

Brandenburgische Technische Universität Cottbus



Brandenburgische  
Technische Universität  
Cottbus

Lehrstuhl Rechnernetze und  
Kommunikationssysteme

---

# Rechnernetze

## Eine (kurze) Einführung

Cluj, Wintersemester 2019/20

Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut König

---

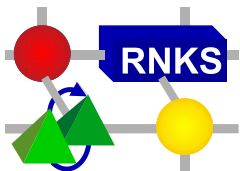
## IV.2

# Drahtlose lokale Netze

*(Wireless Local Area Networks, WLANs)*



Tanenbaum / Wetherall 4.4  
Stallings 17



---

# Wireless LANs

**Drahtlose lokale Netze** sind Shared Medium LANs, die einen Funkkanal als gemeinsames Medium nutzen.

## ● WLAN-Familien

### ● IEEE 802.11

↳ weitverbreitetste Familie drahtloser LANs

### ● Alternativer Ansatz: HIPERLAN (*High Performance Radio Local Area Network*)

↳ Standardisierung durch ETSI

→ hat sich am Markt nicht durchgesetzt !!!

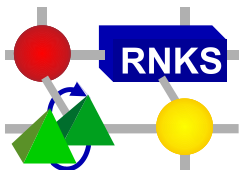
## ● Wi-Fi Alliance (*Wireless Fidelity*)

● Industrie-Konsortium aus über 300 Unternehmen

● Produkte verschiedener Hersteller auf der Basis des IEEE-802.11-Standards

↳ Interoperabilität

↳ <http://www.wi-fi.org/>

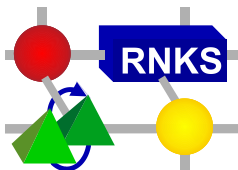


# Datenraten

(Bruttowerte)

IEEE 802.11 <sup>1</sup>	2 Mbps maximal
IEEE 802.11a	54 Mbps maximal (108 Mbps bei 40 MHz Bandbreite proprietär)
IEEE 802.11b	11 Mbps maximal (22 Mbps bei 40 MHz Bandbreite proprietär, 44 Mbps bei 60 MHz Bandbreite proprietär)
IEEE 802.11g	54 Mbps maximal (g+ =108 Mbps proprietär)
IEEE 802.11h	54 Mbps maximal (108 Mbps bei 40 MHz Bandbreite)
IEEE 802.11n	6,9 Gbps,, netto 600 Mbps (Verwendung von MIMO)
IEEE 802.11ad	6,7 Gbps (60 GHz-Band), 10m Reichweite

1) Nicht mehr genutzt

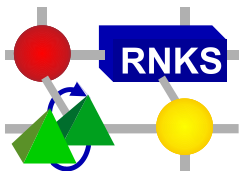




---

## IV.2.1

# Was unterscheidet die drahtlose und mobile Kommunikation von der Festnetz-kommunikation ?



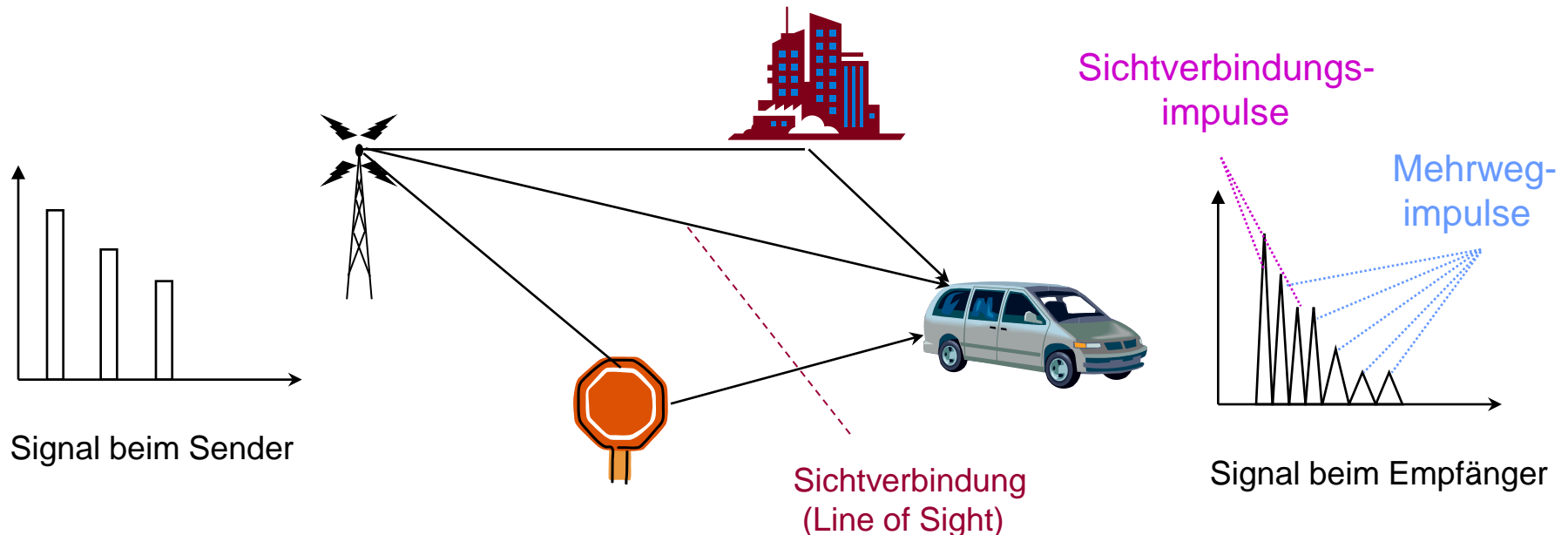
# Unterschiede zur Festnetzkommunikation (1)

## ● Mehrwegausbreitung (*multipath propagation*)<sup>1</sup>

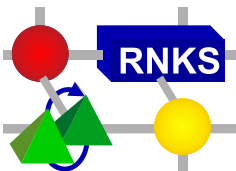
● Signale werden nicht nur in der Sichtrichtung verbreitet

↳ Interferenzen durch Reflexion, Beugung, Streuung usw. an Gegenständen

↳ führt **Intersymbolinterferenzen (ISI)**



1) entnommen Schiller, J.: Mobilkommunikation. Pearson Studium, 2003



---

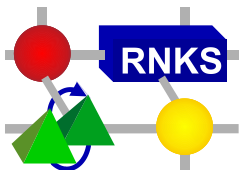
# Unterschiede zur Festnetzkommunikation (2)

## ● Regulierte Frequenzvergaben

- nur relativ wenige Frequenzbereiche können aus technischen und politischen Gründen genutzt werden
  - ↪ effiziente Nutzung der Frequenzbereiche erforderlich
- ISM-Band: freie Bereiche für WLAN- und WPAN-Nutzung
  - ↪ siehe nächste Folie

## ● Geringere Bandbreiten

- deutlich niedriger im Vergleich zu Festnetzen
- Kbit-Mbit/s (lokal) vs. GBit-TBit/s
  - ↪ effizientere Kommunikationsprotokolle erforderlich

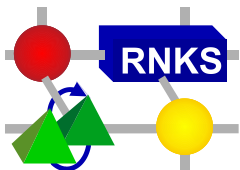
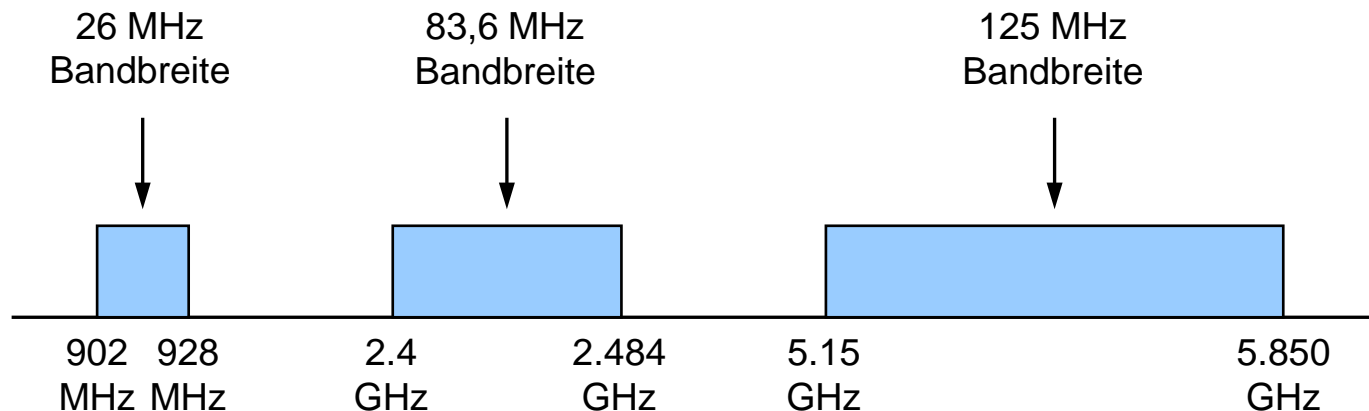


# ISM Wireless Band

Im elektromagnetischen Spektrum sind durch staatliche Regulierung drei Bänder für die Nutzung in Industrie, Wissenschaft und Medizin freigehalten worden.

## ● ISM-Band (*Industrial, Scientific, Medical*)

- Nutzung für WLAN und WPAN

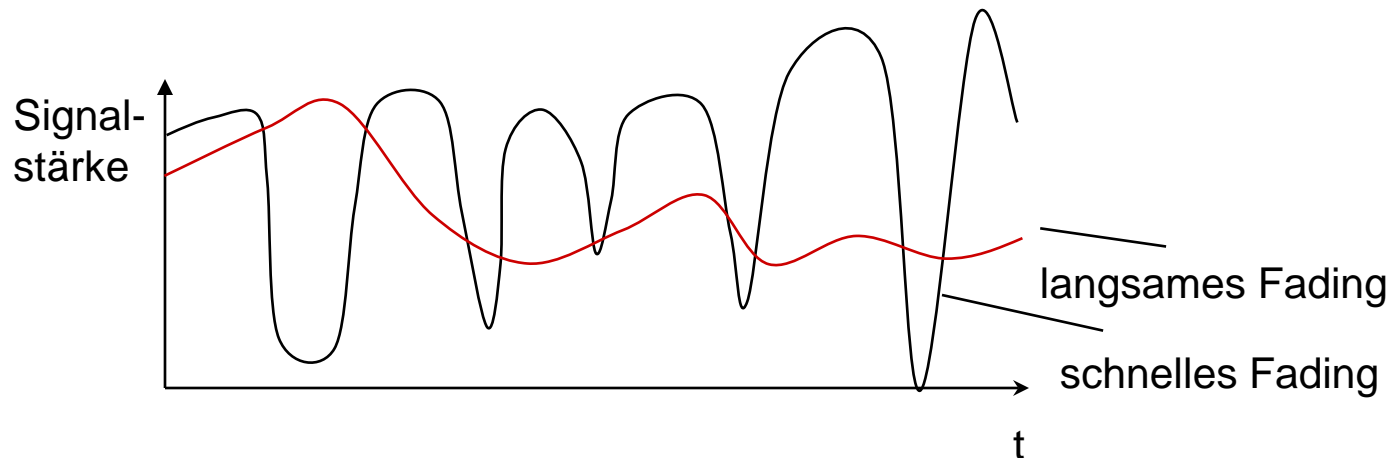


# Unterschiede zur Festnetzkommunikation (3)

## ● Höhere Fehleranfälligkeit

### ● Beeinflussung der Signale durch Umgebung

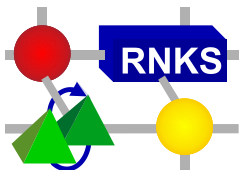
- ↪ elekt. Motoren, Blitze u.a. (Elektrosmog)
- ↪ Effekte durch Streuung, Brechung, Abschattung, Beugung, Freiraumdämpfung
- **Signalschwund (fading)**
  - Langsames Fading: Fading durch Überlagerung verschiedener Ausbreitungsphänomene an terrestrischen Objekte
  - Schnelles Fading: Fading aufgrund der verwendeten Frequenz (Mehrwegausbreitung, Dopplereffekt)



---

# Unterschiede zur Festnetzkommunikation (4)

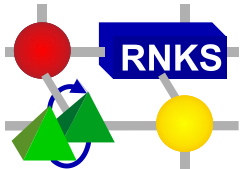
- **Sehr große Schwankungen in der Übertragungsqualität**
  - Starke Übertragungsverzögerungen (→ *delay*)
    - ↪ bis zu mehreren Sekunden (→ Ursache: u.a. Fehlerkorrekturverfahren)
  - große Verzögerungsschwankungen (→ *jitter*)
  - richtungsabhängig
- **Geringere Sicherheit, einfachere Angriffsmöglichkeiten**
  - Abhören von Übertragungen
  - Simulieren von Sendestationen
- **Begrenzte Energie der mobilen Stationen**
  - erfordert effiziente Protokolle / -Implementierungen
- **Mobilität der Nutzer**



---

# IV.2.2

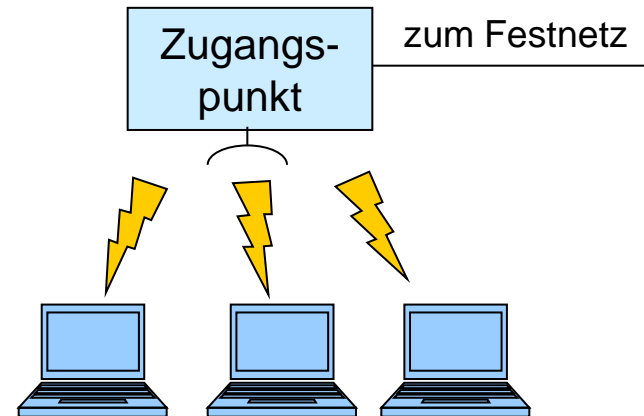
## WLAN - Arten



# Arten von WLAN<sup>1</sup>

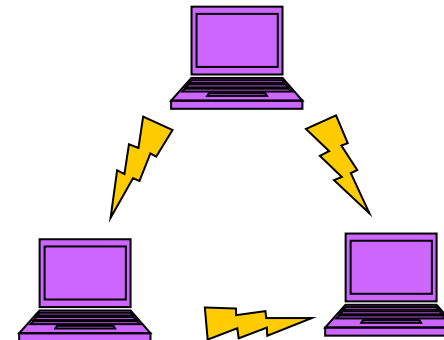
## ● Infrastrukturnetze

- mit Basis-Station
- **Zugangspunkt** (*access point*)
  - ↳ öffentlich: **Hot Spot**
- Zugang zu Festnetz über Ethernet

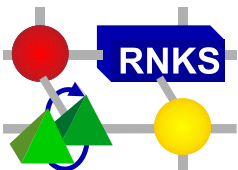


## ● Ad hoc-Netze

- ohne Basis-Station
- Stationen gleichwertig



1. nach: Tanenbaum, A. S.: Computer Networks (4th Edition). Prentice Hall, 2003.





---

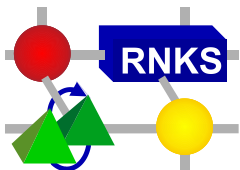
# Infrastrukturnetze vs. Ad hoc-Netze

## ● Infrastrukturnetze

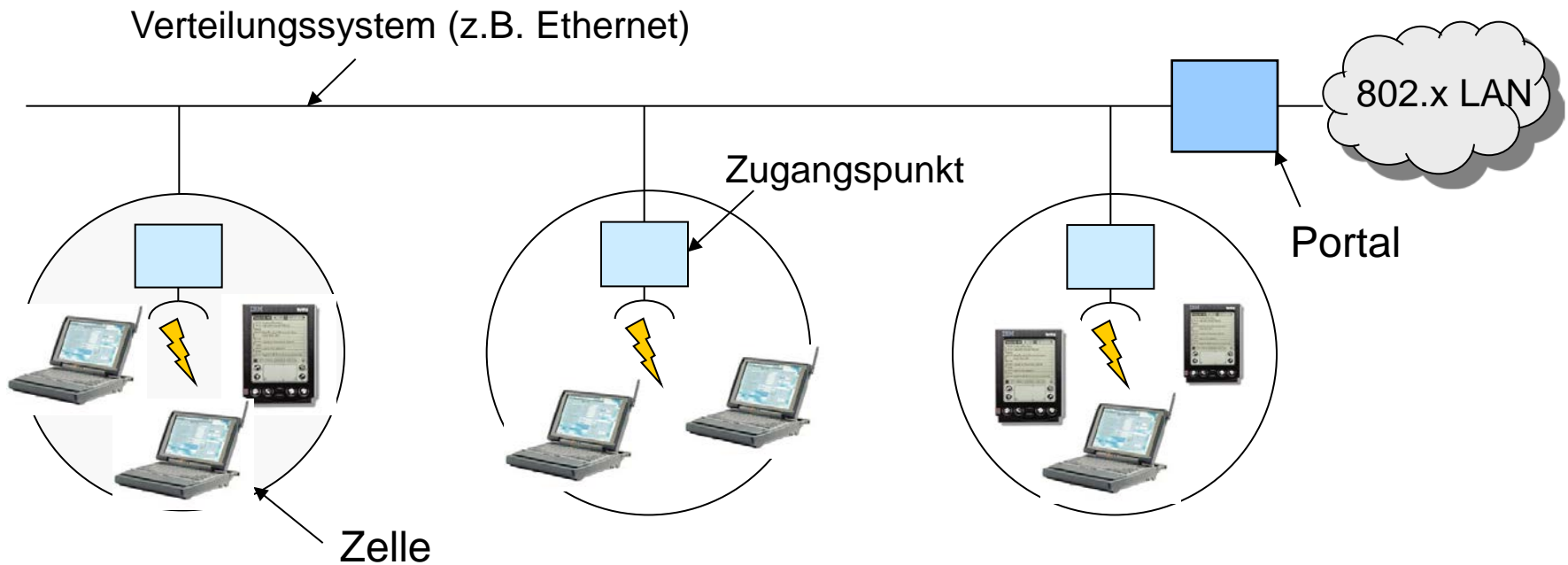
- Drahtlose Kommunikation: Endsystem ↔ Zugangspunkt
  - ☞ Keine direkte Kommunikation zwischen den Endsystemen !!!
- Kommunikation zwischen Endsystemen über ihre Zugangspunkte
  - ☞ auch zwischen verschiedenen Zellen
- Zugang zum Festnetz und anderen Netzen über ein Portal
  - ☞ können Daten zwischen verschiedenen Funknetzen weiterleiten

## ● Ad hoc-Netze

- Keine Infrastruktur erforderlich
  - ☞ Direkte Kommunikation zwischen den Endsystemen !!!
- spontane Vernetzung
- flexibler für bestimmte Einsatzbereiche
- Kein Internetzugang



# Mehr-Zellen-Infrastruktur-Netz<sup>1</sup>



1. entnommen: Tanenbaum, A. S.: Computer Networks (4th Edition). Prentice Hall, 2003.

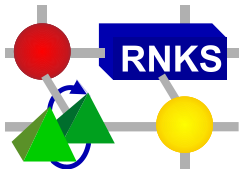
---

## IV.2.4

# IEEE 802.11 – Physikalische Schicht



Tanenbaum / Wetherall 4.4.2



# Freigegebene Frequenzblöcke im ISM-Band

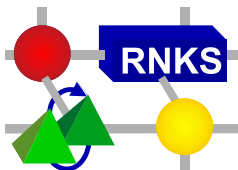
Standard	Frequenzen	Kanäle
IEEE 802.11a/h	5150-5725 MHz	Kanäle: 19, alle überlappungsfrei, in Europa mit TPC und DFS nach 802.11h
IEEE 802.11b/g	2400-2483,5 MHz	Kanäle: b: 11 in den USA, 13 in Europa und 14 in Japan. g: 11 in den USA, 13 in Europa und Japan. Davon überlappungsfrei nutzbar: b: USA und Europa 3, in Japan maximal 4 Kanäle. g: 3 in den USA, 4 in Europa und Japan (durch geringere Kanalbreite bei OFDM)
IEEE 802.11n	2400-2483,5 MHz + 5150-5725 MHz	Kanäle: 3 bzw. 11 (2400–2483,5 MHz) oder 19 bzw. 9 (5150–5725 MHz)
IEEE 802.11ac	5150–5350 MHz + 5470–5725 MHz	Kanäle: 36–64 (5150–5350 MHz) und 100–140 (5470–5725 MHz)

Kanalbandbreite: 802.11a/b/g/h: 20 MHz,

802.11n: 20 MHz (2,4 GHz-Band) oder 40 MHz (im 5 GHz-Band)

802.11ac: 80 MHz / 160 MHz (optional)

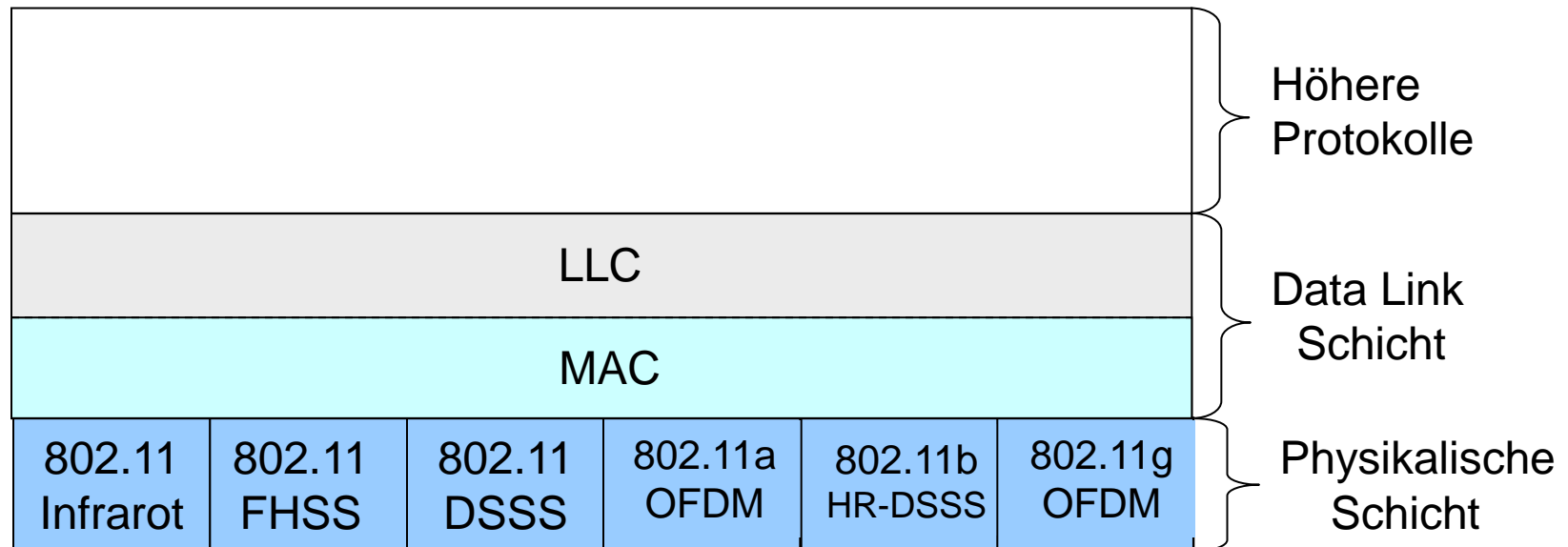
TPC - Transmit Power Control  
DFS - Dynamic Frequency Selection



# WLAN-Protokollstack<sup>1</sup>

Die einzelnen IEEE 802.11-Standards nutzen unterschiedliche Varianten der physikalischen Schicht, um eine stabile Signalübertragung abzusichern.

☞ hier nicht behandelt !!!



☞ Alle 3 PHY-Varianten unterstützen das CCA – Signal (*Clear Channel Assessment*)

☞ zeigt an, dass das Medium frei ist

1) entnommen: Tanenbaum, A. S.; Wetherall, D. J.: Computernetzwerke, 5. Auflage, Pearson, 2012.

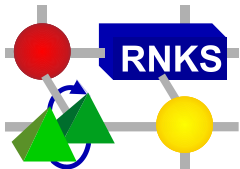
---

## IV.2.5

# IEEE 802.11 – MAC-Sublayer

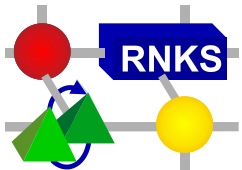


Tanenbaum / Wetherall 1.5.3, 4.2.5, 4.4  
Stallings 17.5



---

A) Kann CSMA/CD in der MAC-Schicht genutzt werden?



# Probleme einer direkten Ethernet-Nutzung<sup>1</sup>

CSMA/CD kann nicht direkt für WLAN eingesetzt werden, da dies zu einer Reihe von Problemen führen würde.

## Carrier Sensing

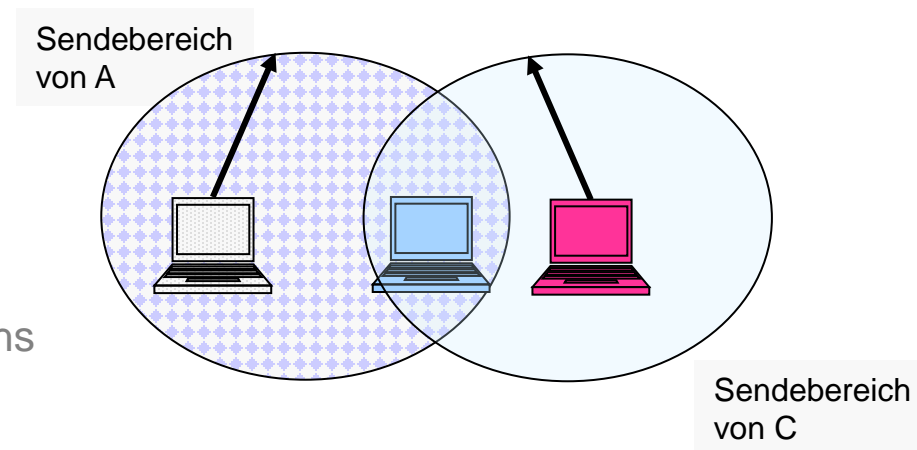
- 👉 **Problem:** Medium kann nicht vollständig überwacht werden
- 👉 **Problem:** begrenzte und überlappende Sendebereiche

## Signalreflexionen an festen Objekten

- 👉 **Problem:** Interferenzen
    - ↪ Mehrwegausbreitung
    - ↪ Signalschwund (*fading*)
- Abschnitt IV.2.1

## Mobilität der Nutzer

- 👉 **Problem:** Wechsel des Sendebereichs
  - ↪ Roaming



1) entnommen: Tanenbaum, A. S.; Wetherall, D. J.: Computernetzwerke, 5. Auflage, Pearson, 2012.



---

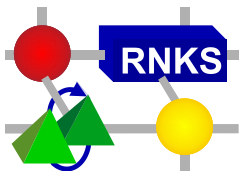
# Probleme der WLAN-Kommunikation (1)

## ● Problem der versteckten Station (*hidden station*)

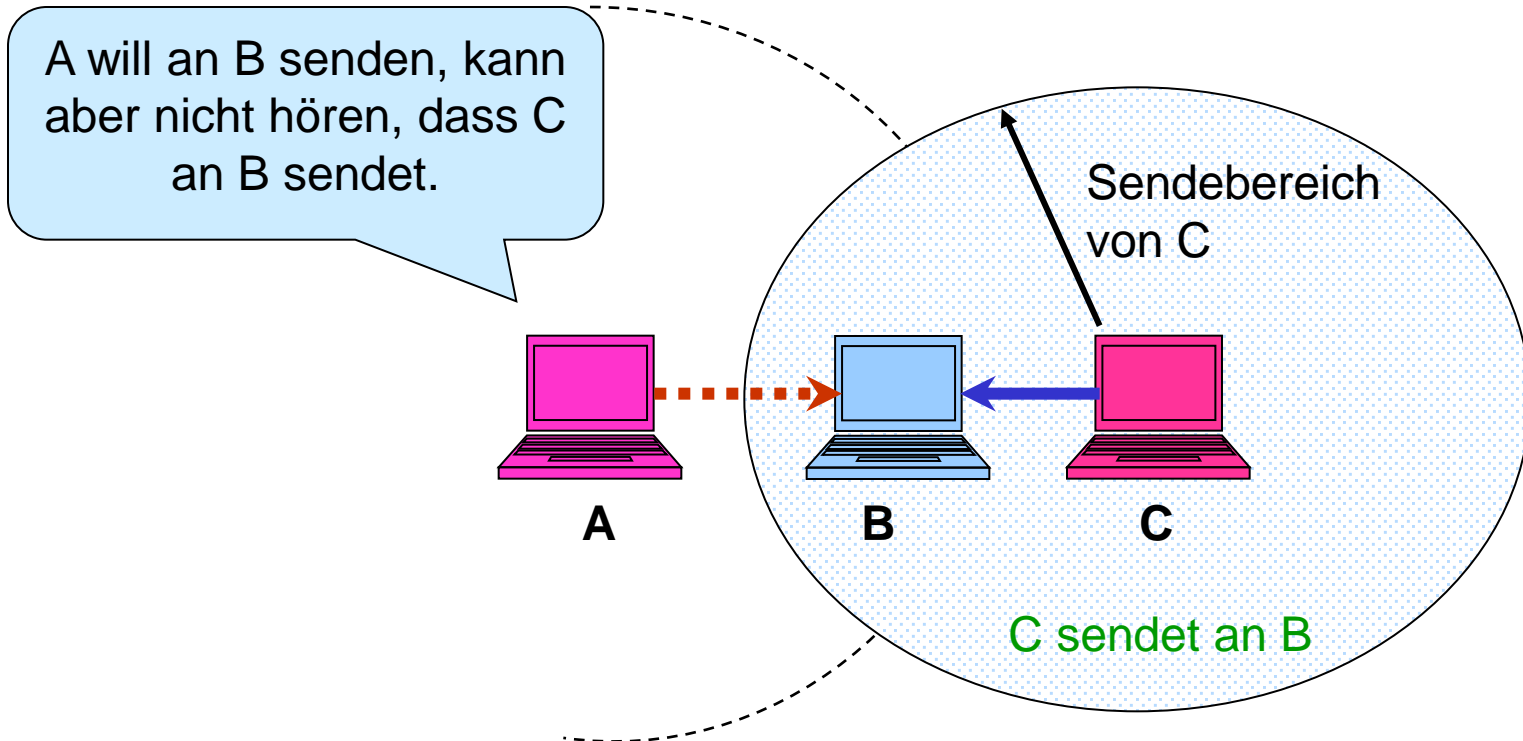
- Eine Station will an eine andere Station senden, die im Sendebereich einer anderen liegt.
- Problem:

Zwei Teilnehmer A und C liegen räumlich so weit auseinander, dass sie ihre Funksignale gegenseitig nicht empfangen können. Zwischen ihnen liegt die Station B, die im Sendebereich beider Stationen liegt. Wenn A und C zeitgleich an B senden, erzeugen sie dort einen Konflikt, können diesen aber nicht erkennen, da die Funksignale des jeweils anderen sie ja nicht erreichen.

☞ A ist für C ein verstecktes Endgerät und umgekehrt !!!



# Problem der versteckten Station<sup>1</sup>



1) entnommen: Tanenbaum, A. S.; Wetherall, D. J.: Computernetzwerke, 5. Auflage, Pearson, 2012.

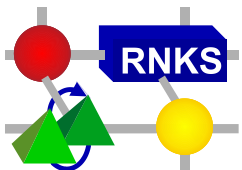
---

# Probleme der WLAN-Kommunikation (2)

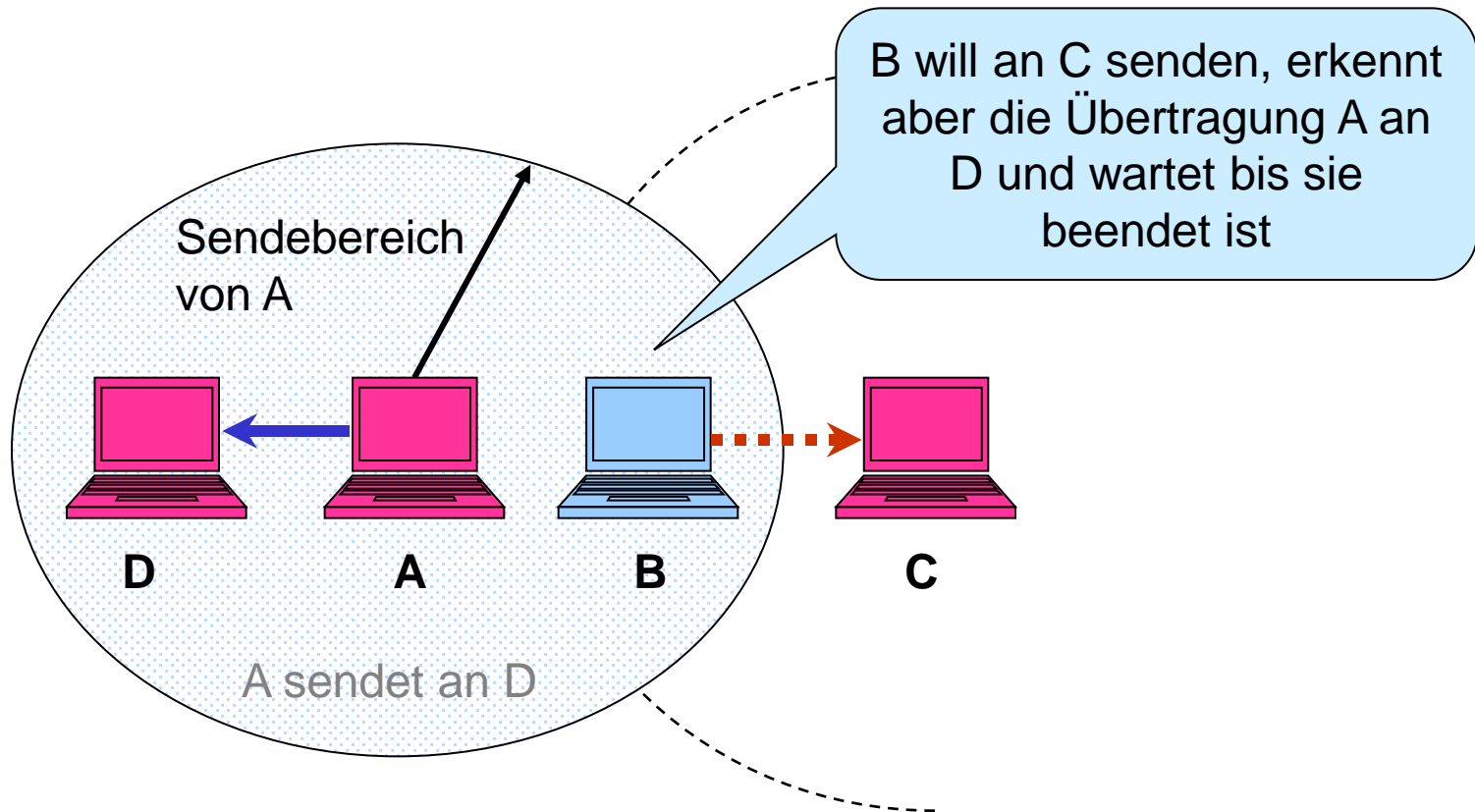
## ● Problem der ausgelieferten Station (*exposed station*)

- Eine Station will an eine Station in ihrem Sendebereich senden, wird aber durch einen Sendevorgang im überlappenden Sendebereich daran gehindert.
- **Problem:**  
Im vorliegenden Szenario sendet Station B an A. Nun möchte C an irgendeine andere Station (nicht A oder B) senden, erkennt aber die Signale von B und wartet, bis die Übertragung zwischen B und A vorbei ist. Da die Funkwellen von C aber A gar nicht erreichen können, wäre es gar nicht nötig zu warten: bei A könnte gar kein Konflikt auftreten.

☞ C ist den anderen beiden Stationen ausgeliefert !!!



# Problem der ausgelieferten Station<sup>1</sup>



1) entnommen: Tanenbaum, A. S.; Wetherall, D. J.: Computernetzwerke, 5. Auflage, Pearson, 2012.

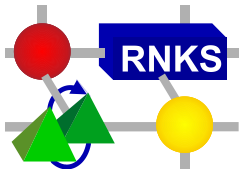
---

# Lösung: CSMA/CA

(*Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance*)

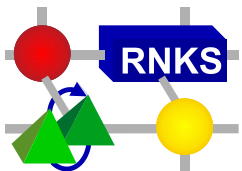
**CSMA/CA** ist das in WLAN nach dem IEEE 802.11-Standard eingesetzten Zugriffsverfahren. CA (*Collision Avoidance*) bedeutet [Kollisionsvermeidung](#).

 **siehe unten**



---

## B) Dienste der IEEE 802.11 MAC-Schicht

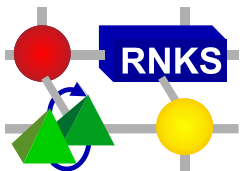


---

# IEEE 802.11 MAC

Die 802.11 MAC-Schicht bietet folgende Dienste an:

- **Asynchroner Datendienst** (*asynchronous data service*)
- **Zeitbeschränkter Datendienst** (*time-bounded service*)
  - ↳ *optional*
- **Unterstützung**
  - **Infrastrukturnetze:** beide Dienste
    - ↳ einschließlich Broadcast- und Multicast bei asynchroner Übertragung
  - **Ad Hoc-Netze:** nur asynchroner Dienst



---

# 802.11-Zugriffsverfahren (1)

## ● Asynchroner Datendienst (

### ● (1) CSMA/CA

↪ obligatorisch

### ● (2) CSMA/CA mit RTS/CTS-Erweiterung

↪ *optional*

→ vermeidet das Problem der versteckten Station !!!

→ Problem der ausgelieferten Station wird nicht gelöst

→ gilt als nicht so relevant, da nur Durchsatz beschränkend

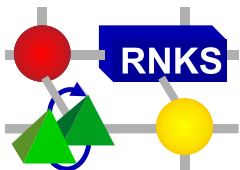
### ● MAC-Zugriffsmechanismen (1) + (2) heißen auch:

Distributed Foundation Wireless Medium Access Control (DFWMAC)

## ● Zeitbeschränkter Datendienst

### ● (3) kollisionsfreies, zentralisiertes Verfahren für zeitbeschränkter Dienste

↪ *optional*





---

# 802.11-Zugriffsverfahren (2)

Unter dem Begriff

- **Distributed Coordination Function (DCF)**

werden die Verfahren (1) + (2)

↪ Einsatz in Infrastruktur- und Ad hoc-Netzen

und

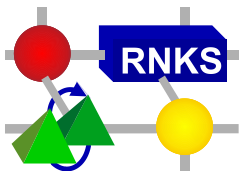
Verfahren (3) als

- **Point Coordination Function (PCF)**

↪ Einsatz nur in Infrastrukturnetzen

↪ hier nicht behandelt

zusammengefasst.



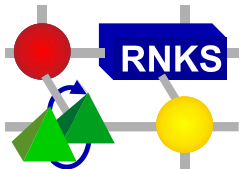
---

## IV.2.6

# Distributed Coordination Function (DCF)

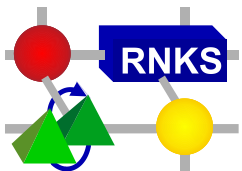


Tanenbaum / Wetherall 4.4.3  
Stallings 17.5



---

# A) Wartezeiten



---

# Wartezeiten beim Medienzugriff

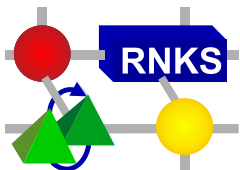
Der Medienzugriff in DCF basiert auf der Einhaltung bestimmter Wartezeiten für den Medienzugriff. Es werden 2 unterschiedliche Wartezeiten definiert, die verschieden eingesetzt werden.

- **DIFS (*DCF Interframe Spacing*)**

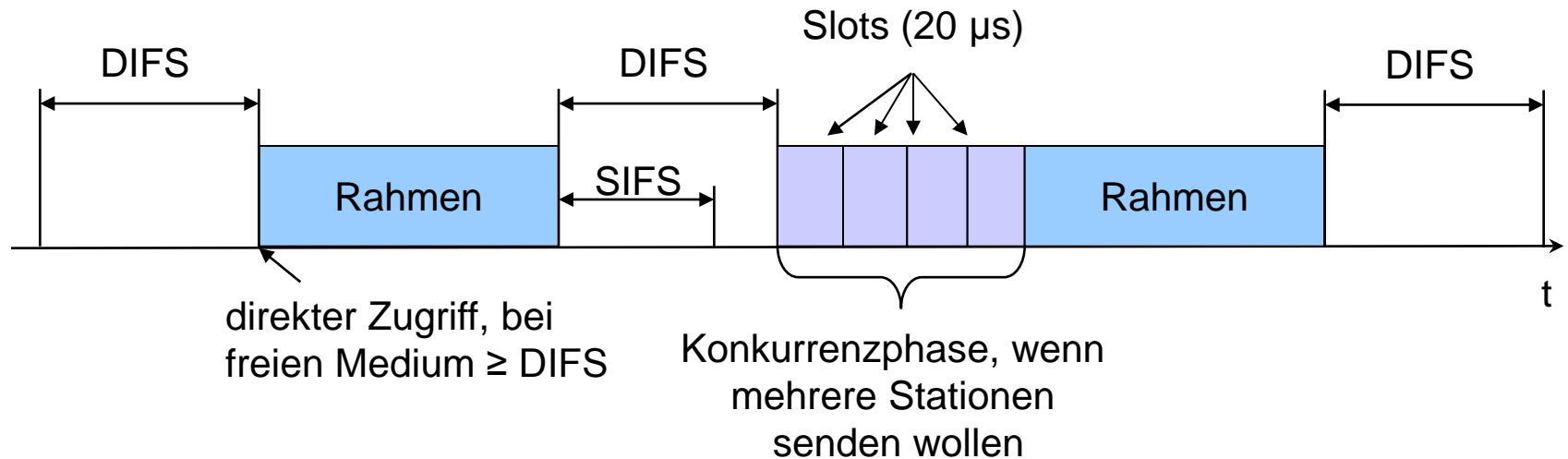
- längste Wartezeit mit niedrigster Zugriffspriorität

- **SIFS (*Short Interframe Spacing*)**

- kürzeste Wartezeit (10  $\mu$ s FHSS, 28  $\mu$ s DSSS)
- betreffende Station hat höchste Zugriffspriorität



# Wartezeiten beim Medienzugriff<sup>1</sup>

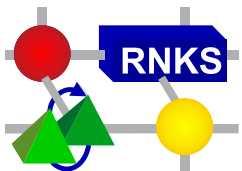


1. nach: Schiller, J.: Mobilkommunikation. Pearson Studium, 2003.

---

## B) CSMA/CA

*(Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance)*



---

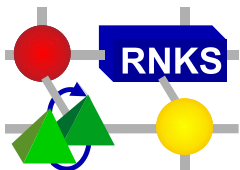
# CSMA/CA

(*Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance*)

**CSMA/CA** ist das in WLAN nach dem IEEE 802.11-Standard eingesetzte Zugriffsverfahren. **CA** (*Collision Avoidance*) bedeutet Kollisionsvermeidung.

## ● Prinzip:

- Da CSMA/CD aus den oben genannten Gründen nicht eingesetzt werden kann, wird das Prinzip "listen before talk" ("erst hören, dann sprechen") verfolgt, d.h. die Kollisionserkennung (CD) wird durch eine ausgefeilte Kollisionsvermeidung (CA) ersetzt, die das Ziel verfolgt, die Anzahl der Kollisionen möglichst gering zu halten.
- Verfeinerung des p-persistent CSMA
  - ↪ vgl. Abschnitt IV.1



---

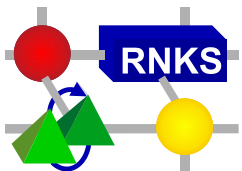
# CSMA/CA-Ablauf (1)

## ● Medienabtastung

- **CCA-Signal** (*Clear Channel Assessment*) zeigt an, ob Medium mindestens die Wartezeit DIFS frei ist

## ● Medienzugriff

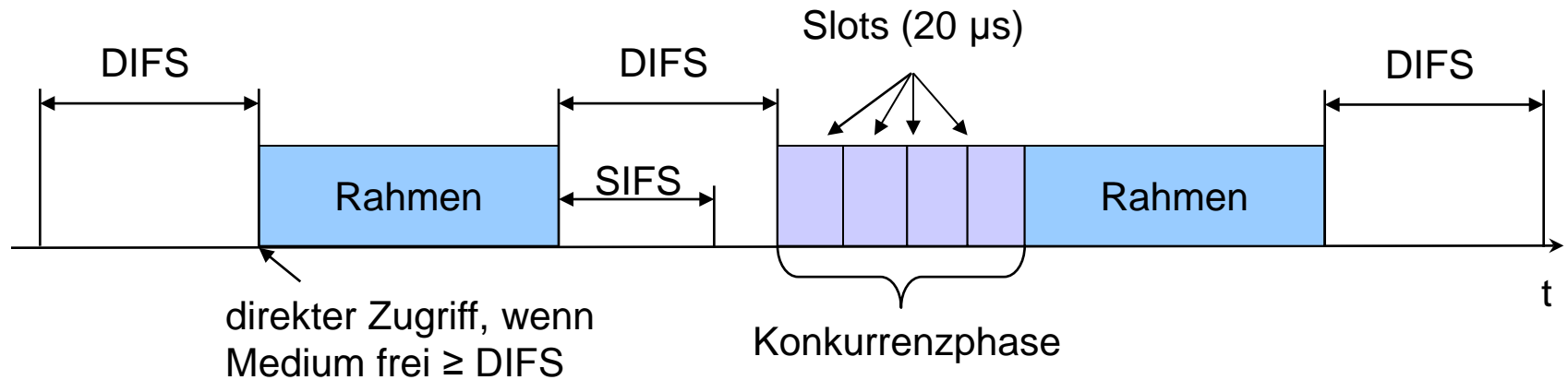
- **frei:** sofortiger Zugriff nach DIFS
  - **belegt:** Warten DIFS + Eintritt in die Konkurrenzphase
    - ↪ Stationen wählen zufällig eine Backoffzeit (in Slots)
      - Zugriff, wenn nach DIFS + Backoff-Zeit Medium frei ist
      - wenn Medium wieder belegt, Wahl einer neuen zufälligen Backoff-Zeit, dann wieder Warten auf Zugriff
- ☞ **Unfair für länger wartende Stationen !!!**
- ↪ Jede Station hat in jedem Zyklus die gleiche Chance, ihre Daten zu senden





# Wartezeiten beim Medienzugriff<sup>1</sup>

(Wiederholung)



Medium frei

Medium war belegt  
(Station wählt Backoff-Zeit)

1. nach: Schiller, J.: Mobilkommunikation. Pearson Studium, 2003.

---

# CSMA/CA-Ablauf (2)

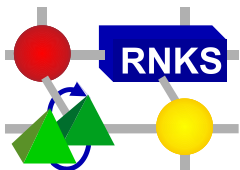
- **Zusätzlicher Backoff-Timer**

- ↪ verdrängte Stationen wählen zufällige Backoff-Zeit
- ↪ nach jedem Slot: Dekrementieren der zufälligen Backoff-Zeit um eine Einheit
- ↪ Zugriff, wenn Backoff-Zeit = 0
- ↪ Stationen wählen keine neue zufällige Backoff-Zeit, wenn eine andere Station auf das Medium zugreift, sondern behalten den heruntergezählten Wert bei !

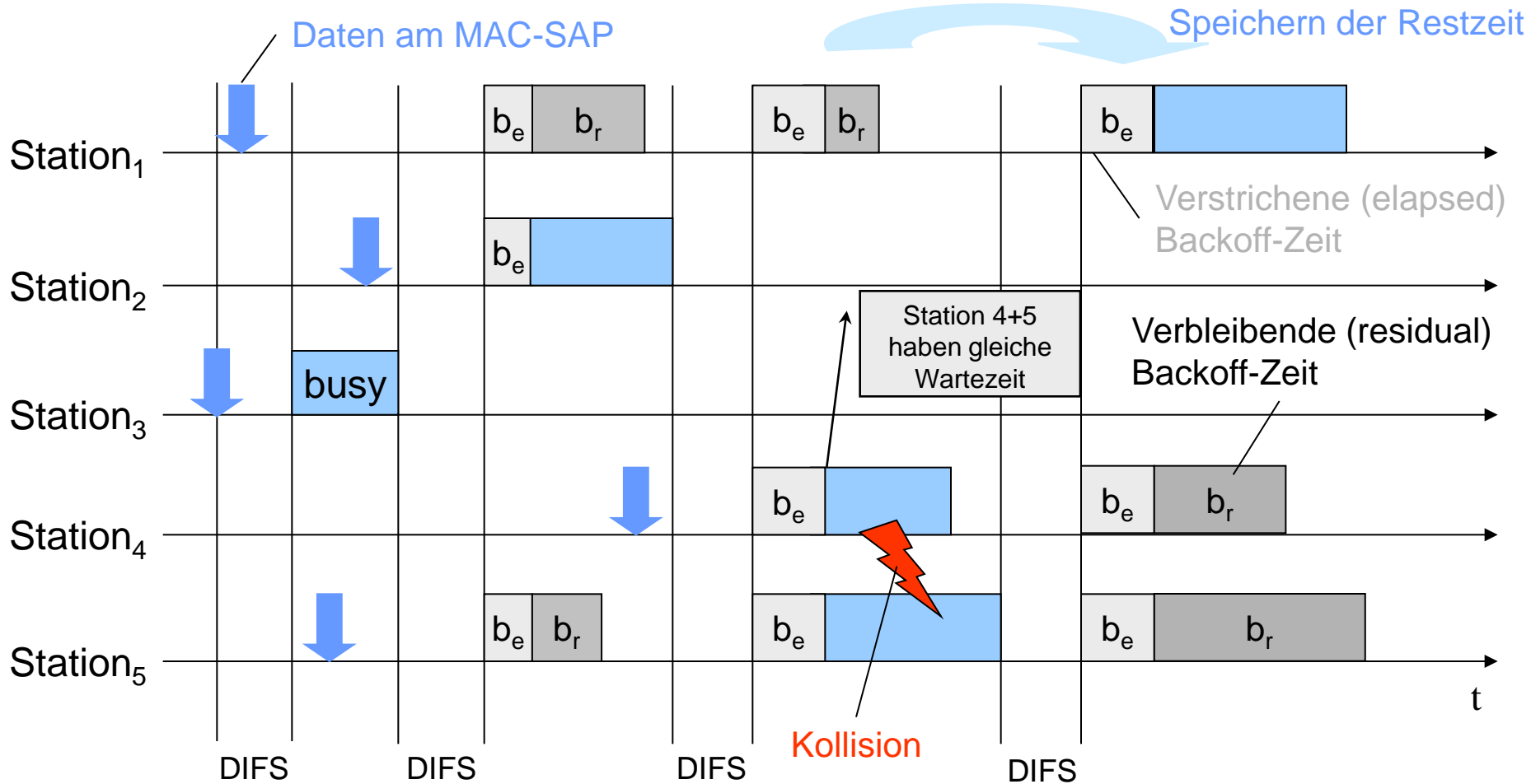
☞ **Länger wartende Stationen erhalten statistisch eine höhere Wahrscheinlichkeit für den Medienzugriff !!!**

- **Bei Kollision:** Neuer Zugriff mit größerem Wettbewerbsfenster (s.u.)

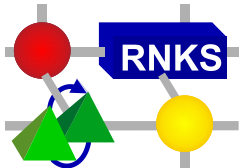
- keine Priorisierung der Station



# Beispiel CSMA/CA-Zugriff



1. entnommen: Schiller, J.: Mobilkommunikation. Pearson Studium, 2003.



---

# Verlängerung der Konkurrenzphase

Bei dem bisher beschriebenen Verfahren können bei kürzeren Konkurrenzphasen ähnliche Backoff-Werte gewählt werden, was zu häufigeren Kollisionen führen kann.

- Zugriffsphase startet mit einem relativ kleinen **Wettbewerbsfenster** (*Contention Window*)

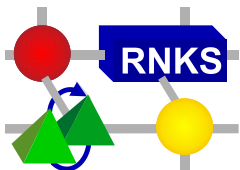
- im Fall de Kollision, Verdopplung des Wettbewerbsfensters

- ↳ Kollision deutet auf belastetes Medium

- bis max. 255 Slots

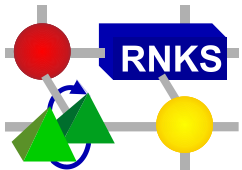
- ☞ Entspricht dem exponentiellen Backoff-Algorithmus von CSMA/CD !!!

- vgl. Abschnitt IV.1



---

## C) Unicast-Übertragung

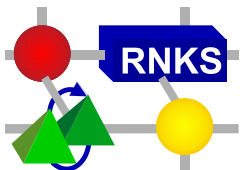


---

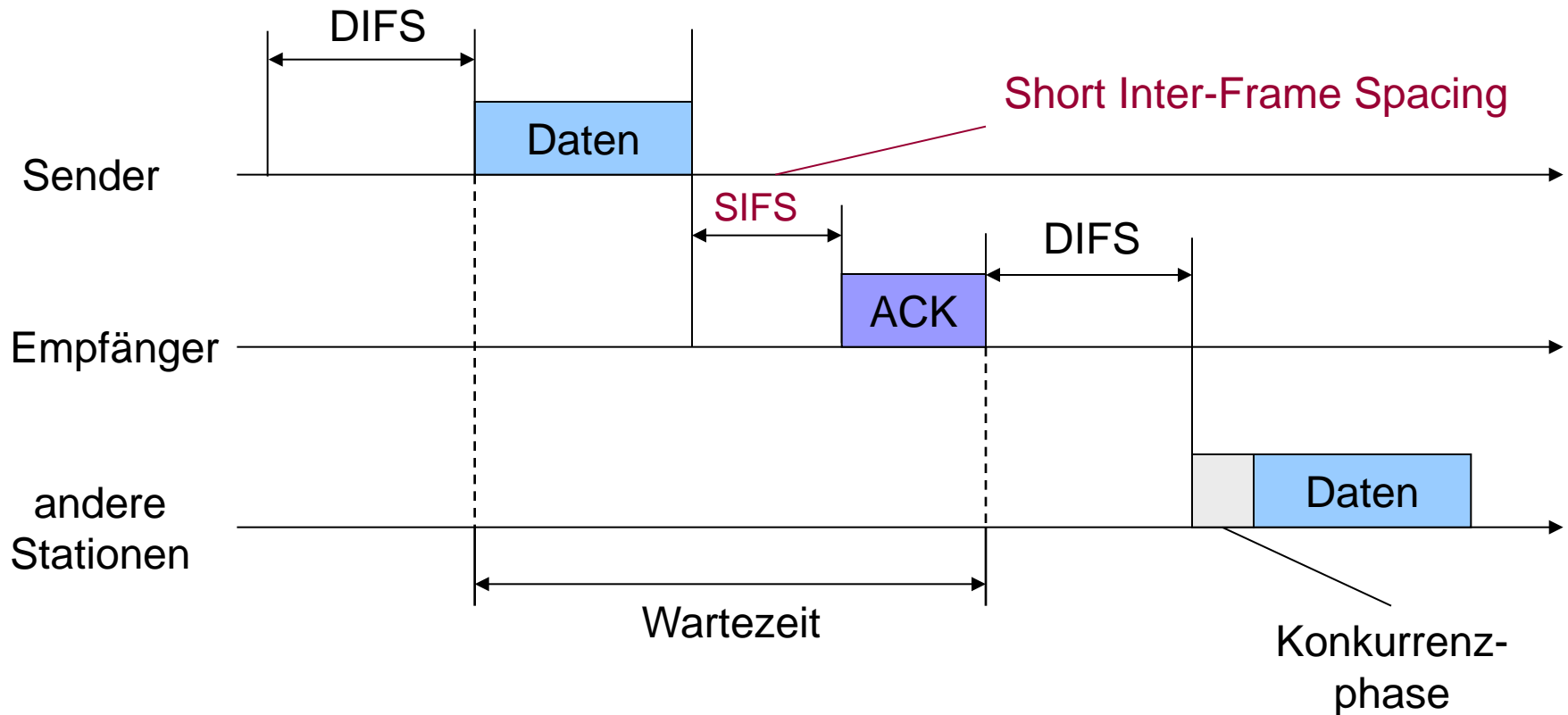
# IEEE 802.11 Unicast-Datenübertragung

Das obige Schema bezieht sich auf die Belegung des Funkkanals für Broadcast-Übertragungen. Wenn nur Daten mit einem bestimmten Empfänger ausgetauscht werden soll, d.h. bei einer **Unicast-Übertragung**, dann muss der Empfänger den Empfang bestätigen.

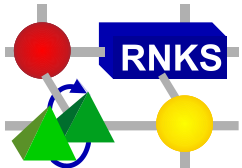
- Empfänger bestätigt den Empfang durch eine ACK-Nachricht
  - Empfänger wartet SIFS Einheiten
    - ↪ SIFS (*Short Inter-Frame Spacing*)
    - ↪  $SIFS < DIFS$ 
      - keine weitere Station darf zugreifen und eine Kollision verursachen
  - ACK bestätigt korrekten Empfang
    - ↪ nach CRC-Prüfung beim Empfänger
  - bei Übertragungsfehler: keine Bestätigung → Neuzugriff des Senders
    - ↪ kein Vorrang für Sender
    - ↪ normaler Zugriff



# IEEE 802.11 Unicast-Datenübertragung<sup>1</sup>

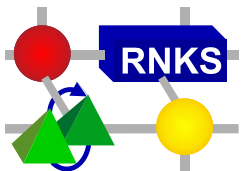


1. entnommen: Schiller, J.: Mobilkommunikation. Pearson Studium, 2003.



---

## D) CSMA/CA mit RTS/CTS-Erweiterung





---

# CSMA/CA mit RTS/CTS-Erweiterung

Diese Erweiterung berücksichtigt das *Problem der versteckten Station*. Es werden zwei zusätzliche Datenpakete eingeführt. Das Verfahren ist optional. Es muss aber von jeder Station beherrscht werden, um auf RTS- und CTS-Pakete richtig zu reagieren.

## ● **RTS (Request to Send)**

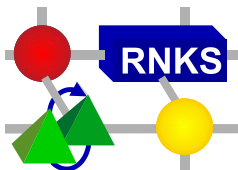
- enthält die Dauer der Übertragung (Dauer + Bestätigung)
- keine Bevorzugung des Rahmens beim Zugriff auf das Medium
- jede Station, die RTS enthält, speichert die Übertragungsdauer im **Network Allocation Vector (NAV)** (Netzbelegungsvektor)
  - ↳ zeigt den Stationen den nächsten möglichen Medienzugriff an

## ● **CTS (Clear to Send)**

- Bestätigung der Empfangsbereitschaft durch Empfänger
- enthält u. U. aktualisierte Dauer der Übertragung
- mithörende Stationen müssen NAV gegebenenfalls anpassen

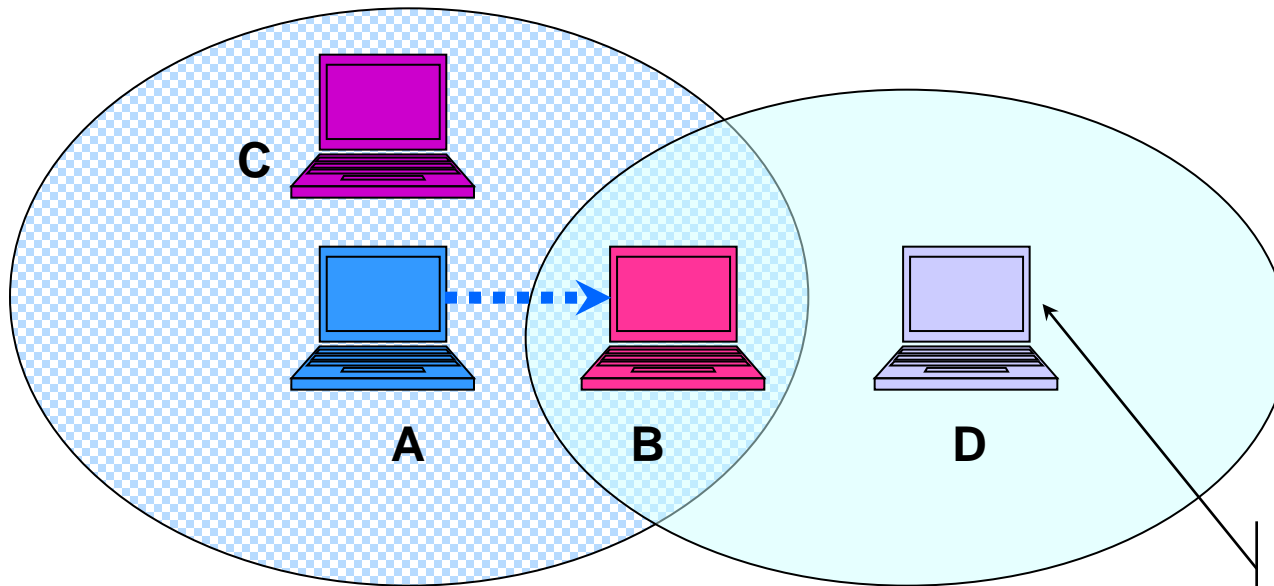


## Virtuelle Reservierung des Mediums



# CSMA/CA mit virtueller Kanalabtastung

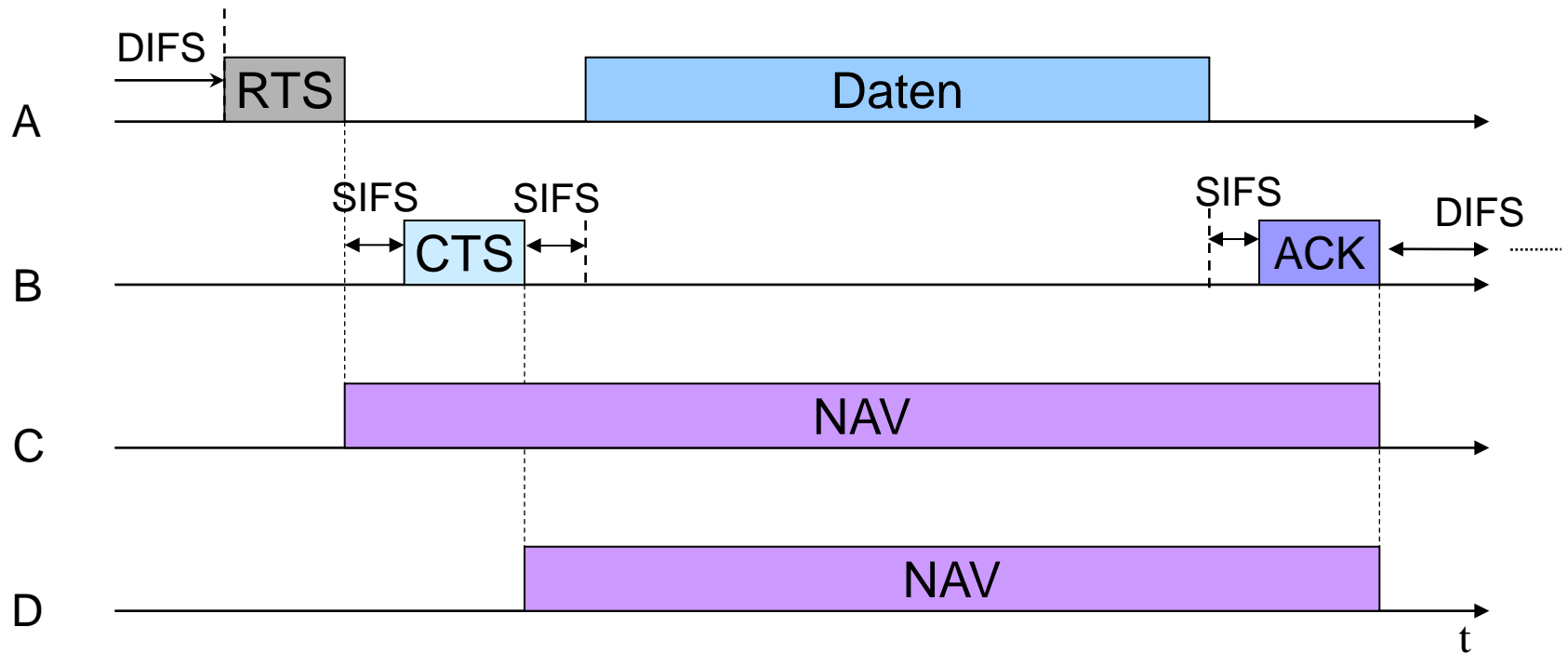
## Beispielnetz



A will an B senden

Wäre versteckte Station, wenn D an B gleichzeitig senden wollte !

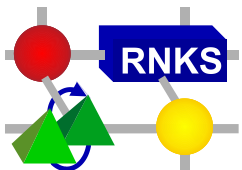
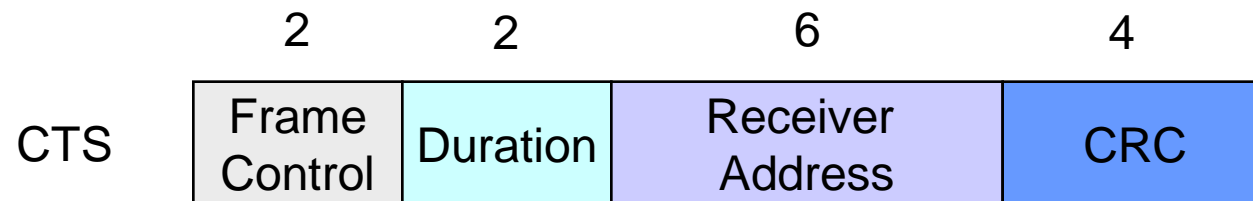
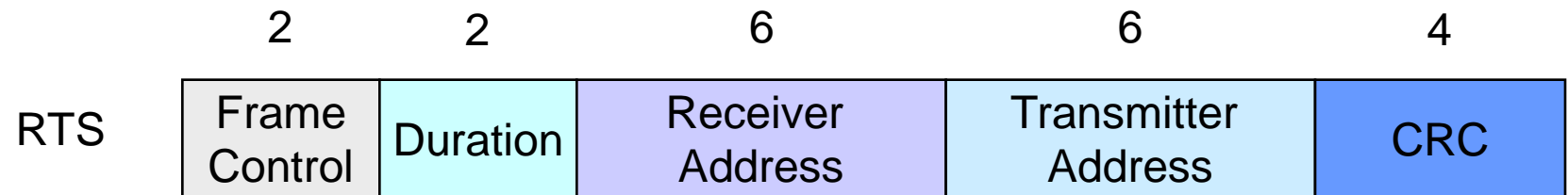
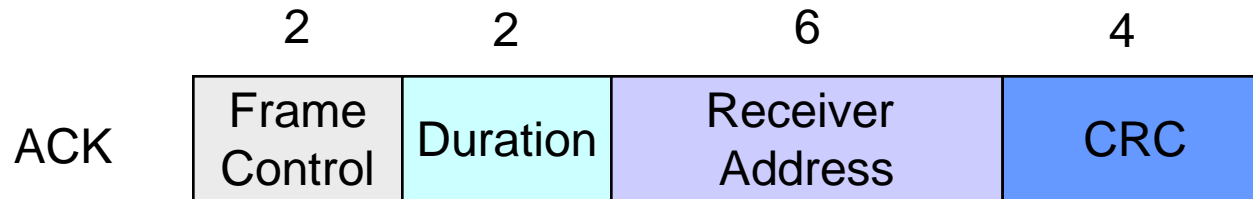
# CSMA/CA mit RTS/CTS-Erweiterung <sup>1</sup>



 **NAV wird nicht gesendet !!!**

1) entnommen: Tanenbaum, A. S.; Wetherall, D. J.: Computernetzwerke, 5. Auflage, Pearson, 2012.

# IEEE 802.11 Steuerpakete



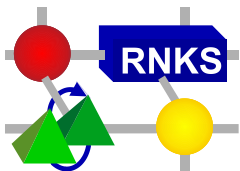
---

## IV.2.7

# 802.11 MAC-Management

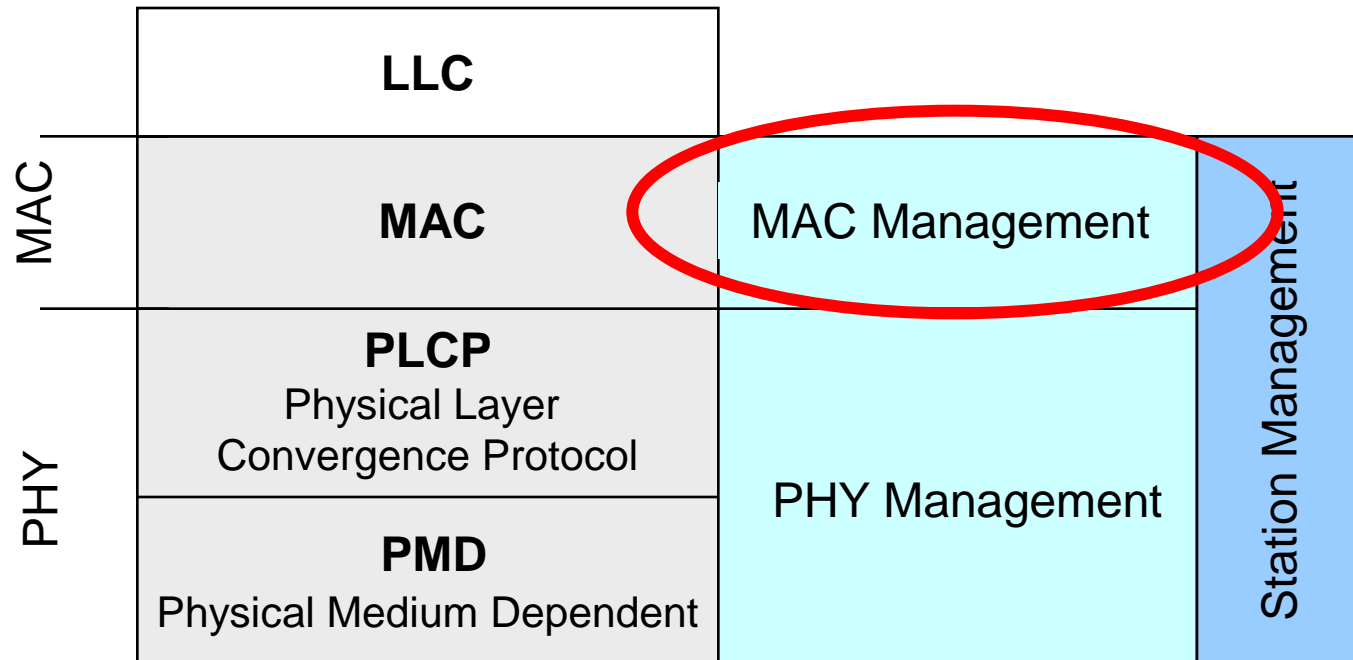


Schiller 7.3.5



# IEEE 802.11 Protokollarchitektur mit Managementfunktionen<sup>1</sup>

(Wiederholung)



1. entnommen: Schiller, J.: Mobilkommunikation. Pearson Studium, 2003.

---

# MAC-Management

Das **MAC-Management** spielt eine zentrale Rolle für den Betrieb einer Station. Es enthält alle Funktionen für die Integration der Stationen in das BSS (*Basic Service Set*) und das ESS (*Extended Service Set*).

## ● Aufgaben

### ● Synchronisation

- ↪ Auffinden drahtloser Netze
- ↪ Synchronisation interner Uhren
- ↪ Erzeugung von Beacon-Rahmen

### ● Leistungssteuerung (Power Management)

- ↪ Steuerung von Stromsparmaßnahmen (Sleeping, Datenpufferung, frühzeitiges Wiedererwachen)

### ● Roaming

- ↪ Wechsel von Zugangspunkten

### ● Management Information Base (MIB)

- ↪ Speichert alle Parameter über den Zustand der Station und des Zugangspunkts

