

# Mobilkommunikation

## I. Einführung



### Kapitel 1 Einführung und Grundlagen



## Kapitelübersicht

- I. **Einleitung**
  - 1. Einführung und Grundlagen
- II. **Drahtlose Telekommunikationssysteme**
  - 2. GSM
  - 3. UMTS / HSDPA / LTE
- 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

- 1.1 Mobilkommunikation verändert unser Leben!
- 1.2 Ziele und Inhalte der Vorlesung
- 1.3 Zur Historie
- 1.4 Grundlagen
  - 1.4.1 Frequenzbereiche
  - 1.4.2 Signale
  - 1.4.3 Modulation
  - 1.4.4 Multiplextechniken
- Übungen
- Referenzen und weiterführende Literatur



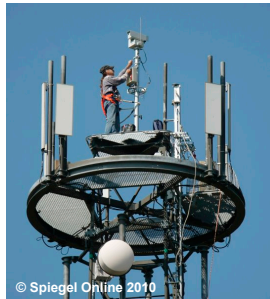
- Milliardenpoker ums mobile Internet

„App-Wahn, iPad, blitzschnelles Surfen ohne Kabel: Alles, was dieses Jahrzehnt in Deutschlands mobilem Internet passiert, hängt von der Versteigerung der neuen **Mobilfunkfrequenzen** ab. Die Milliardenauktion beginnt am Mittag...“

„Aktuell sind für das **mobile Internet** gut 250 Megahertz Frequenzen reserviert. Durch die Versteigerung kommen jetzt noch einmal **360 Megahertz** hinzu...

„Die neuen Frequenzen bilden auch die Grundlage für den neuen Übertragungsstandard **Long Term Evolution (LTE)**“

„... soll LTE Raten von bis zu **hundert Megabit** schaffen, genug, um Videos und Online-Spiele ruckel- und unterbrechungsfrei zu übertragen.“



© Spiegel Online 2010

2

- Siegeszug des **Handys**

- Inzwischen mehr Handys als Festnetzanschlüsse
  - ▶ Beispiel Deutschland: 54,7 Mio. (Festnetz) vs. 71,3 Mio. (Mobilfunk)



- Wachsende Verbreitung von **WLANs**

- Inzwischen in fast jedem Laptop integriert
- ... auch in anderen Geräten auf dem Vormarsch



- ... und das war noch lange nicht alles!

- **WiMax** – Drahtlose Alternative zu DSL
- **RFID** – Internet der Dinge
- **Sensornetzwerke** – Erfassung verteilter Phänomene in der Umgebung
- ...

3

- Konvergenz von Mobilfunk und Festnetz
  - Anwendungen entscheidend, nicht mehr Netzzugang
  - „Alles aus einer Steckdose“
- Beispiel: (Mobiles) Triple Play
  - Telephonie
    - ▶ Standardfunktion von GSM
      - ▶ Allerdings schlechtere Sprachqualität als im Festnetz
      - ▶ Datenrate: 13 kbit/s (... brutto: 22,8 kbit/s)
    - ▶ ... oder VoIP (Voice over IP) über GPRS, UMTS oder WLAN
  - Internetzugang
    - ▶ HSDPA stellt derzeit Datenraten von bis zu 1,8 Mbit/s bereit
  - Fernsehen
    - ▶ DVB-H (oder DMB) zur Fußball-WM verfügbar
    - ▶ Datenraten anpassbar (bei 320x240 Auflösung ca. 300 bit/s)



Ein Anschluss:  
Drei Anwendungen



[I.7]

4

- WLAN-Hotspots = öffentlicher WLAN Access Point
  - Ermöglicht breitbandigen Zugang zum Internet
  - Meist an stark frequentierten, öffentlichen Plätzen
    - ▶ Hotel, Cafes, Bahnhöfen, Flughäfen, ICE
    - ▶ Bsp. T-Online/T-Mobile: 15000 Hotspots weltweit, 4500 in Deutschland
- Aktuelle Situation
  - Viele unterschiedliche Anbieter
    - ▶ Separate Anmeldung bei jedem Anbieter notwendig
  - Eigene Rechnung für WLAN-Nutzung
  - Verbindungsabbruch beim Verlassen des Hotspots
- Was wird zukünftig möglich sein?
  - Roaming zwischen unterschiedlichen Anbietern
  - Rechnung Bestandteil der Handy-Rechnung
  - Wechsel zu zellularem Netz beim Verlassen des Hotspots
  - **Always best connected**
    - ▶ Es wird automatisch der beste Netzanschluss gewählt

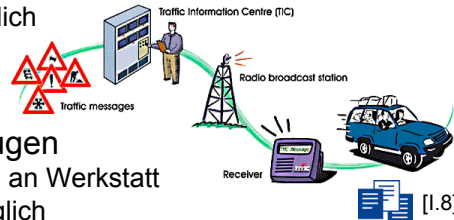


[I.15]

5

- Navigationssysteme zunehmend verbreitet

- Positionsbestimmung über GPS
- Stauinformationen über TMC
  - ▶ Umfahren von Staus möglich



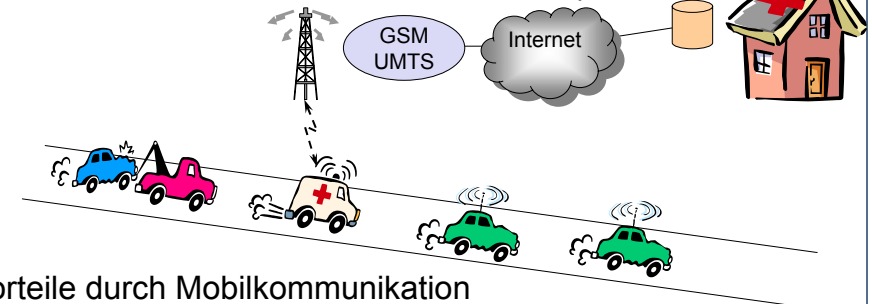
- ... und in Zukunft?

- Fernwartung von Fahrzeugen
  - ▶ Fahrzeug meldet Problem an Werkstatt
  - ▶ Schnellere Reparatur möglich
    - ▶ z.B. benötigte Ersatzteile können vorbestellt werden
- Fahrzeuge kommunizieren selbstständig untereinander
  - ▶ Warnung anderer Fahrzeuge vor Gefahrenpunkten
    - ▶ z.B. Glatteis in Kurve, Stauende
  - ▶ Kooperatives Fahren
    - ▶ Z.B. „Karawane“ von LKWs

6

- Beispiel

- Patient wird nach Unfall ins Krankenhaus transportiert

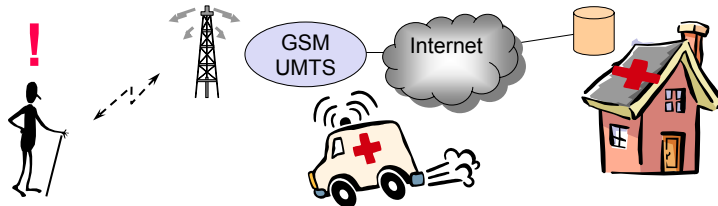


- Vorteile durch Mobilkommunikation

- Übermittlung der Patientendaten **an den Krankenwagen**
  - ▶ z.B. Krankenakte, Allergien gegen bestimmte Medikamente
- Übermittlung der Patientendaten **an das Krankenhaus**
  - ▶ z.B. aktueller Zustand (Blutdruck, etc.)
  - ▶ Gezielte Vorbereitungen im Krankenhaus möglich
  - ▶ Bereits Unterwegs Hilfe durch Experten im Krankenhaus

7

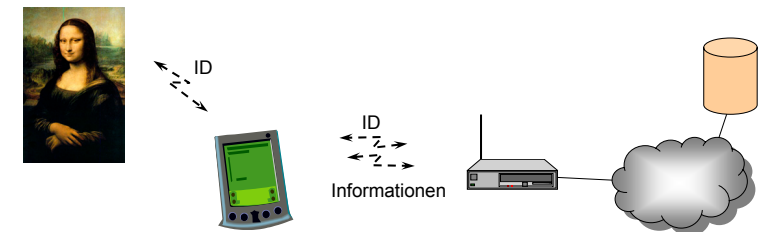
- Demographische Entwicklung in Deutschland
  - Steigende Lebenserwartung → mehr ältere Menschen
  - Sinkende Geburtrate → weniger junge Menschen



- Assisted Living mithilfe von drahtlosen Sensornetzwerken
  - Permanente Überwachung der Vitalfunktionen
    - ▶ Bei Notfall kann sofort Arzt kontaktiert werden
    - ▶ Arzt kann aus der Entfernung Gesundheitszustand überprüfen
  - Kontrolle der Medikamenteinnahme
  - Intelligentes Wohnen
    - ▶ Automatisches Bestellen von Lebensmitteln wenn notwendig
    - ▶ Automatische Steuerung von Licht, Heizung, etc.

8

- Eindeutige Identifikation von Gegenstände mit RFID
  - Informationen zu Gegenstand im Internet
- Beispiel
  - Elektronischer Museums-/Galerieführer
    - ▶ Ausstellungsstücke über RFID identifizierbar
    - ▶ PDA übermittelt über WLAN die ID des Ausstellungsstücks
    - ▶ Informationen zu Ausstellungsstück werden an PDA übermittelt



9

- Multiplayer-Games immer und überall!
  - Erfordert Datenaustausch mit anderen Spielern
    - ▶ Drahtloser Internet-Zugang macht's möglich...
  - Harte Anforderungen an Kommunikationssystem
    - ▶ Echtzeitspiele, Shooter, ...
      - ▶ Brauchen geringes Delay + geringen Jitter
- Verschiedene Techniken bieten Zugang
  - WLAN
    - ▶ Relativ hohe Bandbreite, benötigt Access Point
      - ▶ Sehr Lokations-gebunden
    - ▶ Kostenabrechnung?
  - Mobilfunknetze (GSM, UMTS)
    - ▶ Geringere Bandbreite, großflächige Abdeckung (bei GSM)
    - ▶ Kostenabrechnung inklusive
  - Ad-hoc Netze
    - ▶ Werden spontan von WLAN-fähigen Geräten in Übertragungsreichweite gebildet
    - ▶ Benötigt keine Infrastruktur, aber nur lokal Verfügbar
      - ▶ Internet-Anbindung über Gateway aber möglich
    - ▶ Datenübertragung kostenlos

10

- Position beeinflusst Dienstausführung
  - Lokale Suche
    - ▶ Suchergebnis ist ortsbezogen
      - ▶ Wo ist der nächste McDonalds?
      - ▶ Wie wird morgen das Wetter?
      - ▶ Beispiele (allerdings mit manueller Ortseingabe)
        - ▷ <http://lokales.suche.web.de>
        - ▷ <http://www.wetter.com>
  - Automatische Ortung bei Notrufen
    - ▶ Positionsdaten werden beim Notruf automatisch übermittelt
  - Fahrerassistenzsysteme
    - ▶ Navigationssystem bestimmt Position des Nutzers
    - ▶ Kartenmaterial enthält Informationen zur Höchstgeschwindigkeit
    - ▶ Warnung bei Überschreitung
  - Ortsabhängige Telefontarife
    - ▶ Beispiel: Homezone

11

### • Inhalt

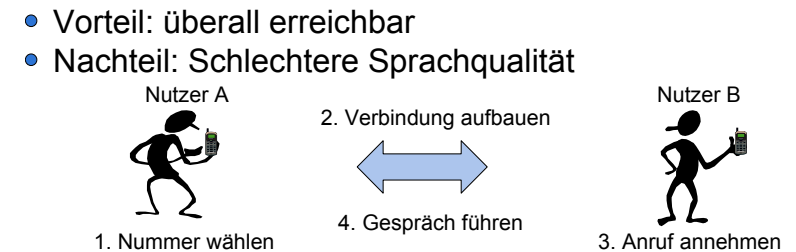
- Wichtige Fragestellungen der Mobilkommunikation
- „Festnetz-Gegenstücke“ bekannt aus Telematik und KuD
- Beispiele
  - ▶ GSM – ISDN
  - ▶ WLAN – Ethernet
  - ▶ Mobile IP – IP

### • Was ist anders?

- Welche neuen Probleme/Aufgabenstellungen treten auf?
  - ▶ Wie werden diese gelöst?
- Grundprinzipien mobiler Kommunikationssysteme
  - ▶ Am Beispiel von Protokollen und Architekturen

12

- ISDN: Standard für digitales Festnetz
- GSM: Digitaler Mobilfunkstandard
- ... für Nutzer ändert sich in der Bedienung eigentlich nichts



- Was ändert sich für das Netzwerk?

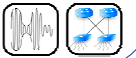
13



- Neues Problem: **Lokalisierung**

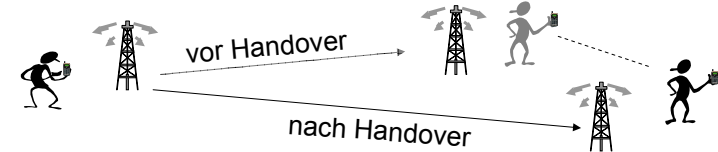
- Bei ISDN:
  - ▶ Aufenthaltsort von Nutzer A und B sind bekannt
    - ▶ Telefonnummer spezifiziert Aufenthaltsort
- Bei GSM:
  - ▶ Nutzer A und B können mobil sein
    - ▶ Telefonnummer lässt keine Rückschlüsse bzgl. Aufenthaltsort zu
  - ▶ Fragestellungen
    - ▶ Wie wird ein mobiles Gerät weltweit gefunden?
    - ▶ Wohin soll das Netz die Verbindung aufbauen?
  - ▶ GSM benötigt einen **Lokationsdienst**
    - ▶ Zuordnung von Telefonnummer zu aktuellem Aufenthaltsort

14




- Neues Problem: **Handover**

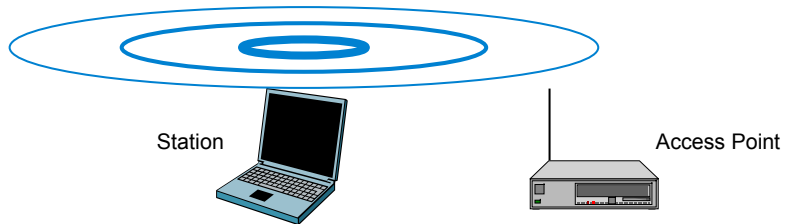
- Bei ISDN:
  - ▶ Aufenthaltsort eines Nutzer ändert sich während einer Verbindung nicht
    - ▶ Zugangspunkt zum Netzwerk (NTBA) bleibt gleich
- Bei GSM:
  - ▶ Nutzer können während einer Verbindung mobil sein
    - ▶ Nutzer muss ggf. Zugangspunkt (Basisstation) wechseln
  - ▶ Was passiert mit der bereits etablierten Verbindung?
  - ▶ GSM muss Handover unterstützen
    - ▶ „Umbiegen“ der Verbindung bei Wechsel des Zugangspunkts



15



- Ethernet (IEEE 802.3) 
  - Standard für drahtgebundene lokale Netzwerke
- WLAN (IEEE 802.11)
  - Standard für drahtlose lokale Netzwerke



- Prinzipielle Unterschiede zwischen beiden, oder ... einfach nur Austausch des Übertragungsmediums ?

16



- Neues Problem: **Überlappung von LANs**

- Bei 802.3:
  - ▶ Keine Überlappung von LANs möglich
    - ▶ Netzwerkkarte ist über **ein** Kabel mit **einem** LAN verbunden
    - ▶ Station empfängt nur Dateneinheiten eines LANs
    - ▶ Kopplung mehrerer LANs über Brücken oder Router
- Bei 802.11:
  - ▶ Überlappung von LANs möglich
    - ▶ Station empfängt Dateneinheiten **aller Stationen in Reichweite**
    - ▶ Stationen in Reichweite können zu anderen LANs gehören?
  - ▶ Zuordnung von Dateneinheiten zu einem bestimmten LAN?
    - ▶ Zu welchem LAN gehört eine Broadcast-Dateneinheit?
  - ▶ Angabe der LAN-Zugehörigkeit in jeder Dateneinheit

17



## • Neues Problem: Semi-Broadcast-Medium

- Bei Ethernet:
  - ▶ Stationen sind über Broadcast-Medium miteinander verbunden
    - ▶ Stationen hören gesendete Dateneinheiten aller Stationen im Netz
    - ▶ Kollisionserkennung durch Sender möglich
- Bei WLAN:
  - ▶ Stationen sind über Semi-Broadcast-Medium miteinander verbunden
    - ▶ Stationen hören nur Dateneinheiten von Stationen in Reichweite
    - ▶ Sender kann Kollision nicht erkennen
    - ▶ Problem der versteckten Endgeräte
  - ▶ Medienzugriff muss angepasst werden

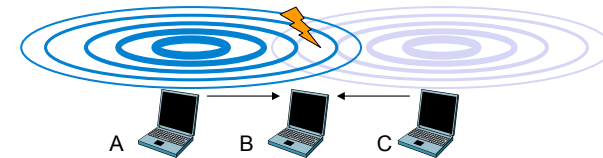


18



## • Beispielsituation

- Station A sendet zu Station B
- Station C kann Signale von Station A nicht mehr empfangen
- Station C will zu Station B senden
  - ▶ Medium ist für Station C frei (Carrier Sense versagt)
- Kollision bei Station B
  - ▶ Station A kann dies nicht erkennen (Collision Detection versagt)
- Station A ist „versteckt“ für Station C

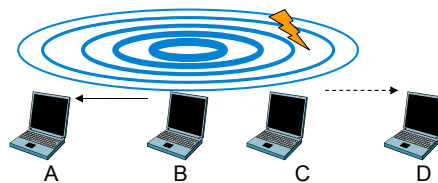


19



### • Beispielsituation

- Station B sendet zu Station A
- Station C will zu Station D senden
- Station C muss warten
  - ▶ Carrier Sense signalisiert ein „besetztes“ Medium
- da Station A aber außerhalb der Reichweite von Station C ist, ist dies unnötig
- Station C ist Station B „ausgeliefert“

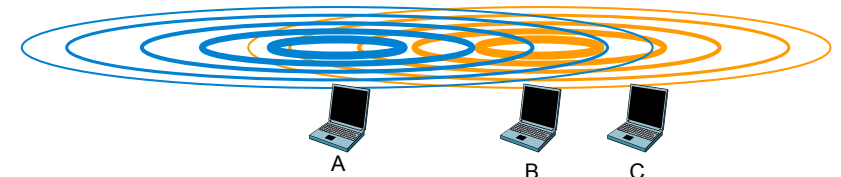


20



### • Beispielsituation

- Station A und B senden, Station C soll empfangen
  - ▶ Signalstärke nimmt quadratisch mit der Entfernung ab
  - ▶ Signal von Station B „übertönt“ das von Station A
  - ▶ Station C kann Station A nicht hören



- Problem muss bei der Konzipierung eines drahtlosen Netzes beachtet werden
  - ▶ Je nach Art der verwendeten Mechanismen ist exakte Leistungskontrolle erforderlich, um „übertönen“ zu vermeiden.

21



- Neues Problem: **Abhörbarkeit des Funkmediums**

- Bei 802.3:
  - ▶ Stationen sind über drahtgebundenes Medium miteinander verbunden
    - ▶ Physischer Zugang zum Netzwerk für Abhören notwendig
- Bei 802.11:
  - ▶ Stationen sind über drahtloses Medium (Funk) miteinander verbunden
    - ▶ Netzwerk kann über gewisse Entfernung noch abgehört werden
  - ▶ Wie kann das Abhören erschwert bzw. verhindert werden?
  - ▶ Einsatz von **Sicherheitsmechanismen** auf MAC-Schicht

22



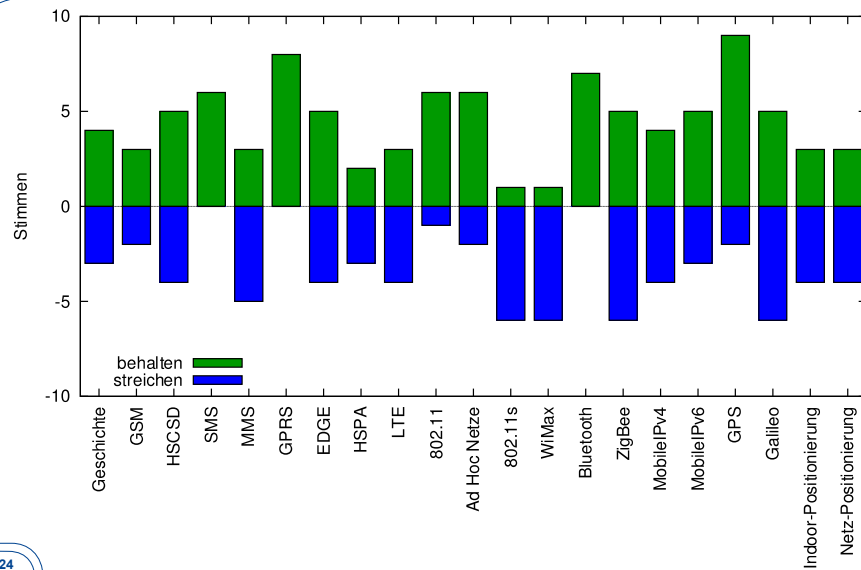
- Fragestellungen aus den Bereichen

- Bitübertragungsschicht, z.B.
  - ▶ Signalausbreitung
  - ▶ Modulationstechniken
- Sicherungsschicht, z.B.
  - ▶ Raum-, Frequenz, Zeit- und Code-Multiplexing
  - ▶ Carrier Sense Multiple Access
- Vermittlungsschicht und Netzarchitektur
  - ▶ Anrufvermittlung im GSM System
  - ▶ Mobiles Internet Protokol (MobileIP)
- Transportschicht und darüber
  - ▶ Z.B. Mobiles TCP
  - ▶ SMS / MMS
- Sicherheit in Mobilkommunikationssystemen
  - ▶ Z.B. Teilnehmer-Authentifikation in GSM



23

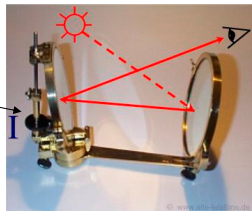




- Übersicht der Inhalte s. **MobilKom-MindMap™**
  - <http://www.tm.uka.de/lehre>
  - Tool: <http://freemind.sourceforge.net/>

- Drahtlose Kommunikation ist „uralt“
  - ... nun ja, die Technik hat entscheidende Fortschritte gemacht
- Heliograph (405 v. Chr., Griechenland)
  - Muster von Lichtimpulsen mithilfe von Spiegeln
    - ▶ Amplitudenmodulation!
  - ab 1875 für militärische Zwecke verwendet
    - ▶ Wegen hoher Wetterabhängigkeit durch elektrischen Telegraph abgelöst
  - Schematische Darstellung

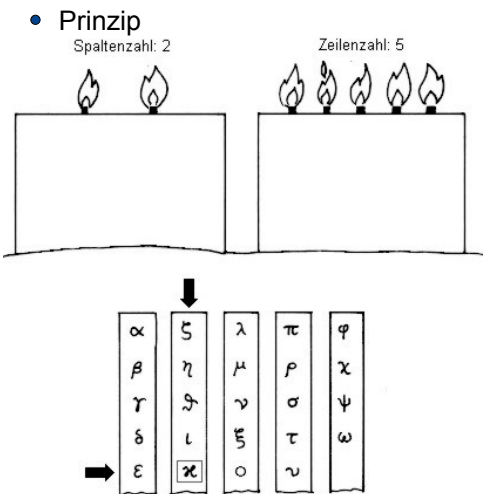
Taste zum Kippen des Spiegels



[I.9]

26

- Von Polybius in der Antike vorgeschlagen
  - 150 v.Chr., Griechenland
- Funktionsweise
  - Jedem Buchstaben des Alphabets wird ein Fackelcode zugeordnet
    - ▶ 5 Fackeln – jeweils Bestimmung der Zeile und der Spalte
- Probleme
  - Geringe Reichweite
  - Personal muss lesen und schreiben können
- Keine Hinweise für historischen Einsatz



[I.10, I.3]

27

„Seit dem Altertum zählt das Feuer zu den klassischen Medien der Signalgebung. Gewöhnlich wurde das Zeichen mit Hilfe brennender Fackeln übermittelt, die etwa zwischen die Zinnen eines Signalturms gelegt waren.“

[1.3]



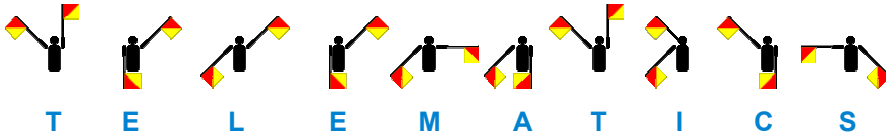
Römischer Limes-Wachturm  
mit Fackelsignal.  
Kupferstich, 1785



Aquarell von A. Roloff

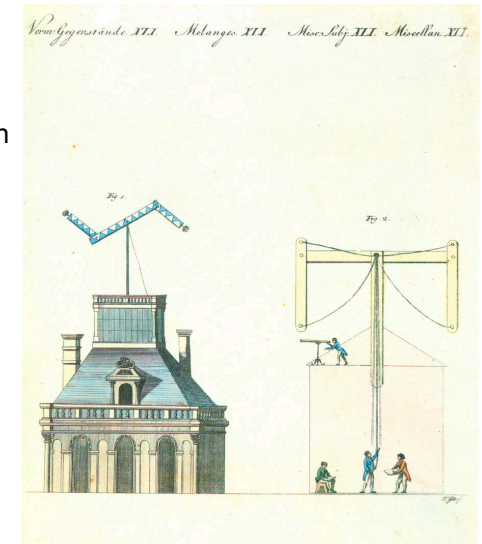
- Es können etwa 8 Zeichen pro Minute übertragen werden.
- Welche Datenrate kann damit realisiert werden?

- 1794: Claude Chappe (1763 – 1805)
  - Flaggen („Semaphore“), Zeiger
    - ▶ Positionen von Flaggen kodiert Zeichen
  - Beispiel



- Erste Telegraphenlinie (1794) von Paris nach Lille
  - ca. 210 km mit 23 Zwischenstationen. [I.11]
  - Übertragung einer längeren Nachricht innerhalb einer Stunde von Lille nach Paris
  - Überbringung durch berittenen Boten hätte 24 Stunden gedauert
  - ... strategischer Vorteil bei einem befürchteten Angriff auf England
    - ▶ Lille liegt an der schmalsten Stelle des Ärmelkanals

- Funktionsweise eines Flaggentelegraphen
  - Je Zeiger 7 Positionen
  - Je Querbalken 2 Positionen
  - $\rightarrow 7 \times 2 \times 2 \times 7 = 196$  Figuren
  - 92 gut erkennbare Figuren über Code-Verzeichnis mit Bedeutung verknüpft
  - 2 Zeichen pro Nachrichteneinheit
    - ▶ Seite (1...92)
    - ▶ Zeile (1...92)
    - ▶ Damit  $92 \times 92 = 8464$  verschiedene Nachrichteneinheiten



[I.3]



- Jedes Zeichen wird ca. 20 Sekunden angezeigt
  - Dient auch der Vermeidung von Übertragungsfehlern
- Welche Datenrate kann damit erzielt werden?
  - Informationsgehalt von 13 bit pro Doppelzeichen



Pleumeur-Bodou



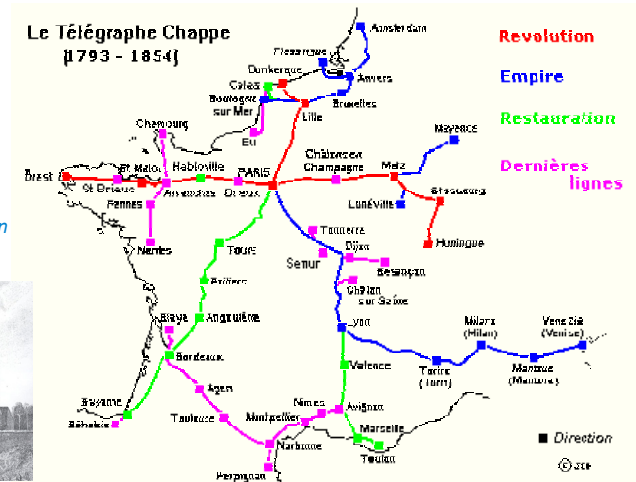
Sainte Foy-lès-Lyon



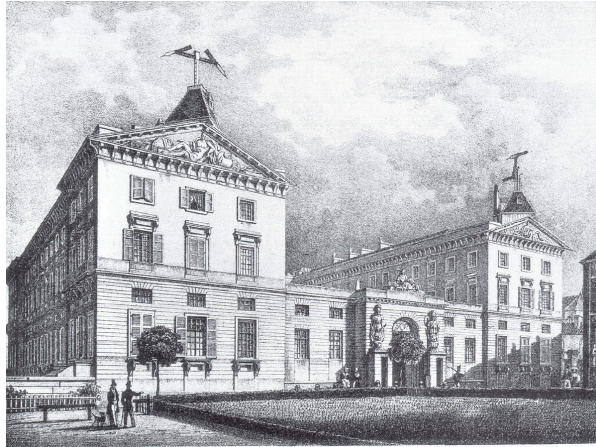
Marcy sur Anse


Kirche St. Pierre auf dem  
Hügel Montmartre in Paris

## Le Télégraphe Chappe [1793 - 1854]



„Anfangs war Metz eine Station der Linie Paris-Strassburg; in den Jahren 1813/1814 kam eine Abzweigung hinzu, so dass der Justizpalast gleich zwei Telegrafenstationen beherbergte.“



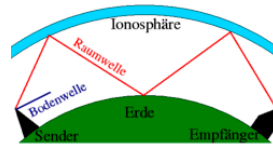
- „Carlsruher Zeitung“ vom 20. Oktober 1794
  - Erstmaliger Bericht über Telegraphen in Frankreich
    - ▶ Großes Interesse
      - ▶ Bisher: maximale Benachrichtigungsgeschwindigkeit: Galopp eines Pferdes
    - ▶ Information wird vom Material gelöst!
      - ▶ Claude Chappe: „Ich schreibe im Raum“
  - Böckmann aus Karlsruhe macht neue Erfindungen im Bereich der Telegraphen
    - ▶ Professor für Mathematik und Physik in Karlsruhe
    - ▶ ... es muss etwas geschehen
    - ▶ ... „nicht nur wegen der schier unglaublichen Übertragungsgeschwindigkeiten“ [1.3]
    - ▶ ... Kriegszustand – also wollte keiner die Erkenntnisse Frankreichs übernehmen

- Zitat aus den zuerst 1832 erschienenen „Französischen Zustände“ Heinrich Heines
  - Siehst Du ihn, den Willen Gottes?  
Er zieht durch die Luft, wie das stumme Geheimnis eines Telegraphen, der hoch über unseren Häuptern seine Verkündigungen den Wissenden mittheilt, während die Uneingeweihten unten im lauten Markgetümmel leben und Nichts davon merken, dass ihre wichtigsten Interessen, Krieg und Frieden, unsichtbar über sie hin in den Lüften verhandelt werden.

- Für die Vorlesung ist vor allem der Einsatz von **Funk** zur Kommunikation von Interesse. Besondere Beiträge hierzu leisteten u.a. die folgenden Forscher
  - **Michael Faraday** (1791 – 1867)
    - ▶ 1831: Demonstration der elektromagnetischen Induktion
  - **James Clerk Maxwell** (1831 – 1879)
    - ▶ 1864: Theorie der elektromagnetischen Felder
    - ▶ Wellengleichungen
  - **Heinrich Rudolf Hertz** (1857 – 1894)
    - ▶ 1886: Demonstriert experimentell den Wellencharakter der elektrischen Übertragung durch den Raum
      - ▶ In Karlsruhe, an der Stelle des heutigen Hertz-Hörsaals



- 1896: **Guglielmo Marchese Marconi** (1874 – 1937)
  - Erste Demonstration der drahtlosen Telegraphie (digital!)
  - Langwellenübertragung, hohe Sendeleistungen (> 200kW)
  - Drahtlose Übertragung über 1,5 Meilen
  - 1897: Gründung von *Marconi's Wireless Telegraph Company Ltd.*
  - 1899: Erste drahtlose Verbindung über den Ärmelkanal
  - 1901: Erste transatlantische Funkübertragung
- 1906: Erste Konferenz der International Telecommunication Union (ITU)
- 1907: Kommerzielle Transatlantik-Verbindungen
  - Sehr große Basisstationen (30 x 100m hohe Antennenmasten)
- 1915: Drahtlose Sprachübertragung New York - San Francisco
- 1920: Entdeckung der Kurzwelle durch Marconi
  - 3 MHz – 30 MHz, Wellenlänge von 100m bis 10m
  - Reflexion an der Ionosphäre (Raumwelle)
  - Erfindung der Vakuumröhre (1906, Lee DeForest und Robert von Lieben) ermöglicht kleinere Sender und Empfänger



- 1926: Erstes Zugtelefon
  - Strecke Hamburg - Berlin
  - Drähte parallel zur Bahntrasse
- 1928: Viele Feldversuche mit TV
  - Farb TV, Nachrichten, Atlantik
- 1933 **E. H. Armstrong** (1890 – 1954)
  - Erfindung der Frequenzmodulation



- 1958 **A-Netz** in Deutschland
  - Erste Testläufe 1953
    - ▶ Mobiltelefonat von einem VW-Käfer aus
    - ▶ Mobilfunkgerät: Gewicht 16 kg, Preis: 8000 DM
      - ▶ Zum Vergleich: damaliger Preis VW-Käfer: 5000 DM
  - analog, 160 MHz, Verbindungsaufbau nur von der Mobilstation, kein Handover, 80% Flächendeckung, 11000 Teilnehmer (1971)
    - ▶ Handvermittlung durch „Dame vom Amt“
    - ▶ 137 Zonen à 30 km Durchmesser
  - 1977 abgeschaltet



- 1972: **B-Netz** in Deutschland
  - Einführung zu den Olympischen Spielen 1972 in München
  - analog, 160 MHz, Verbindungsaufbau auch aus dem Festnetz heraus (aber Aufenthaltsort der Mobilstation muss bekannt sein), kein Handover
    - ▶ Keine „Dame vom Amt“ mehr erforderlich
    - ▶ Geräte vornehmlich in PKWs im Einsatz
  - ebenso in A, NL und LUX, 27000 Teilnehmer in D (1979)
  - 1994 abgeschaltet
- 1979: **NMT** (Nordic Mobile Telephone System), 450 MHz (Skandinavien)
  - Automatische Vermittlungsstellen
- 1982: Start der **GSM**-Spezifikation
  - Durch „Group Special Mobile“
    - ▶ Sollte für CEPT Standard entwickeln
  - Ziel: paneuropäisches digitales Mobilfunknetz mit Roaming
- 1983: **AMPS** in Amerika (Advanced Mobile Phone System)
  - analog
- 1984: **CT-1** Standard (Europa) für schnurlose Telefone

- 1986: **C-Netz** in Deutschland
  - analoge Sprachübertragung, 450 MHz, Handover möglich, digitale Signalisierung, automatische Lokalisierung der Mobilstation
  - Dienste: FAX, Modem, Datex-P, EMail, 98% Flächendeckung
  - 12/2000 abgeschaltet
- 1991: Spezifikation des **DECT**-Standards
  - Digital European Cordless Telephone (heute: Digital Enhanced Cordless Telecommunications)
  - 1880-1900 MHz, ~100-500 m Reichweite, 120 Duplexkanäle, 1,2 Mbit/s Datenübertragung, Sprachverschlüsselung, Authentifizierung, mehrere 10.000 Nutzer/km<sup>2</sup>, Nutzung in 40 Ländern

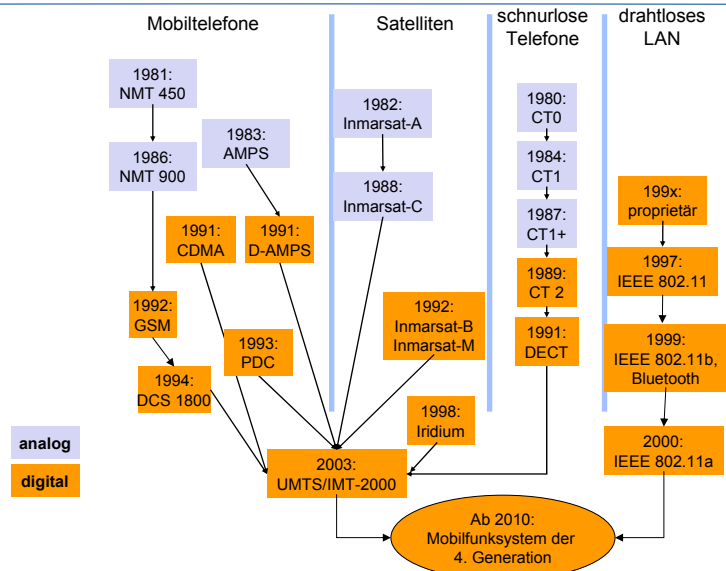
42

- 1992: Start von GSM
  - in Deutschland als **D1** und **D2**, voll digital, 900 MHz, 124 Trägerfrequenzen
  - automatische Lokalisierung, Handover, zellular
  - Roaming in Europa - nun auch weltweit in über 150 Ländern
  - Dienste: Daten mit 9,6 kbit/s, FAX, Sprache ... SMS (!)
- 1994 E-Netz in Deutschland
  - GSM mit 1800 MHz, kleinere Zellen, derzeit 11 Länder (DCS-1800)
  - als **E-Plus** in Deutschland
- 1996 HiperLAN (High Performance Radio Local Area Network)
  - **ETSI** (European Telecommunications Standards Institute)
  - Standardisierung von Typ 1: 5,15 - 5,30 GHz, 23,5 Mbit/s
  - Vorschläge für Typen 2 und 3 (beide 5 GHz) und 4 (17 GHz) als drahtlose ATM-Erweiterungen (bis 155 Mbit/s)
  - ... heute ohne praktische Bedeutung, aber Einfluss auf weitere Standardisierung genommen
- 1997 Wireless LAN – IEEE 802.11
  - **IEEE-Standard**, 2,4 - 2,5 GHz und Infrarot, 2 Mbit/s
  - viele proprietäre Produkte schon früher

43

- 1998 Spezifikation von GSM-Nachfolgern
  - UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) als europäischer Vorschlag für **IMT-2000** (International Mobile Telecommunications-2000, verabschiedet von der ITU)
- 1999
  - Weitere drahtlose LANs
    - ▶ IEEE-Standard **802.11b**, 2,4 - 2,5 GHz, 11 Mbit/s
  - **Bluetooth** für Personal Area Networks, 2,4 GHz, < 1 Mbit/s
  - Entscheidung über **IMT-2000**
    - ▶ Mehrere „Familienmitglieder“: UMTS, CDMA2000, UWC-136
  - Start von **WAP** (Wireless Application Protocol)
    - ▶ Anfang der Verschmelzung Internet/Mobilkommunikation
    - ▶ Zugang zu vielfältigen Informationsdiensten über ein Handy

- 2000: GSM mit höheren Übertragungsraten
  - HSCSD bietet bis zu 57,6 kbit/s
  - Erste GPRS-Installationen mit bis zu 115,2 kbit/s
- 2002: Erste Testinstallationen von UMTS in Deutschland
- 2003: Bildung IEEE 802.11s Arbeitsgruppe
  - Drahtlose, vermaschte Netze
  - Noch nicht verabschiedet
- 2004: Kommerzieller Start von UMTS in Deutschland
- 2005: **WiMax** (Worldwide Interoperability for Microwave Access)
  - Drahtloser Breitbandzugang
    - ▶ Alternative zu DSL
  - Standardisiert als IEEE 802.16 (seit 2001)
    - ▶ Unterschiedliche Versionen
      - ▶ Datenraten bis zu 100 Mbit/s
      - ▶ Reichweite bis zu 50 km
  - August 2005: Start eines kommerziellen WiMax-Netzes in Heidelberg
- 2006: Kommerzieller Start von **HSDPA** in Deutschland
- 2010: Versteigerung neuer Frequenzen (360 Megahertz)
- 2011: Start **LTE**-Ausbau



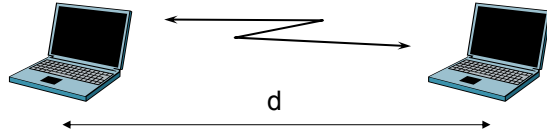
### • Drahtloses Übertragungsmedium

- Höhere Fehlerraten als drahtgebundene Medien durch Interferenzen
  - ▶ Einstrahlung von z.B. Elektromotoren, Blitzschlag
- Niedrigere Datenraten als drahtgebundene Medien
  - ▶ lokal rund 100 Mbit/s, regional derzeit z.B. 2 Mbit/s mit UMTS
- Höhere Verzögerungen, größere Schwankungen
  - ▶ Z.B. Verbindungsaufbauzeiten via GSM im Sekundenbereich
  - ▶ Übertragungsqualität unterliegt hohen Schwankungen
  - ▶ Verbindungsabbrüche
- Geringere Sicherheit gegenüber Abhören, aktive Attacken
  - ▶ Luftschnittstelle ist für jeden einfach zugänglich, Basisstationen können vorgetäuscht werden
- Stets geteiltes Medium
  - ▶ Geeignete Medienzugriffsverfahren erforderlich
- Regulierung der Frequenzbereiche
  - ▶ Frequenzen müssen koordiniert werden (national/international)
  - ▶ Viele sinnvoll nutzbare Frequenzen sind schon vergeben



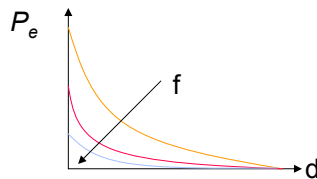
- Signalausbreitung im idealen Fall

- Signalausbreitung wird nicht durch Hindernisse beeinflusst



- Empfangsleistung nimmt mit  $1/d^2$  ab
  - ▶  $d$  = Entfernung zwischen Sender und Empfänger
  - ▶  $P_s, P_e$ : Sende- bzw. Empfangsleistung
- Proportionalitätsfaktor hängt von Frequenz ab

$$P_e \sim \frac{1}{d^2} P_s$$



[I.14]

48

- Dezibel (dB)

- In logarithmischer Skala dargestelltes Verhältnis zweier homogener Größen
- Beispiele
  - ▶ Bezugsleistung 1 Watt (dBW):  $10 \log_{10}(P/1W)$
  - ▶ Bezugsleistung 1 Milliwatt (dBm):  $10 \log_{10}(P/1mW)$
  - ▶ Allgemein Gewinn / Abschwächung:  $10 \log_{10}(P_{\text{Output}} / P_{\text{Input}})$



$\frac{P_{\text{Output}}}{P_{\text{Input}}}$	dB	Beschreibung
0,01	-20dB	Abschwächung
0,1	-10dB	Abschwächung
1	0dB	1:1-Übertragung
10	10dB	Verstärkung
100	20dB	Verstärkung

[I.14]

49

- Ausbreitungsmaß

$$a(t)_{dB} = 10 \cdot \log_{10}(P_s / P_e(t))$$

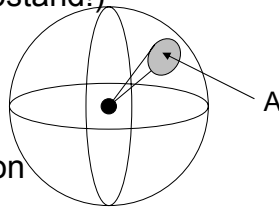
- Annahme: Ideale **isotrope Antenne** bei Sender und Empfänger

- Wirkfläche einer idealen isotropen Antenne

$$A_e = \lambda^2 / 4\pi$$

- Leistung des empfangenen Signals ( $d$  = Abstand!)

$$P_e = \frac{A_e}{4\pi d^2} \cdot P_s = \frac{1}{4\pi d^2} \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot P_s$$



- Daraus ergibt sich ein Ausbreitungsmaß von

$$a_{dB} = 20 \log_{10}(4\pi d / \lambda)$$

[I.14]

50

- Beispiel

- Wie groß ist Abschwächung eines 2.4 GHz Signals bei 10 km Abstand vom Sender?

$$a_{dB} = 20 \cdot \log_{10}(4\pi d / \lambda)$$

$$= 20 \cdot \log_{10}(4\pi d / \frac{c}{f})$$

$$= 20 \cdot \log_{10}(4\pi \cdot 10^4 m \cdot 2.4 \cdot 10^9 \frac{1}{s} / 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s})$$

$$= 20 \cdot \log_{10}(4\pi \cdot 0.8 \cdot 10^5)$$

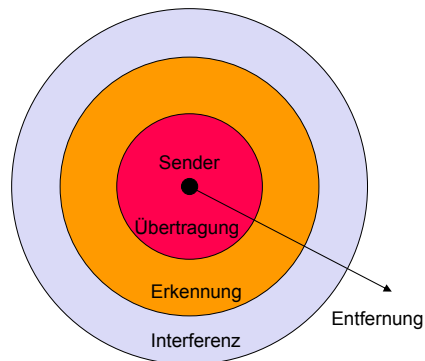
$$\approx 120dB$$

[I.14]

51

- Unterschiedliche Bereiche der Signalausbreitung

- Übertragungsbereich
  - ▶ Kommunikation möglich
  - ▶ niedrige Fehlerrate
- Erkennungsbereich
  - ▶ Signalerkennung möglich
  - ▶ keine Kommunikation möglich
- Interferenzbereich
  - ▶ Signal kann nicht detektiert werden
  - ▶ Signal trägt zum Hintergrundrauschen bei



- **Streuung** (scattering) an kleinen Hindernissen
  - Aufspaltung in mehrere schwächere Signale



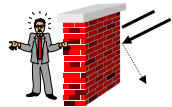
- **Beugung** (diffraction)

- Ablenkung von Wellen an einem Hindernis
- Welle wird in den Abschattungsbereich eines Hindernisses gebeugt
- Beugung stärker bei größerem Verhältnis von Wellenlänge zu Abmessung des Hindernisses
  - ▶ Oberhalb von etwa 5 GHz vernachlässigbar



- **Abschattung** durch Hindernisse

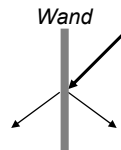
- Extreme Form der Dämpfung



Abschattung  
(idealisiert)

- **Reflexion**

- Abschwächung des Signals



Reflexion  
(idealisiert)

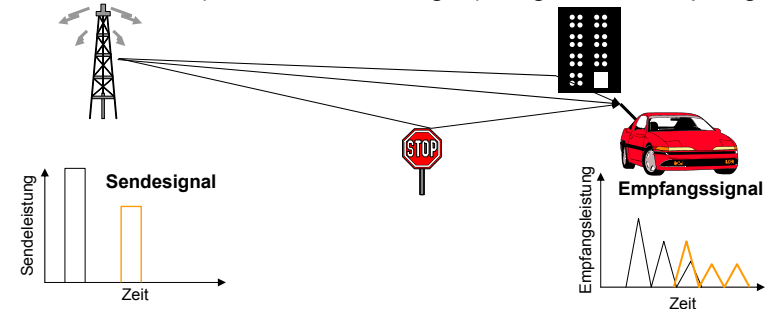
- **Freiraumdämpfung**

- Atmosphäre ändert ihre Eigenschaften aufgrund der Wetterbedingungen
  - ▶ Stark Frequenzabhängig
    - ▶ Z.B. ab etwa 12 GHz bei Nebel oder Regen starke Dämpfung durch Streuung und Absorption elektromagnetischer Wellen an Wassertropfen

54

- **Mehrwegeausbreitung**

- Signal kommt aufgrund von Reflexion, Streuung und Beugung auf mehreren (unterschiedlich langen) Wegen beim Empfänger an



- Signal wird zeitlich gestreut (time dispersion)
  - ▶ Interferenz mit Nachbarsymbolen (**Intersymbolinterferenz**, ISI)
- Direkte und phasenverschobene Signalanteile werden empfangen
  - ▶ je nach Phasenlage abgeschwächtes Signal

55

## • Fading

- Schwankungen der Amplitude des Empfangssignals, die durch ausbreitungsbedingte Störungen entstehen.
- Übertragungskanal ändert sich mit dem Ort der Mobilstation und der Zeit

- ▶ Übertragungswege ändern sich
- ▶ unterschiedliche Verzögerungsbreite der Einzelsignale
- ▶ unterschiedliche Phasenlage der Signalanteile

### • Schnelles Fading

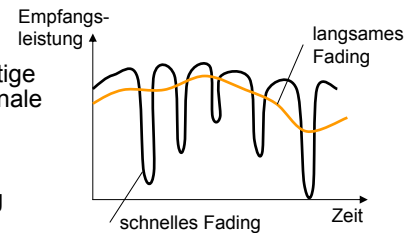
- ▶ kurzzeitige Einbrüche in der Empfangsleistung durch gegenseitige Auslöschung der überlagerten Signale

### • Zusätzlich ändern sich

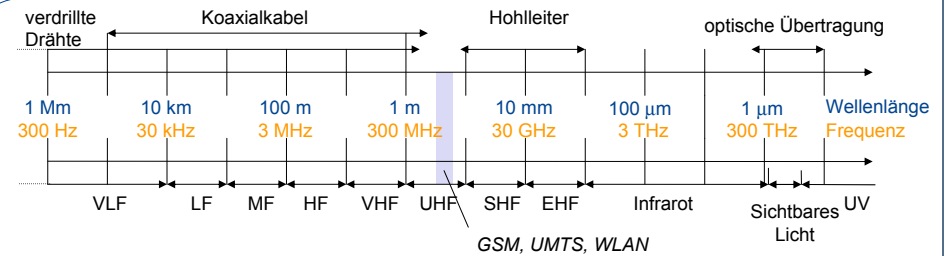
- ▶ Entfernung von der Basisstation
- ▶ Hindernisse in weiterer Entfernung

### • Langsames Fading

- ▶ langsame Änderungen in der (durchschnittlichen) Empfangsleistung



56



VLF = Very Low Frequency

LF = Low Frequency (Langwellen-Radio)

MF = Medium Frequency (Mittelwellen-Radio)

HF = High Frequency (Kurzwellen-Radio)

VHF = Very High Frequency (UKW-Radio)

UHF = Ultra High Frequency

SHF = Super High Frequency

EHF = Extra High Frequency

UV = Ultraviolettes Licht

## • Zusammenhang zwischen Frequenz und Wellenlänge:

$$\lambda = c/f$$

mit

Wellenlänge  $\lambda$ ,  
Lichtgeschwindigkeit  $c \approx 3 \times 10^8$  m/s,  
Frequenz  $f$ 

57

- Antennengröße und Ausbreitungseigenschaften (z.B. Durchdringbarkeit von Materialien) sind abhängig von Sendefrequenz
- **VHF-/UHF-Bereich** für Mobilfunk
  - Handhabbare, kleine Antennen
  - Ausbreitungsbedingungen günstig für Mobilfunk (kaum reflektierende Wellen, Ausbreitung auch durch Wände möglich)
- Frequenzen ab **SHF-Bereich** für Richtfunkstrecken, Satellitenkommunikation
  - Überschaubare Antennenabmessungen mit starker Bündelwirkung
  - Größere Bandbreiten verfügbar
  - Durchdringbarkeit von Wänden nicht nötig
- Für drahtlose LANs Frequenzen ab **UHF-Bereich** bis **SHF-Bereich**
  - Geplant auch bis in **EHF-Bereich**
  - Begrenzung durch Resonanz von Molekülen (Wasser, Sauerstoff etc.)
    - ▶ damit starke witterungsbedingte Dämpfungen

- Die ITU-R veranstaltet regelmäßig Konferenzen zur Aushandlung und Verwaltung der Frequenzbereiche
  - World Radio Conferences (WRC)
- Beispiele für Betriebsfrequenzen im Mobilkommunikationsbereich

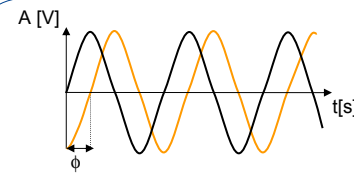
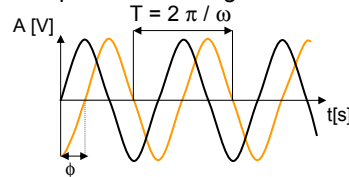
	Europa	USA	Japan
Mobiltelefone	<b>NMT</b> 453-457 MHz, 463-467 MHz <b>GSM</b> 890-915 MHz, 935-960 MHz 1710-1785 MHz, 1805-1880 MHz	<b>AMPS, TDMA, CDMA</b> 824-849 MHz, 869-894 MHz <b>TDMA, CDMA, GSM</b> 1850-1910 MHz, 1930-1990 MHz	<b>PDC</b> 810-826 MHz, 940-956 MHz, 1429-1465 MHz, 1477 -1513 MHz
Schnurlose Telefone	<b>CT1+</b> 885-887 MHz, 930-932 MHz <b>CT2</b> 864-868 MHz <b>DECT</b> 1880-1900 MHz	<b>PACS</b> 1850-1910 MHz 1930-1990 MHz <b>PACS-UB</b> 1910-1930 MHz	<b>PHS</b> 1895-1918 MHz <b>JCT</b> : 254-380 MHz
Drahtlose LANs	<b>IEEE 802.11</b> 2400-2483 MHz 5150-5350 MHz, 5470-5725 MHz <b>HIPERLAN</b> 5176-5270 MHz	<b>IEEE 802.11</b> 2400-2483 MHz, 5150-5350 MHz, 5725-5825 MHz	<b>IEEE 802.11</b> 2471-2497 MHz, 5150-5250 MHz

- Signale sind **physikalische Darstellung von Daten**
- Zeitabhängig oder ortsabhängig
- Einteilung
  - **zeitkontinuierlich** oder **zeitdiskret**
  - **wertkontinuierlich** oder **wertdiskret**
  - **Analogsignal**
    - ▶ zeit- und wertkontinuierlich
  - **Digitalsignal**
    - ▶ zeit- und wertdiskret
- **Signalparameter**
  - Kenngrößen, deren Wert oder Werteverlauf die Daten repräsentieren
- Signalparameter **periodischer Signale**
  - **Periode**  $T$ , **Frequenz**  $f=1/T$ , **Amplitude**  $A$ , **Phasenverschiebung**  $\phi$
  - Sinusförmige Trägerschwingung als spezielles periodisches Signal

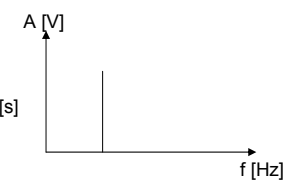


$$s(t) = A \sin(2 \pi f t + \phi) = A \sin(\omega t + \phi)$$

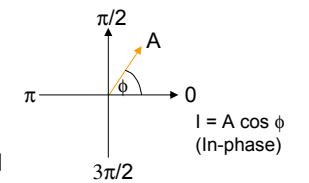
mit Kreisfrequenz  $\omega = 2 \pi f$



**Amplitudenspektrum/  
Zeitbereich**  
(Amplitude über Zeit)



**Frequenzspektrum/  
Frequenzbereich**  
(Amplitude oder Phase  
über Frequenz)



**Phasenzustandsdiagramm**  
(Amplitude  $A$  und  
Phasenwinkel  $\phi$  werden in  
Polarkoordinaten aufgetragen)

- Überführung von Darstellung im Zeitbereich in Darstellung im Frequenzbereich (und vice versa) mittels

- **Fourier-Transformation**

$$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) e^{-j2\pi ft} dt$$

- **Inverse Fourier-Transformation**

$$s(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(f) e^{j2\pi ft} df$$

- Periodisches Signal  $s(t)$  mit der Periode  $T = 2\pi/\omega$  hat im Allgemeinen ein unendliches Spektrum, was durch die folgende **Fourier-Reihe** ausgedrückt wird:

$$s(t) = \frac{1}{2}c + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(n\omega t)$$

mit  $c$ : Gleichstromanteil des Signals  
 $a_n$ : Amplitude der  $n$ -ten Sinusfunktion  
 $b_n$ : Amplitude der  $n$ -ten Kosinusfunktion

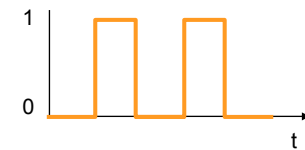
oder kürzer gefasst:

$$s(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin(n\omega t + \phi_n)$$

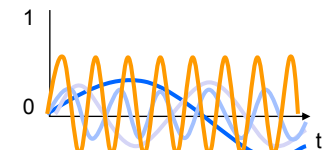
mit

$$\phi_n = \arctan \frac{a_n}{b_n}$$

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$



periodisches Signal

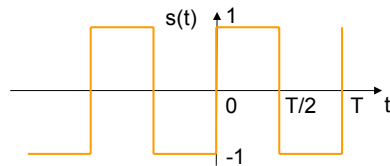


Komposition basierend  
auf **Grundfrequenz** und  
**Harmonischen**

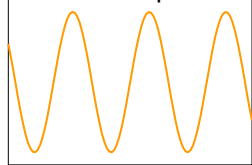


Fourier-Reihe einer idealen periodischen Rechteckfunktion:

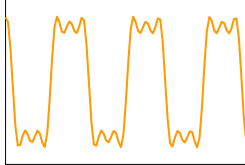
$$s(t) = \frac{4}{\pi} \left( \sin \omega \cdot t + \frac{1}{3} \sin 3\omega \cdot t + \frac{1}{5} \sin 5\omega \cdot t + \dots \right)$$



Grundfrequenz



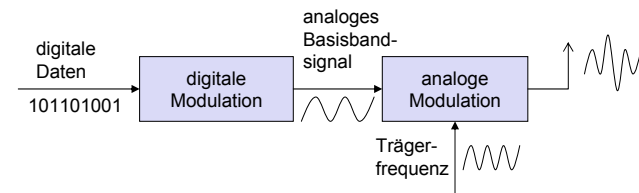
3. Harmonische



5. Harmonische



Ideale Rechteckfunktion benötigt **unendlich** viele Harmonische und damit theoretisch eine **unendlich** hohe Bandbreite



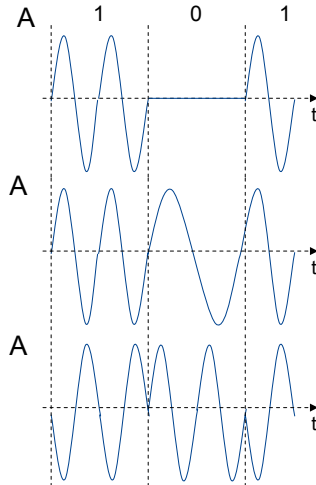
- Digitale Modulation

- Digitale Daten werden in ein analoges (Basisband-)Signal umgesetzt
  - Amplitudenmodulation ...

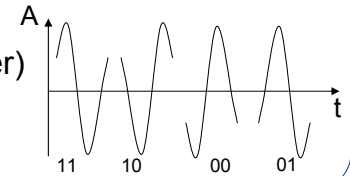
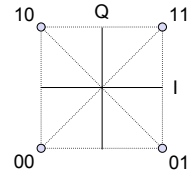
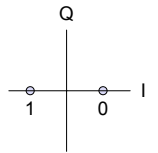
- Analoge Modulation

- Verschieben des Basisbandsignals auf die Trägerfrequenz
  - Kleinere Antennen, Frequenzmultiplex ...

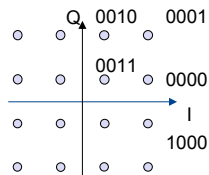
- Modulation bei digitalen Signalen auch als Umastung (**Shift Keying**) bezeichnet
- **Amplitudenmodulation (ASK)**
  - technisch einfach
  - benötigt wenig Bandbreite
  - stör anfällig
- **Frequenzmodulation (FSK)**
  - größere Bandbreite
  - für Telefonübertragung
  - mit oder ohne Phasensprünge
  - Binary FSK (BFSK)
    - ▶ Zwei Frequenzen 0:  $f_1$ , 1:  $f_2$
- **Phasenmodulation (PSK)**
  - komplexe Demodulation mit Trägerrückgewinnung
  - relativ störungssicher



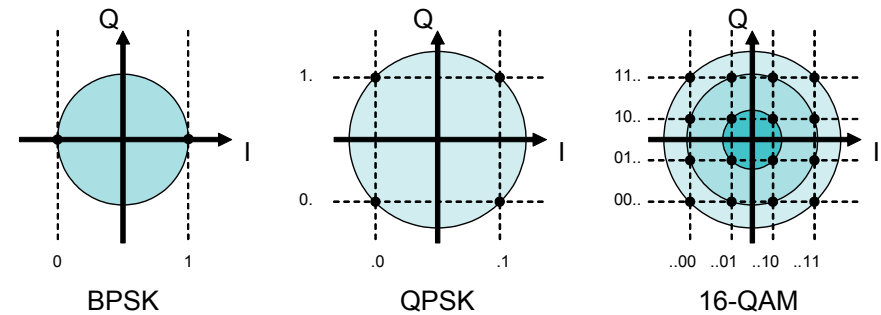
- **BPSK (Binary Phase Shift Keying)**
  - Bitwert 0: Sinusförmiges Signal
  - Bitwert 1: negatives Sinussignal
  - einfachstes Phasentastungsverfahren
  - spektral ineffizient
  - robust, in Satellitensystemen benutzt
- **QPSK (Quaternary Phase Shift Keying)**
  - 2 Bits werden in ein Symbol kodiert
  - Symbol entspricht phasenverschobenem Sinussignal
  - weniger Bandbreite als bei BPSK benötigt
  - Komplexer
- Oft Übertragung der relativen Phasenverschiebung (weniger Bitfehler)
  - **DQPSK** in z.B. IS-136, PHS (Mobilfunkstandards aus Amerika)



- **Quadraturamplitudenmodulation (QAM):** kombiniertes Amplituden- und Phasenmodulationsverfahren
  - Aufteilung von Bits oder Bitgruppen auf zwei Kanäle
  - getrennte Amplitudenmodulation dieser Kanäle auf zwei um  $90^\circ$  phasenverschobene Träger, die dann addiert werden
  - Möglichkeit,  $n$  Bits in ein Symbol zu kodieren
  - $2^n$  diskrete Stufen,  $n=2$  entspricht QPSK
  - Bitfehlerrate steigt mit  $n$ , aber weniger Bitfehler als bei vergleichbaren PSK-Verfahren
- **Beispiel: 16-QAM (4 Bits entspr. einem Symbol)**
  - Die Symbole 0011 und 0001 haben gleiche Phase und unterschiedliche Amplitude.
  - Die Symbole 0000 und 1000 haben unterschiedliche Phasen und gleiche Amplitude.



Moduliert die ASCII-Zeichenkette  
MK (= 01001101 01001011)  
mit den folgenden Modulationstechniken:



- Ziel



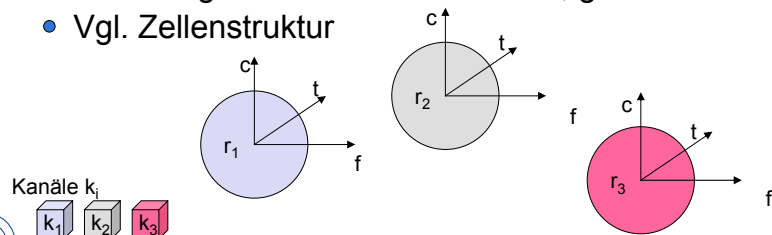
- Mehrfachnutzung des gemeinsamen Mediums

- Multiplexen ist in vier Dimensionen möglich

- Raum (r), Zeit (t), Frequenz (f) und Code (c)
- Wichtig: Genügend große Schutzabstände nötig!

- SDMA (Space Division Multiple Access)

- Einteilung des Raums in Sektoren, gerichtete Antennen
- Vgl. Zellenstruktur



70

- Vorgehensweise



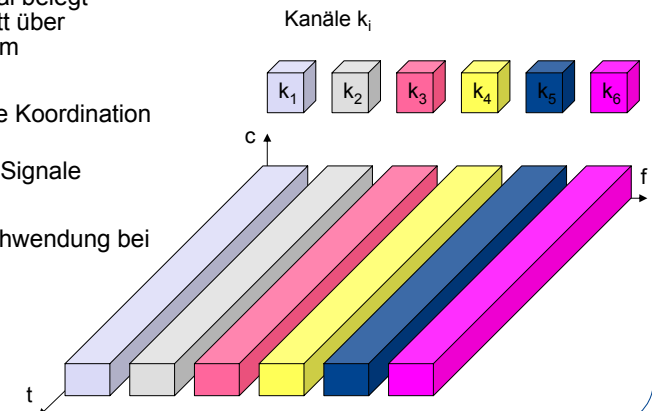
- Verfügbare Bandbreite wird in einzelne Frequenzabschnitte aufgeteilt
- Übertragungskanal belegt Frequenzabschnitt über gesamten Zeitraum

- Vorteile

- Keine dynamische Koordination nötig
- Auch für analoge Signale

- Nachteile

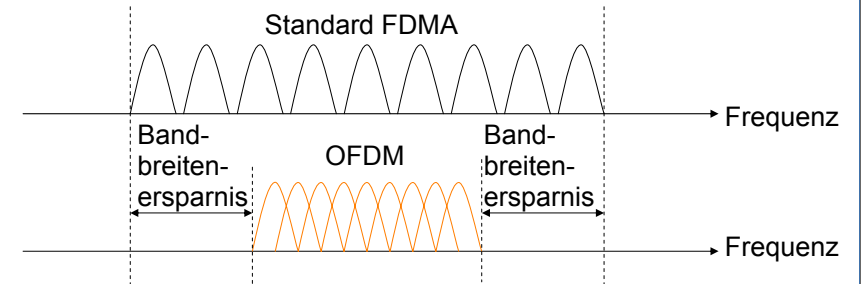
- Bandbreitenverschwendung bei ungleichmäßiger Belastung
- Unflexibel



71

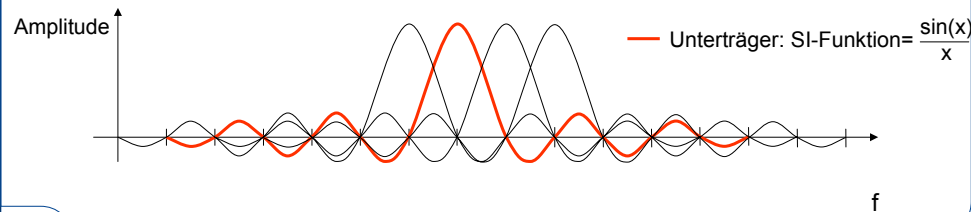
- **Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM)**
- **Ziel**
  - Hohe Datenraten bei geringer Bandbreite
- **Einsatzbereiche**
  - WLAN, DSL, Satellitenkommunikation, DAB, DVB, LTE
- **Beobachtung**
  - Mehrwegeausbreitung führt zu unterschiedlich langen Wegen für die Signalausbreitung
    - ▶ Intersymbolinterferenz limitiert erzielbare Datenrate
- **Vorgehensweise**
  - Parallele Datenübertragung statt serieller
    - ▶ Daten werden **parallel** auf mehreren (orthogonalen) Unterträgern mit geringer Datenrate übertragen
    - ▶ Hierdurch verringerte Intersymbolinterferenz

- **Unterschied zu traditionellem FDMA**
  - Geringerer Abstand zwischen den Unterträgern
    - ▶ Bei FDMA wegen großem Abstand relativ große Bandbreite erforderlich
    - ▶ Bei OFDM können sich die Unterträger sogar überlappen
      - ▶ Dadurch Einsparung im Hinblick auf die benötigte Bandbreite



- Orthogonale Unterträger bei OFDM

- Maximum einer Trägerfrequenz liegt im Frequenzbereich genau auf den Nullstellen aller anderen Trägerfrequenzen
  - ▶ Überlagerung der Frequenzen im selben Frequenzbereich
  - ▶ Störungen einer Frequenz führen nur zu Störungen auf einem Unterträger
  - ▶ Orthogonalität erlaubt Trennung des Signals auf Empfängerseite
- Genaue Synchronisation von Sender und Empfänger notwendig



74

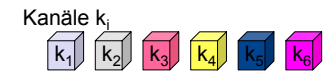
- Vorgehensweise



- Kanal belegt gesamten Frequenzraum für einen gewissen Zeitabschnitt

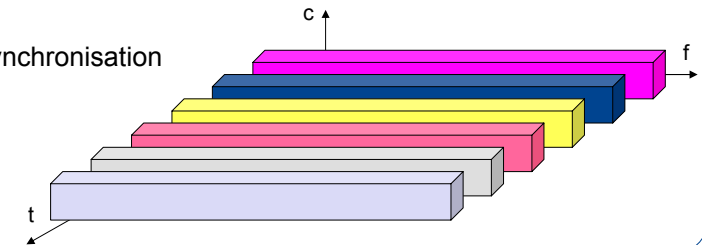
- Vorteile

- In einem Zeitabschnitt nur ein Träger auf dem Medium
- Durchsatz bleibt auch bei hoher Teilnehmerzahl hoch



- Nachteile

- Genaue Synchronisation nötig



75

## • Vorgehensweise

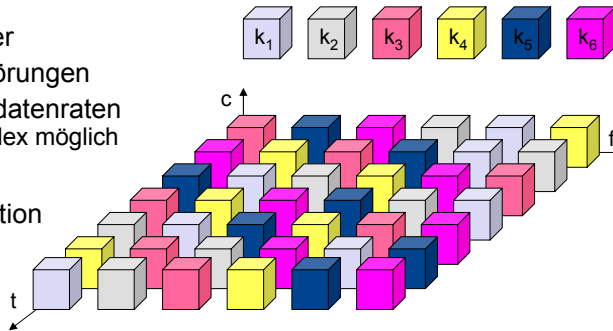
- Kombination der oben genannten Verfahren
- Belegen eines Frequenzabschnitts für einen Zeitabschnitt

## • Vorteile

- relativ abhörsicher
- Schutz gegen Störungen
- höhere Benutzerdatenraten als bei Codemultiplex möglich

## • Nachteil

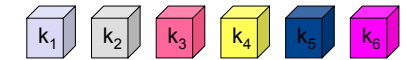
- genaue Koordination erforderlich



76

## • Vorgehensweise

- Alle Stationen operieren zur gleichen Zeit auf derselben Frequenz
- Signal wird vom Sender mit einer für ihn eindeutigen Pseudozufallszahl (Code) verknüpft
- Empfänger kann mittels bekannter Sender-Pseudozufallsfolge und Korrelationsfunktion das Originalsignal restaurieren



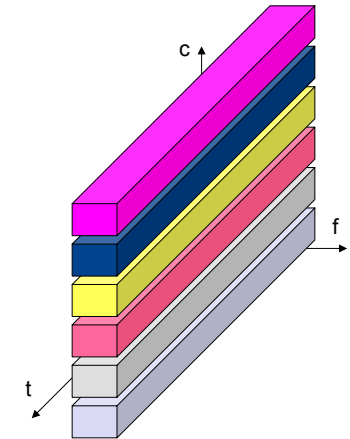
## • Nachteil

- Höhere Komplexität wegen Signalregenerierung
- Alle Signale müssen beim Empfänger gleich stark ankommen

## • Vorteile

- Keine Frequenzplanung erforderlich
- Sehr großer Coderaum (z.B.  $2^{32}$ ) im Vergleich zum Frequenzraum
- Vorwärtskorrektur und Verschlüsselung leicht integrierbar

- Realisierung: [Spreizspektrumtechnik](#)



77

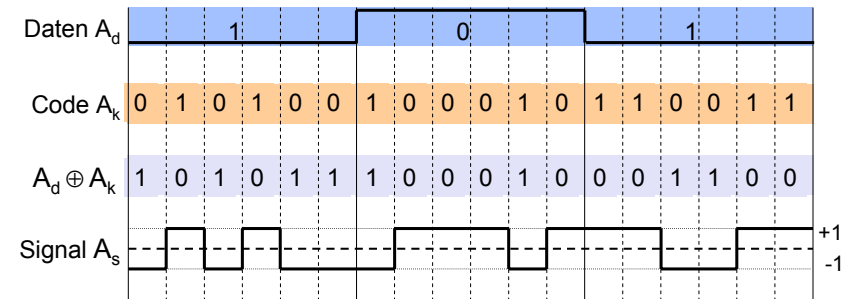
- Sender A
  - Sendet  $A_d = 1$ , Code  $A_k = 010011$  (setze: „0“ = +1, „1“ = -1)
  - Sendesignal  $A_s = A_d \cdot A_k = -1 \cdot (1, -1, +1, +1, -1, -1) = (-1, +1, -1, -1, +1, +1)$
- Sender B
  - Sendet  $B_d = 0$ , Code  $B_k = 110101$  (setze: „0“ = +1, „1“ = -1)
  - Sendesignal  $B_s = B_d \cdot B_k = 1 \cdot (-1, -1, +1, -1, +1, -1) = (-1, -1, +1, -1, +1, -1)$
- Beide Signale überlagern (addieren) sich in der Luft
  - Störungen hier vernachlässigt (Rauschen etc.)
  - Beide Signale haben die gleiche Signalstärke
  - $A_s + B_s = (-2, 0, 0, -2, +2, 0)$
- Empfänger will Sender A hören
  - Wendet Schlüssel  $A_k$  bitweise an (inneres Produkt)
    - ▶  $A_e = (A_s + B_s) \cdot A_k = (-2, 0, 0, -2, +2, 0) \cdot (1, -1, 1, 1, -1, -1) = -2 + 0 + 0 - 2 - 2 + 0 = -6$
    - ▶ Ergebnis ist deutlich kleiner 0, daher war gesendetes Bit eine „1“
  - Analog B
    - ▶  $B_e = (-2, 0, 0, -2, +2, 0) \cdot B_k = 2 + 0 + 0 + 2 + 2 + 0 = 6$ , also „0“



[1.1]

- Sender A will Bitfolge 101 übertragen

- Signalpegel im Beispiel
  - ▶ 0: positiver Pegel (+1)
  - ▶ 1: negativer Pegel (-1)



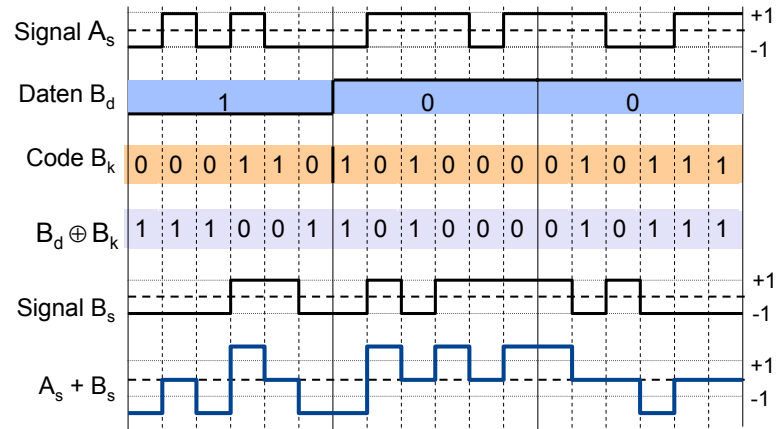
- In der Praxis werden längere Schlüssel eingesetzt, um einen möglichst großen Abstand im Coderaum zu erzielen.



- Sender B will Bitfolge 100 übertragen

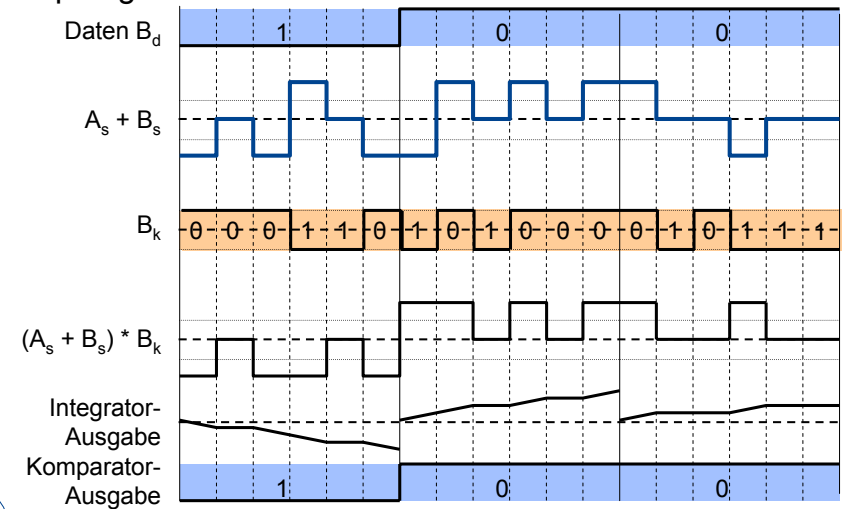
- Signalpegel im Beispiel

- ▶ 0: positiver Pegel (+1)
    - ▶ 1: negativer Pegel (-1)



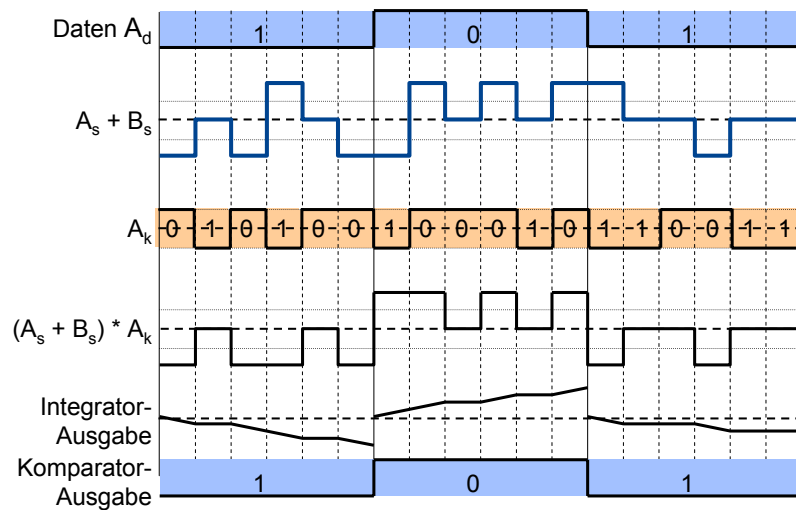
80

- Empfänger rekonstruiert Daten von B



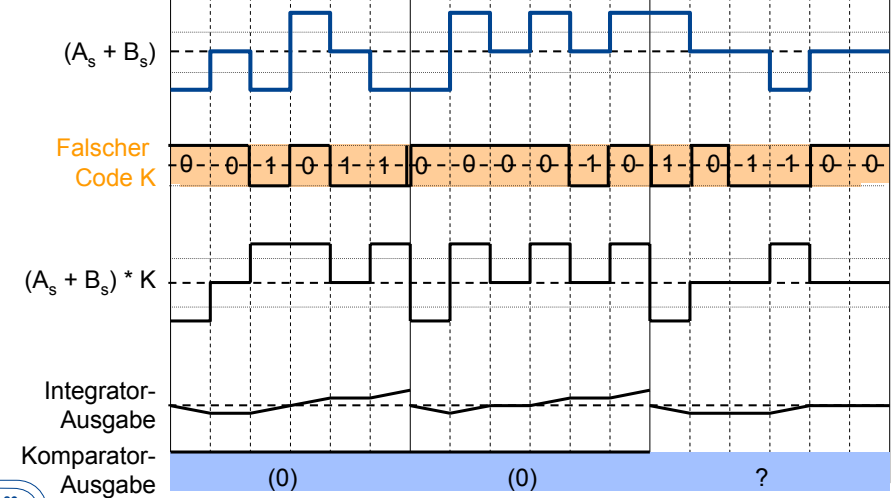
81

- Empfänger rekonstruiert Daten von A



82

- Empfänger arbeitet mit falschem Code



83

## Veranschaulicht die verschiedenen Multiplexing-Techniken anhand von (betrunkenen) Gästen auf einer Cocktailparty

- Space Division Multiple Access
- Frequency Division Multiple Access
- Time Division Multiple Access
- Code Division Multiple Access

Verfahren	SDMA	TDMA	FDMA	CDMA
Idee	Einteilung des Raums in Zellen/Sektoren	Aufteilung der Sendezeiten in disjunkte Schlitzze, anforderungs-gesteuert oder fest	Einteilung des Frequenzbereiches in disjunkte Bänder	Bandspreizung durch individuelle Codes
Teilnehmer	Nur ein Teilnehmer kann in einem Sektor ununterbrochen aktiv sein	Teilnehmer sind nacheinander für kurze Zeit aktiv	Jeder Teilnehmer hat ein Frequenzband, ununterbrochen	Alle Teilnehmer können gleichzeitig am gleichen Ort ununterbrochen aktiv sein
Signal-trennung	Zellenstruktur, Richtantennen	Im Zeitbereich durch Synchronisation	Im Frequenzbereich durch Filter	Code plus spezielle Empfänger
Vorteile	Sehr einfach hinsichtlich Planung, Technik, Kapazitätserhöhung	Etabliert, voll digital, vielfältig einsetzbar	Einfach, etabliert, robust, planbar	Flexibel, benötigt weniger Frequenzplanung, weicher Handover
Nachteile	Unflexibel, typischerweise feste Antennen	Schutzzeiten wegen Mehrwegausbreitung nötig, Synchronisation	Geringe Flexibilität, Frequenzen Mangelware	Komplexe Empfänger, benötigt exakte Steuerung der Sendeleistung
Bemerkung	Nur in Kombination mit TDMA, FDMA oder CDMA sinnvoll	Standard in Festnetzen, im Mobilien oft kombiniert mit FDMA	Heute kombiniert mit TDMA in z.B. GSM	Findet Verwendung in UMTS

- I.1 Was versteht man unter Triple Play? Überlegen Sie sich Anwendungsbeispiele.
- I.2 Welche neuen Aufgaben müssen in der Mobilkommunikation im Vergleich zur Festnetzkommunikation gelöst werden?
- I.3 Was versteht man unter einem Handover?
- I.4 Erläutern Sie das Problem der versteckten Endgeräte.
- I.5 In welcher Relation stehen Sende- und Empfangsleistung?
- I.6 Was versteht man unter Mehrwegeausbreitung?
- I.7 Wie entsteht Intersymbolinterferenz und was für Auswirkungen hat sie?
- I.8 Welcher Zusammenhang besteht zwischen Frequenz und Wellenlänge?
- I.9 In welchen Frequenzbereichen befinden sich die gängigen Netze der Mobilkommunikation?
- I.10 Welche Techniken zur digitalen Modulation kennen Sie?
- I.11 Welche Aufgabe hat die analoge Modulation?
- I.12 Auf welche Arten können Signale dargestellt werden?
- I.13 Welche Vorteile hat CDMA und wie funktioniert es?
- I.14 Vergleichen Sie OFDM mit Frequenzmultiplexen.
- I.15 Wieso hilft OFDM bei Mehrwegeausbreitung?

- [I.1] J. Schiller; Mobilkommunikation; Addison-Wesley, 2003
  - ▶ Kapitel 1 – Einführung → Geschichte der Mobilkommunikation
  - ▶ Kapitel 2 – Drahtlose Übertragung
  - ▶ Kapitel 3 – Medienzugriffsverfahren → SDMA, FDMA, TDMA, CDMA
- [I.2] R. Read, Nachrichten- und Informationstechnik; Pearson Studium 2004
  - ▶ Einfach lesbare Einführung in die Nachrichten- und Informationstechnik
- [I.3] K. Beyerer, B. Mathis (Hrsg.); So weit das Auge reicht – Die Geschichte der optischen Telegraphie; Karlsruhe, Braun, 1995, ISBN 3-7650-8150-7
  - ▶ Populärwissenschaftliches Buch über die Geschichte der optischen Telegraphie
- [I.4] T. S. Rappaport, Wireless Communications, Prentice Hall, 1999
- [I.5] [www.handywellen.de](http://www.handywellen.de)
- [I.6] [www.umtslink.at/mobilfunkgeschichte.htm](http://www.umtslink.at/mobilfunkgeschichte.htm)
- [I.7] <http://www.spiegel.de/netzwelt/technologie/0,1518,405336,00.html>
- [I.8] <http://www.tmcforum.com/>
- [I.9] <http://www.alte-telefone.de/seite50.htm>
- [I.10] <http://it.tud.uni-essen.de/polybios.htm>
- [I.11] [www.wikipedia.de](http://www.wikipedia.de) (vor allem Bilder)
- [I.12] <http://jcb57.club.fr/chappe/reseau.html>
- [I.13] [http://epp.eurostat.cec.eu.int/cache/ITY\\_OFFPUB/KS-NP-06-009/DE/KS-NP-06-009-DE.PDF](http://epp.eurostat.cec.eu.int/cache/ITY_OFFPUB/KS-NP-06-009/DE/KS-NP-06-009-DE.PDF)
- [I.14] <http://tdrwww.iem.uni-due.de/index2.php?id=86&kat=5>
- [I.15] <http://www.t-mobile.de/hotspot/1,9646,13391-,00.html?svl=100>