

## I. Einleitung

1. Einführung und Grundlagen

## II. Drahtlose Telekommunikationssysteme

2. GSM
3. UMTS

## III. Drahtlose lokale Netze

4. IEEE 802.11 / WiFi

## IV. Drahtlose innerstädtische Netze

5. Mobile Ad Hoc 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

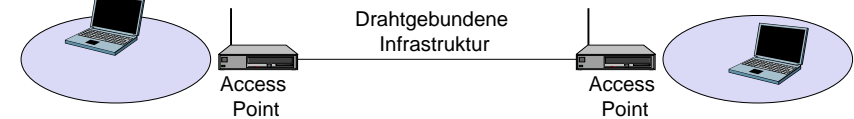
1



## • Ausprägungsformen drahtloser LANs (WLAN - Wireless LAN)

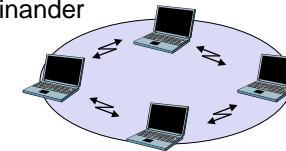
### • Infrastruktur-Netzwerke

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



### • Ad-hoc-Netzwerke

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



2

## • 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

3

• **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 **Netzicherheit**
  - Emissionen
    - ▶ z.B. keine Interferenzen mit Herzschrittmachern

4



## 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)

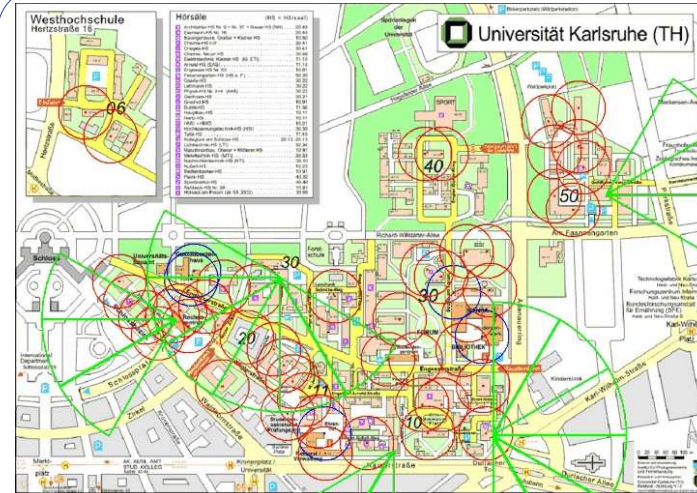
## HIPERLAN – High Performance Radio Local Area Network

- 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

5



blau = Außenantennen  
rot = Innenantennen  
grün = Richtantennen

Aufbau:

- ca. 210 Zugangspunkte
- IEEE 802.11 b/g

Abdeckung:

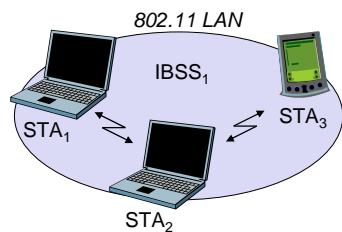
- ca. 80 % der Campusfläche
- 37 Hörsäle/Seminarräume

III.6

6



## Architektur eines Ad-hoc-Netzwerks

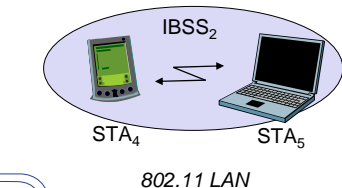


### Direkte Kommunikation der Geräte

- ▶ 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

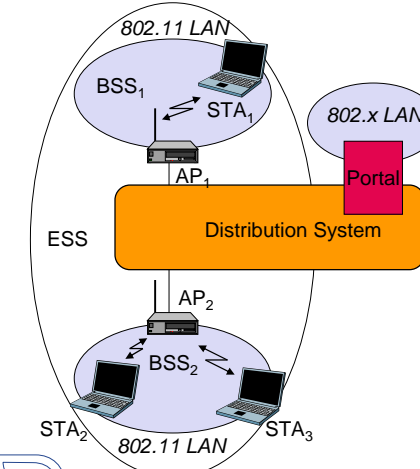
- ▶ Räummultiplexen (genügend Abstand)
- ▶ Nutzen unterschiedlicher Funkfrequenzen



7



## 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.

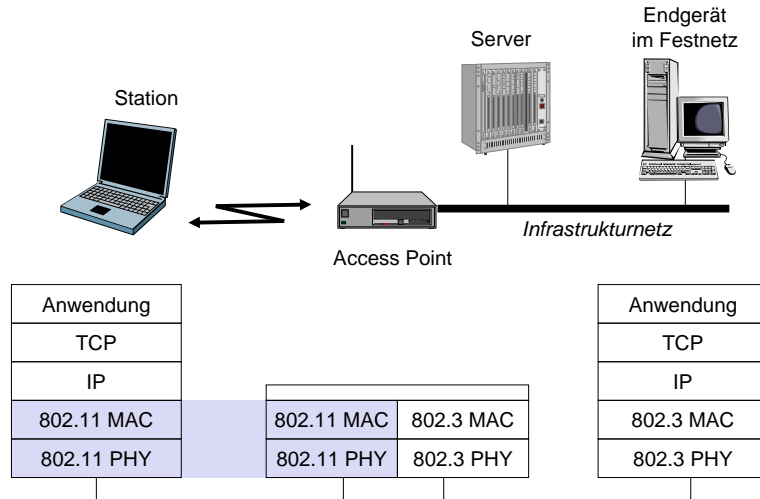
### Portal

- ▶ Übergang in ein anderes Netz

### Distribution System

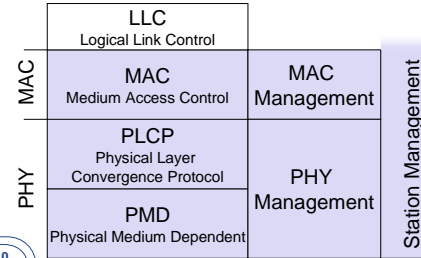
- ▶ Verbindung mehrerer BSS zu einem Extended Service Set (ESS)
- ▶ Architektur des Distribution System ist nicht Teil des Standards

8



9

- **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



10



- **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

11

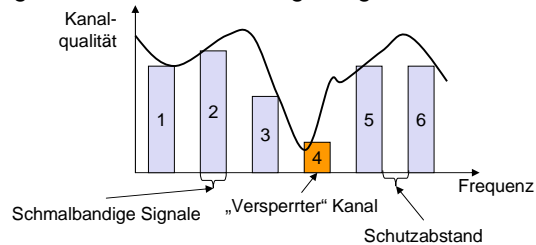


- Engl.: **spread spectrum**
- **Problem**
  - Frequenzselektives Fading und schmalbandige Störungen können einige schmalbandige Kanäle „versperren“.
- **Lösung**
  - Signal mittels Codefolge auf breiteren Frequenzbereich **spreizen**
- **Nebeneffekte**
  - Koexistenz mehrerer Nutzsignale ohne dynamische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

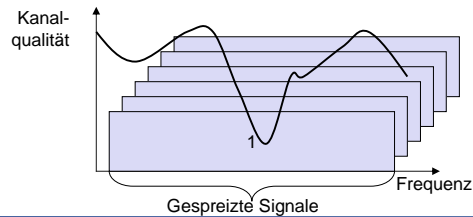
12



- Verwendung **mehrerer** schmalbandiger Signale



- Bandspreizung **aller** Signale

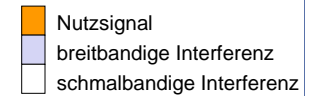


13



- Diagramme

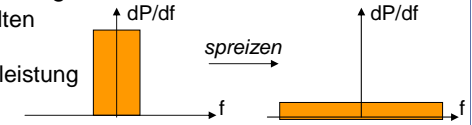
- Leistungsdichte ( $dP/df$ ) über Frequenz ( $f$ )



- Sender

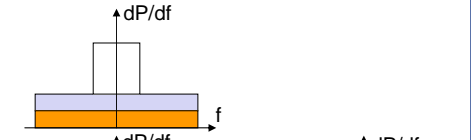
- Spreizen eines schmalbandigen Signals

- Energie (Fläche) bleibt erhalten
- Resultat ist breitbandiges Signal mit geringerer Sendeleistung

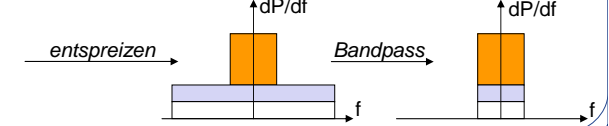


- ... während der Übertragung

- Verschiedene Interferenzen



- Empfänger



14



- 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

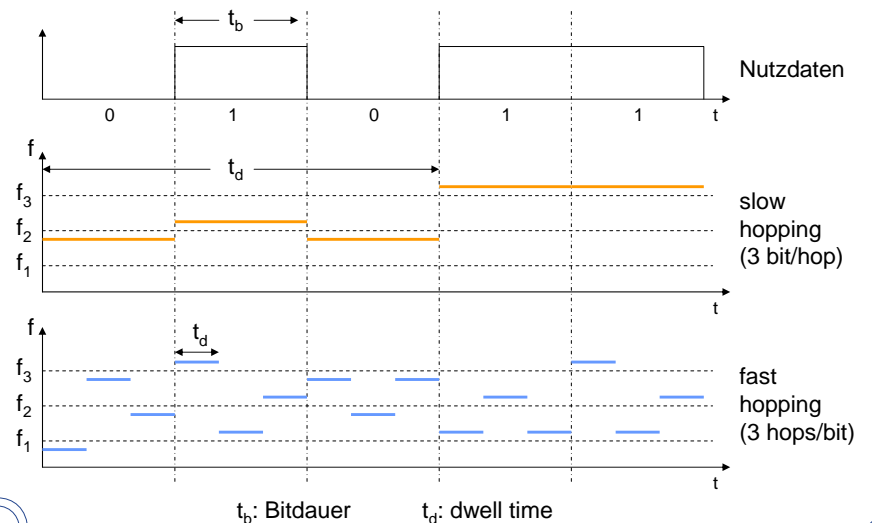
- Vorteile

- 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

15

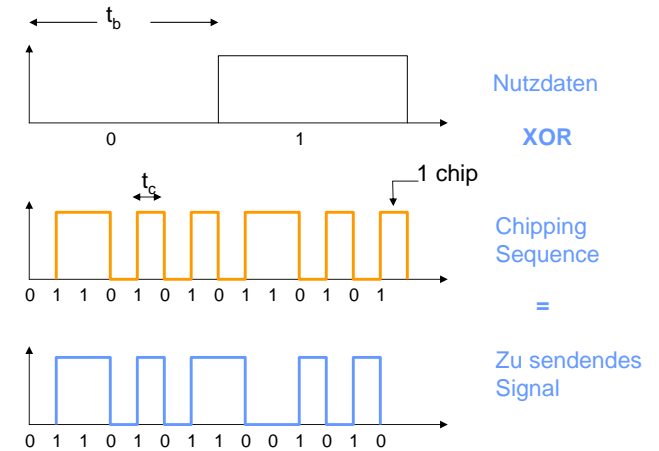


16



- **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

17



Chiprate:  $r_c = 1/t_c$   
Bitrate:  $r_b = 1/t_b$

→ Spreizfaktor =  $r_c / r_b$   
Größe des Spreizfaktors im Beispiel?

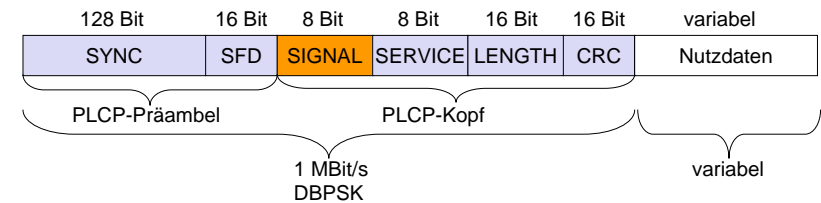
18



- **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 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

PHY	MAC	MAC	MAC Management	Station Management
	PLCP	PHY	PHY Management	
		PMD		

19



- **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 [μs], die für die Übertragung der Nutzdaten benötigt wird
- **CRC**
  - ▶ Prüfsumme über den PLCP-Kopf

20

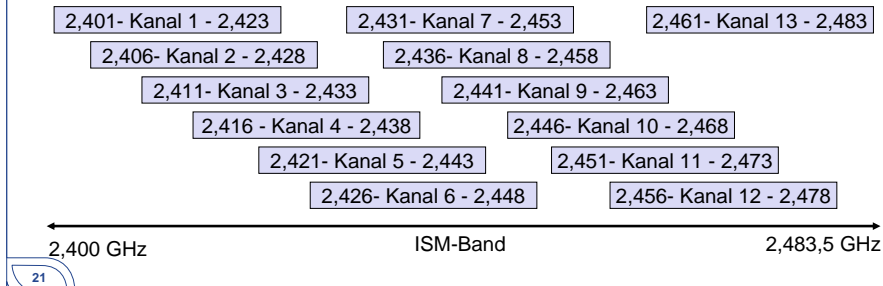




### • WLAN verwendet das ISM-Band

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

### • Aufteilung



21



### • 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

22



### • Verwendung eines 8 Bit langen Complementary Codes anstelle des 11 Bit langen Chip Baker Codes (**Complementary Code Keying – CCK**)

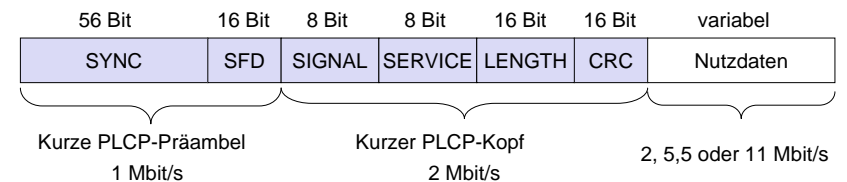
- Symbolrate =  $1 \text{ MSymbol/s} \cdot 11 / 8 = 1,375 \text{ MSymbol/s}$
- Complementary Code wird aus Nutzdaten gewonnen
  - ▶ d.h. durch verwendeten Spreizcode werden gleichzeitig Nutzdaten übermittelt

### • Realisierung der höheren Datenraten

- Symbollänge = 4 Bit → Datenrate =  $1,375 \text{ MSymbol/s} \cdot 4 \text{ Bit/Symbol} = 5,5 \text{ Mbit/s}$ 
  - ▶ 2 Bit werden über DQPSK moduliert
  - ▶ 2 Bit wählen einen von 4 komplexen Codes aus
- Symbollänge = 8 Bit → Datenrate =  $1,375 \text{ MSymbol/s} \cdot 8 \text{ Bit/Symbol} = 11 \text{ Mbit/s}$ 
  - ▶ 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

23



### • 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 µs statt 192 µs
  - ▶ Einsparung von 50%
- Access Point zeigt ggf. in periodischen Beacons an, dass er das Format für kurze DSSS-Dateneinheiten unterstützt

24

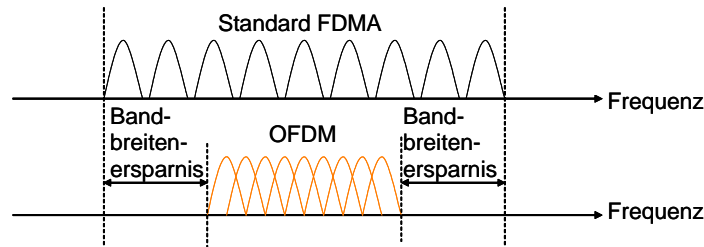


- Datenraten von 6 bis 54 Mbit/s im 2,4 GHz Band

- Vorteile

- ▶ Weltweit lizenzfreies Frequenzband
    - ▶ Auswirkungen der Dämpfung geringer als im 5 GHz Band (vgl. IEEE 802.11a)
    - ▶ Geringere Sendeleistung erforderlich

- Verwendung von OFDM



25



- 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

26



- 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

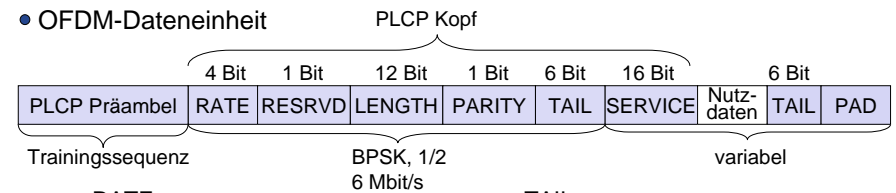
(\*) verpflichtend

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

27



- 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)

28

## • 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


29

## • 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

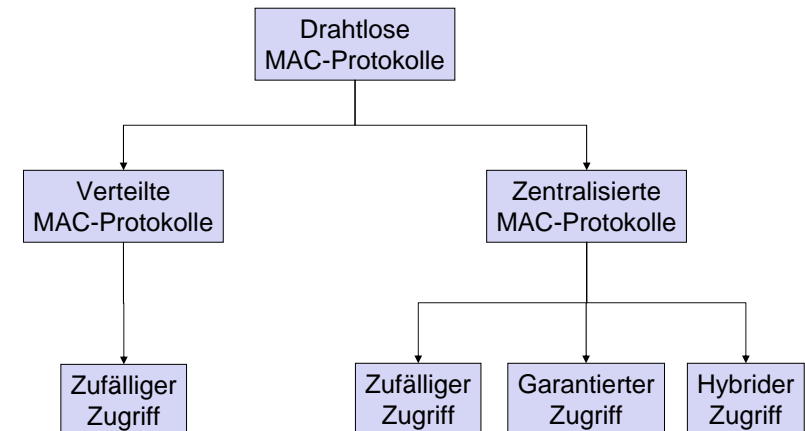
30

## • Klassifizierung

- Zentralisiert vs. verteilt arbeitende Protokolle
    - ▶ Arbeiten am effektivsten in entsprechender Netzarchitektur
- 
- Synchron vs. Asynchron
    - ▶ Kanal kann in Zeitschlitz 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

 [III.4, 3.5]

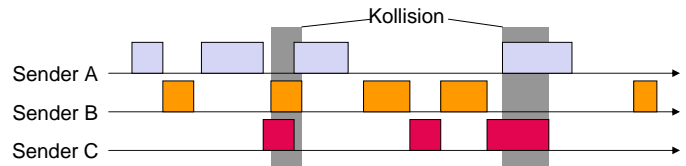
31



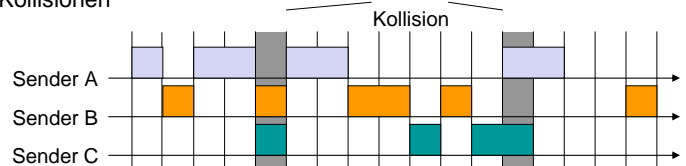
32



- **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



33

- 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!



34

- 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

35

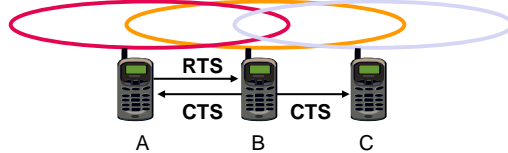
- Kollisionsvermeidung durch **In-Band Signalisierung**
  - Control-Handshake auf gleichem Kanal wie Datenübertragung
- Beispiel
  - **Multiple Access with Collision Avoidance (MACA)**
    - ▶ Drei-Wege-Handshake minimiert Anzahl versteckter Endgeräte
    - ▶ Sender sendet kurze **Request to Send (RTS)** 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

36



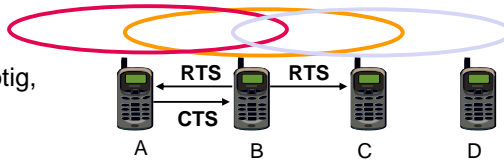
### • Vermeidung des Problems versteckter Endgeräte

- 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



37



### • 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

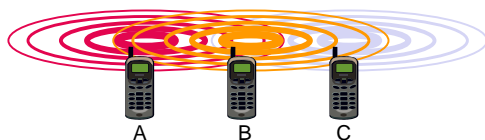
### • Point Coordination Function (PCF)

- 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

38



- 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

39



### • Physikalische Carrier-Sense-Funktion

- Erkennen, ob Medium gerade von einer anderen Station belegt ist

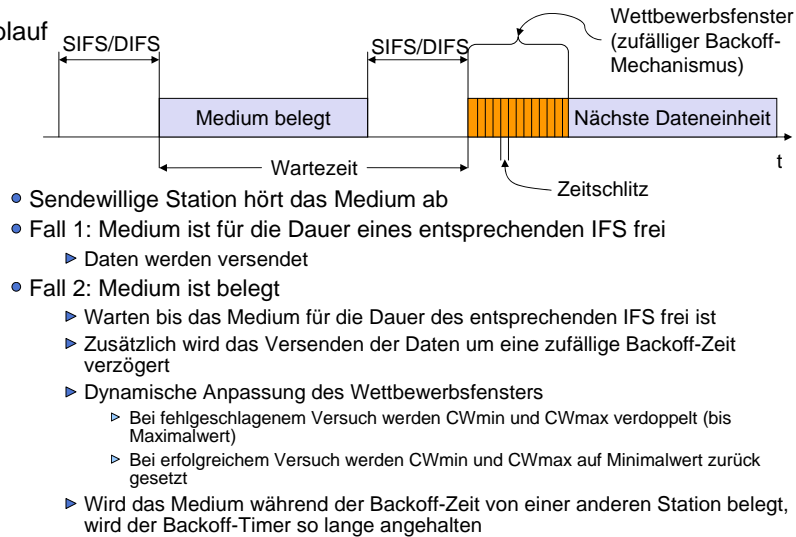
### • Virtuelle Carrier-Sense-Funktion

- 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
  - ▶  $\text{backoff time} = \text{random}(\text{CW}) \times \text{slot time}$ 
    - ▶  $\text{CW}_{\min} \leq \text{random}(\text{CW}) \leq \text{CW}_{\max}$
    - ▶  $\text{CW}_{\min}$  und  $\text{CW}_{\max}$  bilden Wettbewerbsfenster (CW – Contention Window)
    - ▶ slot time (Zeitschlitz): festgelegt von physikalischer Schicht (bei DSSS = 20 µs)

40

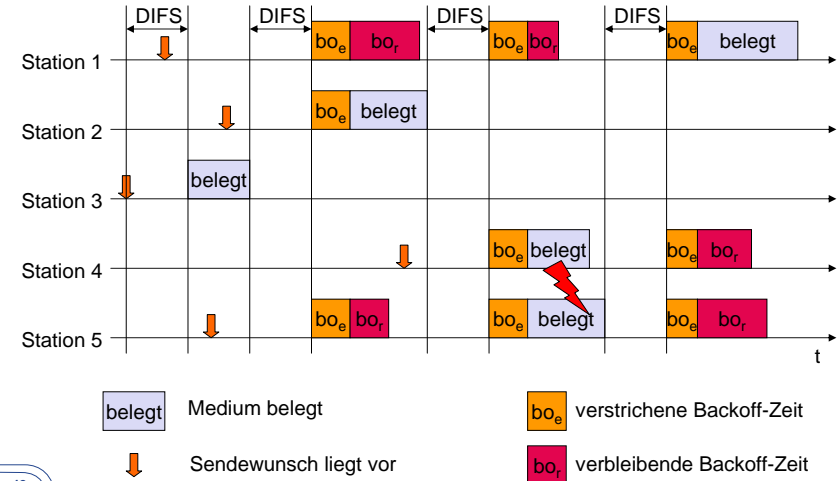


## Ablauf



- 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

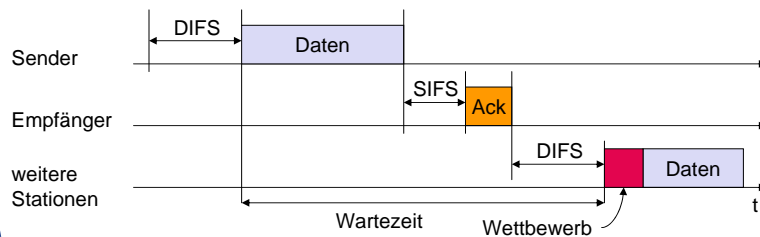
41



42



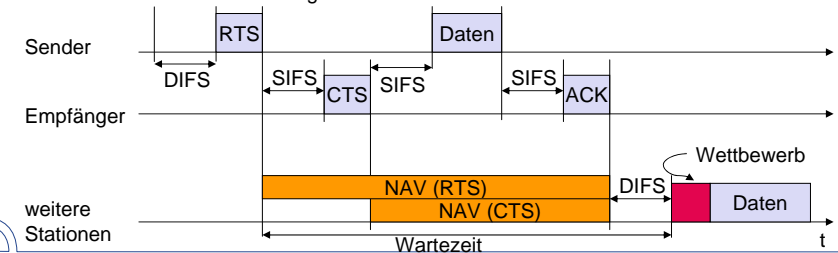
- Daten können nach Abwarten von DIFS gesendet werden
- Empfänger antworten nach SIFS mit einem ACK, falls die Dateneinheit korrekt empfangen wurde
  - Überprüfen der Korrektheit mittels CRC
- Im Fehlerfall wird die Dateneinheit vom Sender automatisch wiederholt
  - Station bewirbt sich erneut um das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



43



- 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



44



- 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?

