

- 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

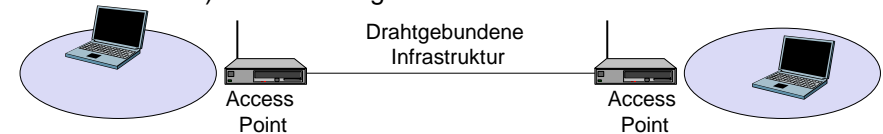
- 4.1 Einführung
- 4.2 IEEE 802.11 – Überblick
- 4.3 PHY-Schicht
 - 4.3.1 Exkurs: Spreizspektrumtechnik
 - 4.3.2 DSSS in IEEE 802.11
 - 4.3.3 Erweiterungen
- 4.4 MAC-Schicht
 - 4.4.1 Exkurs: MAC-Protokolle
 - 4.4.2 Medienzugriff in IEEE 802.11
 - 4.4.3 Format der MAC-Dateneinheiten
- 4.5 MAC Management
 - 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)

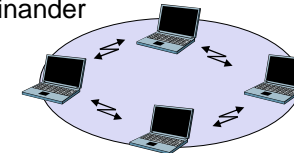
• Infrastruktur-Netzwerke

- 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

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  **Netzsicherheit**
 - 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)

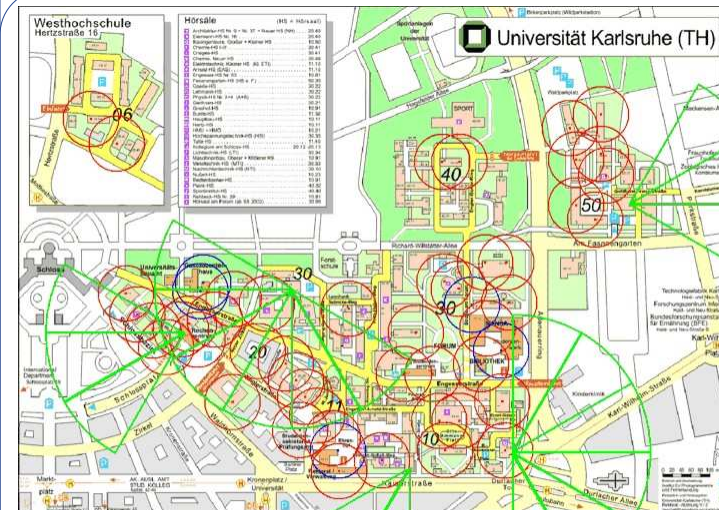
HIPERLAN – High Performance Radio Local Area Network

- 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:

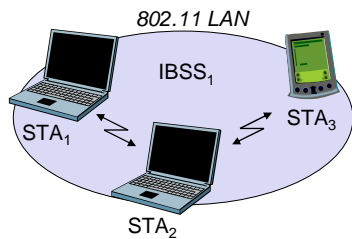
- ca. 80 % der Campusfläche
- 37 Hörsäle/Seminarräume

III.6

6



• Architektur eines Ad-hoc-Netzwerks

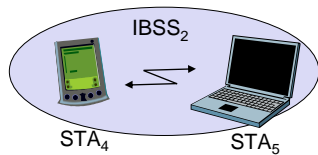


• Direkte Kommunikation der Geräte

- ▶ 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

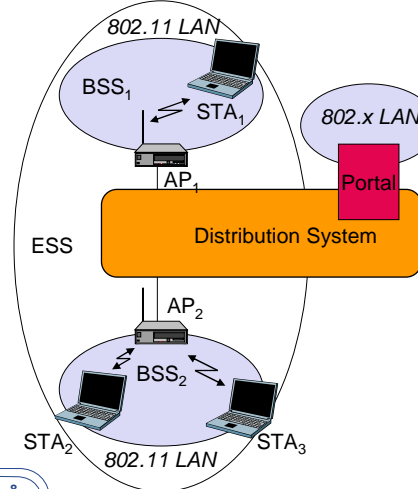
- ▶ Raummultiplexen (genügend Abstand)
- ▶ Nutzen unterschiedlicher Funkfrequenzen



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

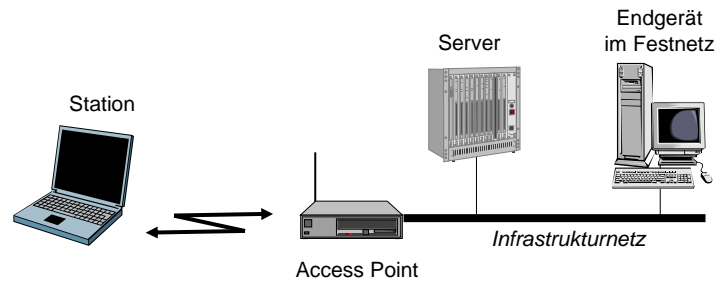
- ▶ Übergang in ein anderes Netz

• Distribution System

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

8





Anwendung
TCP
IP
802.11 MAC
802.11 PHY

802.11 MAC	802.3 MAC
802.11 PHY	802.3 PHY

Anwendung
TCP
IP
802.3 MAC
802.3 PHY

• 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

	LLC Logical Link Control	
MAC	MAC Medium Access Control	MAC Management
	PLCP Physical Layer Convergence Protocol	
PHY	PMD Physical Medium Dependent	PHY Management
		Station Management



- 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

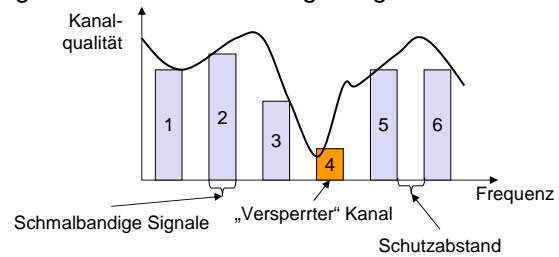
- Koexistenz mehrerer Nutzsignale ohne dynamische Koordination
 - Abhörsicherheit

- Alternativen

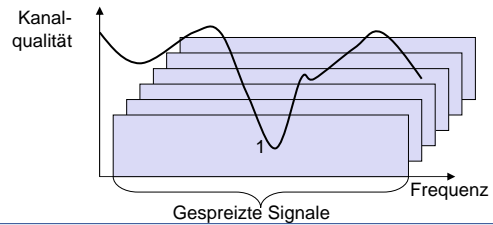
- Direct Sequence, Frequency Hopping



- Verwendung **mehrerer** schmalbandiger Signale



- Bandspreizung **aller** Signale

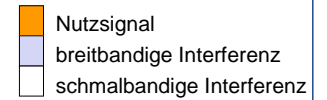


13



- Diagramme

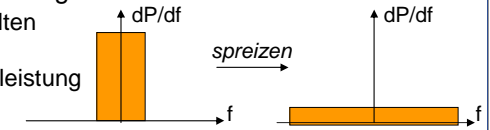
- Leistungsdichte (dP/df) über Frequenz (f)



- Sender

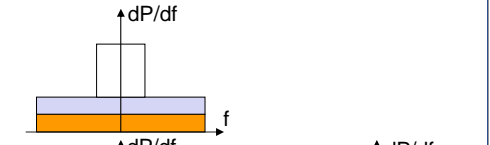
- Spreizen eines schmalbandigen Signals

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

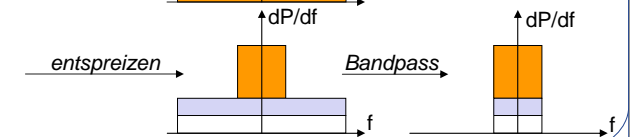


- ... während der Übertragung

- Verschiedene Interferenzen



- Empfänger



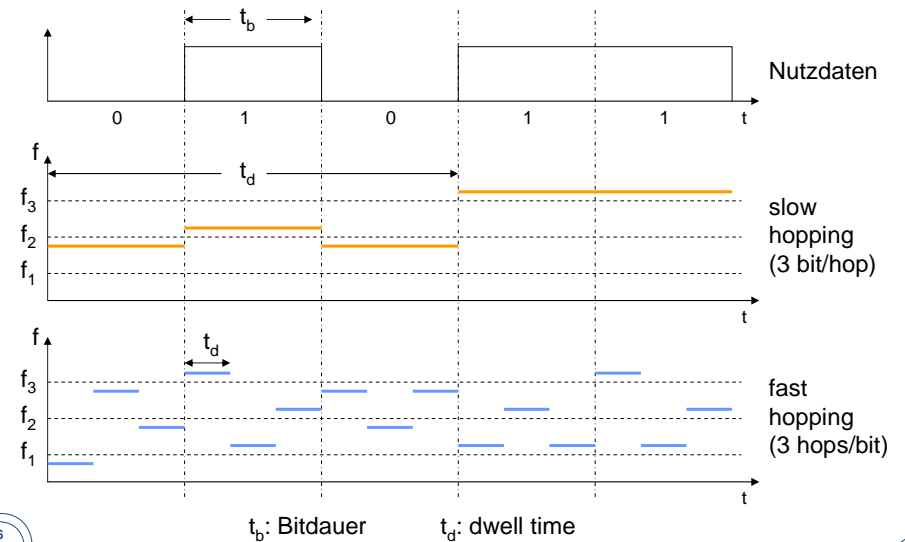
14





- 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

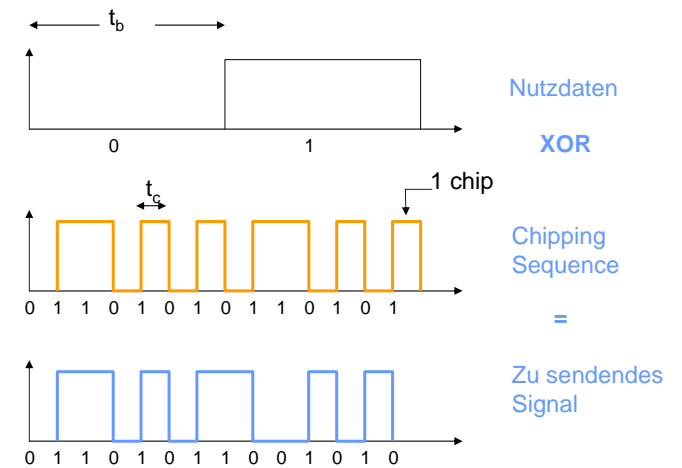
15



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



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

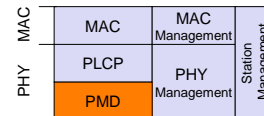
→ Spreizfaktor = r_c / r_b
 Größe des Spreizfaktors im Beispiel?



• 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

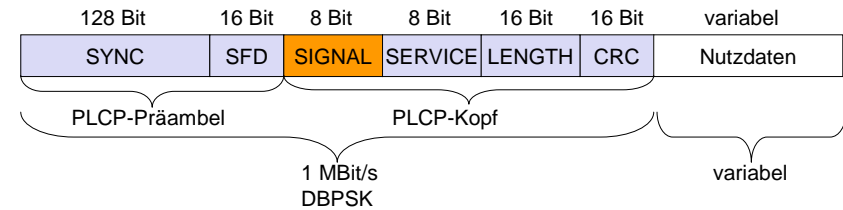
- Chiprate: 11 MChips/s
 - ▶ Damit eine Symbolrate von 1 MSymbol/s



• 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

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

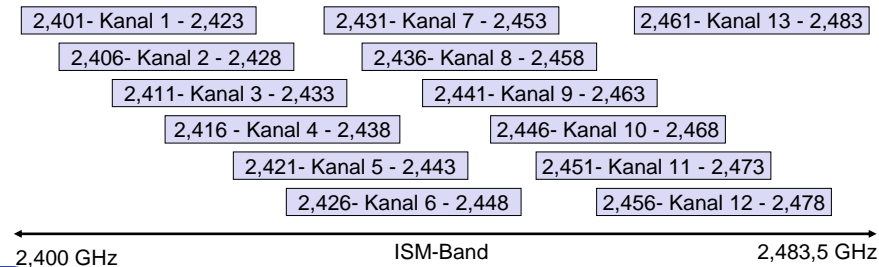




- WLAN verwendet das ISM-Band

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

- Aufteilung



- 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**

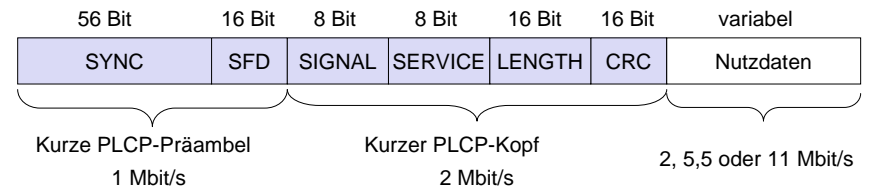
- IEEE 802.11g

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



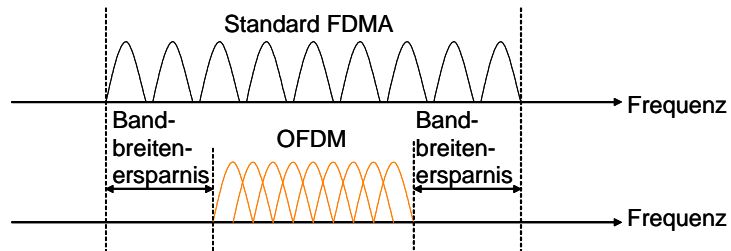


- Datenraten von 6 bis 54 Mbit/s im 2,4 GHz Band

- Vorteile

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

- Verwendung von OFDM



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

PLCP Kopf

	4 Bit	1 Bit	12 Bit	1 Bit	6 Bit	16 Bit	6 Bit		
PLCP Präambel	RATE	RESRVD	LENGTH	PARITY	TAIL	SERVICE	Nutzdaten	TAIL	PAD

Trainingssequenz BPSK, 1/2 6 Mbit/s variabel
- 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

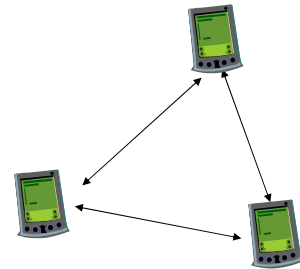
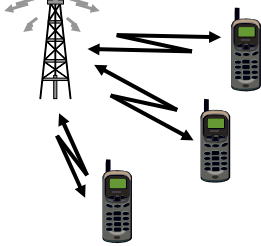
30



- Klassifizierung

- Zentralisiert vs. verteilt arbeitende Protokolle

- ▶ Arbeiten am effektivsten in entsprechender Netzarchitektur



- Synchron vs. Asynchron

- ▶ Kanal kann in Zeitschlitzte eingeteilt werden (TDMA)

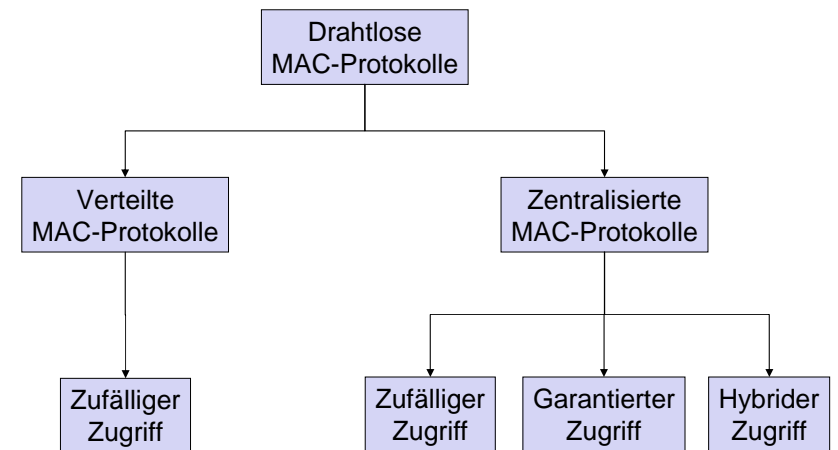
- ▶ Vereinfacht Management von Bandbreite und QoS

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

- ▶ Alternative: asynchrone, paketbasierte Protokolle mit zufälligem Zugriff

 [III.4, 3.5]

31

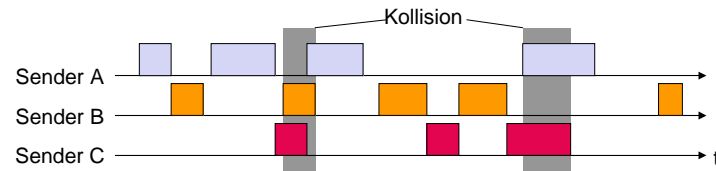


32

- **ALOHA** war das erste MAC-Protokoll für paketbasierte drahtlose Netze

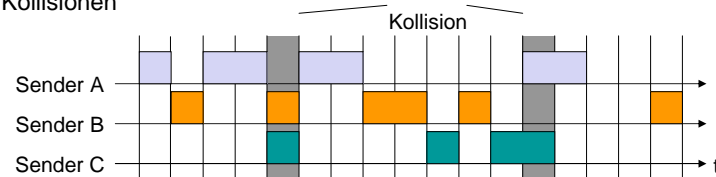
- zufälliger Zugriff mit Zeitmultiplex und ohne Kollisionsvermeidung

- ▶ Viele Kollisionen bei hoher Last
- ▶ ARQ auf höheren Schichten notwendig



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

- Weniger Kollisionen



- 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

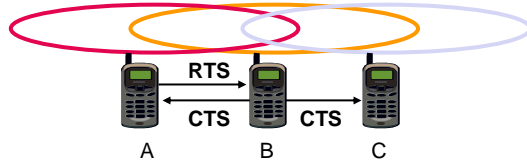
- **Multiple Access with Collision Avoidance (MACA)**
 - ▶ Drei-Wege-Handshake minimiert Anzahl versteckter Endgeräte
 - ▶ Sender sendet kurze **Request to Send** (RTS) Dateneinheit
 - ▶ Empfänger antwortet mit **Clear to Send** (CTS) Dateneinheit
 - ▶ Sender sendet Daten
- Während Handshaking-Phase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





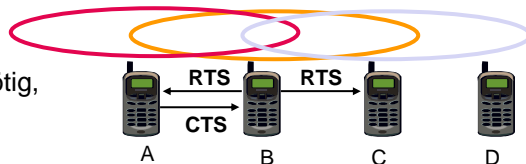
• Vermeidung des Problems versteckter Endgeräte

- 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



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)

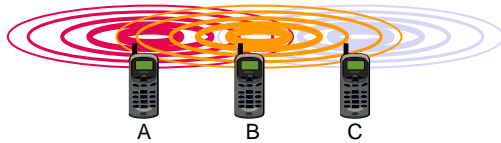
- Zentraler Ansatz
- Nur in Infrastruktur-Netzwerken einsetzbar
- Point Coordinator kontrolliert innerhalb der wettbewerbsfreien Phase (**Contention Free Period - CFP**) den Medienzugriff
 - ▶ Medienzugriff kann Station für bestimmten Zeitraum garantiert werden
- PCF muss nicht von jeder Station implementiert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



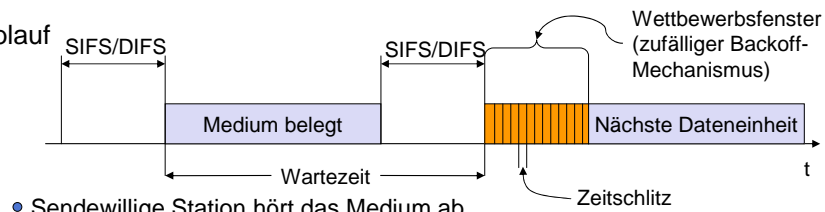
- **Physikalische** Carrier-Sense-Funktion
 - Erkennen, ob Medium gerade von einer anderen Station belegt ist
- **Virtuelle** Carrier-Sense-Funktion
 - Medienreservierung auf Basis des **Network Allocation Vectors (NAV)**
 - ▶ In jeder MAC-Dateneinheit enthalten
 - ▶ Zeigt voraussichtliche Dauer der 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
 - ▶ $\text{backoff time} = \text{random}(\text{CW}) \times \text{slot time}$
 - ▶ $\text{CWmin} \leq \text{random}(\text{CW}) \leq \text{CWmax}$
 - ▶ CWmin und CWmax bilden Wettbewerbsfenster (CW – Contention Window)
 - ▶ slot time (Zeitschlitz): festgelegt von physikalischer Schicht (bei DSSS = 20 µs)

40



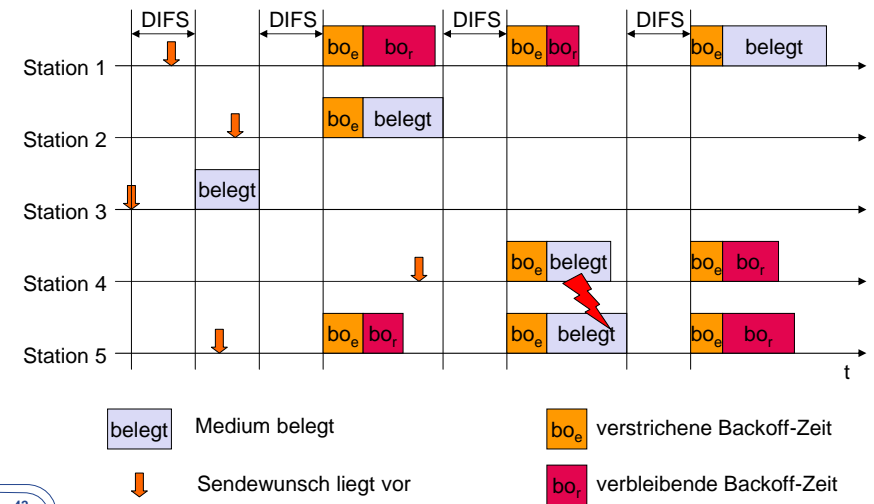


Ablauf



- 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

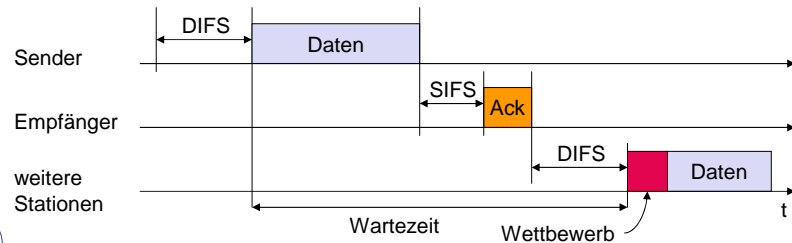


42





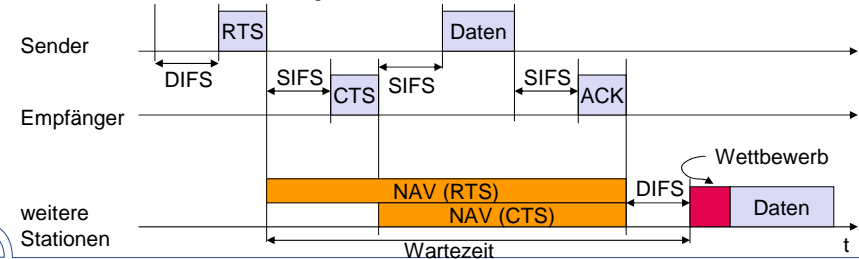
- Daten können nach Abwarten von DIFS gesendet werden
- Empfänger antworten nach SIFS mit einem ACK, falls die Dateneinheit korrekt empfangen wurde
 - Überprüfen der Korrektheit mittels CRC
- Im Fehlerfall wird die Dateneinheit vom Sender automatisch wiederholt
 - Station bewirbt sich erneut um das Medium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

