daten in die Station
- Quellstation entfernt Daten
 - Token wird wieder auf den Ring gegeben

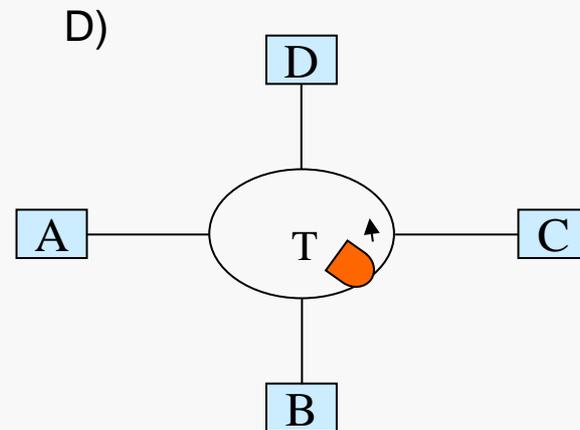
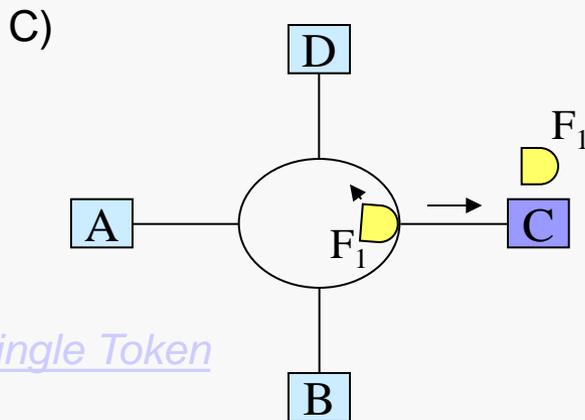
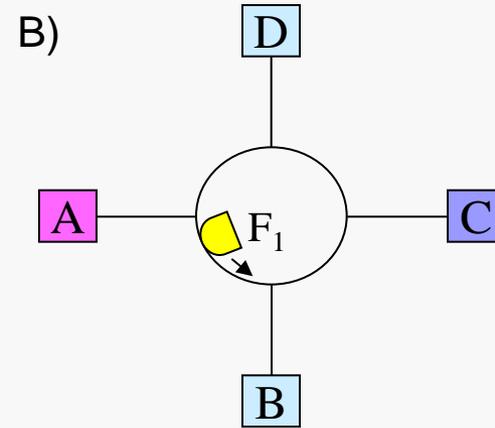
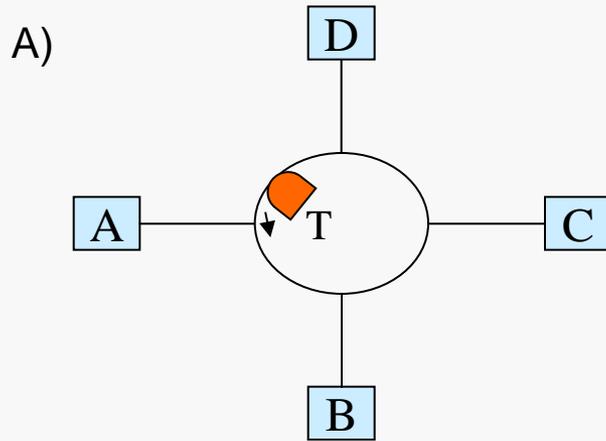


Jeder Sender muss das Token nach einer bestimmten Zeit weitergeben !!!

↳ Token Holding Time (THT)

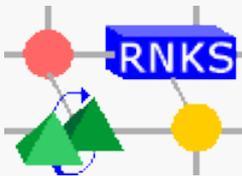


Single Token-Verfahren



T - Token
F - Frame

[Animation Single Token](#)

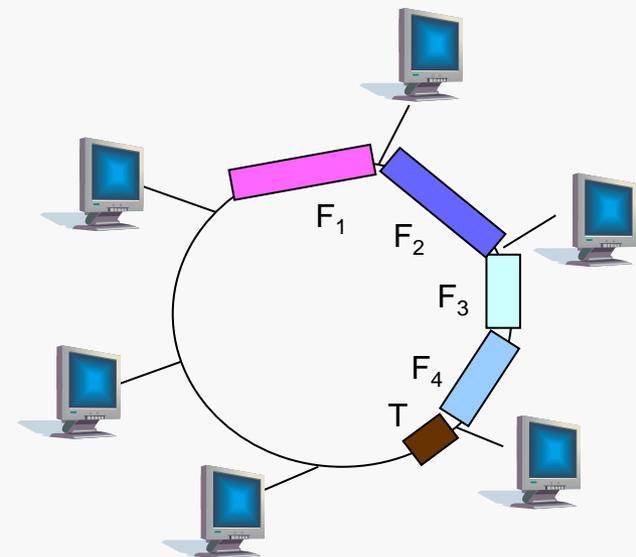


Early Token Release

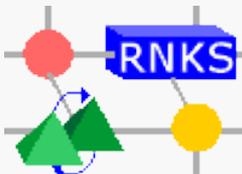
Das Single Token Verfahren erweist sich bei größeren Netzen (> 2000 m) als ineffizient, da der Ring mit der Übertragung nur eines Rahmens schlecht ausgelastet ist. Die Tokenumlaufzeit erhöht sich und die Wartezeit der sendewilligen Stationen, verzögert sich erheblich. Die Übertragungsrates bleibt mit 4 MBit/s begrenzt.

● Early Token Release

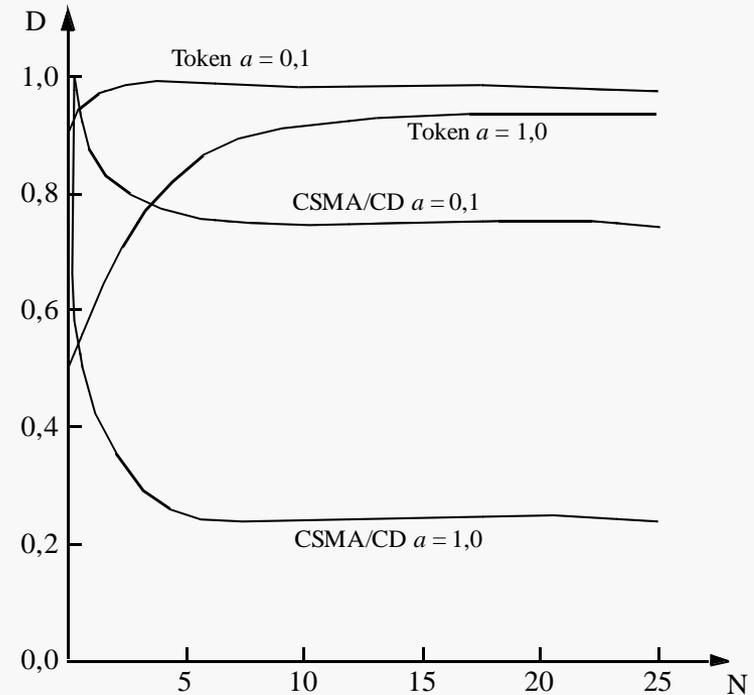
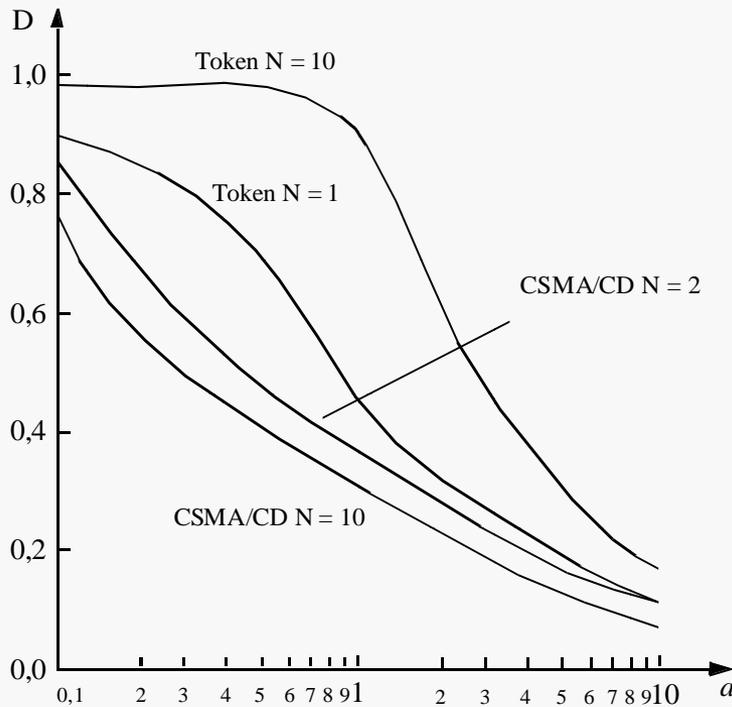
- sendende Station hängt (Frei-) Token an die Daten an
- weitere Stationen können Datenrahmen anhängen
 - ☞ mehrere Rahmen auf dem Ring
- Anwendung z. B. auch in FDDI (1. HS-LAN)



Legende: T –Token
F - Frame



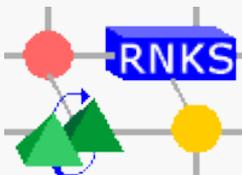
Leistungsverhalten CSMA/CD vs. Tokenring¹



Legende:

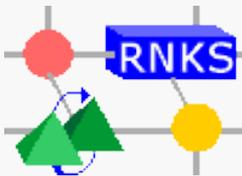
- D - Durchsatz
- N - Zahl der aktiven Stationen
- a - maximale (normierte) Ausbreitungsverzögerung

entnommen: Stallings, W.: Data and Computer Communications (4th ed.). Prentice Hall, 1994



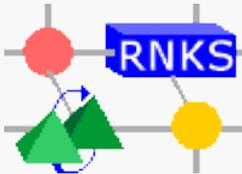
Weiterentwicklungen Tokenring

- Token Ring Switches
 - Full Duplex Token Ring (*dedicated token ring*)
 - ↪ IEEE 802.5r
 - ↪ 32 Mbit/s
 - High Speed Token Ring
 - ↪ IEEE 802.5t
- ☞ **Die Bedeutung der Tokenring-Verfahren ist stark rückläufig !!!**



IV.2.3

IEEE LAN-Standards



IEEE LAN-Standards

Die wichtigsten LAN-Zugriffsverfahren sind heute standardisiert. Der Grund dafür lag in der Vielzahl von Zugriffsverfahren, die in den 70/80er Jahre existierten. VLSI-Schaltkreise für LAN-Anschlüsse sind aber nur ökonomisch, wenn ein großer Absatzmarkt gesichert ist. Deshalb erfolgte eine Konzentration auf wenige Verfahren.

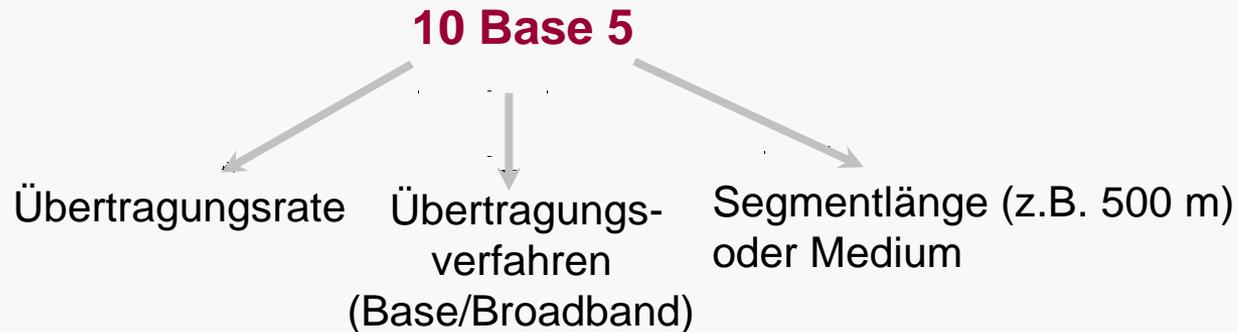
- LAN-Standardisierung durch die Projektgruppe 802 des *Institute for Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*
- LAN-Standards (klassische LAN):
 - LLC IEEE 802.2 / ISO IS 8802/2
 - CSMA/CD IEEE 802.3 / ISO IS 8802/3
 - Tokenbus IEEE 802.4 / ISO IS 8802/4
 - Tokenring IEEE 802.5 / ISO IS 8802/5



IEEE LAN-Standards

Standard	Projektgruppe
802.1	Higher Level Interface
802.2	Logical Link Control (LLC)
802.3	CSMA/CD
802.4	Token Bus
802.5	Token Ring
802.6	Metropolitan Area Network (MAN)/DQDB
802.7	Broadband Technical Advisory Group
802.8	Fiber Optic Technical Advisory Group
802.9	Intergrated Services LAN (ISLAN)
802.10	Standard for Interoperable LAN Security (SILS)
802.11	Wireless LAN (WLAN)
802.12	Demand Priority (100Base-VGAnyLAN)

Bezeichnungen in IEEE LAN Standards



Beispiele: 10 Base 5
10 Base T
10 Base F
10 Broad 36
100 Base FX

Legende: T – Twisted Pair
F – Fibre Optics



Die IEEE-Standards der Zugriffsverfahren umfassen stets die MAC- und die physikalische Schicht !!!

