

I. Einleitung

1. Einführung und Grundlagen

II. Drahtlose Telekommunikationssysteme

2. GSM
3. UMTS

III. Drahtlose lokale Netze

4. IEEE 802.11 / WiFi

5. Mobile Ad Hoc Netze

IV. Drahtlose innerstädtische Netze

6. IEEE 802.11s
7. IEEE 802.16 / WiMax

V. Drahtlose persönliche Netze

8. Bluetooth
9. IEEE 802.15.4 / ZigBee

VI. Positionsbestimmung

10. Positionsbestimmung

VII. Mobiles Internet

11. Mobile Vermittlungsschicht
12. Mobile Transportschicht

4.1 Einführung

4.2 IEEE 802.11 – Überblick

4.3 PHY-Schicht

4.3.1 Exkurs: Spreizspektrumtechnik

4.3.2 DSSS in IEEE 802.11

4.3.3 Erweiterungen

4.4 MAC-Schicht

4.4.1 Exkurs: MAC-Protokolle

4.4.2 Medienzugriff in IEEE 802.11

4.4.3 Format der MAC-Dateneinheiten

4.5 MAC Management

4.5.1 Synchronisation

4.5.2 Scanning

4.5.3 Authentifizierung

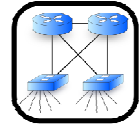
4.5.4 Assozierung

4.5.5 Reassoziierung

4.5.6 Power-Management

4.6 Erweiterung der MAC-Schicht

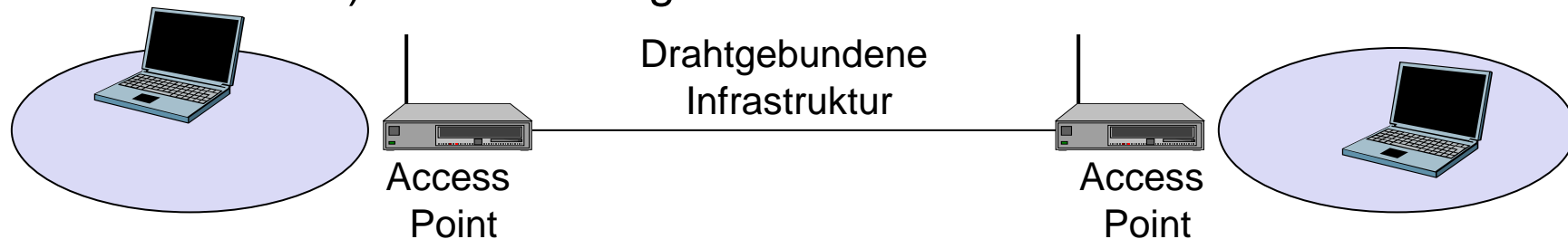
4.7 Zusammenfassung und Ausblick



- Ausprägungsformen drahtloser LANs (WLAN - Wireless LAN)

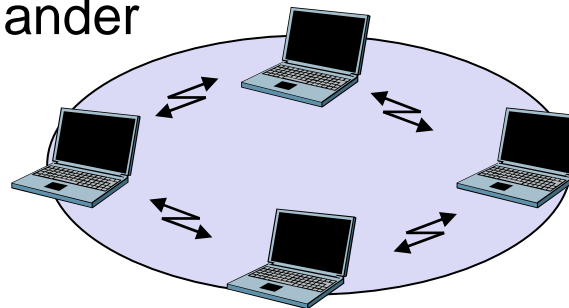
- Infrastruktur-Netzwerke

- ▶ Geräte sind drahtlos über einen **Zugangspunkt** (AP - Access Point) mit der drahtgebundenen Infrastruktur verbunden



- Ad-hoc-Netzwerke

- ▶ Geräte kommunizieren **ohne drahtgebundene Infrastruktur** direkt miteinander



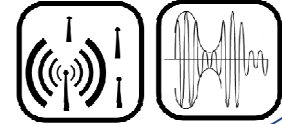
- Vorteile
 - Keine Verkabelungsprobleme
 - ▶ z.B. historische Gebäude, Feuerschutz
 - Geringere Kosten für Inbetriebnahme
 - ▶ Ein Zugangspunkt wird von vielen Nutzern genutzt
 - Geräte räumlich flexibel platzierbar innerhalb eines Empfangsbereichs
 - Ad-hoc-Netzwerke ohne vorherige Planung realisierbar
 - Robustheit gegenüber Beschädigungen
 - ▶ Katastrophen wie Erdbeben, Feuer - und unachtsame Benutzer
- Nachteile
 - Geringere Übertragungsraten als Festnetze
 - ▶ z.B. max. 54 Mbit/s bei IEEE 802.11a/g
 - Geringere Dienstgüte
 - ▶ Übertragungsfehler, Verzögerung und Jitter größer
 - Standardisierung muss viele nationale Restriktionen beachten
 - Sicherheit
 - ▶ Abhören der Luftschnittstelle leicht möglich

- **Weltweite** Funktion
- Betrieb **ohne Sondergenehmigungen bzw. Lizenzen** möglich
- Möglichst **geringe Leistungsaufnahme** wegen Batteriebetrieb
- **Robuste** Übertragungstechnik
- Vereinfachung der (spontanen) Zusammenarbeit bei Treffen
 - Einfache Handhabung und Verwaltung (**Plug & Play**)
- Schutz bereits getätigter Investitionen im Festnetzbereich
 - **Interoperabilität** zwischen LANs und WLANs
 - **Transparenz** für höhere Schichten
- **Sicherheit** hinsichtlich
 - Abhören vertraulicher Daten
 - Emissionen
 - ▶ z.B. keine Interferenzen mit Herzschrittmachern

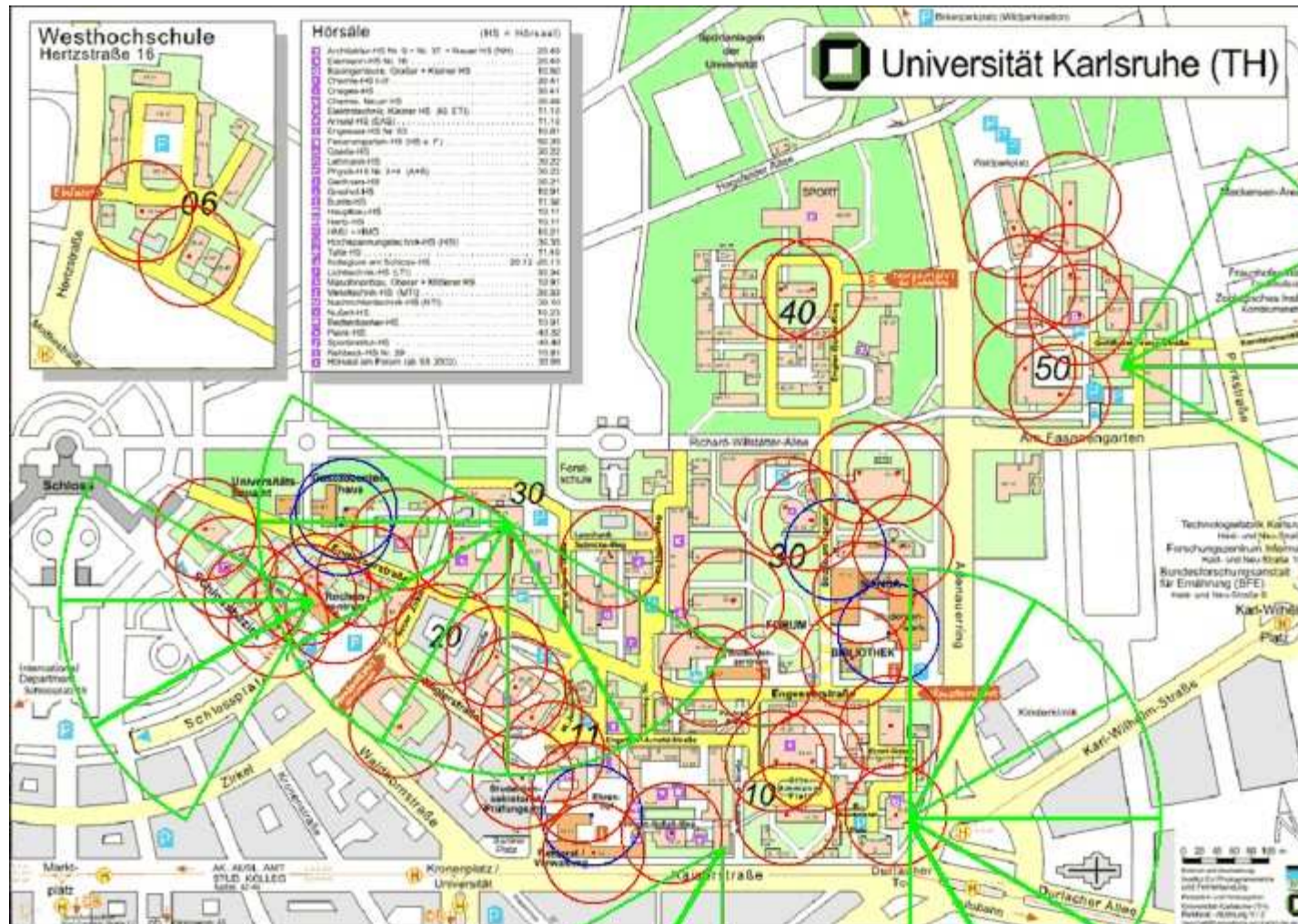
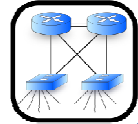


Netzicherheit





- **IEEE 802.11**
 - Basisstandard wurde am 26.07.1997 verabschiedet
 - Erweiterungen der physikalischen Schicht (PHY-Schicht)
 - ▶ 802.11a/b/g
 - Erweiterungen der Medienzugriffsschicht-Schicht (MAC-Schicht)
 - ▶ 802.11h/e/i
 - Hohe Verbreitung (→ in diesem Kapitel behandelt)
- **HIPERLAN** – High Performance Radio Local Area Network
 - Europäischer Standard
 - Version 1: 23,529 Mbit/s im 5 GHz Band
 - Version 2: 54 Mbit/s im 5 GHz Band
 - Derzeit keine Produkte verfügbar
- **HomeRF** – Home Radio Frequency
 - Standardisierung durch Firmenkonsortium
 - ▶ u.a. Intel, Compaq, IBM, HP, Microsoft, Motorola
 - Speziell für Privatanwender konzipiert
 - ▶ Einfache Installation/geringe Kosten
 - Geringe Verbreitung
 - HomeRF Working Group hat sich im Januar 2003 aufgelöst



blau = Außenantennen

rot = Innenantennen

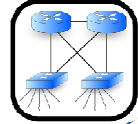
grün = Richtantennen

Aufbau:

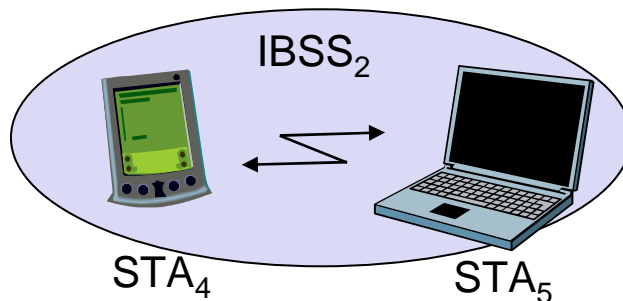
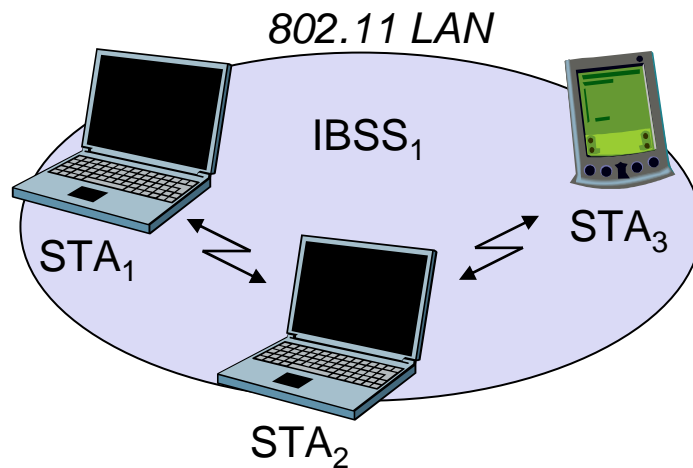
- ca. 210 Zugangspunkte
- IEEE 802.11 b/g

Abdeckung:

- ca. 80 % der Campusfläche
- 37 Hörsäle/Seminarräume



• Architektur eines Ad-hoc-Netzwerks

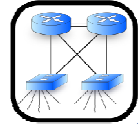


• Direkte Kommunikation der Geräte

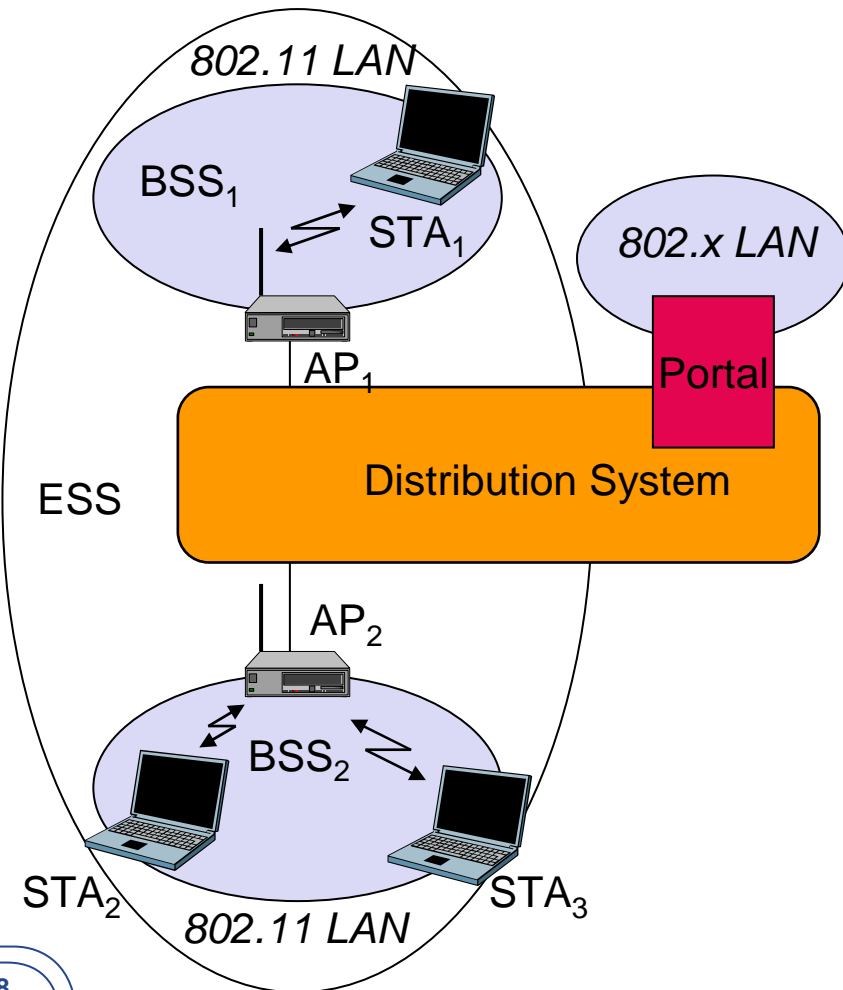
- ▶ Begrenzte Reichweite
- ▶ **Station (STA)**
 - ▶ Endgerät mit Zugriffsfunktion auf das drahtlose Medium
- ▶ **Independent Basic Service Set (IBSS)**
 - ▶ Gruppe von Stationen, die dieselbe Funkfrequenz nutzen

• Bildung verschiedener IBSSs

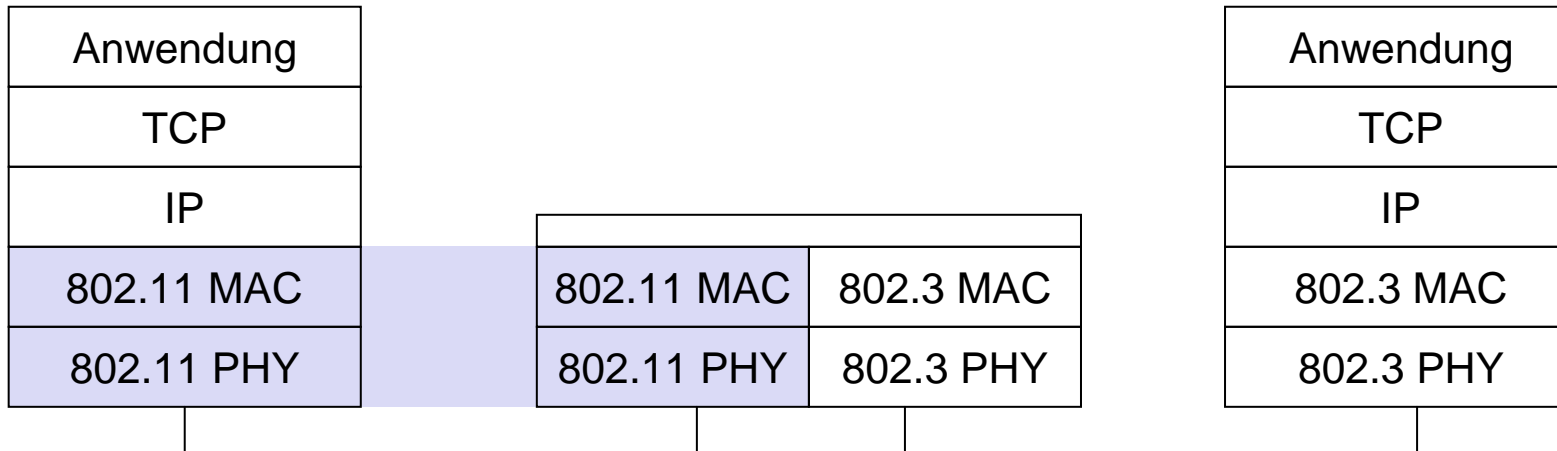
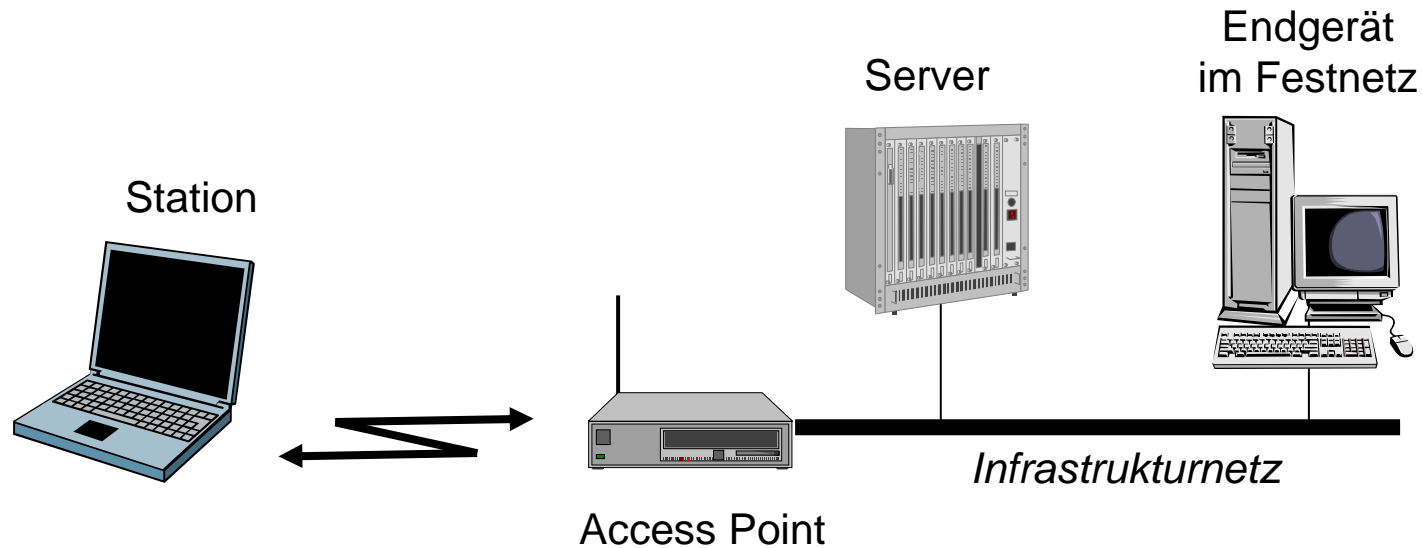
- ▶ Raummultiplexen (genügend Abstand)
- ▶ Nutzen unterschiedlicher Funkfrequenzen



• Architektur eines Infrastrukturnetzes

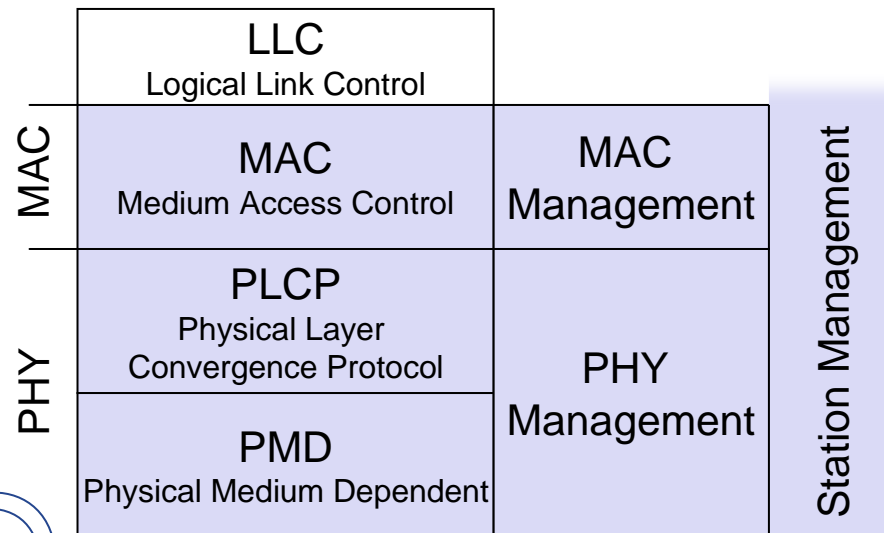


- **Station (STA)**
 - ▶ Endgeräte mit Zugriffsfunktion auf das drahtlose Medium und Funkkontakt zum Zugangspunkt (AP – Access Point)
- **Basic Service Set (BSS)**
 - ▶ Gruppe von Stationen, die dieselbe Funkfrequenz nutzen
- **Access Point (AP)**
 - ▶ Station, die sowohl an einem BSS als auch am Distribution System teilnimmt.
- **Portal**
 - ▶ Übergang in ein anderes Netz
- **Distribution System**
 - ▶ Verbindung mehrerer BSS zu einem **Extended Service Set (ESS)**
 - ▶ Architektur des Distribution System ist nicht Teil des Standards



- MAC
 - Medienzugriff
 - Fragmentierung
 - Verschlüsselung
- MAC-Management
 - Synchronisation
 - Scanning
 - Association/Reassociation
 - Power-Management
 - Authentifizierung/Verschlüsselung

- PLCP
 - Einheitlicher PHY-Zugangspunkt unabhängig von Übertragungstechnik
 - Clear Channel Assessment Signal
 - ▶ Signalschwelle für Carrier Sense
- PMD
 - Modulation
 - Codierung
- PHY Management
 - Kanalwahl
- Station Management
 - Koordination der Management-Funktionen





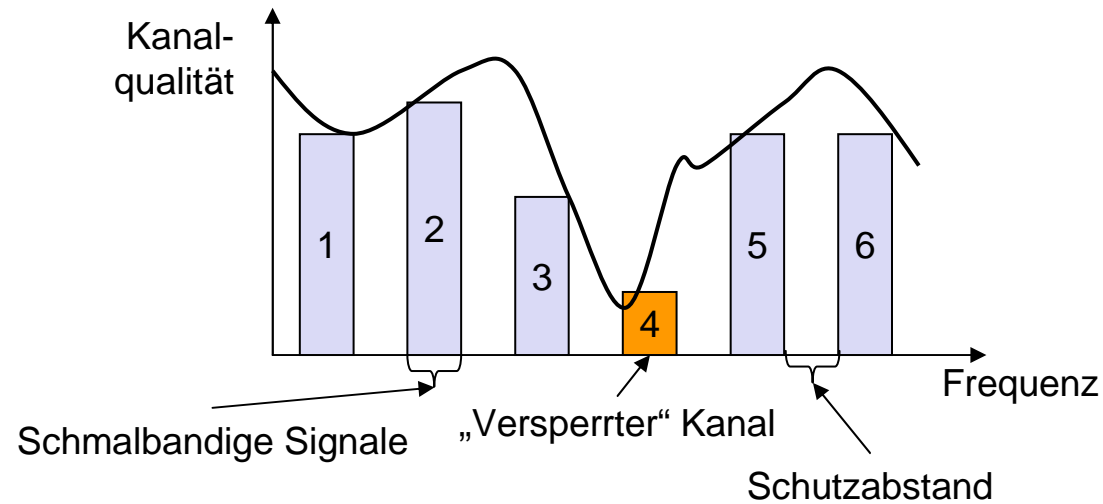
- Basisstandard definiert 3 Varianten der PHY-Schicht
 - Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)
 - ▶ Datenraten von 1 – 2 Mbit/s
 - ▶ Weite Verbreitung
 - ▶ Heute noch in 802.11b/g-Komponenten enthalten
 - Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)
 - ▶ Datenraten von 1 – 2 Mbit/s
 - ▶ Keine WLAN-Komponenten verfügbar, die FHSS verwenden
 - ▶ Aber: Bluetooth verwendet FHSS
 - ▶ ... im weiteren nur kurz berücksichtigt
 - Infrarot
 - ▶ Datenraten von 1 – 2 Mbit/s
 - ▶ Keine WLAN-Komponenten verfügbar, die Infrarot verwenden
 - ▶ Aber: IrDA verwendet Infrarot
 - ▶ ... im weiteren nicht berücksichtigt



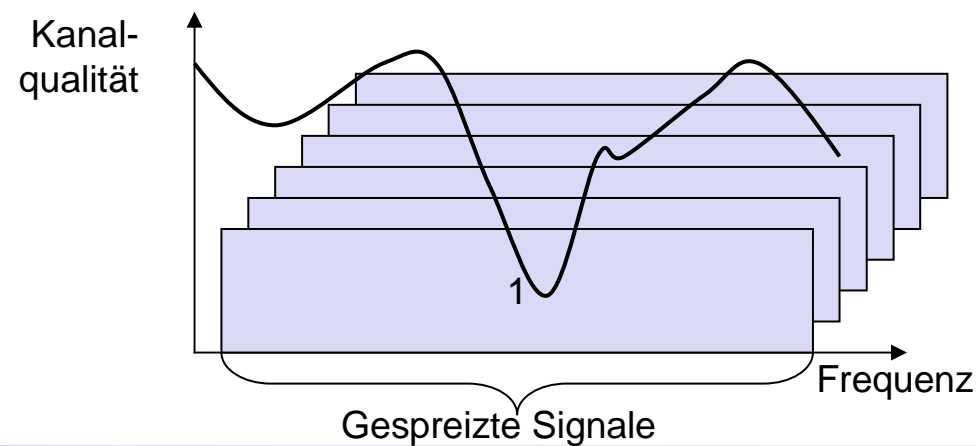
- Engl.: **spread spectrum**
- Problem
 - Frequenzselektives Fading und schmalbandige Störungen können einige schmalbandige Kanäle „versperren“.
- Lösung
 - Signal mittels Codefolge auf breiteren Frequenzbereich **spreizen**
- Nebeneffekte
 - Koexistenz mehrerer Nutzsignale ohne dynamische Koordination
 - Abhörsicherheit
- Alternativen
 - **Direct Sequence, Frequency Hopping**



- Verwendung **mehrerer** schmalbandiger Signale



- Bandspreizung **aller** Signale



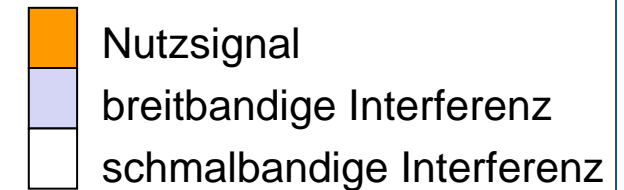


• Diagramme

- Leistungsdichte (dP/df) über Frequenz (f)

• Sender

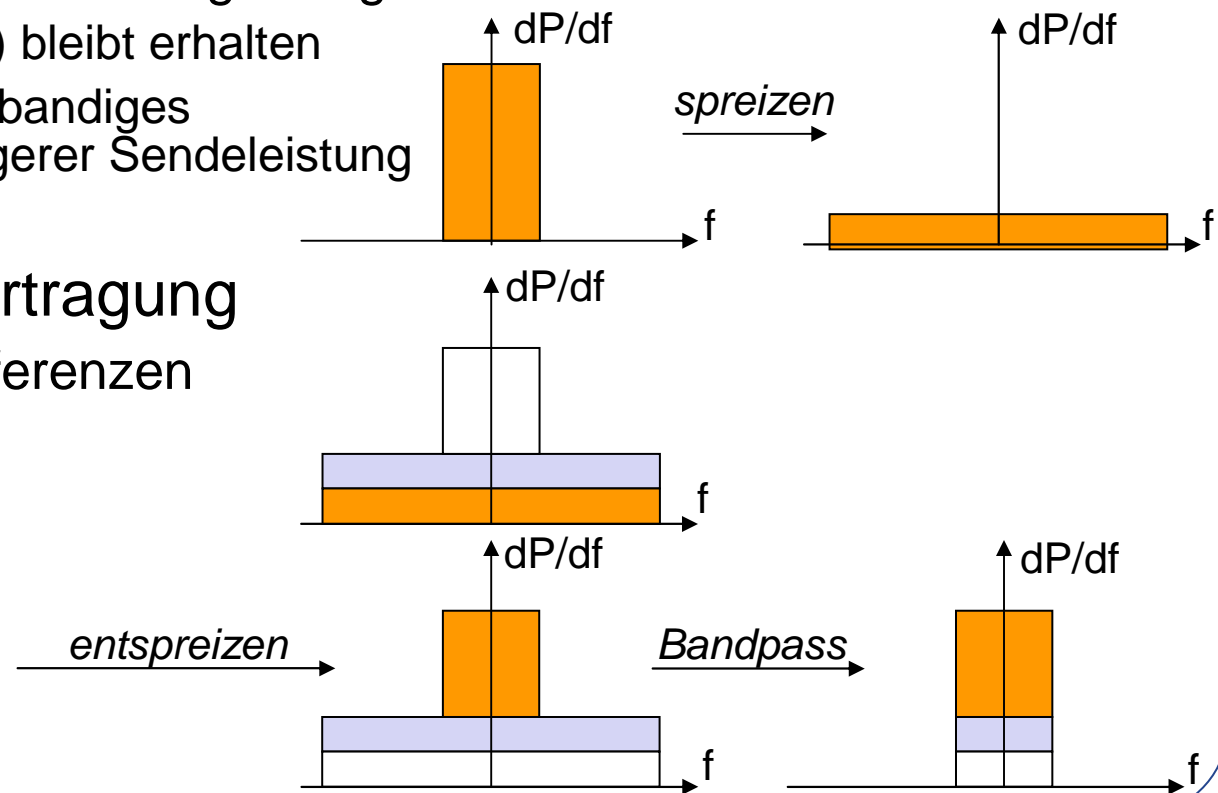
- Spreizen eines schmalbandigen Signals
 - ▶ Energie (Fläche) bleibt erhalten
 - ▶ Resultat ist breitbandiges Signal mit geringerer Sendeleistung



• ... während der Übertragung

- Verschiedene Interferenzen

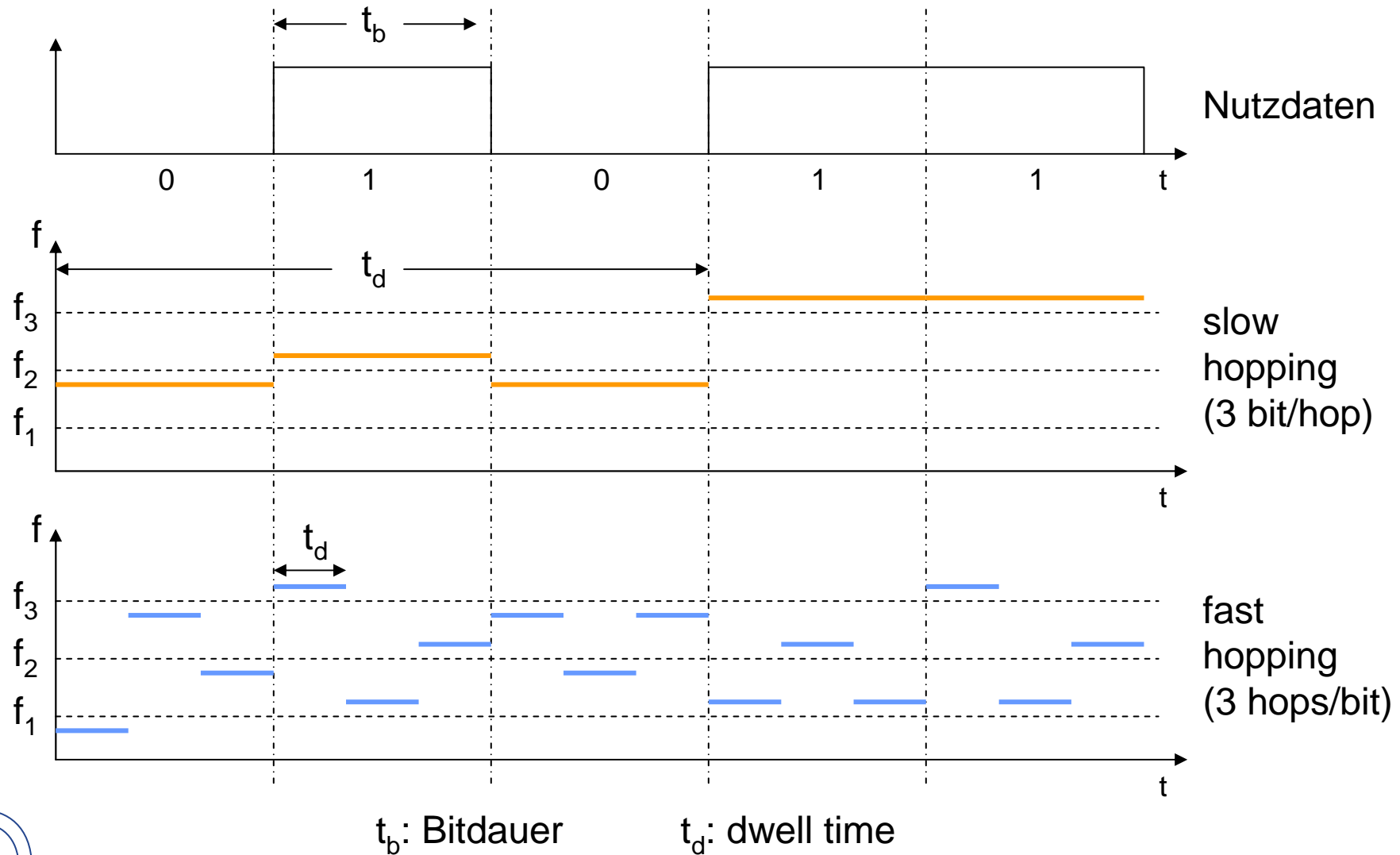
• Empfänger





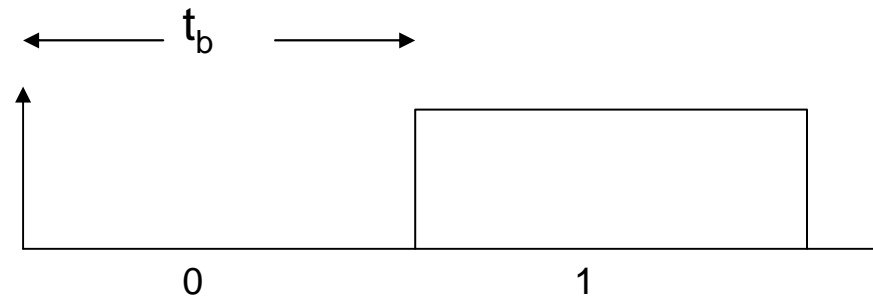
- Diskrete Wechsel der Trägerfrequenz
 - Gleichzeitige Verwendung von TDMA und FDMA
 - **Sprungsequenz**: Muster der Kanalbewegung (Hopping Sequence)
 - ▶ wird durch Pseudozufallszahlen bestimmt
 - ▶ Verweilzeit in einem Kanal: **dwell time**
- Zwei Versionen
 - schneller Wechsel (**fast hopping**)
 - ▶ mehrere Frequenzen pro Nutzdatenbit
 - langsamer Wechsel (**slow hopping**)
 - ▶ mehrere Nutzdatenbits pro Frequenz
 - ▶ Optionales Verfahren bei GSM
- Vorteile
 - frequenzselektives Fading und Interferenz auf kurze Perioden begrenzt
 - einfache Implementierung
 - nutzt nur schmalen Bereich des Spektrums zu einem Zeitpunkt
- Nachteile
 - nicht so robust wie DSSS
 - einfacher abzuhören





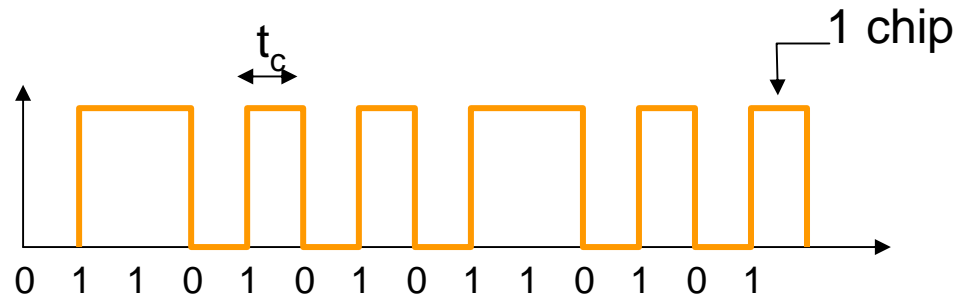


- Ansatz
 - Spreizen des Signals durch digitale Codefolge zur Reduktion des frequenzabhängigen Fading
 - ▶ Basisstationen können den gleichen Frequenzbereich nutzen
 - ▶ mehrere Basisstationen können das Signal erkennen und rekonstruieren
 - ▶ weiche Handover möglich
- Vorgehensweise
 - XOR-Verknüpfung mit digitaler Codefolge (**Chipping Sequence**) sowohl beim Sender als auch beim Empfänger
 - ▶ Codefolge muss allen Stationen bekannt sein
 - Spreizfaktor = Chiprate / Bitrate
 - Hoher Spreizfaktor (z.B. 128) führt zu hoher Bandbreite des resultierenden Signals
- Nachteile
 - exakte Leistungssteuerung notwendig



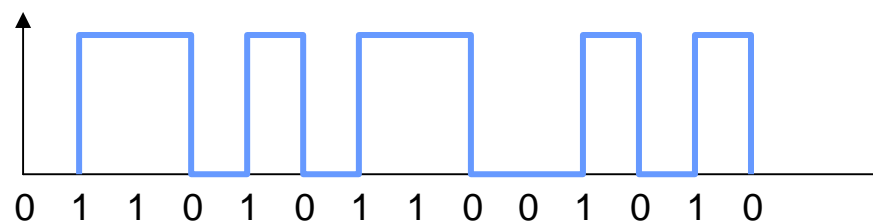
Nutzdaten

XOR



Chipping
Sequence

=



Zu sendendes
Signal

Chiprate: $r_c = 1/t_c$

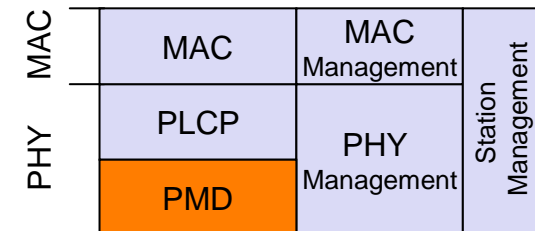
Bitrate: $r_b = 1/t_b$

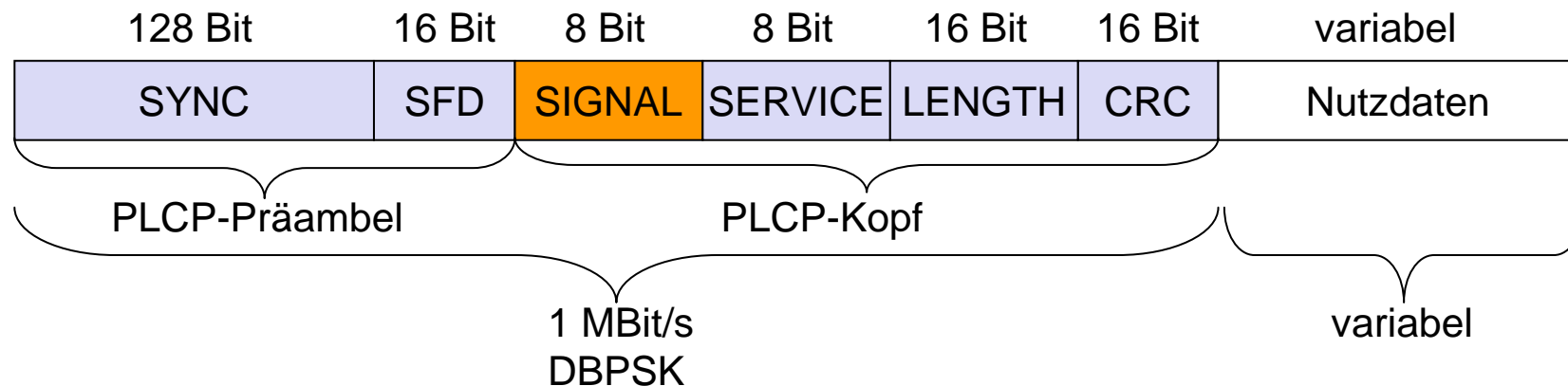
→ Spreizfaktor = r_c / r_b

Größe des Spreizfaktors im Beispiel?



- Verwendung des **11-Chip Barker-Codes** für die Spreizung im Basisstandard
 - Bei einer Datenrate von 1 oder 2 Mbit/s
 - ▶ Bei höheren Datenraten verwendet man andere Codes
 - **+1, -1, +1, +1, -1, +1, +1, +1, -1, -1, -1**
 - ▶ +1 wird durch logische 1 repräsentiert, -1 durch logische 0
 - ▶ Codefolge: 10110111000
 - Chiprate: 11 MChips/s
 - ▶ Damit eine Symbolrate von 1 MSymbol/s
- Verwendete Modulationsverfahren
 - Differential Binary Shift Keying (DBPSK)
 - ▶ Symbollänge: 1 Bit → Datenrate: 1 Mbit/s
 - Differential Quadrature Shift Keying (DQPSK)
 - ▶ Symbollänge: 2 Bit → Datenrate: 2 Mbit/s

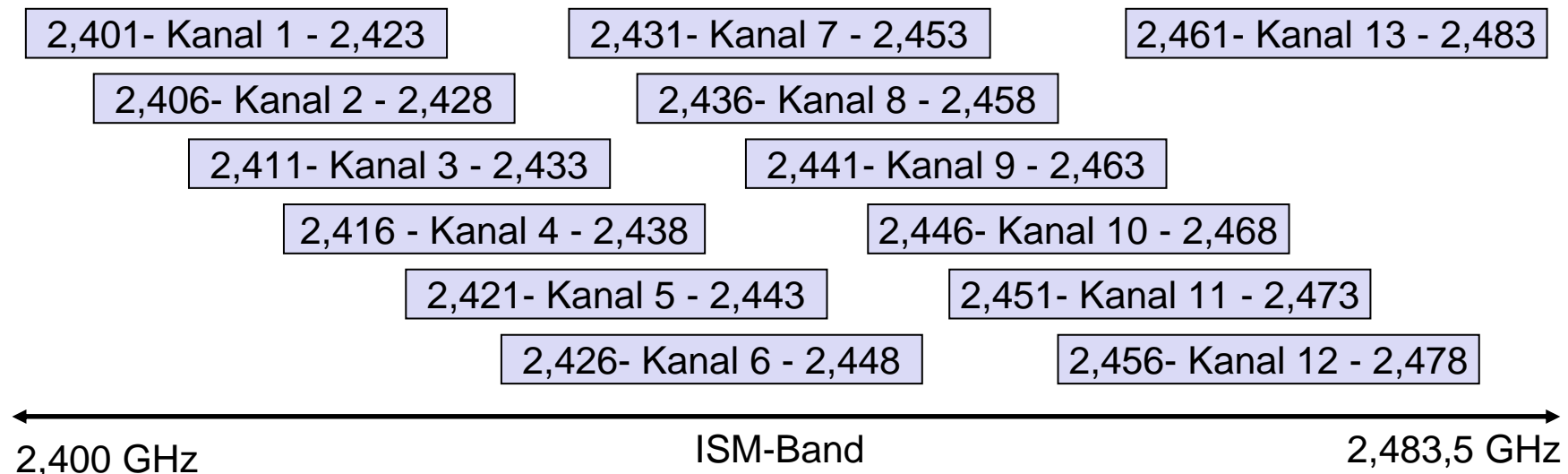




- **SYNC: Synchronisation**
 - ▶ Synchronisation über die Bitfolge 101010....
- **SFD: Start Frame Delimiter**
 - ▶ Bitfolge 1111001110100000 kennzeichnet Ende der Präambel und Anfang vom PLCP-Kopf
- **SIGNAL**
 - ▶ Datenrate, mit der Nutzdaten übermittelt werden
 - ▶ Erleichtert Rückwärtskompatibilität
- **SERVICE**
 - ▶ Reserviert (wird z.B. von IEEE 802.11b/g verwendet)
- **LENGTH**
 - ▶ Zeit [μ s], die für die Übertragung der Nutzdaten benötigt wird
- **CRC**
 - ▶ Prüfsumme über den PLCP-Kopf



- WLAN verwendet das ISM-Band
 - Untergliederung in 13 Frequenzbänder/Kanäle im Bereich 2,4000 – 2,4835 GHz
 - ▶ Breite eines Frequenzbandes: 22 MHz
 - Max. 3 nicht überlappende Kanäle realisierbar
- Aufteilung

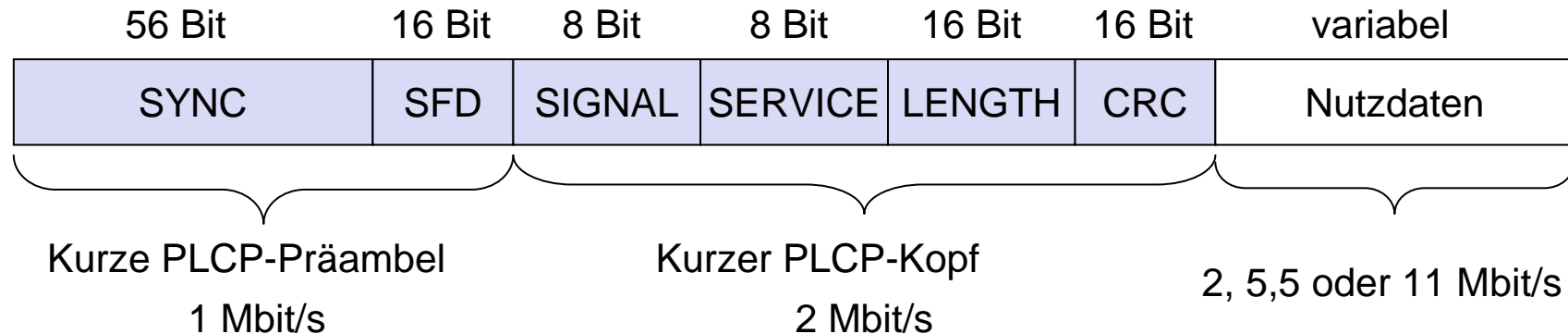




- **IEEE 802.11b**
 - Datenraten von 5,5 und 11 Mbit/s im 2.4 GHz-Band
 - Abwärtskompatibel zum Basisstandard
 - Einsatz von **Complementary Code Keying (CCK)**
 - Definition eines Formats für **kurze Dateneinheiten**
- **IEEE 802.11a**
 - Datenraten von 6 - 54 Mbit/s im 5 GHz-Frequenzbereich
 - Einsatz von **OFDM**
- **IEEE 802.11g**
 - Datenraten von 6 - 54 Mbit/s im 2,4 GHz-Frequenzbereich
 - Einsatz von OFDM
 - Abwärtskompatibel zu 802.11 und 802.11b



- Verwendung eines 8 Bit langen Complementary Codes anstelle des 11 Bit langen Chip Baker Codes (**Complementary Code Keying** – CCK)
 - Symbolrate = $1 \text{ MSymbol/s} * 11 / 8 = 1,375 \text{ MSymbol/s}$
 - Complementary Code wird aus Nutzdaten gewonnen
 - ▶ d.h. durch verwendeten Spreizcode werden gleichzeitig Nutzdaten übermittelt
- Realisierung der höheren Datenraten
 - Symbollänge = 4 Bit → Datenrate = $1,375 \text{ MSymbol/s} * 4 \text{ Bit/Symbol} = 5,5 \text{ MBit/s}$
 - ▶ 2 Bit werden über DQPSK moduliert
 - ▶ 2 Bit wählen einen von 4 komplexen Codes aus
 - Symbollänge = 8 Bit → Datenrate = $1,375 \text{ MSymbol/s} * 8 \text{ Bit/Symbol} = 11 \text{ MBit/s}$
 - ▶ 2 Bit werden über DQPSK moduliert
 - ▶ 6 Bit wählen einen von 64 komplexen Codes aus
- Da Empfänger alle 4 bzw. 64 Codes kennt, kann er den verwendeten Code herausfinden und damit die Nutzdaten dekodieren

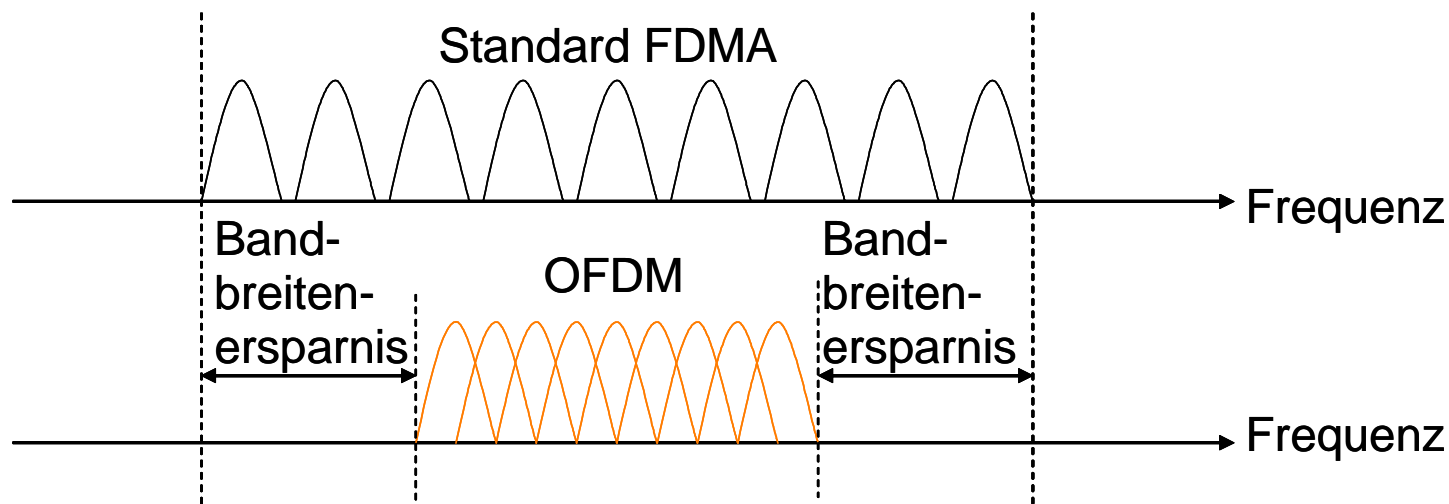


• Format für kurze DSSS-Dateneinheiten

- SYNC wird von 144 Bit auf 72 Bit reduziert
- SFD zeigt statt 1111001110100000 den Wert 0000010111001111 an
 - ▶ Unterscheidung möglich
- PLCP-Kopf wird mit 2 Mbit/s statt mit 1 Mbit/s übertragen
- Ergebnis
 - ▶ Übertragung von Präambel und Kopf benötigt nur 96 μ s statt 192 μ s
 - ▶ Einsparung von 50%
- Access Point zeigt ggf. in periodischen Beacons an, dass er das Format für kurze DSSS-Dateneinheiten unterstützt



- Datenraten von 6 bis 54 Mbit/s im 2,4 GHz Band
 - Vorteile
 - ▶ Weltweit lizenzfreies Frequenzband
 - ▶ Auswirkungen der Dämpfung geringer als im 5 GHz Band (vgl. IEEE 802.11a)
 - ▶ Geringere Sendeleistung erforderlich
- Verwendung von OFDM





- Abwärtskompatibel zu 802.11 und 802.11b
 - Extended Rate PHY (ERP)
 - ▶ Verfahren, die Datenraten über 11 Mbit/s unterstützen
 - Non Extended Rate PHY (NonERP)
 - ▶ Verfahren, die Datenraten bis 11 MBit/s unterstützen (802.11, 802.11b)

- Erweiterung der MAC-Schicht
 - Abwärtskompatibilität zu 802.11 und 802.11b
 - ▶ Siehe MAC-Erweiterungen: Protection Mechanismus

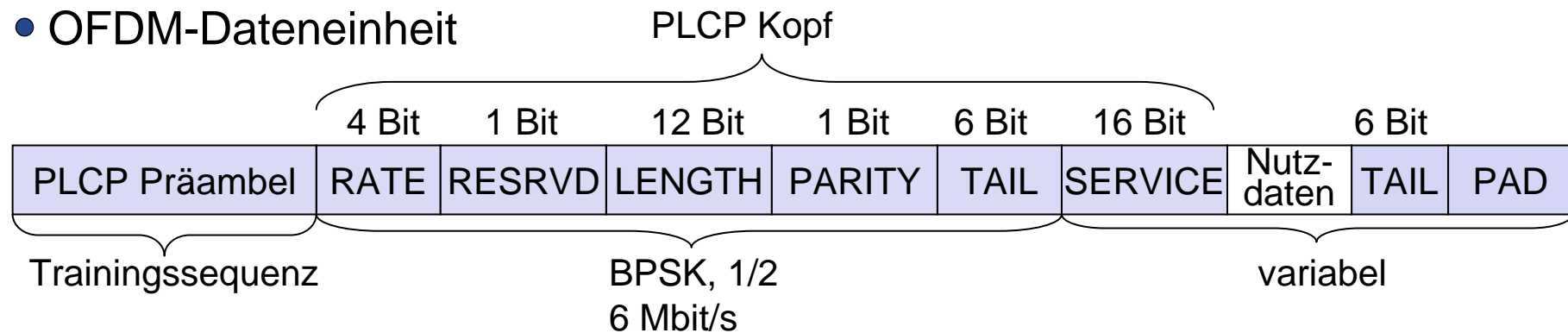


- Datenraten von 6 bis 54 Mbit/s im 5 GHz Band
- Verwendung von OFDM
- Forward Error Correction (FEC), um auftretende Fehler korrigieren zu können
 - FEC-Rate = n/m
 - ▶ für n Netto-Bits müssen m Brutto-Bits gesendet werden

(*) verpflichtend

Modulation	FEC Code-Rate	Datenrate
BPSK	1 / 2	6 Mbit/s (*)
BPSK	3 / 4	9 Mbit/s
QPSK	1 / 2	12 Mbit/s (*)
QPSK	3 / 4	18 Mbit/s
16-QAM	1 / 2	24 Mbit/s (*)
16-QAM	3 / 4	36 Mbit/s
64-QAM	2 / 3	48 Mbit/s
64-QAM	3 / 4	54 Mbit/s

- OFDM-Dateneinheit



- RATE

- ▶ Datenrate mit der ab dem Service-Feld gesendet wird

- LENGTH

- ▶ Länge der Nutzdaten

- PARITY

- ▶ Gerade Parität des LENGTH-Feldes

- TAIL

- ▶ 0-Bits; Empfänger stellt sich auf die geforderte Datenrate ein; Überführung des Faltungskodierers in den Ausgangszustand

- SERVICE

- ▶ Reserviert für zukünftige Verwendung (9 Bits) und Synchronisation des Descramblers (7 Bits)

- PAD

- ▶ Füllbits (OFDM spezifisch)

- **Codierungsprozess**

- Trainingsphase

- ▶ 1 x kurze Trainingssequenz
 - ▶ Kontrolle des Antennengewinns, Antennenauswahl, Taktgewinnung, Grobeinstellung der Empfängerfrequenz
 - ▶ 2 x lange Trainingssequenz
 - ▶ Kanalbestimmung, Feinabstimmung der Empfängerfrequenz

- Scrambling

- ▶ Verwürfeln der Daten (Service, Nutzdaten, Tail, Pad)
 - ▶ Vermeidung langer Folgen von Nullen und Einsen

- Faltungskodierung (Service, Nutzdaten, Tail, Pad)

- ▶ Hinzufügen von Redundanzbits für Vorwärtsfehlerkorrektur (immer Coderate 1/2)

- Ggf. Punktierung (Service, Nutzdaten, Tail, Pad)

- ▶ Gezieltes Verwerfen von Redundanzbits für Vorwärtsfehlerkorrektur
 - ▶ Notwendig um Coderaten von 2/3 und 3/4 erzeugen zu können

- Interleaving-Prozess

- ▶ Zusätzliche Verwürfelung
 - ▶ Umstellung der einzelnen Bits zwischen den Unterkanälen
 - ▶ Dient der Absicherung von Bündelfehlern



- Spezielle Anforderungen für WLANs
 - Medienzugriff
 - ▶ In drahtlosen LANs existiert das Problem der versteckten Endgeräte
→ WLANs benötigen spezielles Medienzugriffsverfahren
 - Einfluss des drahtlosen Übertragungsmediums
 - ▶ Drahtlose LANs sind anfälliger für Störeinflüsse als drahtgebundene
 - ▶ Höhere Bitfehlerrate des Funkmediums
 - ▶ Frequenzbereich kann auch von anderen Technologien verwendet werden
→ Automatic Repeat Request (ARQ) Verfahren auf MAC-Schicht sinnvoll
→ Fragmentierung auf MAC-Schicht sinnvoll
 - ▶ Drahtlose LANs sind wesentlich leichter abhörbar als drahtgebundene
→ Sicherheitsmechanismen auf MAC-Schicht erforderlich
 - Unterstützung mobiler Endgeräte
 - ▶ Geringe Batteriekapazität
 - ▶ Ständiges Abhören des Funkmediums würde zuviel Energie benötigen
→ Power-Management-Mechanismen auf MAC-Schicht sinnvoll

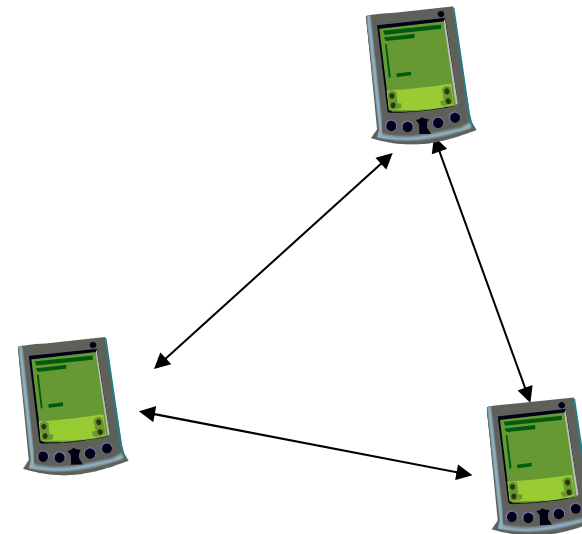
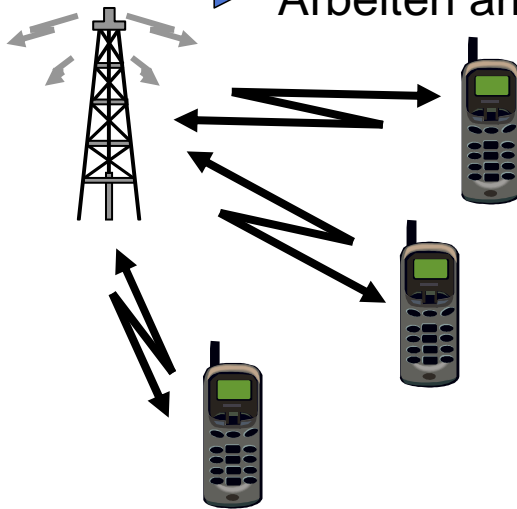


[III.4, 3.5]

- Klassifizierung

- Zentralisiert vs. verteilt arbeitende Protokolle

- ▶ Arbeiten am effektivsten in entsprechender Netzarchitektur



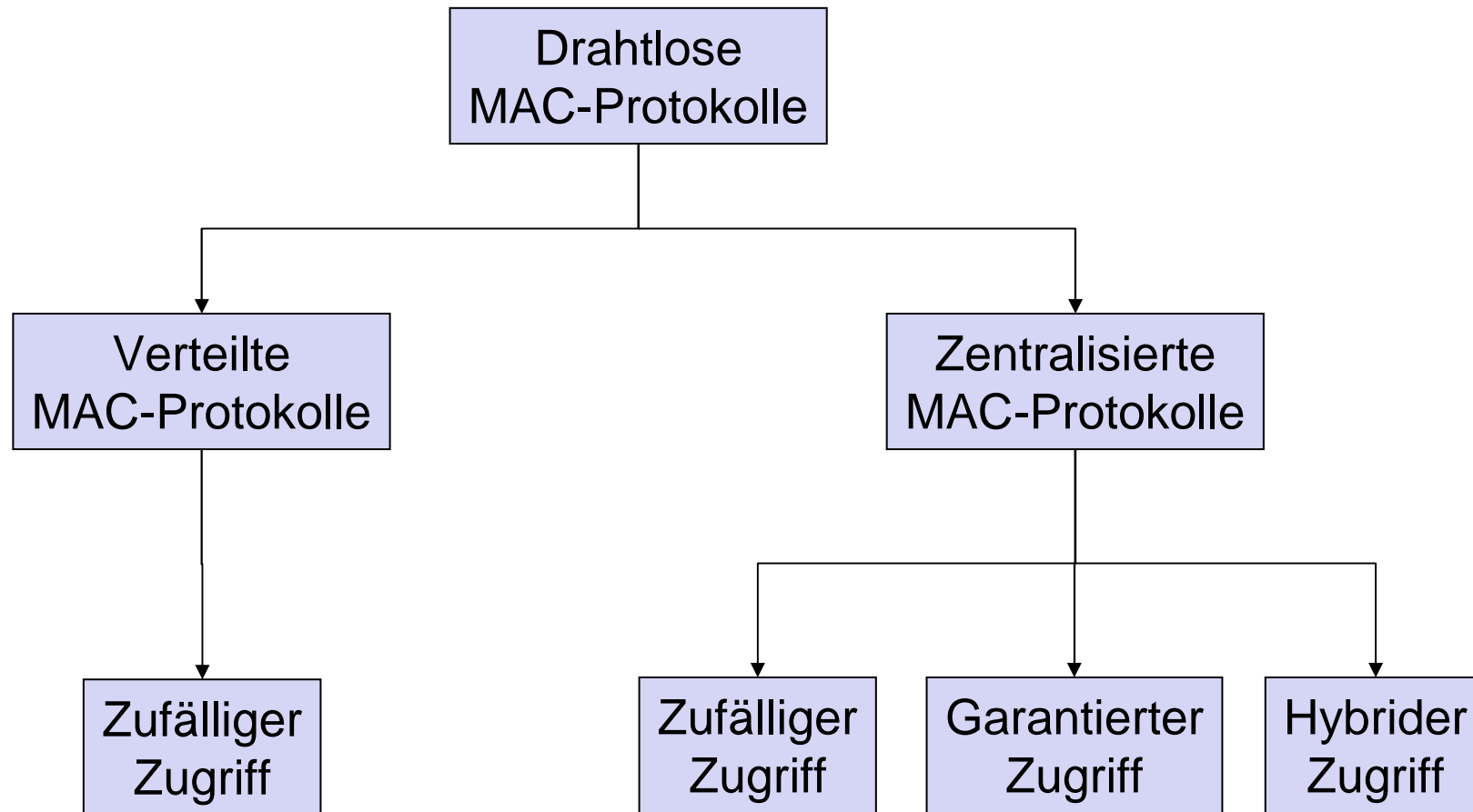
- Synchron vs. Asynchron

- ▶ Kanal kann in Zeitschlitzte eingeteilt werden (TDMA)

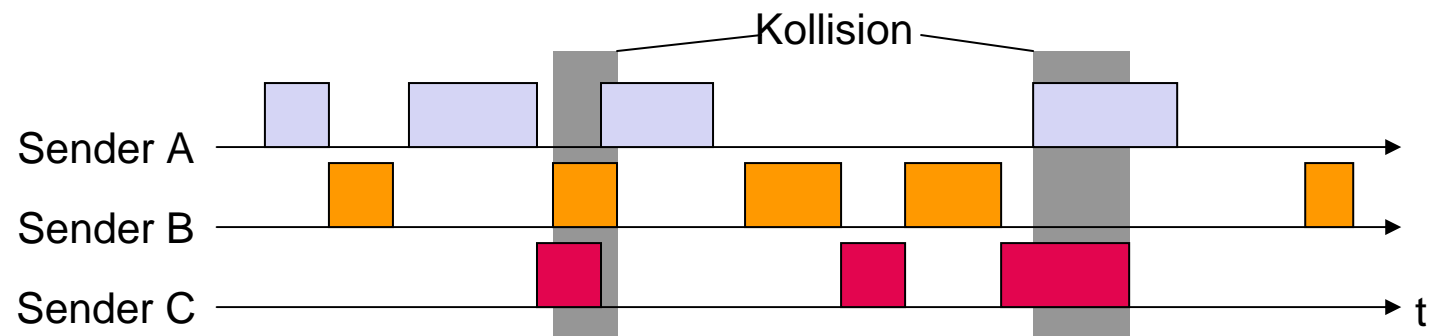
- ▶ Vereinfacht Management von Bandbreite und QoS

- ▶ Aber: alle Geräte müssen zeitlich synchronisiert sein
→ eher für zentralisierte Netzarchitektur geeignet

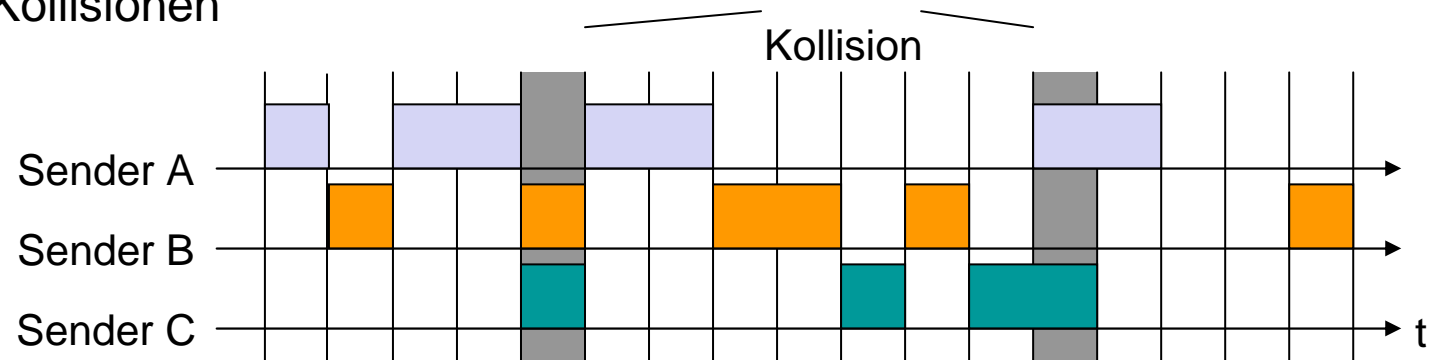
- ▶ Alternative: asynchrone, paketbasierte Protokolle mit zufälligem Zugriff



- **ALOHA** war das erste MAC-Protokoll für paketbasierte drahtlose Netze
 - zufälliger Zugriff mit Zeitmultiplex und ohne Kollisionsvermeidung
 - ▶ Viele Kollisionen bei hoher Last
 - ▶ ARQ auf höheren Schichten notwendig



- **Slotted ALOHA** erlaubt Senden nur zu Beginn eines Zeitschlitzes
 - Weniger Kollisionen





- Sender hört Medium zu Beginn der Übertragung ab
 - Überprüft Energiepegel
 - Medienzugriff soll nur erfolgen, wenn das Medium derzeit ungenutzt ist
 - Problem: Sender besitzt nur eine rein lokale Sicht
- Varianten
 - Non-persistentes CSMA
 - ▶ Falls Kanal belegt, nach zufälliger Zeitspanne noch einmal versuchen
 - p-persistentes CSMA
 - ▶ Kanal ist in (logische) Zeitschlitz eingeteilt. Falls Kanal frei, mit Wahrscheinlichkeit $0 < p < 1$ senden, andernfalls in späterem Zeitschlitz noch einmal versuchen
 - (1-)Persistentes CSMA
 - ▶ Senden, sobald Kanal frei ist
- Kollisionen können damit nicht vermieden werden!

- Kollisionsvermeidung durch **Out-of-Band Signalisierung**
 - Dadurch keine Self-Interference
 - Nachteil: Es muss ein weiterer Kanal belegt werden
- Beispiele
 - **Busy Tone Multiple Access (BTMA)**
 - ▶ Jeder, der andauernde Übertragung auf Datenkanal hört, sendet „Busy Tone“ auf einem anderen Übertragungskanal (Kontrollkanal)
 - ▶ Alle Geräte im 2-hop Umkreis eines aktiven Knotens warten
 - ▶ Keine versteckten Endgeräte, aber viele ausgelieferte Endgeräte
 - **Receiver Initiated Busy Tone Multiple Access (RI-BTMA)**
 - ▶ Nur Empfänger sendet „Busy Tone“
 - ▶ Kaum ausgelieferte Endgeräte, aber Busy Tone kann erst gesendet werden, wenn Empfänger Übertragungswunsch dekodiert hat

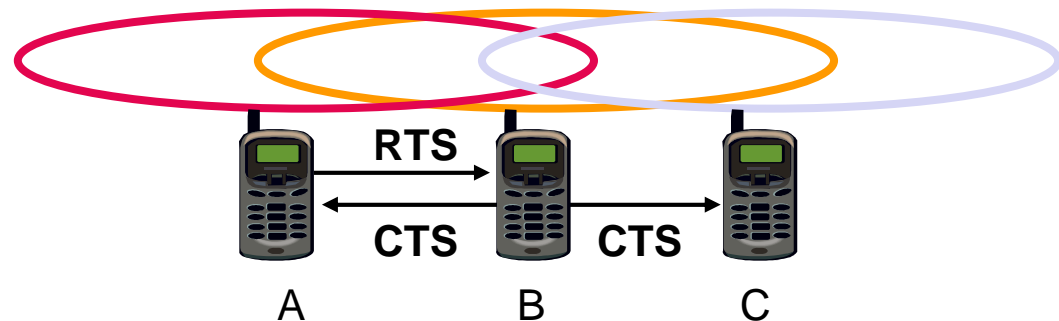


- Kollisionsvermeidung durch **In-Band Signalisierung**
 - Control-Handshake auf gleichem Kanal wie Datenübertragung
- Beispiel
 - **Multiple Access with Collision Avoidance (MACA)**
 - ▶ Drei-Wege-Handshake minimiert Anzahl versteckter Endgeräte
 - ▶ Sender sendet kurze **Request to Send (RTS)** Dateneinheit
 - ▶ Empfänger antwortet mit **Clear to Send (CTS)** Dateneinheit
 - ▶ Sender sendet Daten
 - Während Handshaking-Phase können noch Kollisionen auftreten!
 - ▶ Aber mit geringerer Wahrscheinlichkeit, da RTS/CTS sehr klein sind



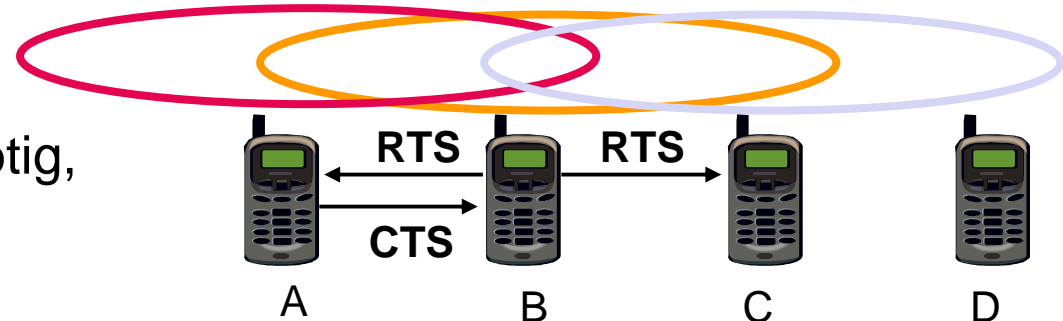
• Vermeidung des Problems versteckter Endgeräte

- A und C wollen zu B senden
- A sendet zuerst RTS
- B antwortet mit
 - ▶ CTS teilt Dauer der Belegung mit
- C wartet, da es das CTS von B hört



• Vermeidung des Problems „ausgelieferter“ Endgeräte

- B will zu A, C zu D senden
- C wartet nicht mehr unnötig, da es das CTS von A nicht empfängt



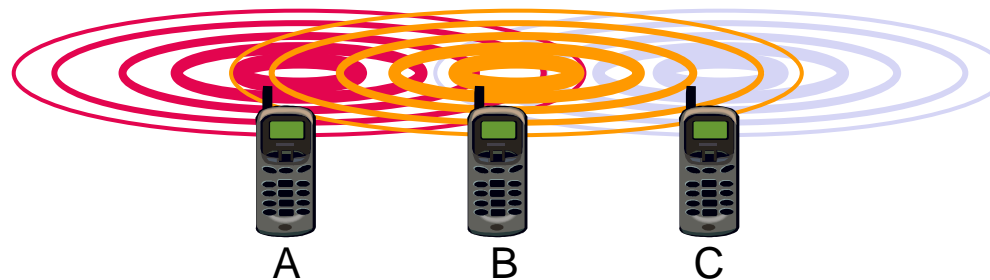


- **Distribution Coordination Function (DCF)**
 - Dezentraler Ansatz
 - In Infrastruktur- und Ad-hoc-Netzwerken einsetzbar
 - In Wettbewerbsphase (**Contention Period - CP**) konkurrieren Stationen um Medienzugriff
 - ▶ Datenaustausch auf Best-Effort Basis
 - ▶ Broadcast und Multicast möglich
 - Jede IEEE 802.11 Station **muss** DCF unterstützen

- **Point Coordination Function (PCF)**
 - Zentraler Ansatz
 - Nur in Infrastruktur-Netzwerken einsetzbar
 - Point Coordinator kontrolliert innerhalb der wettbewerbsfreien Phase (**Contention Free Period - CFP**) den Medienzugriff
 - ▶ Medienzugriff kann Station für bestimmten Zeitraum garantiert werden
 - PCF muss nicht von jeder Station implementiert werden
 - ▶ Aktuelle Produkte unterstützen PCF nicht



- Verteiltes MAC-Protokoll
- CSMA/CD-Verfahren (Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection) von IEEE 802.3 einsetzbar?
 - Nein.
 - Kollisionserkennung findet bei CSMA/CD beim Sender statt
 - ▶ Station muss gleichzeitig senden und empfangen können
 - ▶ Bei WLAN vollständig getrennte Sende- und Empfangseinheit
 - ▶ Hardwareaufwand nicht gerechtfertigt
 - Kollisionserkennung muss bei WLAN **beim Empfänger** stattfinden
 - ▶ Vgl. Situation mit versteckten Endgeräten



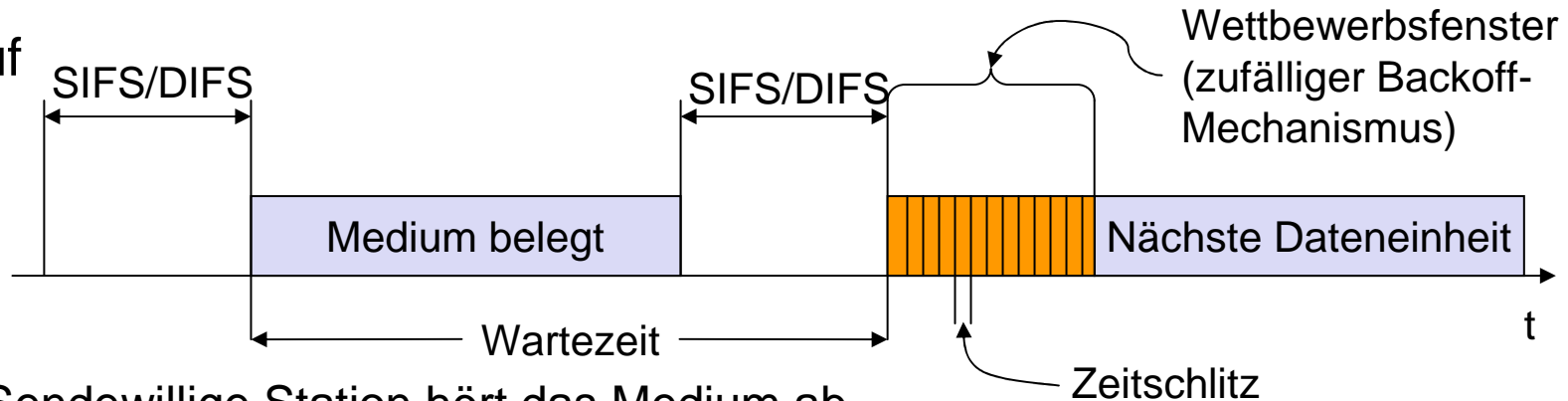
- IEEE 802.11 verwendet das **CSMA/CA**-Verfahren (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) für den Medienzugriff
 - Wahrscheinlichkeit von Kollision wird minimiert



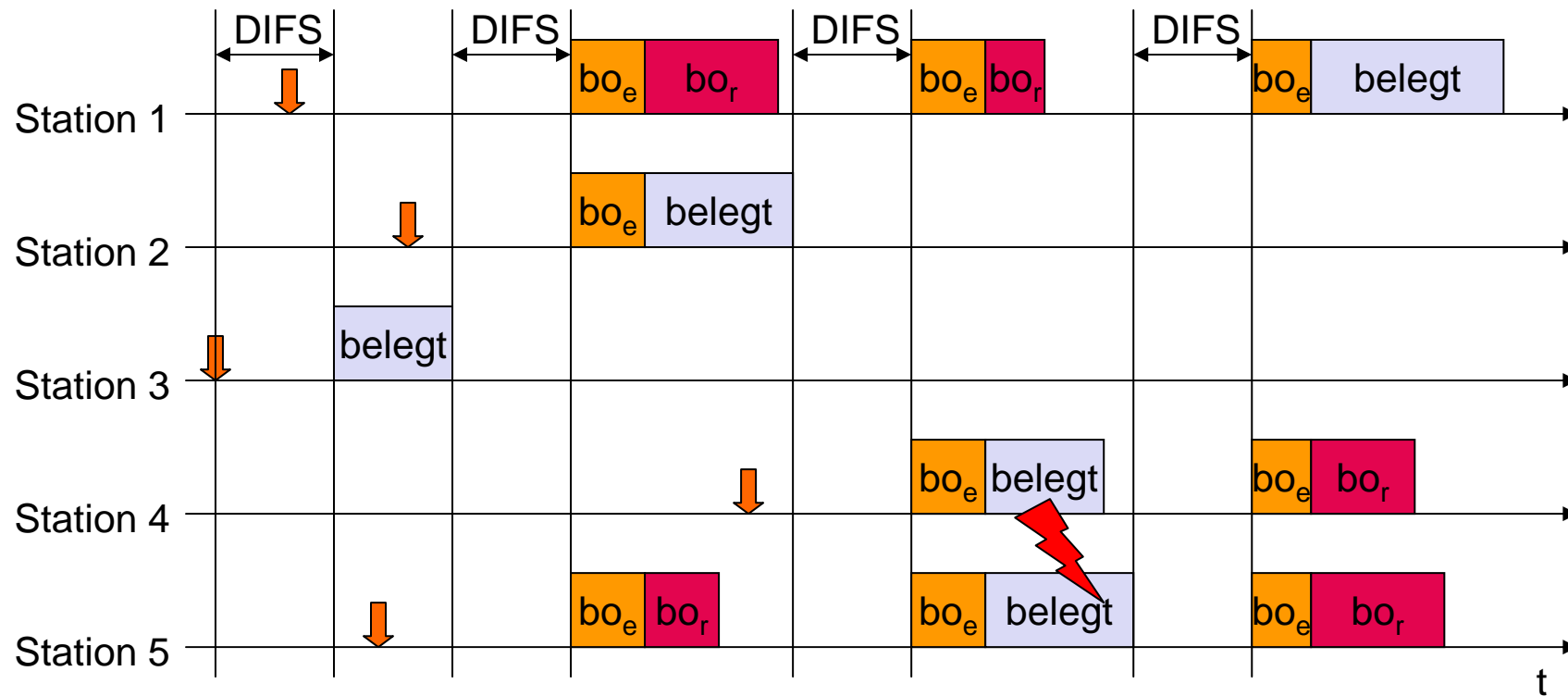
- **Physikalische** Carrier-Sense-Funktion
 - Erkennen, ob Medium gerade von einer anderen Station belegt ist
- **Virtuelle** Carrier-Sense-Funktion
 - Medienreservierung auf Basis des **Network Allocation Vectors (NAV)**
 - ▶ In jeder MAC-Dateneinheit enthalten
 - ▶ Zeigt voraussichtliche Dauer der Medienbelegung an
 - Unterschiedliche Wartezeiten (**Inter Frame Spaces – IFS**) nach Ablauf des NAV
 - ▶ **Short Interframe Space (SIFS)**
 - ▶ Höchste Priorität → geringste Wartezeit
 - ▶ **Distributed (Coordination Function) Interframe Space (DIFS)**
 - ▶ Geringste Priorität → längste Wartezeit
 - Backoff-Algorithmus
 - ▶ Bestimmung einer zufälligen Wartezeit
 - ▶ $\text{backoff time} = \text{random}(\text{CW}) \times \text{slot time}$
 - ▶ $\text{CW}_{\min} \leq \text{random}(\text{CW}) \leq \text{CW}_{\max}$
 - ▶ CW_{\min} und CW_{\max} bilden Wettbewerbsfenster (CW – Contention Window)
 - ▶ slot time (Zeitschlitz): festgelegt von physikalischer Schicht (bei DSSS = 20 μs)



- Ablauf



- Sendewillige Station hört das Medium ab
- Fall 1: Medium ist für die Dauer eines entsprechenden IFS frei
 - ▶ Daten werden versendet
- Fall 2: Medium ist belegt
 - ▶ Warten bis das Medium für die Dauer des entsprechenden IFS frei ist
 - ▶ Zusätzlich wird das Versenden der Daten um eine zufällige Backoff-Zeit verzögert
 - ▶ Dynamische Anpassung des Wettbewerbsfensters
 - ▶ Bei fehlgeschlagenem Versuch werden CWmin und CWmax verdoppelt (bis Maximalwert)
 - ▶ Bei erfolgreichem Versuch werden CWmin und CWmax auf Minimalwert zurück gesetzt
 - ▶ Wird das Medium während der Backoff-Zeit von einer anderen Station belegt, wird der Backoff-Timer so lange angehalten



belegt

Medium belegt

bo_e

verstrichene Backoff-Zeit



Sendewunsch liegt vor

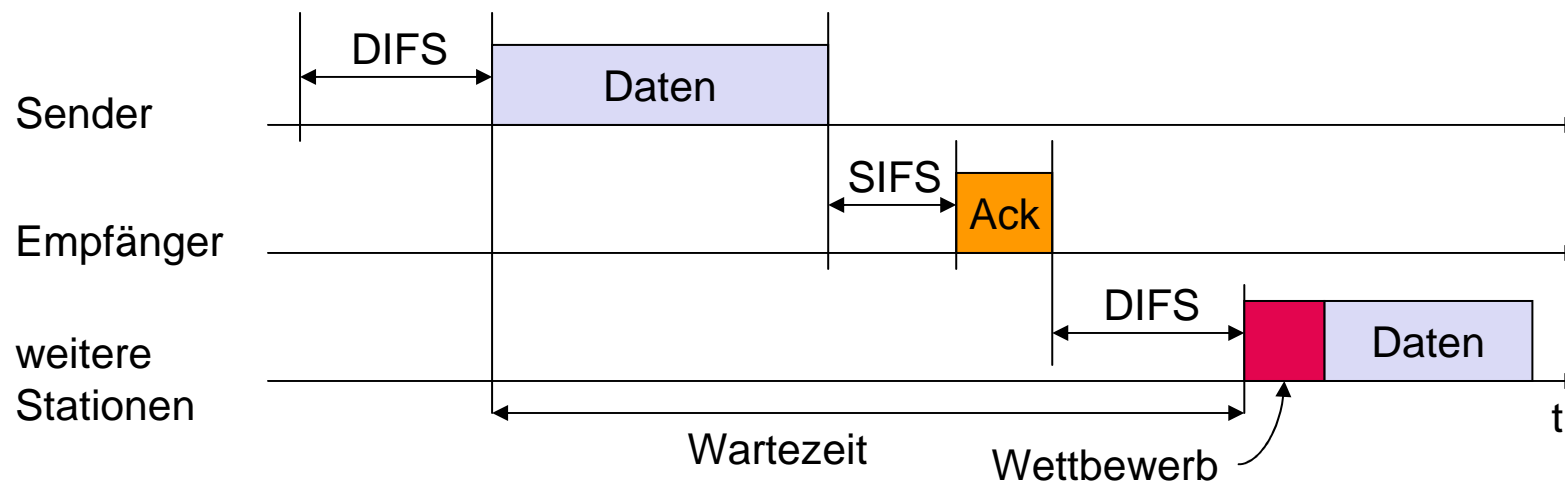
bo_r

verbleibende Backoff-Zeit



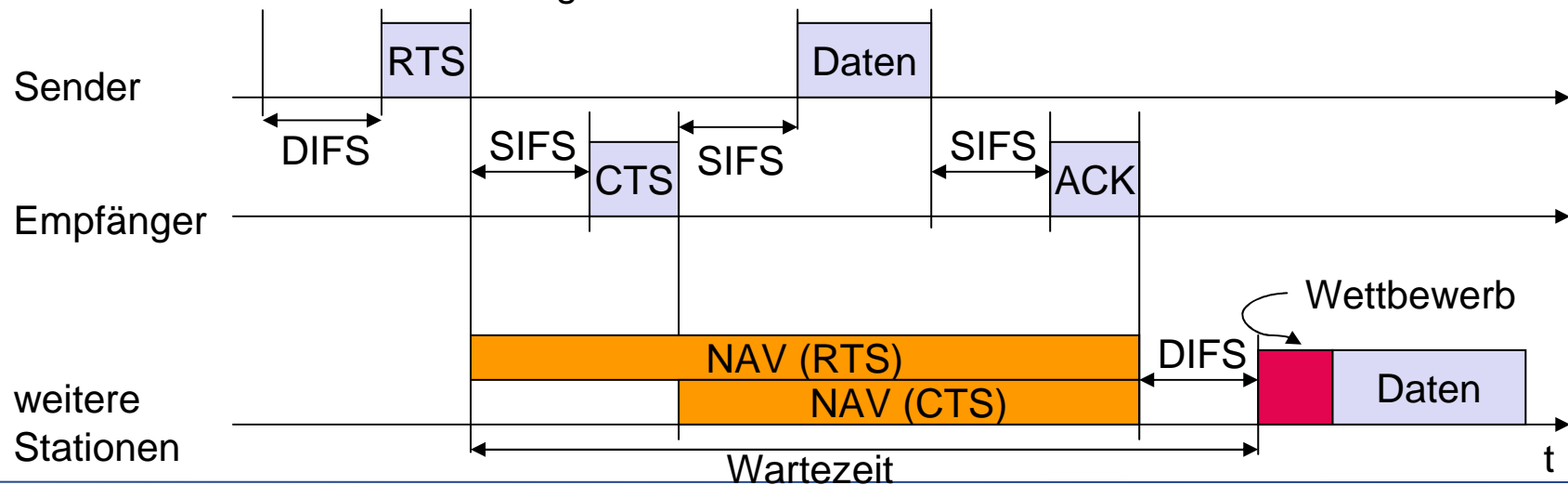


- Daten können nach Abwarten von DIFS gesendet werden
- Empfänger antworten nach SIFS mit einem ACK, falls die Dateneinheit korrekt empfangen wurde
 - Überprüfen der Korrektheit mittels CRC
- Im Fehlerfall wird die Dateneinheit vom Sender automatisch wiederholt
 - Station bewirbt sich erneut um das Medium
 - Neuer Backoff wird berechnet (CWmin und CWmax angepasst)





- RTS/CTS-Erweiterung für Unicast-Dateneinheiten
 - RTS kann nach Abwarten von DIFS gesendet werden
 - ▶ Belegungsdauer als Parameter mit gesendet
 - Bestätigung durch CTS nach SIFS durch Empfänger
 - ▶ Enthält ebenfalls Belegungsdauer als Parameter
 - Sofortiges Senden der Daten nach SIFS möglich
 - ▶ Bestätigung wie gehabt mit ACK
 - Andere Stationen speichern Belegungsdauer im NAV (Net Allocation Vector)
 - ▶ Virtuelle Reservierung





- Ziel
 - Übertragung längerer zusammenhängender Daten
- Vorgehensweise
 - Über Sequence-Control Feld der Dateneinheit gesteuert
 - ▶ Sequenznummern und Fragmentnummern
 - Stop-and-Wait ARQ-Verfahren auf Fragmente angewendet
 - Weshalb ist der NAV-Wert nicht über die Sendung der gesamten Daten gesetzt?

