

# Kapitel 2 – Drahtlose Übertragung

**Vorlesung Mobilkommunikation Wintersemester 2017/18**  
**Prof. Dr. Oliver Waldhorst (HS Karlsruhe), Markus Jung**

INSTITUT FÜR TELEMATIK





Mobiles TCP



Mobile Ad Hoc Netze



Mobile IP



WLAN, Bluetooth



GSM, UMTS, LTE, 5G



Mobilitätsmanagement



Medienzugriff



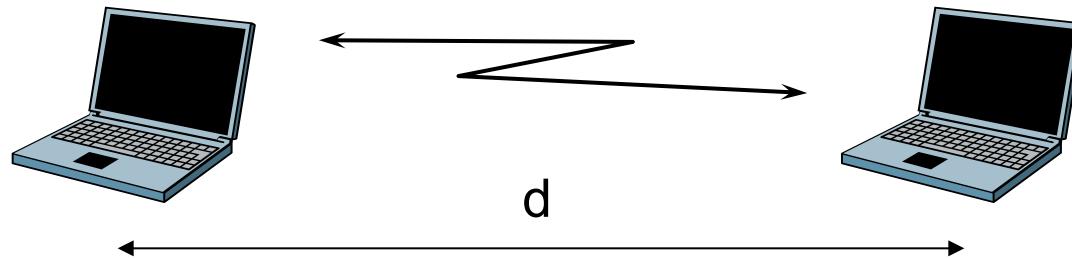
**Drahtlose Übertragung**

- *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
- *Geteiltes Medium*
  - Geeignete Verfahren für Multiplexing und Medienzugriff erforderlich
- *Regulierung der Frequenzbereiche*
  - Frequenzen müssen koordiniert werden (national/international)
  - Viele sinnvoll nutzbare Frequenzen sind schon vergeben

# Signalausbreitung

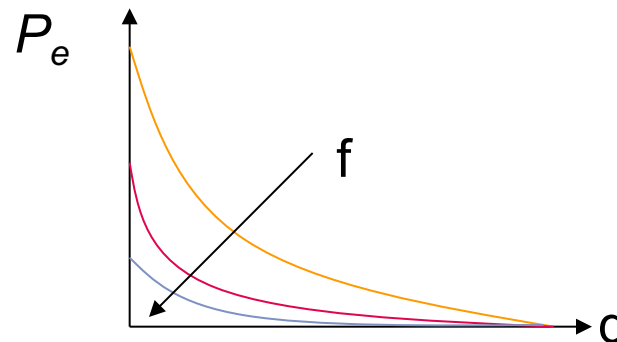
## ■ Signalausbreitung im idealen Fall

- 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

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



# Signalausbreitung

## ■ Dezibel (dB)

- In logarithmischer Skala dargestelltes Verhältnis zweier homogener Größen

### ■ Beispiele

- Allgemein Gewinn / Abschwächung:  $10 \log_{10}(P_{\text{Output}} / P_{\text{Input}})$
- Bezugsleistung 1 Watt (dBW):  $10 \log_{10}(P/1\text{W})$
- Bezugsleistung 1 Milliwatt (dBm):  $10 \log_{10}(P/1\text{mW})$



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

# Signalausbreitung

## ■ Ausbreitungsmaß (auch: Pathloss)

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

## ■ Annahme: Ideale **isotrope Antenne** bei Sender und Empfänger

- Wirkfläche einer idealen isotropen Antenne  $A_e = \lambda^2 / 4\pi$

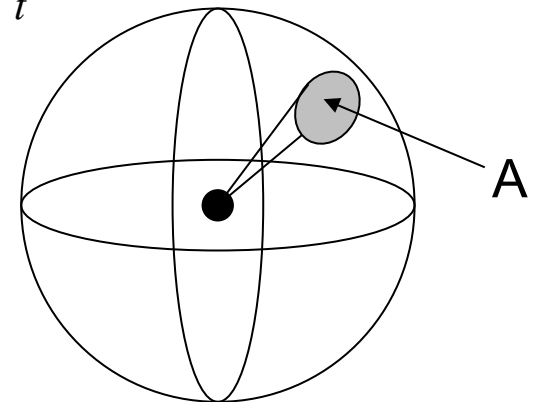
## ■ Leistung des empfangenen Signals ( $d$ = Abstand!)

- Annahme: Konstant über die Zeit, d.h., keine Funktion von  $t$

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

## ■ Daraus ergibt sich ein Ausbreitungsmaß von

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



# Signalausbreitung

## ■ Beispiel

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

$$\begin{aligned}a_{dB} &= 20 \cdot \log_{10}(4\pi d / \lambda) \\&= 20 \cdot \log_{10}(4\pi d / \frac{c}{f}) \\&= 20 \cdot \log_{10}(4\pi \cdot 10^4 m \cdot 2.4 \cdot 10^9 \frac{1}{s} / 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}) \\&= 20 \cdot \log_{10}(4\pi \cdot 0.8 \cdot 10^5) \\&\approx 120dB\end{aligned}$$

Zusammenhang zwischen Frequenz und Wellenlänge:

$$\lambda = c/f \quad \text{mit} \quad \begin{array}{l} \text{Wellenlänge } \lambda, \\ \text{Lichtgeschwindigkeit } c \cong 3 \times 10^8 \text{ m/s}, \\ \text{Frequenz } f \end{array}$$

# Signalausbreitung

## ■ Unterschiedliche Bereiche der Signalausbreitung

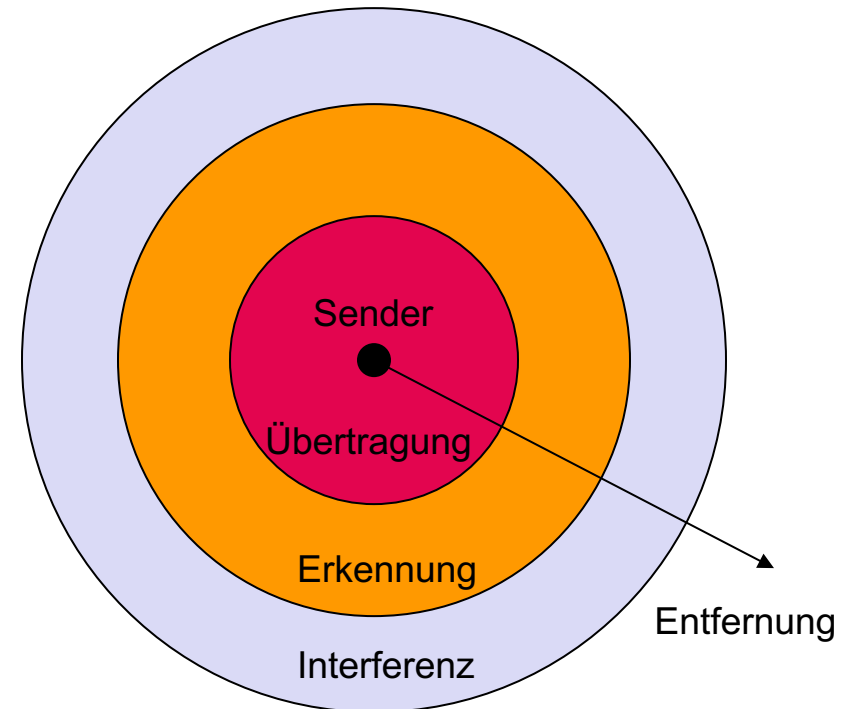
- Übertragungsbereich
  - Kommunikation möglich
  - niedrige Fehlerrate
- Erkennungsbereich
  - Signalerkennung möglich
  - Kommunikation nicht möglich
- Interferenzbereich
  - Signal kann nicht detektiert werden
  - Signal trägt zum Hintergrundrauschen bei

## ■ Idealisierte Darstellung

- Geht von hindernisfreier Ausbreitung aus

## ■ Bereiche sind

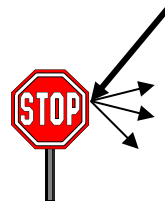
- *nicht* scharf gegeneinander abgegrenzt!
- *nicht* notwendigerweise kreisförmig!



# Einflussfaktoren

## ■ Streuung (scattering) an kleinen Hindernissen

- Aufspaltung in mehrere schwächere Signale



## ■ Beugung (diffraction)

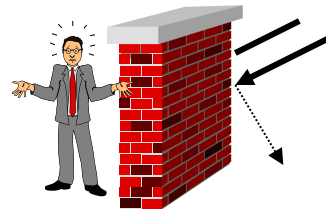
- Ablenkung von Wellen an einem Hindernis
- Welle wird in den Abschattungsbereich eines Hindernisses gebeugt
- Beugung stärker bei größerem Verhältnis von Wellenlänge zu Abmessung des Hindernisses
  - Oberhalb von etwa 5 GHz vernachlässigbar



# Einflussfaktoren

## ■ Abschattung durch Hindernisse

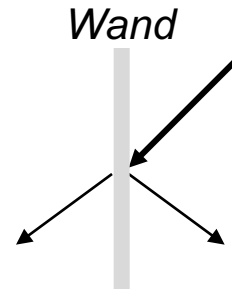
- Extreme Form der Dämpfung



Abschattung  
(idealisiert)

## ■ Reflexion

- Abschwächung des Signals



Reflexion  
(idealisiert)

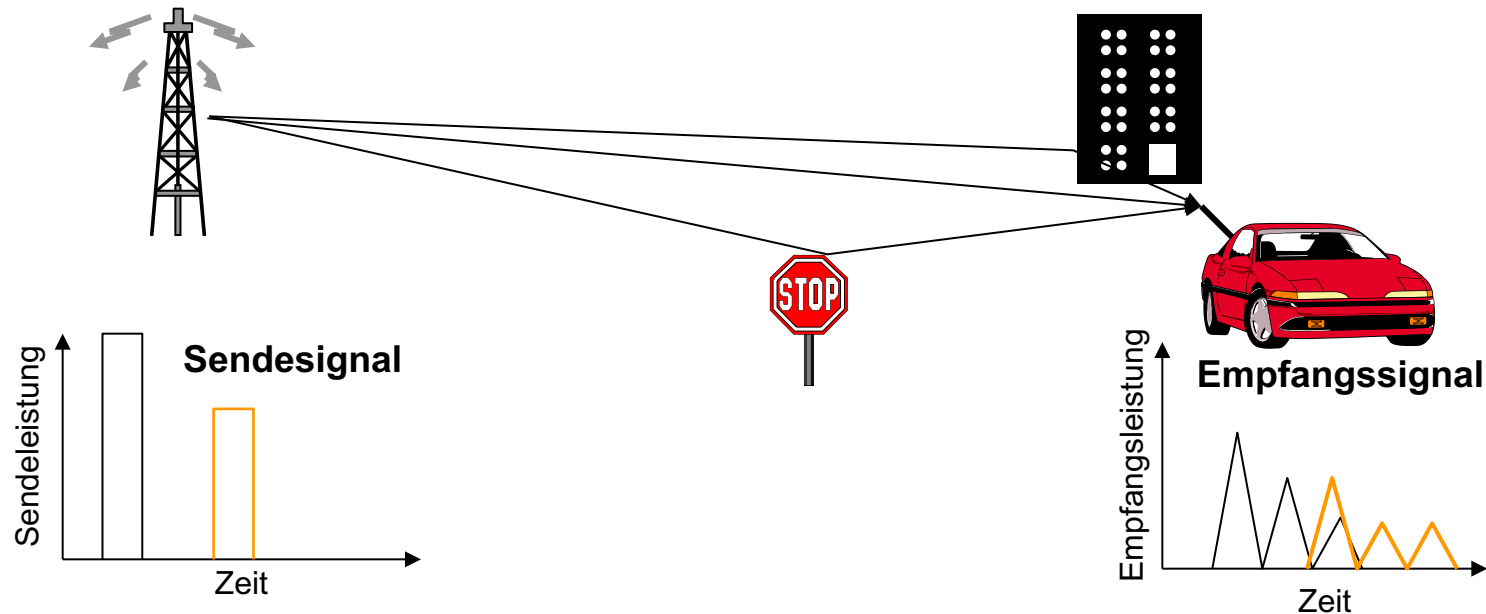
## ■ Freiraumdämpfung

- 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

# Einflussfaktoren

## ■ 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

# Einflussfaktoren

## ■ 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

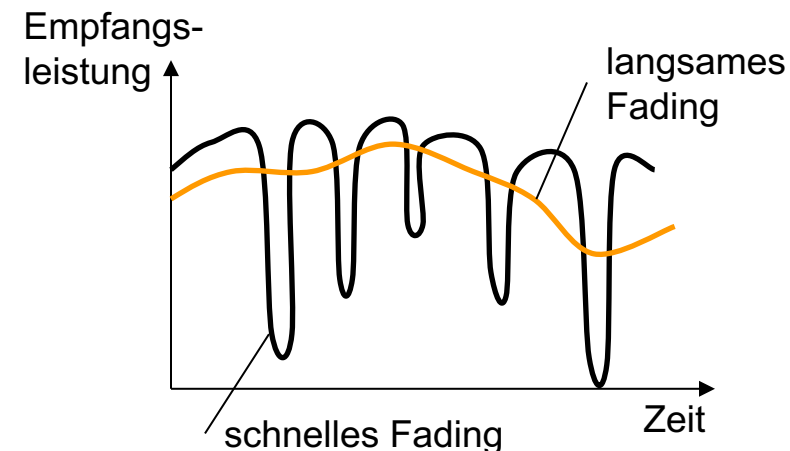
- kurzzeitige Einbrüche in der Empfangsleistung durch gegenseitige Auslöschung der überlagerten Signale

### ■ Zusätzlich ändern sich

- Entfernung von der Basisstation
- Hindernisse in weiterer Entfernung

### ■ Langsames Fading

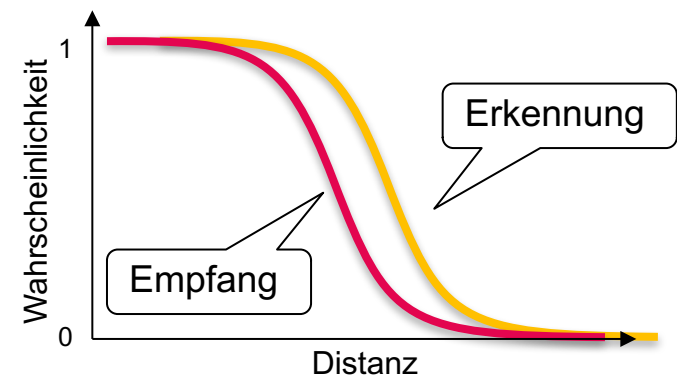
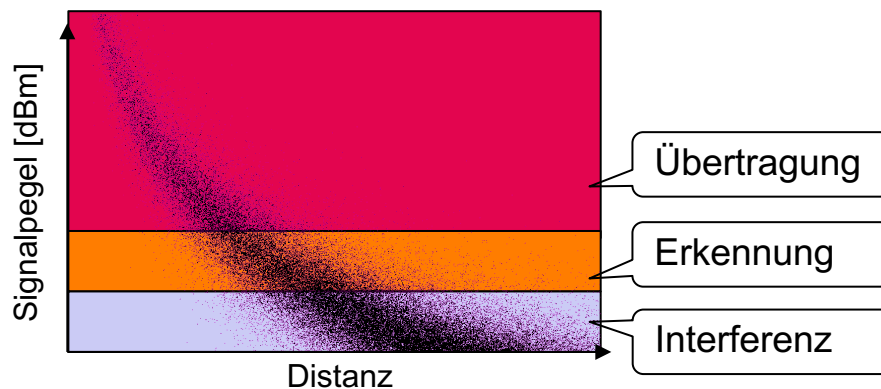
- langsame Änderungen in der (durchschnittlichen) Empfangsleistung





# Verfeinerung des Modells zur Signalausbreitung

- Zahlreiche Einflussfaktoren auf das Signal (s.o.)
  - Ausbreitungsbedingte Störungen
  - Signalpegel kaum exakt vorhersagbar
  - Signalpegel besser durch Verteilung modellierbar
- Folge für die Übertragung zwischen zwei Stationen
  - Übertragungen können fehlschlagen
  - Übertragung kann nur unidirektional sein
  - Mittlere Empfangswahrscheinlichkeit fällt mit Distanz





# Kanalkapazität

## ■ Kanalkapazität $\mathbb{C}$

- Maximale Informationsmenge, die bei vorgegebener Bandbreite  $B$  fehlerfrei übertragen werden kann
  - Abhängig von Signal-zu-Rausch-Verhältnis  $SNR$
- Laut Shannon für Kanal mit additivem weißem **Gaußschem Rauschen** (**Additive White Gaussian Noise**, AWGN)

$$\mathbb{C} = B \log_2(1 + SNR)$$

## ■ Spektrale Effizienz $C = \mathbb{C} / B$

- Wichtiges Optimierungskriterium im Mobilfunk  
(Bsp.: UMTS Lizenzgebühren 50 Mrd. € für 60 MHz)



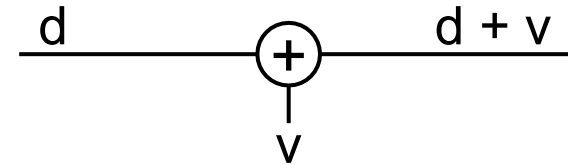


# Kapazitätsgewinn durch parallele Übertragung (1)

## ■ Einzelner Datenpfad

- $C_1 = \log_2(1 + \text{SNR})$

[v = Rauschen]



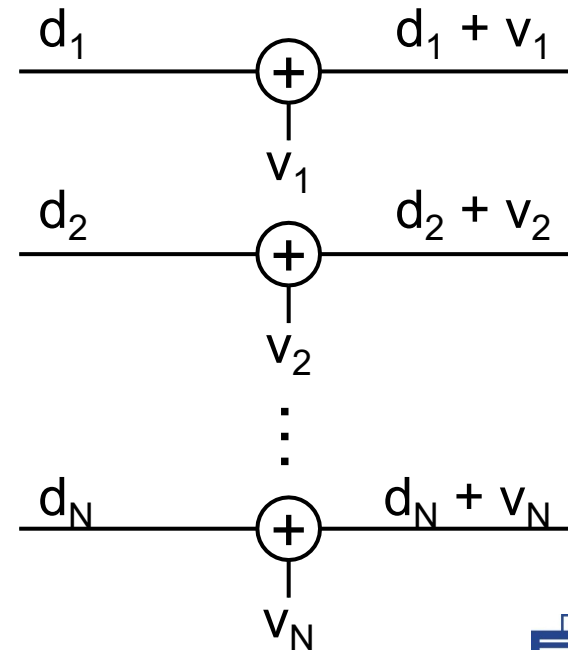
## ■ N parallele Übertragungen

- Sendeleistung wird auf alle N Pfade aufgeteilt

N Übertragungskanäle...

- $C_N = N \log_2(1 + \text{SNR}/N)$

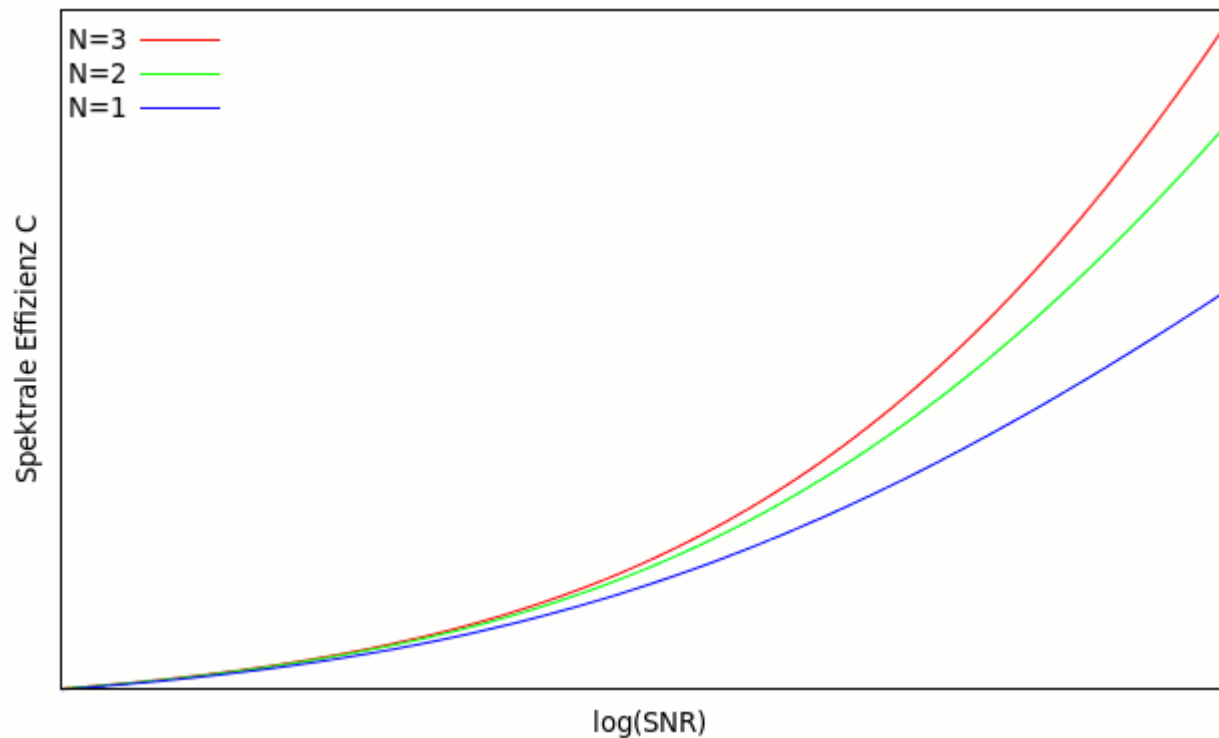
... mit je 1/N Sendeleistung

 [2.5]



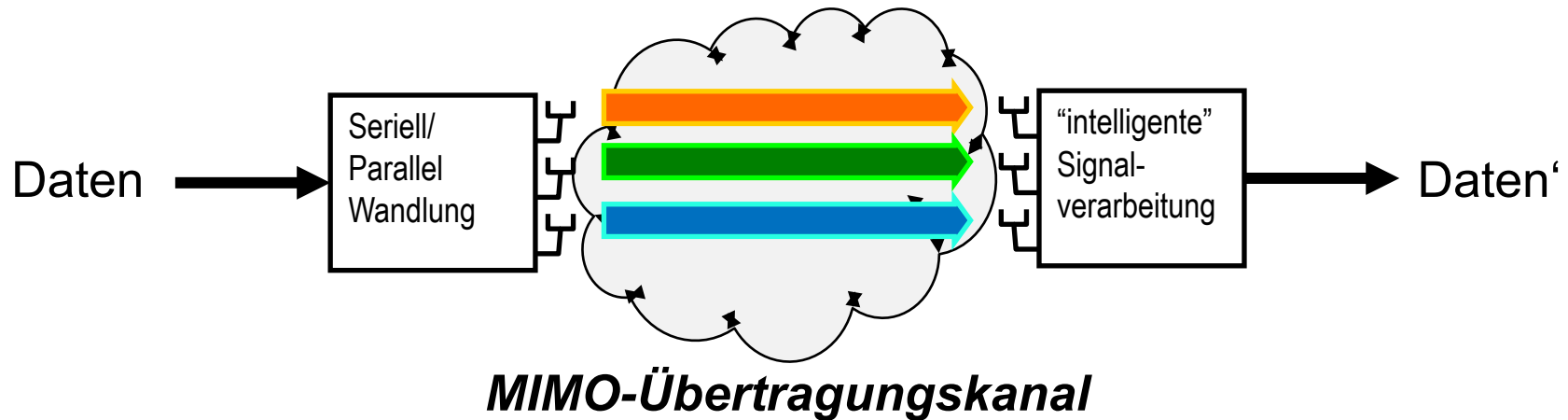
# Kapazitätsgewinn durch parallele Übertragung (2)

- Deutlich höhere spektrale Effizienz bei großen SNR
  - Interessant für lokale Netze (z.B. WLAN)



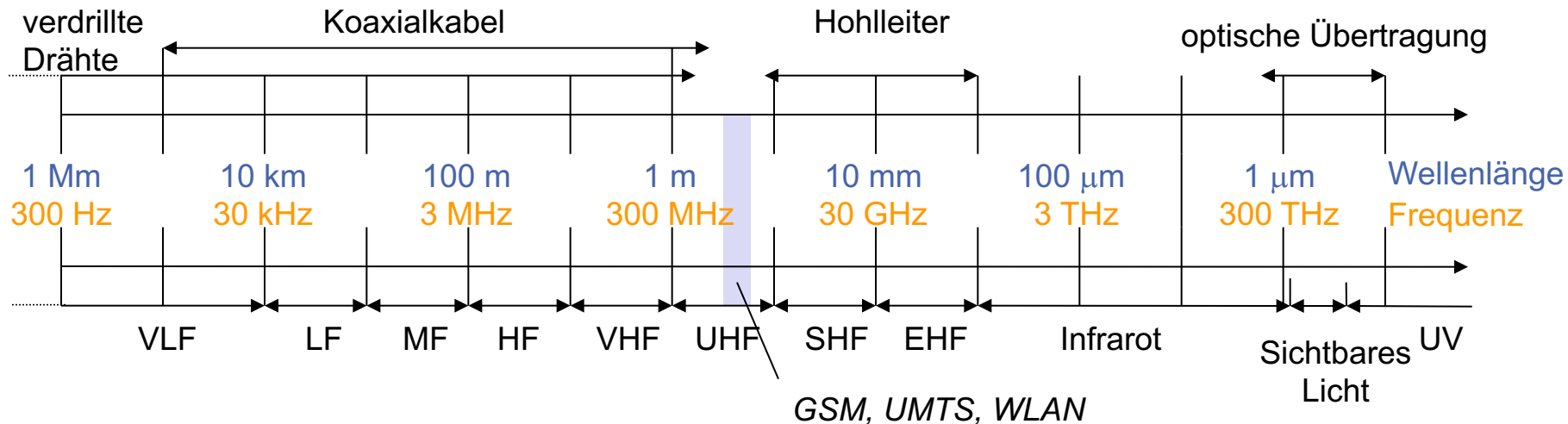


# Anwendung: Multiple-Input-Multiple-Output (MIMO)



- Datenstrom wird in mehrere Teilströme aufgeteilt
  - Gleichzeitige Abstrahlung mittels **Multi-Element-Antennen**
- Empfänger detektiert und trennt überlagerte Signale mit „**intelligenter Signalverarbeitung**“
  - i.A. Kanalkenntnisse notwendig (Schätzungen durch bekannte Pilotsignale, statistische Eigenschaften)
- Anwendungsbeispiele
  - WLAN IEEE 802.11n, LTE

# Frequenzbereiche



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  $c \cong 3 \times 10^8$  m/s,  
Frequenz  $f$



# Frequenzbereiche

- 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

# Frequenzen und Regulierungen

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



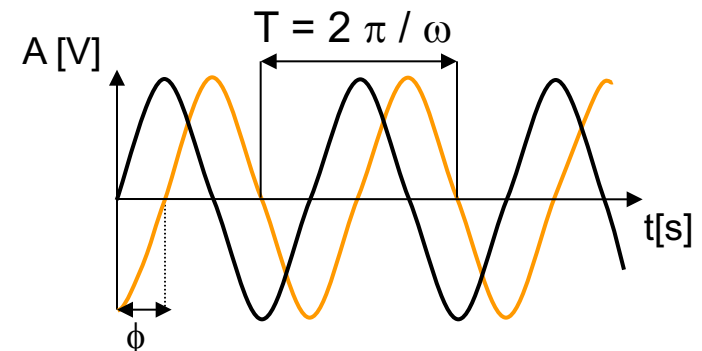
# Signale

- 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

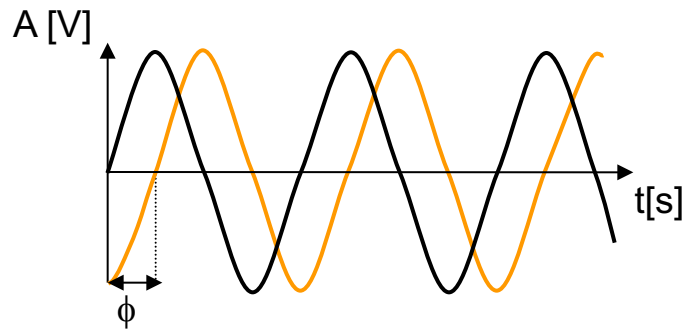


$$s(t) = A \sin(2 \pi f t + \phi) = A \sin(\omega t + \phi)$$

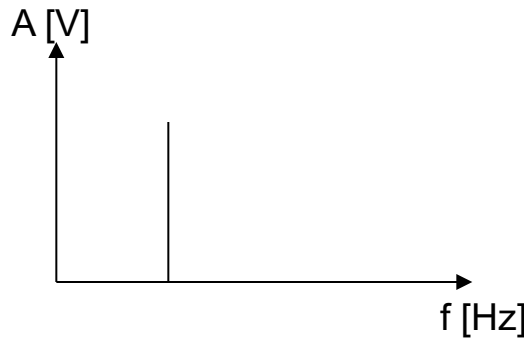
mit Kreisfrequenz  $\omega = 2 \pi f$



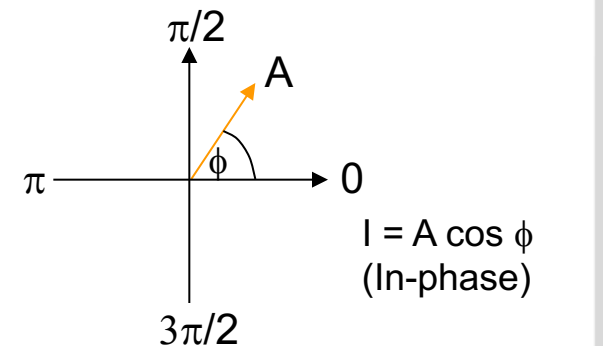
# Darstellung von Signalen



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
- Inverse Fourier-Transformation

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

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

# Fourier Repräsentation periodischer Signale

- 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:

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

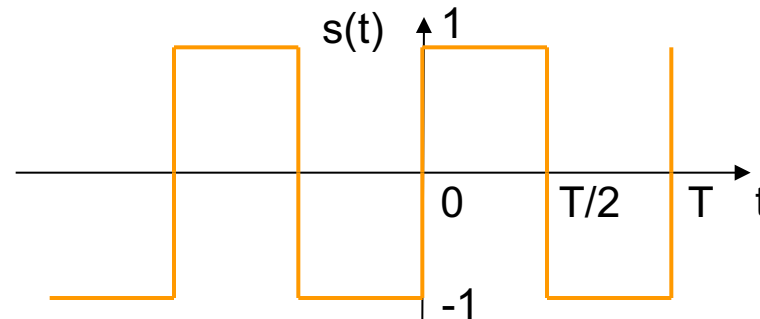
mit  $\phi_n = \arctan \frac{a_n}{b_n}$

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

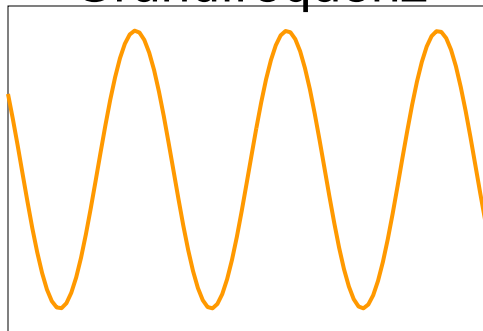
# Beispiel Fourier-Reihe

Fourier-Reihe einer idealen periodischen Rechteckfunktion:

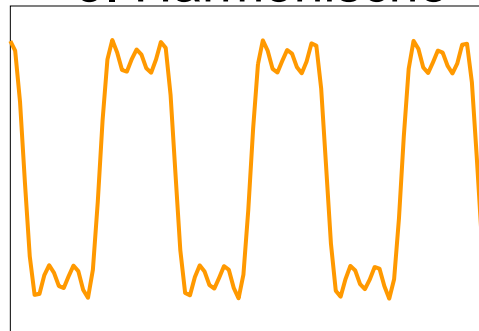
$$s(t) = \frac{4}{\pi} \left( \sin \omega \cdot t + \frac{1}{3} \sin 3\omega \cdot t + \frac{1}{5} \sin 5\omega \cdot t + \dots \right)$$



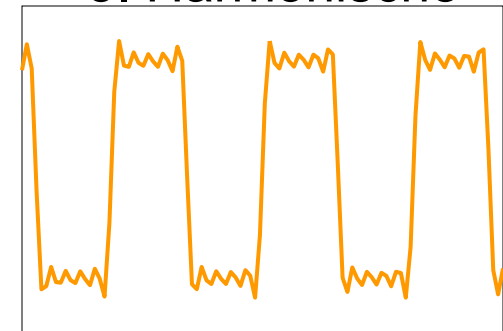
Grundfrequenz



3. Harmonische



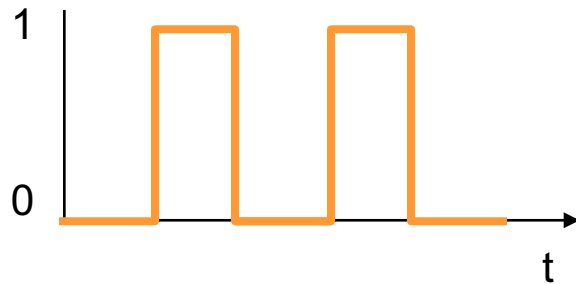
5. Harmonische



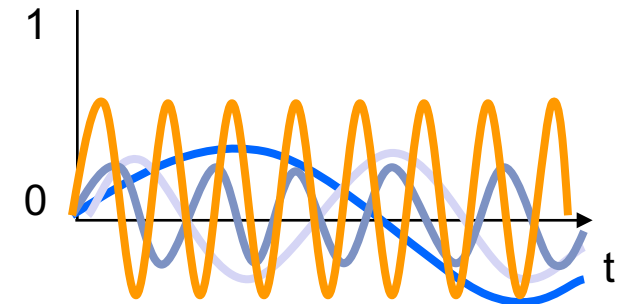
Ideale Rechteckfunktion benötigt **unendlich** viele Harmonische und damit theoretisch eine **unendlich** hohe Bandbreite



# Fourier Repräsentation periodischer Signale



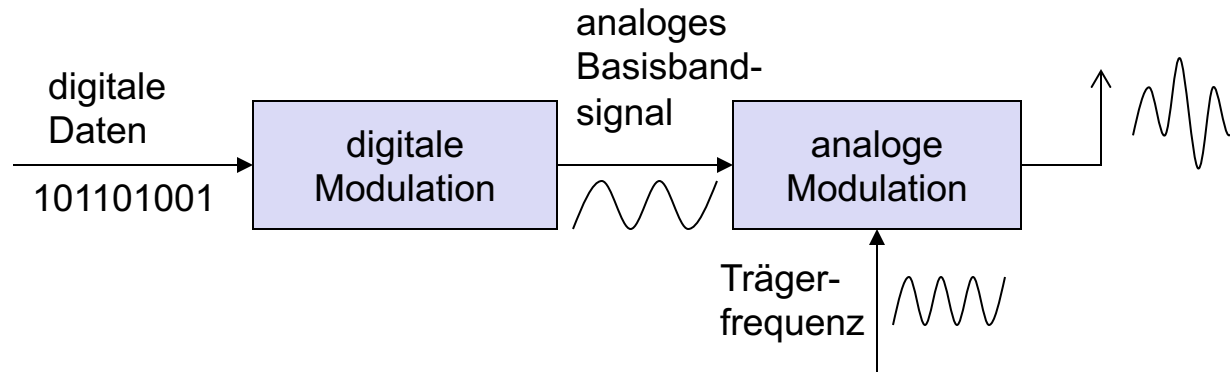
periodisches Signal



Komposition basierend  
auf Grundfrequenz und  
Harmonischen



# Modulation



## ■ Digitale Modulation

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

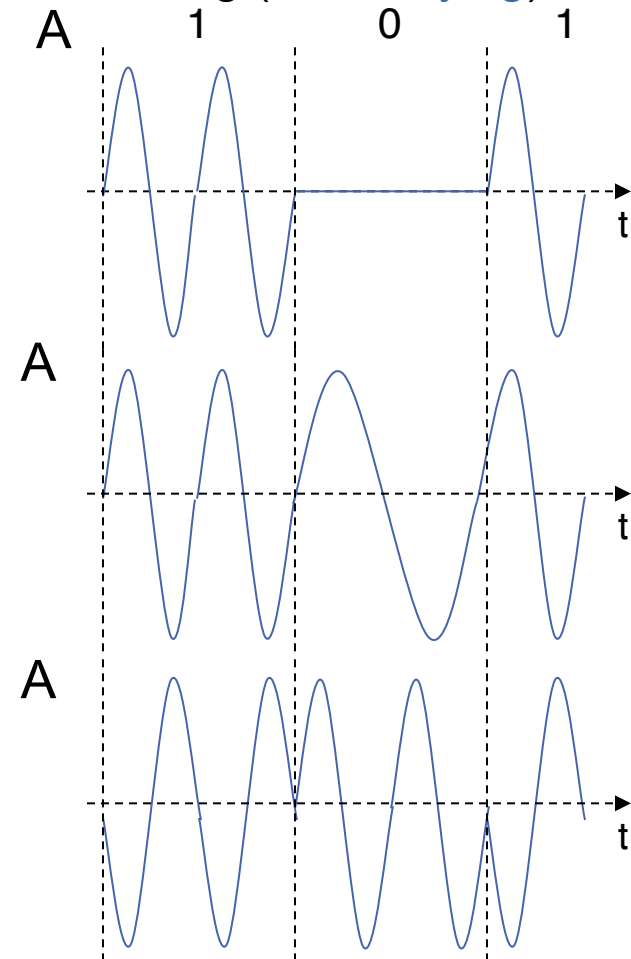
## ■ Analoge Modulation

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



# Digitale Modulationstechniken

- Modulation bei digitalen Signalen auch als Umtastung (**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 Trägersrückgewinnung
  - relativ störungssicher

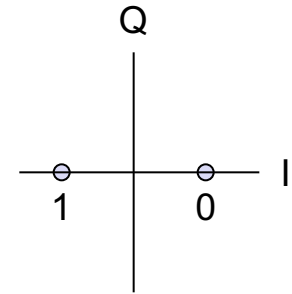




# Fortgeschrittene PSK-Verfahren

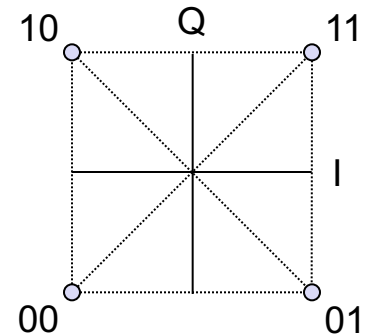
## ■ BPSK (Binary Phase Shift Keying)

- Bitwert 0: Sinusförmiges Signal
- Bitwert 1: negatives Sinussignal
- einfachstes Phasentastungsverfahren
- spektral ineffizient
- robust, in Satellitensystemen benutzt



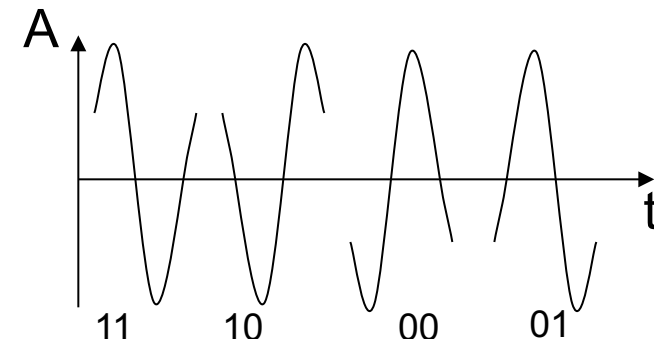
## ■ QPSK (Quaternary Phase Shift Keying)

- Zwei Datenbits werden in ein Symbol kodiert
- Symbol entspricht phasenverschobenem Sinussignal
- weniger Bandbreite als bei BPSK benötigt
- Komplexer



## ■ Oft Übertragung der relativen Phasenverschiebung (weniger Bitfehler)

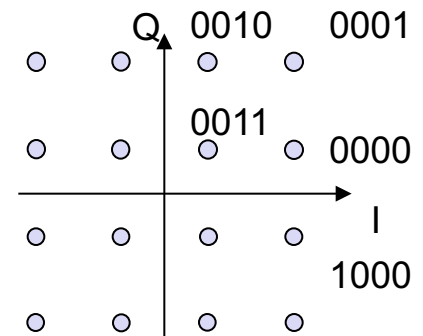
- DQPSK in z.B. IS-136, PHS (Mobilfunkstandards aus Amerika)





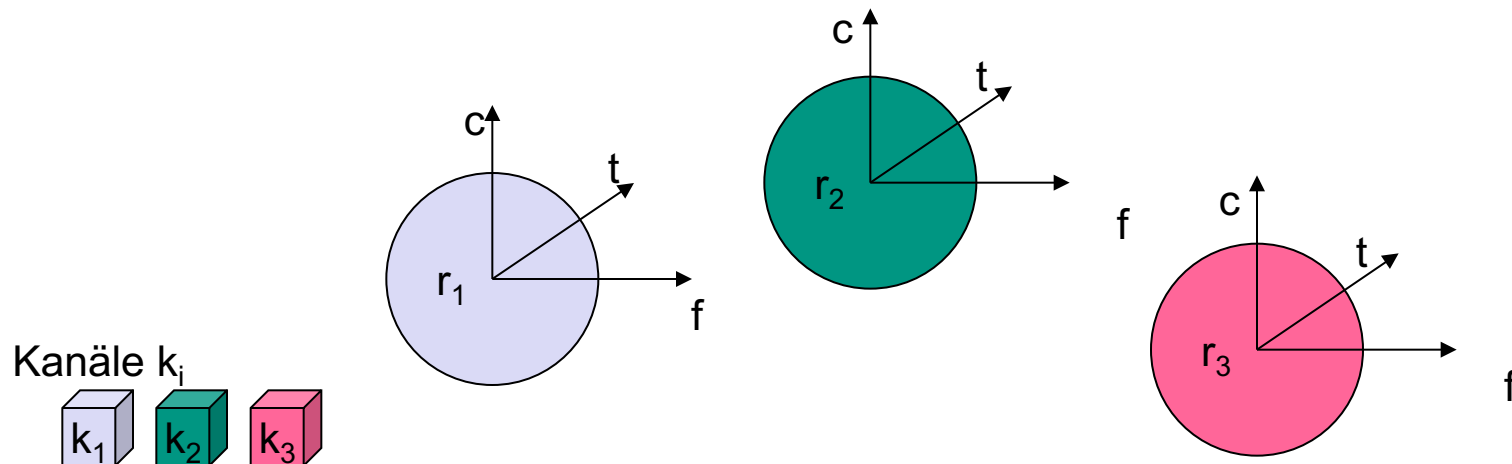
# Quadraturamplitudenmodulation

- **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.



# Multiplextechniken

- 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



# Frequenzmultiplex (FDMA)

## ■ Vorgehensweise

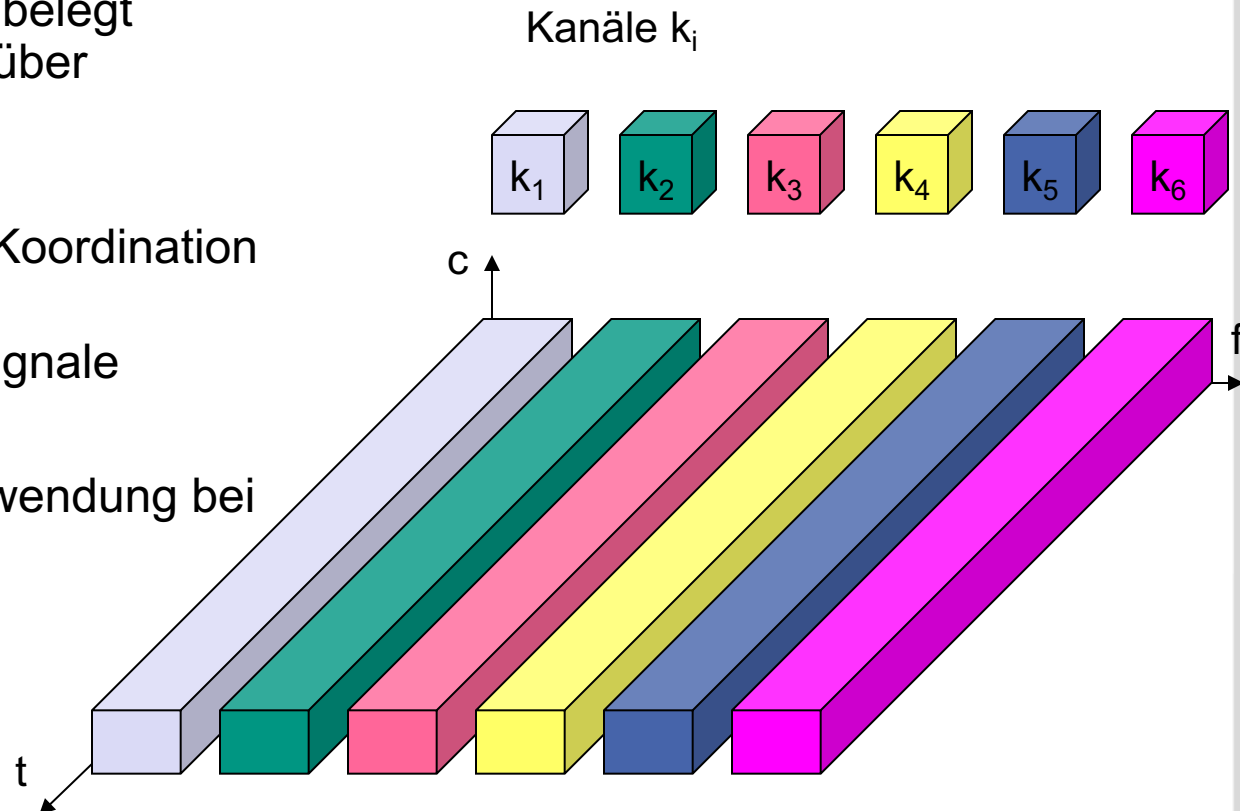
- Verfügbare Bandbreite wird in einzelne Frequenzabschnitte aufgeteilt
- Übertragungskanal belegt Frequenzabschnitt über gesamten Zeitraum

## ■ Vorteile

- Keine dynamische Koordination nötig
- Auch für analoge Signale

## ■ Nachteile

- Bandbreitenverschwendung bei ungleichmäßiger Belastung
- Unflexibel



# Zeitmultiplex (TDMA)

## ■ Vorgehensweise

- Kanal belegt gesamten Frequenzraum für einen gewissen Zeitabschnitt

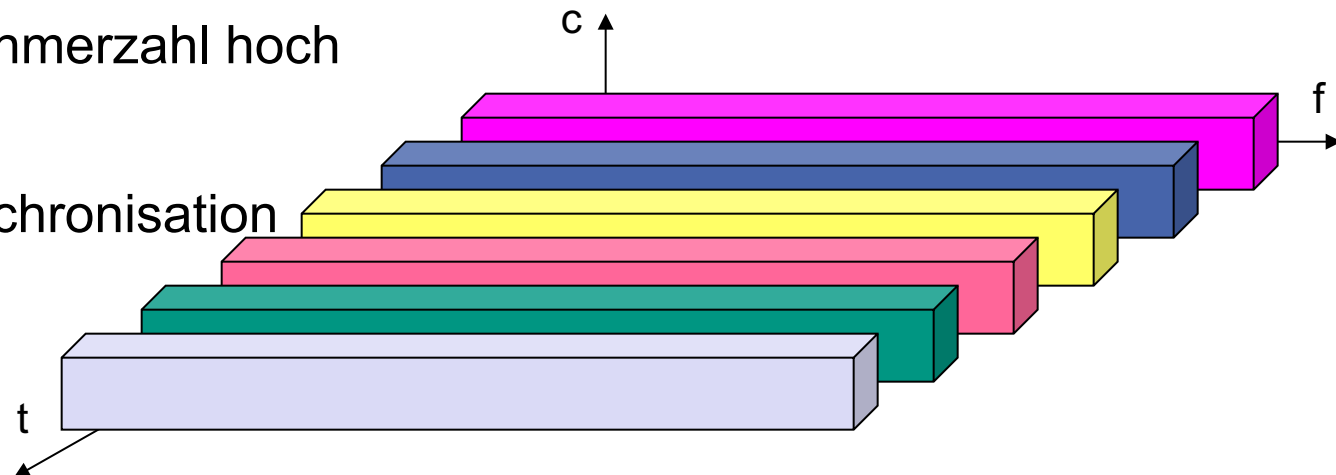
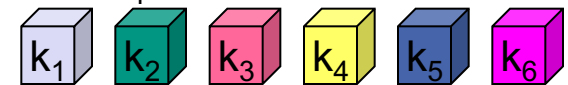
## ■ Vorteile

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

## ■ Nachteile

- Genaue Synchronisation nötig

Kanäle  $k_i$



# Zeit- und Frequenzmultiplex

## ■ Vorgehensweise

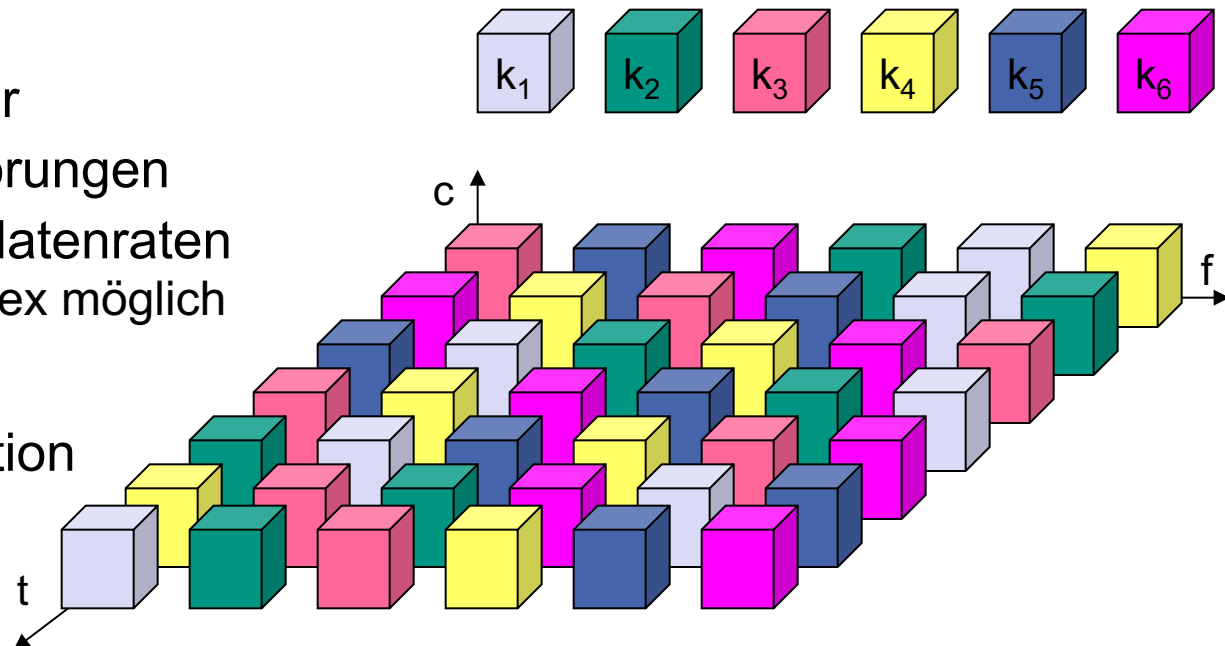
- Kombination der oben genannten Verfahren
- Belegen eines Frequenzabschnitts für einen Zeitabschnitt

## ■ Vorteile

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

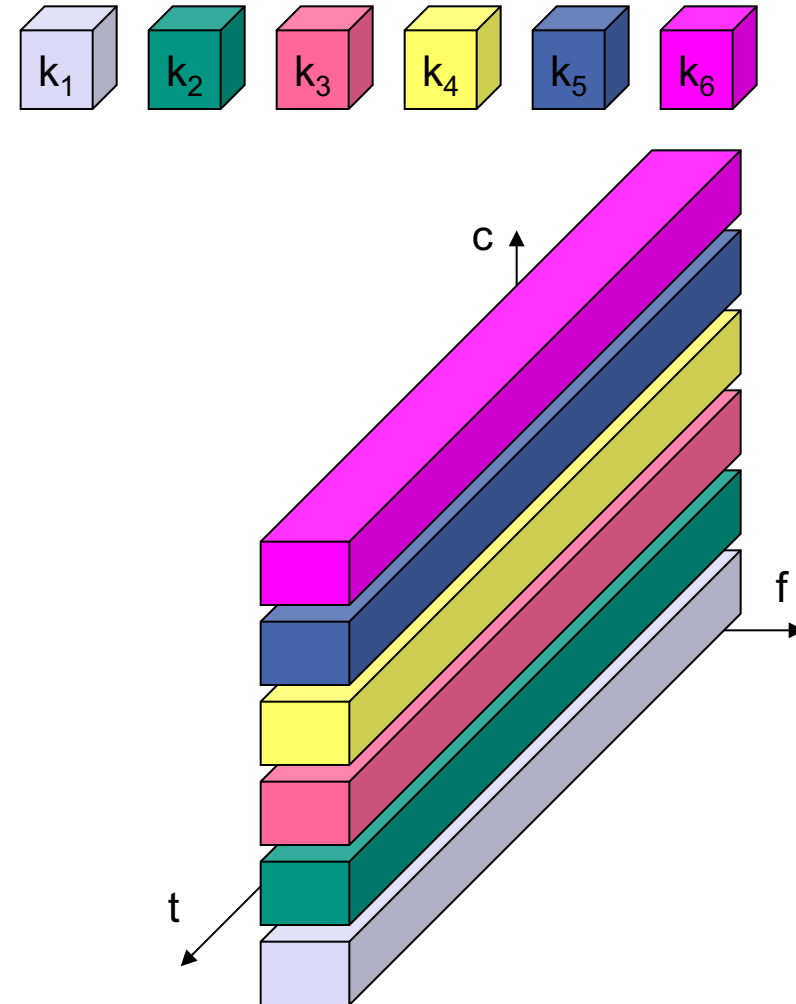
## ■ Nachteil

- genaue Koordination erforderlich



# Codemultiplex (CDMA)

- Vorgehensweise
  - Alle Stationen operieren zur gleichen Zeit auf derselben Frequenz
  - Signal wird vom Sender mit einer für ihn eindeutigen Pseudozufallszahlenfolge (**Code**, **Chipping Sequence**) 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**
  - (vgl. Folie 44 ff.)



# CDMA - Beispiel

## ■ 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“



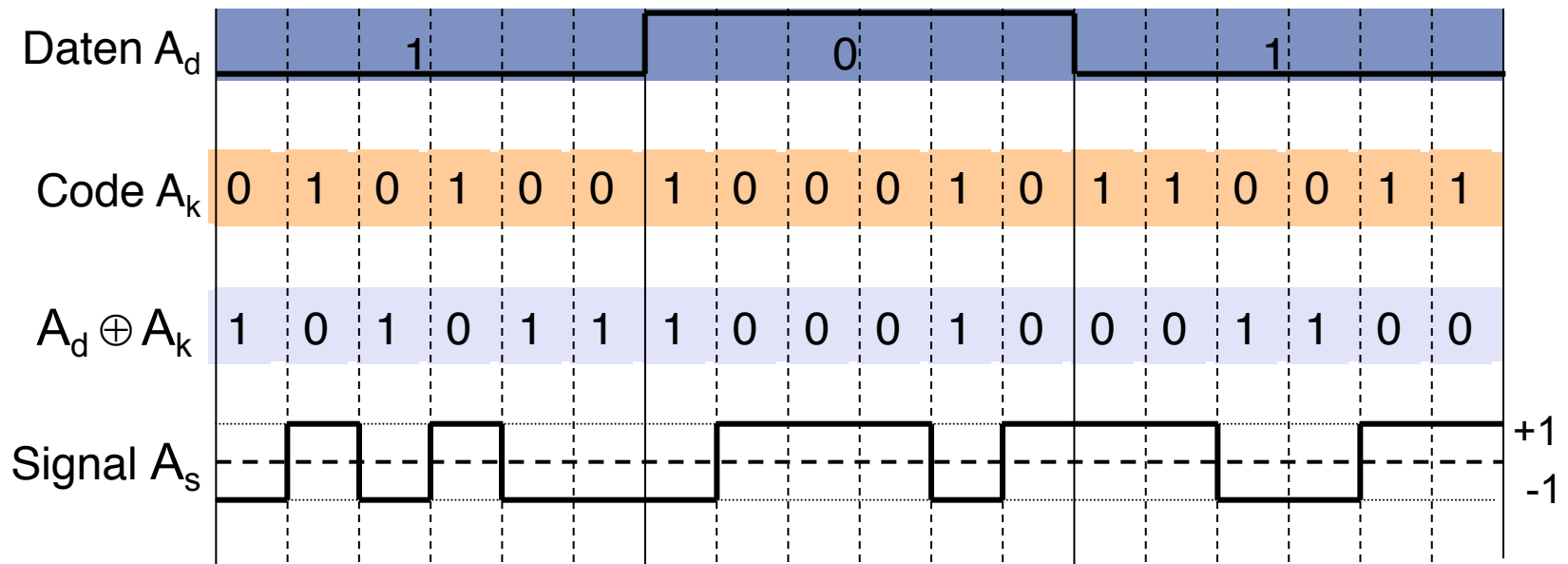
# CDMA - Beispiel

■ 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.

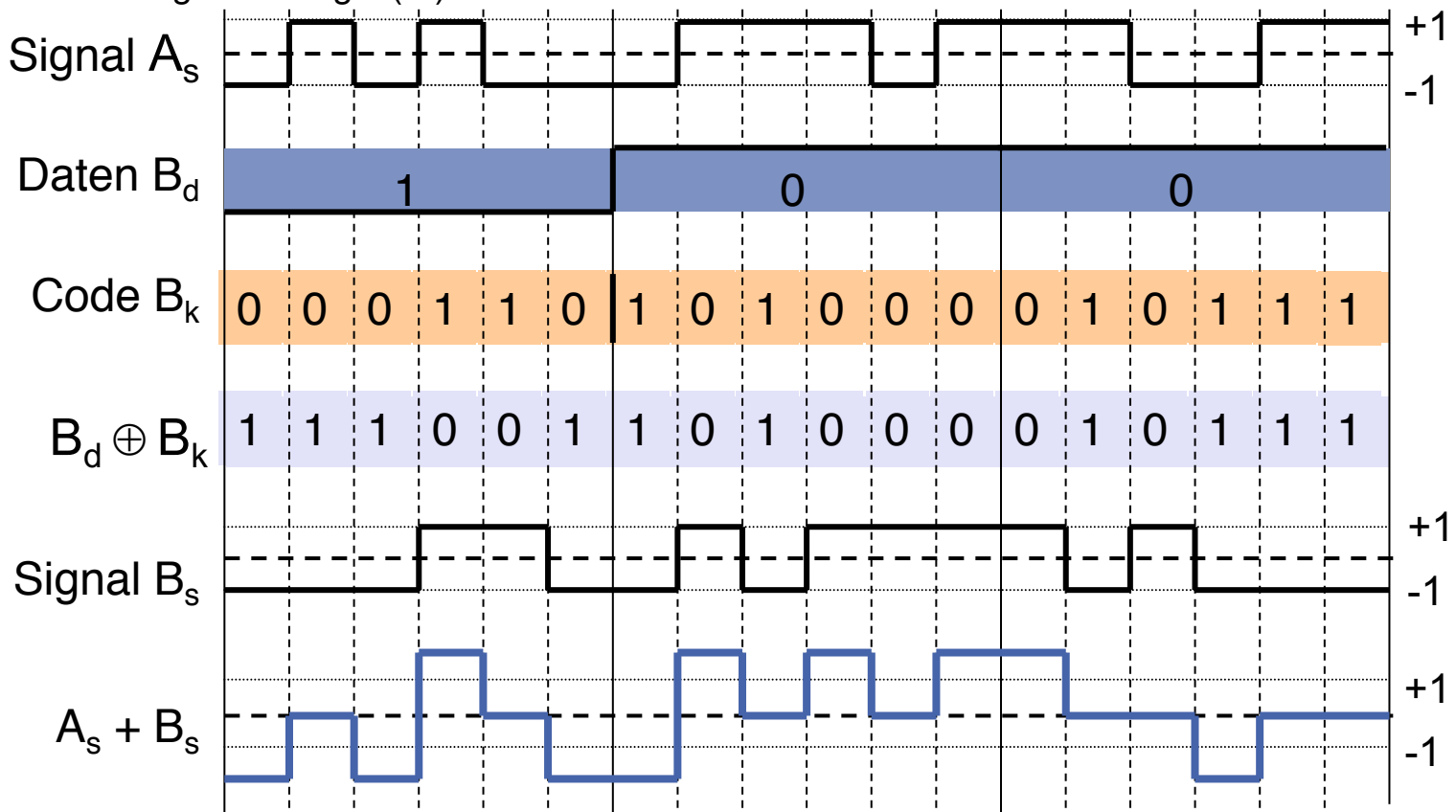
# CDMA - Beispiel

■ Sender B will Bitfolge 100 übertragen

■ Signalpegel im Beispiel

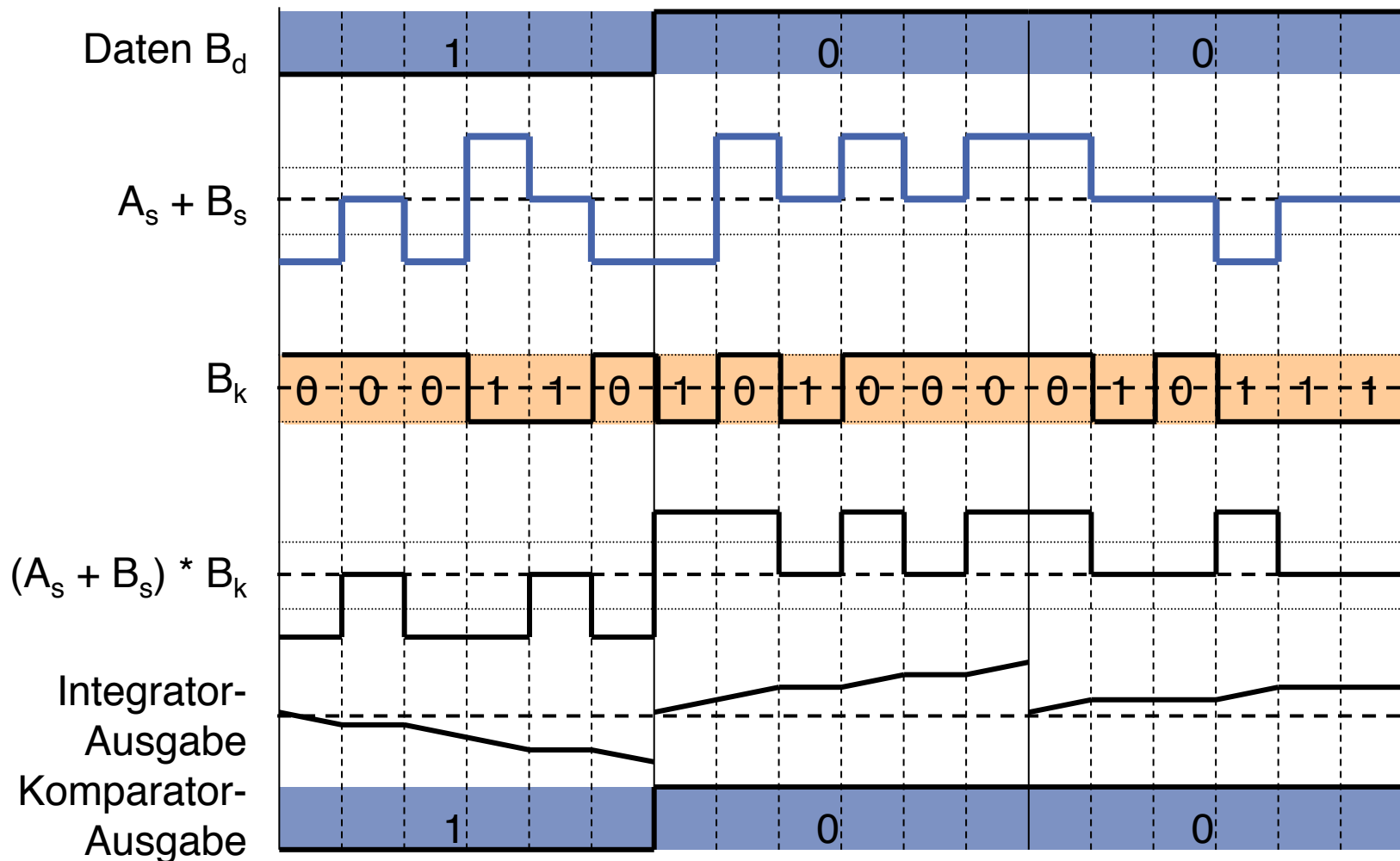
■ 0: positiver Pegel (+1)

■ 1: negativer Pegel (-1)



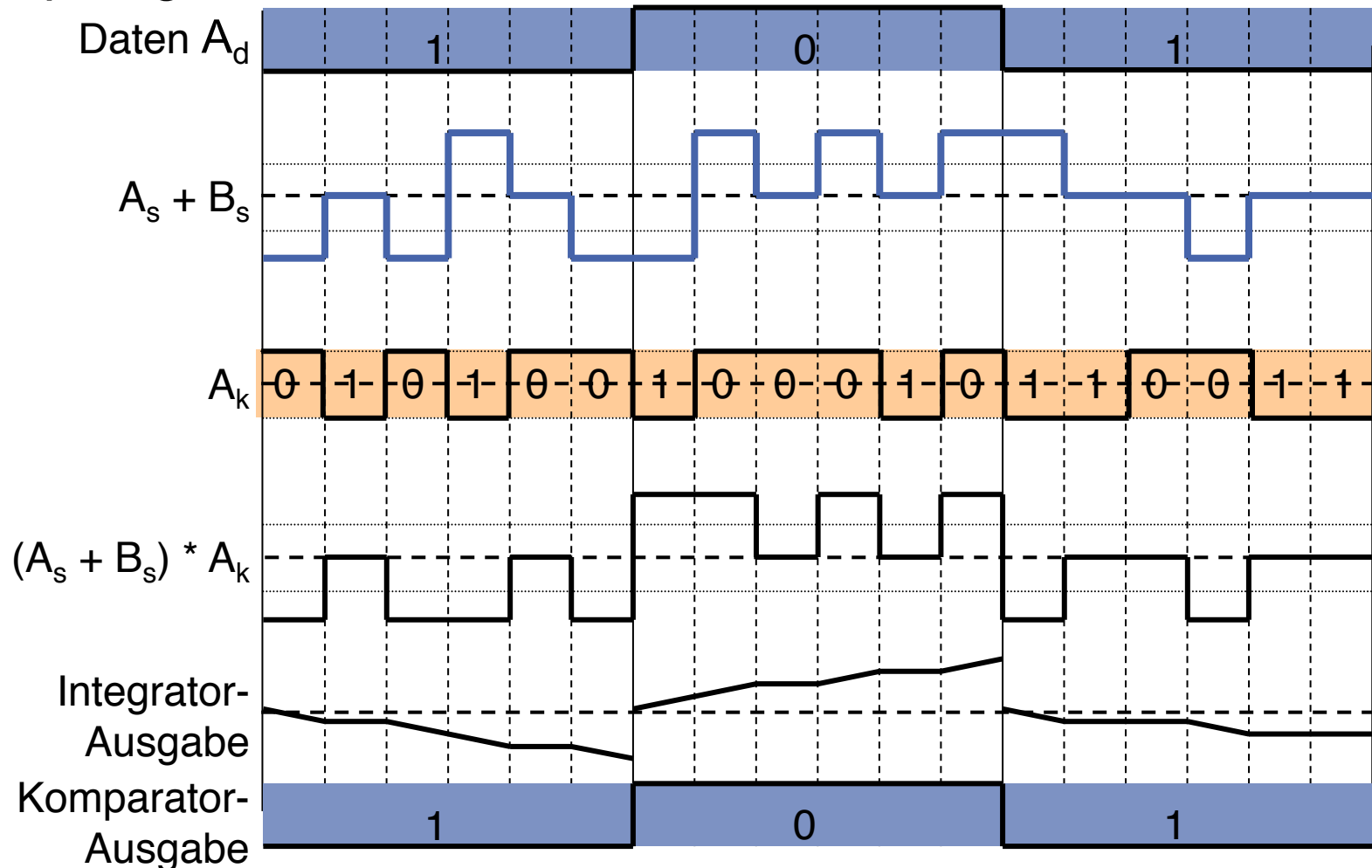
# CDMA - Beispiel

- Empfänger rekonstruiert Daten von B



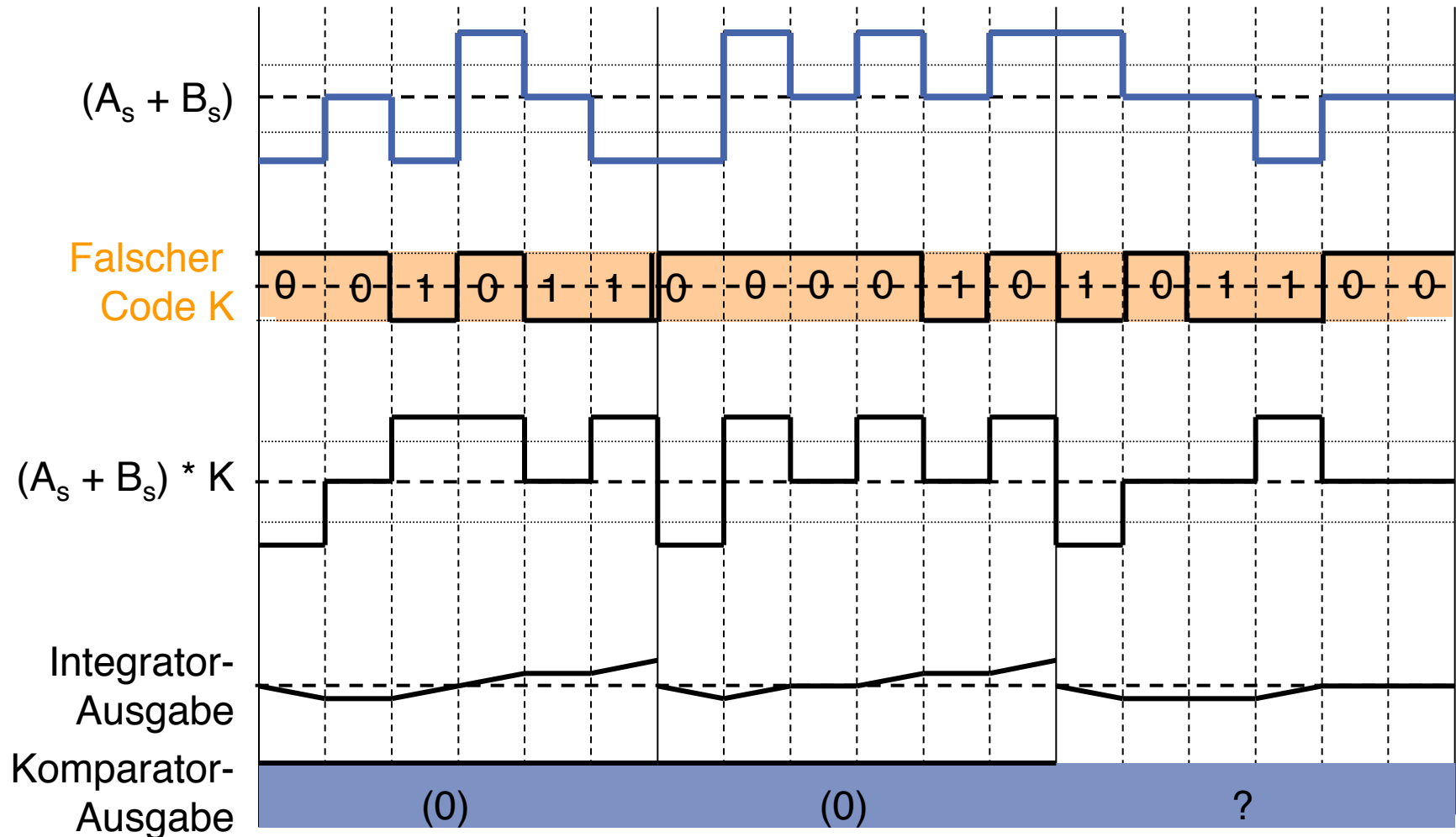
# CDMA - Beispiel

- Empfänger rekonstruiert Daten von A



# CDMA - Beispiel

## ■ Empfänger arbeitet mit falschem Code



# Wie generiert man orthogonale Codes?

■ Walsh-Hadamard-Matrix rekursiv definiert durch

$$C_1 = [1]$$

$$C_{2N} = \begin{bmatrix} C_N & C_N \\ C_N & -C_N \end{bmatrix}$$

■ Beispiel:

$$C_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$C_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

■ Zeile der Matrix heißt Walsh Sequence

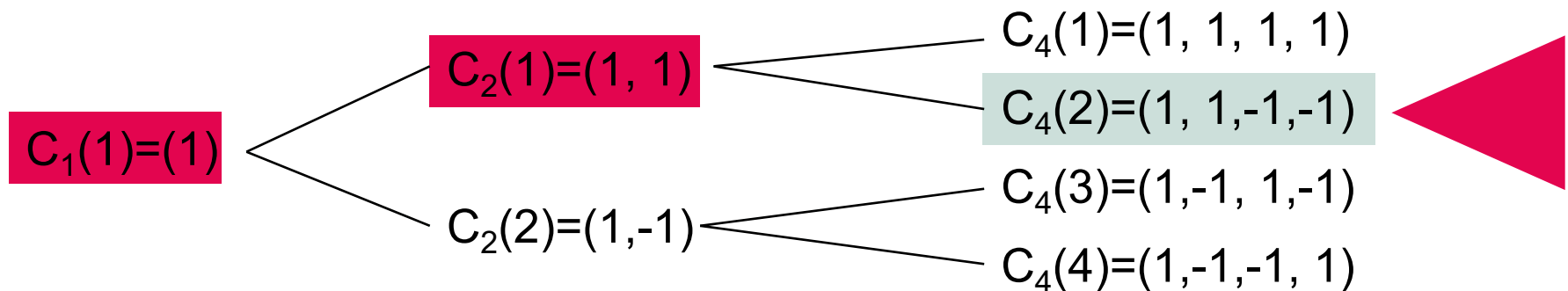
■ Paarweise orthogonal

# Orthogonal Variable Spreading Factor (OVSF)

## ■ Motivation OVSF

- Verschiedene Spreizfaktoren für verschieden Kanäle  
→ Unterschiedliche Datenraten

## ■ Darstellung der Codes als Baum



- „Oberes“ Kind: Elter-Sequenz 2x konkateniert
- „Unteres“ Kind: Elter-Sequenz konkateniert mit ihrem Inversen
- Für jede gewählte Sequenz dürfen Vorgänger und Nachfolger nicht verwendet werden

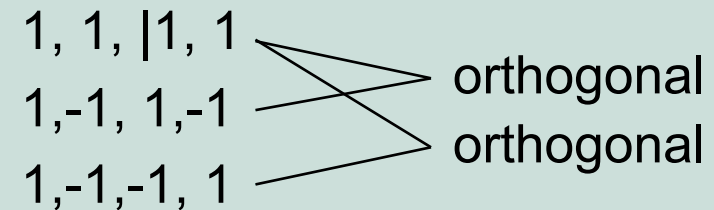
# Beispiel Anwendung OVSF

- Gültige Auswahl:  $C_2(1)=(1,1)$ ,  $C_4(3)=(1,-1,1,-1)$ ,  $C_4(4)=(1,-1,-1,1)$

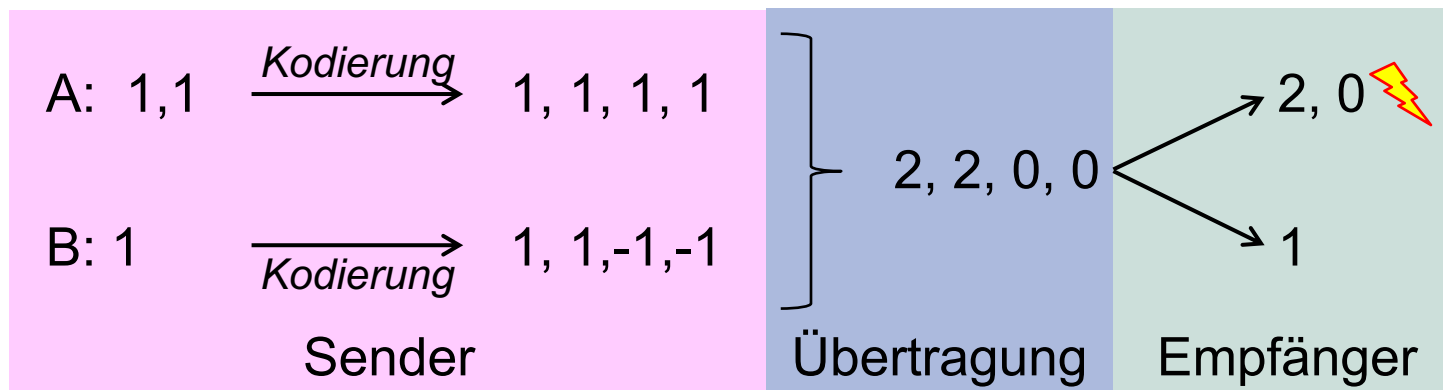
A, gewählte Sequenz, wiederholt

B, gewählte Sequenz

C, gewählte Sequenz



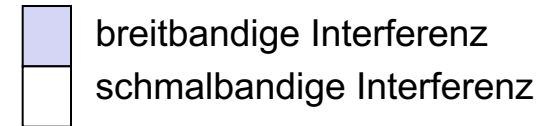
- Ungültige Auswahl:  $C_2(1)=(1,1)$ ,  $C_4(2)=(1,1,-1,-1)$



# Vergleich SDMA/TDMA/FDMA/CDMA

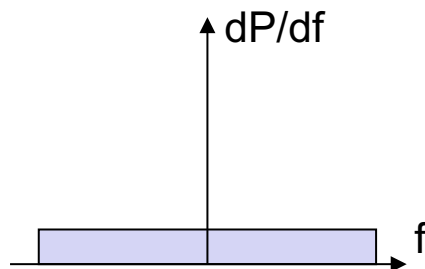
| Verfahren       | SDMA                                                              | TDMA                                                                               | FDMA                                                  | CDMA                                                                          |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Idee            | Einteilung des Raums in Zellen/Sektoren                           | Aufteilung der Sendezeiten in disjunkte Schlitze, 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                                                     |

# Arten von Interferenzen



## Breitbandige Interferenzen

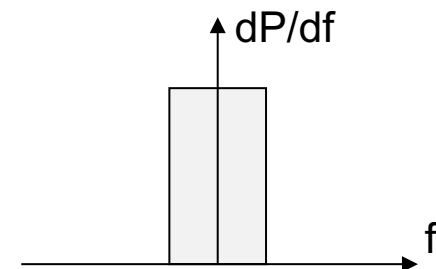
- Konstante Leistungsdichte über alle Frequenzen



- Verursacht durch: Motoren, Thyristor-Schaltkreise, Inverter, Computer, Kontakte von elektrischen Schaltern, Spannungsregler, Impulsgeneratoren, Thermostate, Schweißausrüstung

## Schmalbandige Interferenzen

- Selektive Leistungsdichte auf einzelnen Frequenzen



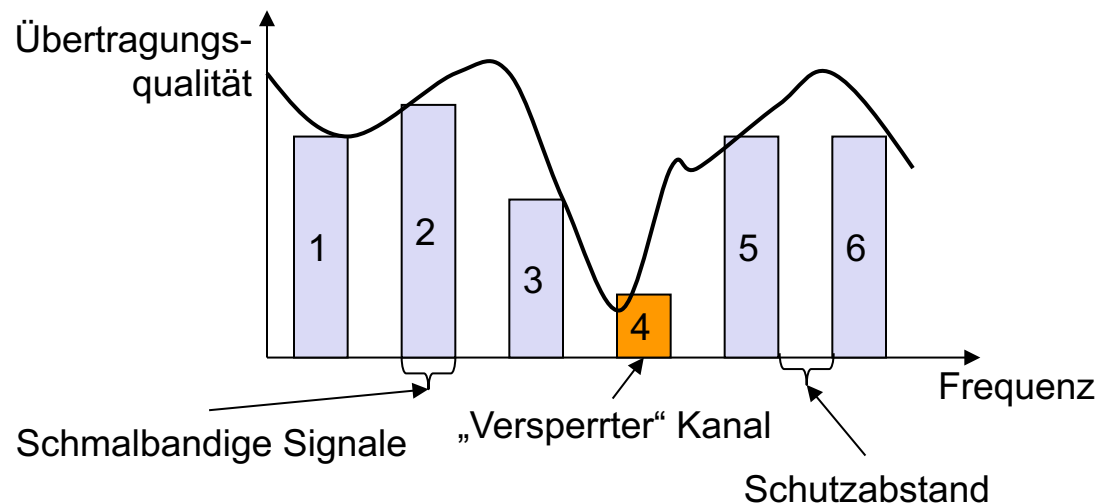
- Verursacht durch: Unterbrechungsfreie Stromversorgungen, Netzbrummen, Vorschaltgeräte, Prüfgeräte, Zellulare Netze, Radio-/TV-Sender, Signalgeneratoren, Mikrowellen-Gräte, ...



[2.7]

# Auswirkungen von Interferenzen

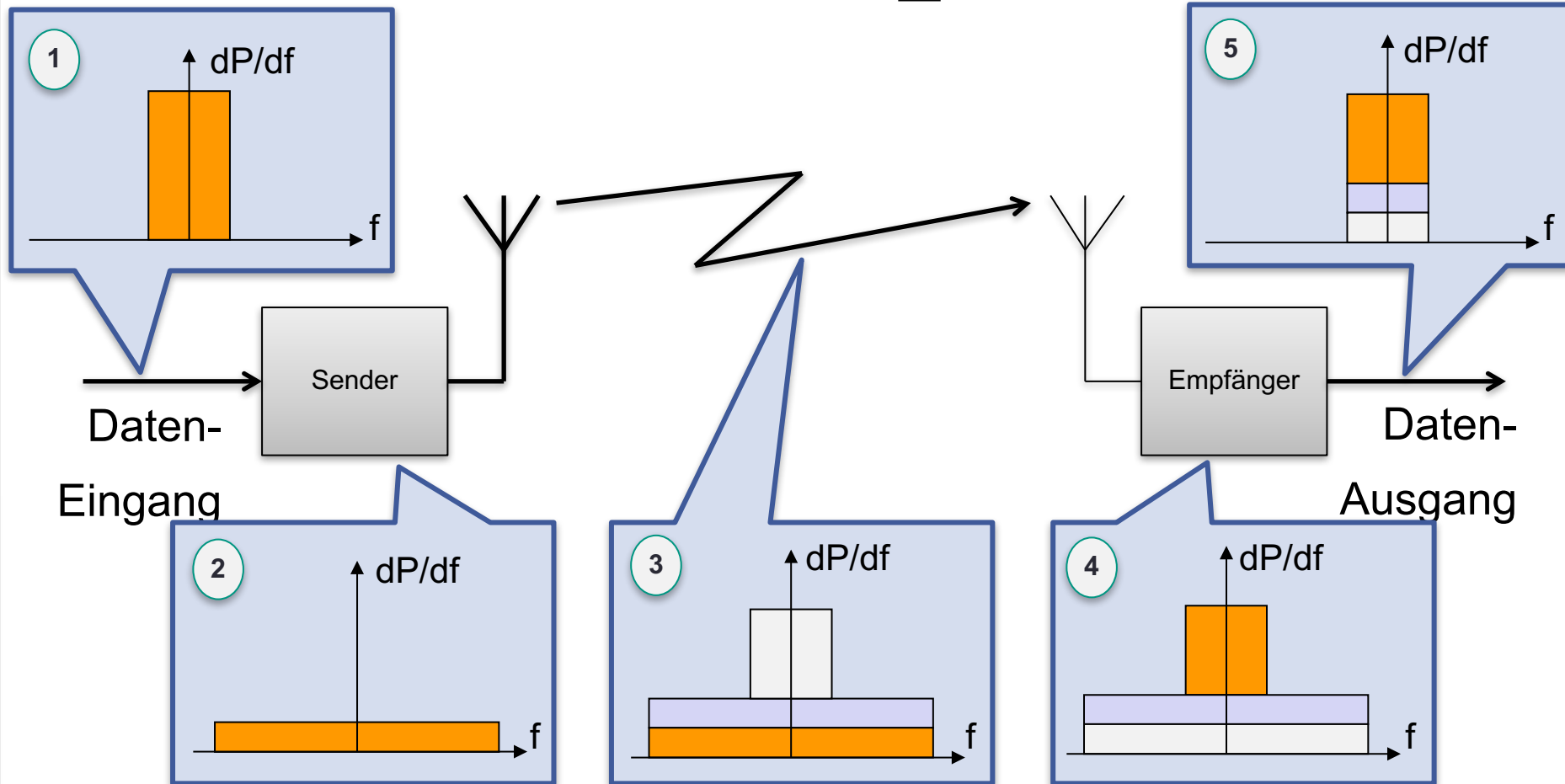
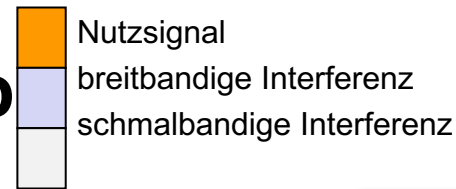
- Reduktion der Übertragungsqualität
  - Schmalbandige Kanäle können komplett versperrt sein



- Lösungsansatz: „Spreizen“ des Signals auf breites Frequenzband!



# Bandspreizen: Grundprinzip



- (1) Schmalbandiges Signal zur Übertragung
- (2) Bandspreizen
- (3) Überlagerung durch Interferenzen

- (4) Entspreizen des Signals
- (5) Bandpass



[2.10]

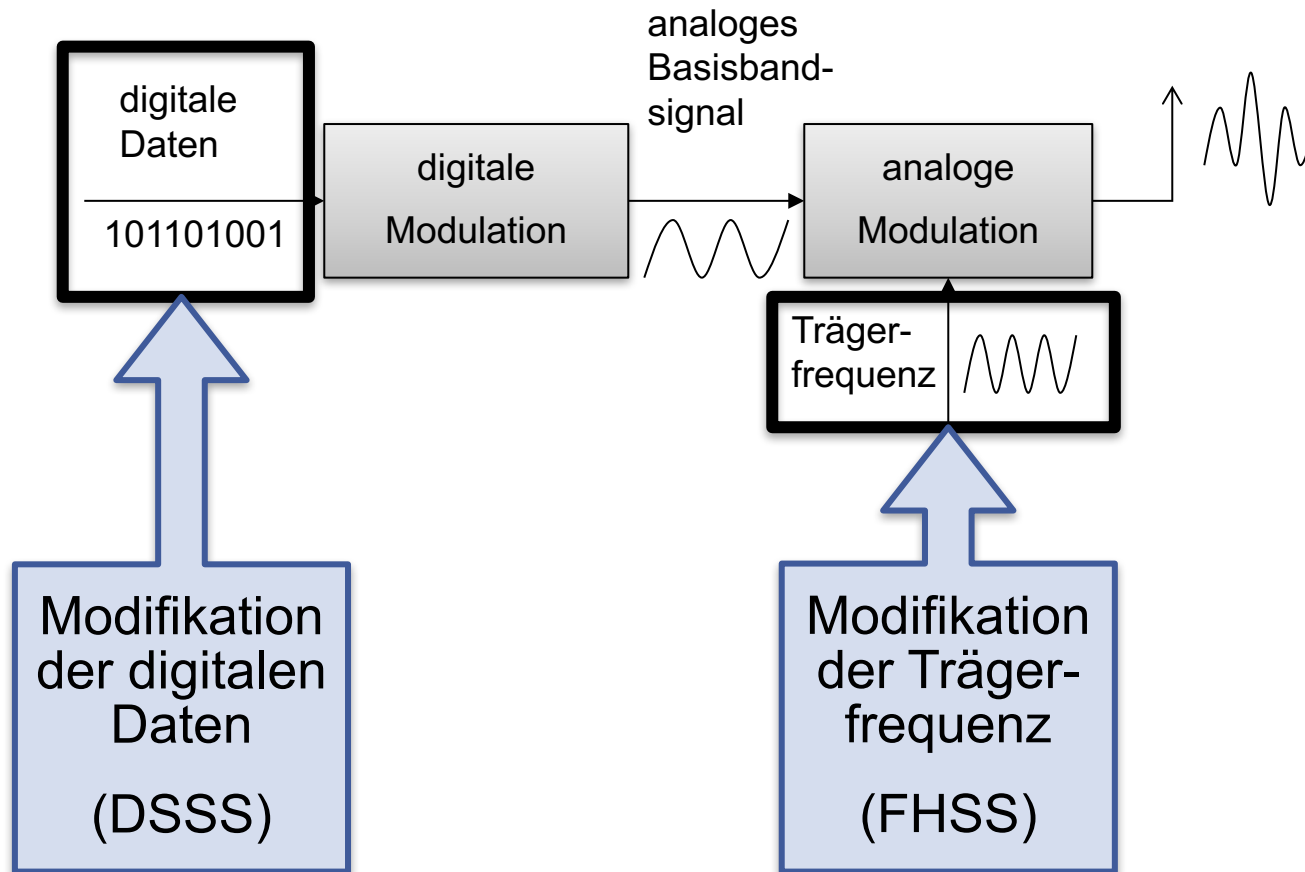


# Bandspreizen – Die Vorteile

- ✓ Unempfindlichkeit gegen
  - verschiedene Arten von Interferenzen
  - Mehrwege-Ausbreitung durch Reflektionen
  
- ✓ Koexistenz vieler Benutzer mit geringen gegenseitigen Störungen
  
- ✓ Verstecken und Verschlüsseln von Signalen



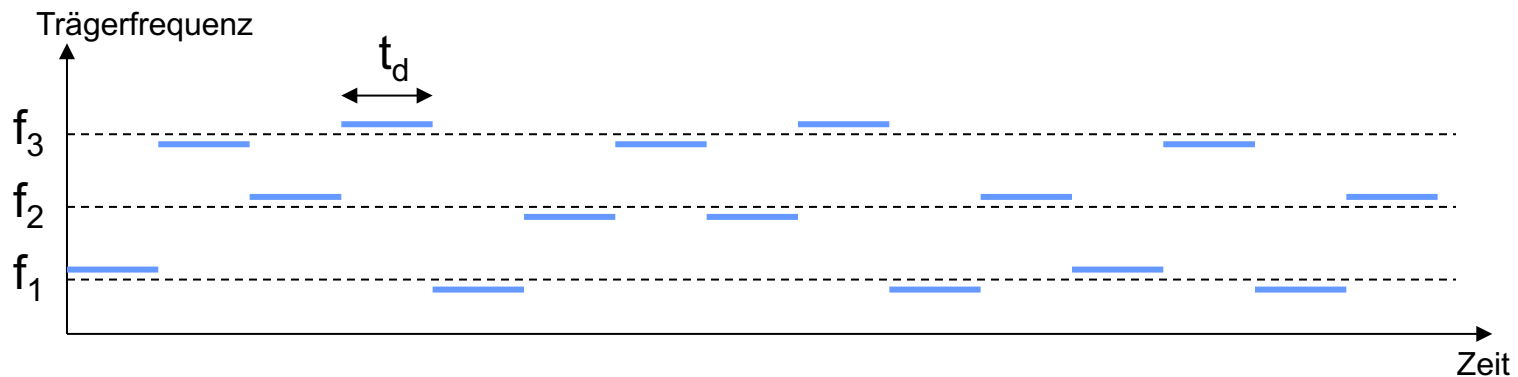
# Bandspreizen – Wie macht man das?





# Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)

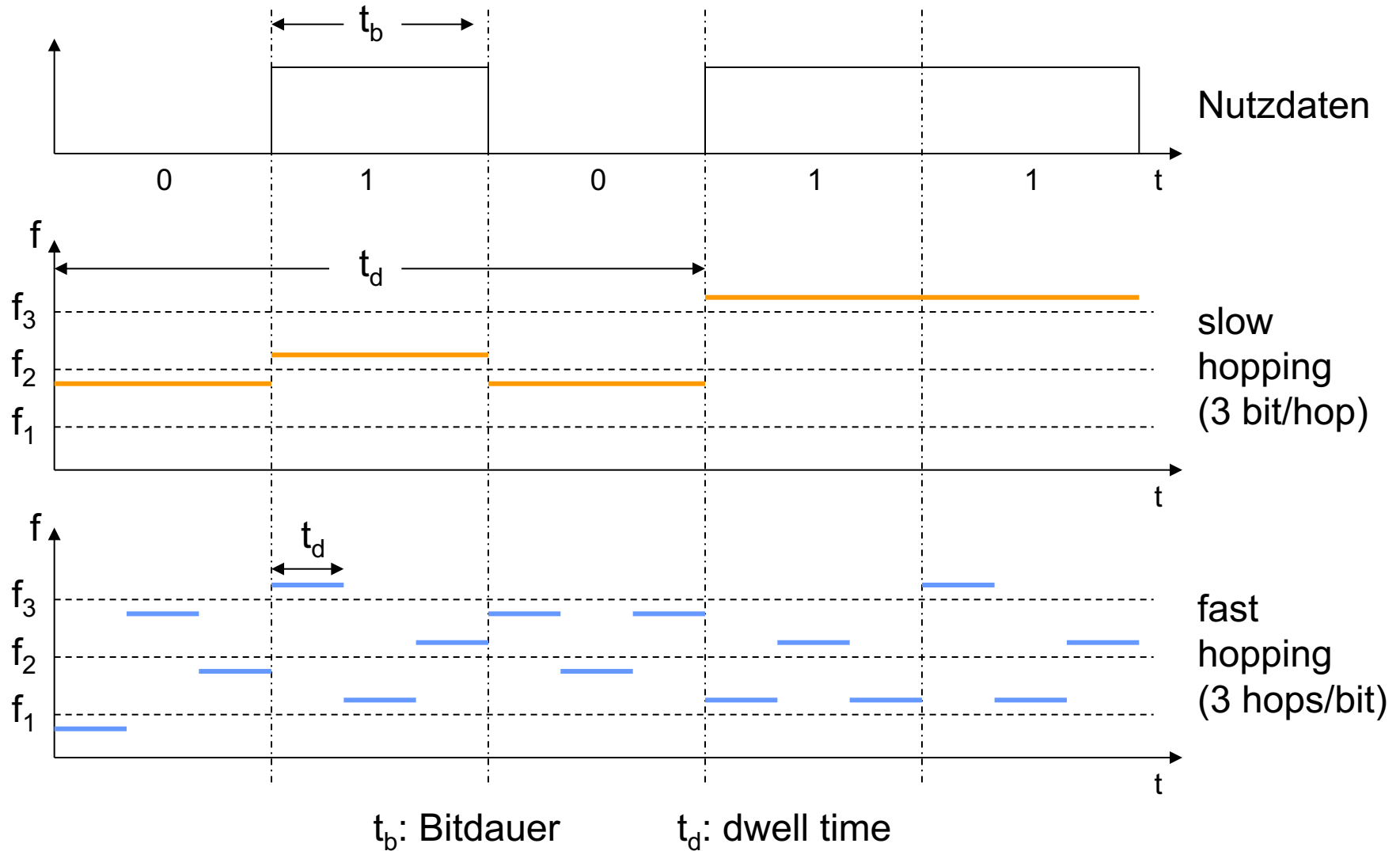
- Spreizen durch diskreten Wechsel der Trägerfrequenz
  - Sprungsequenz: Muster der Kanalbewegung (Hopping Sequence)
    - Wird durch Pseudozufallszahlenfolge bestimmt, bei Sender und Empfänger bekannt
    - Verweilzeit in einem Kanal: Dwell Time  $t_d$
- Beispiel für eine Sprungsequenz über drei Trägerfrequenzen  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ :



- Zwei verschiedene Ausprägungen
  - schneller Wechsel (fast hopping) mehrere Frequenzen pro Nutzdatenbit
  - langsamer Wechsel (slow hopping) mehrere Nutzdatenbits pro Frequenz

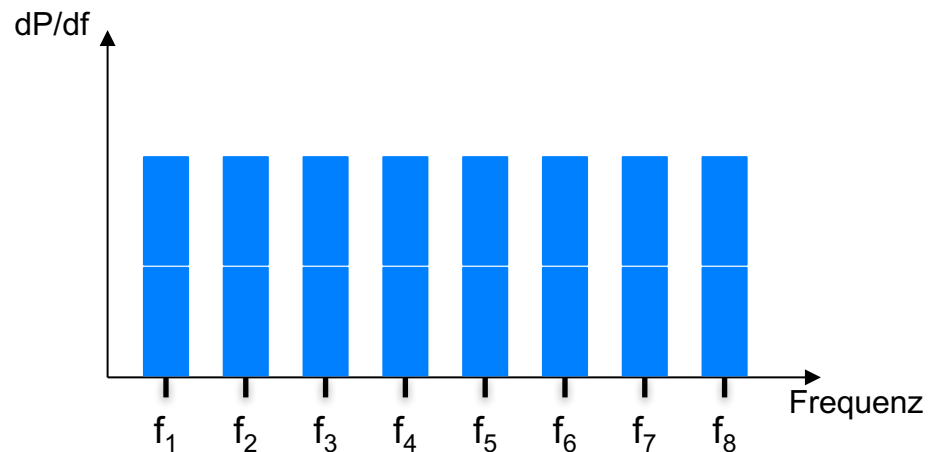
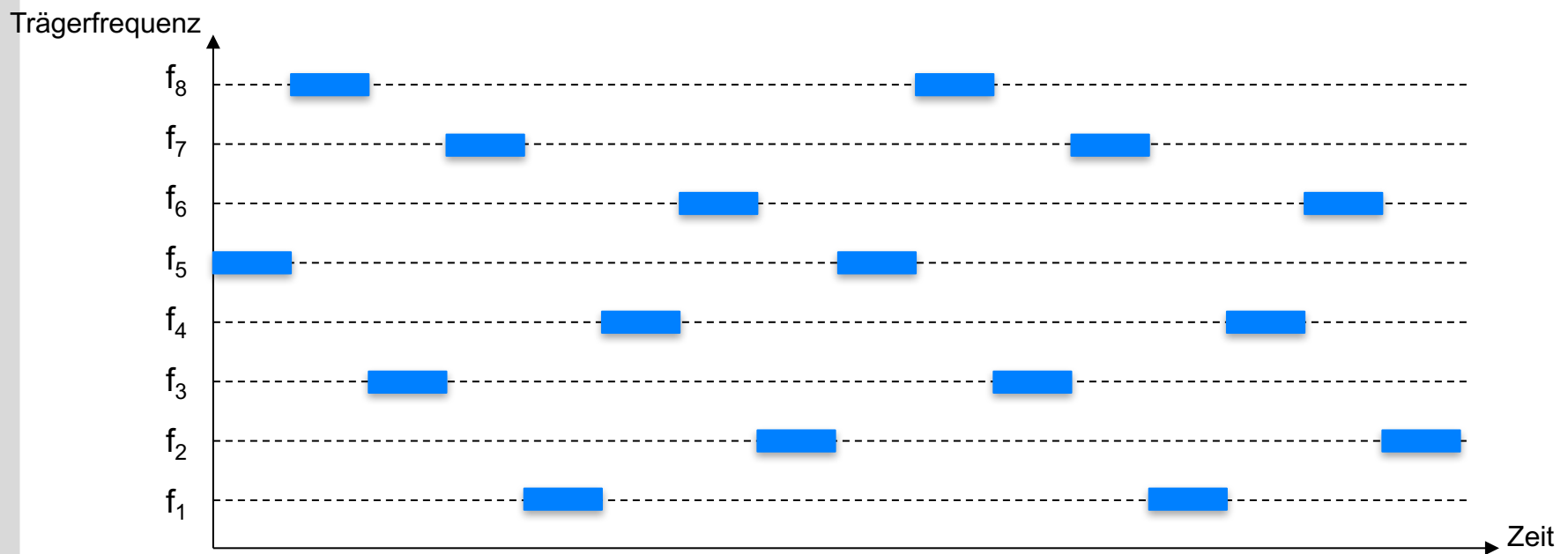


# FHSS – Slow vs. Fast Hopping





# FHSS: Leistungsdichte

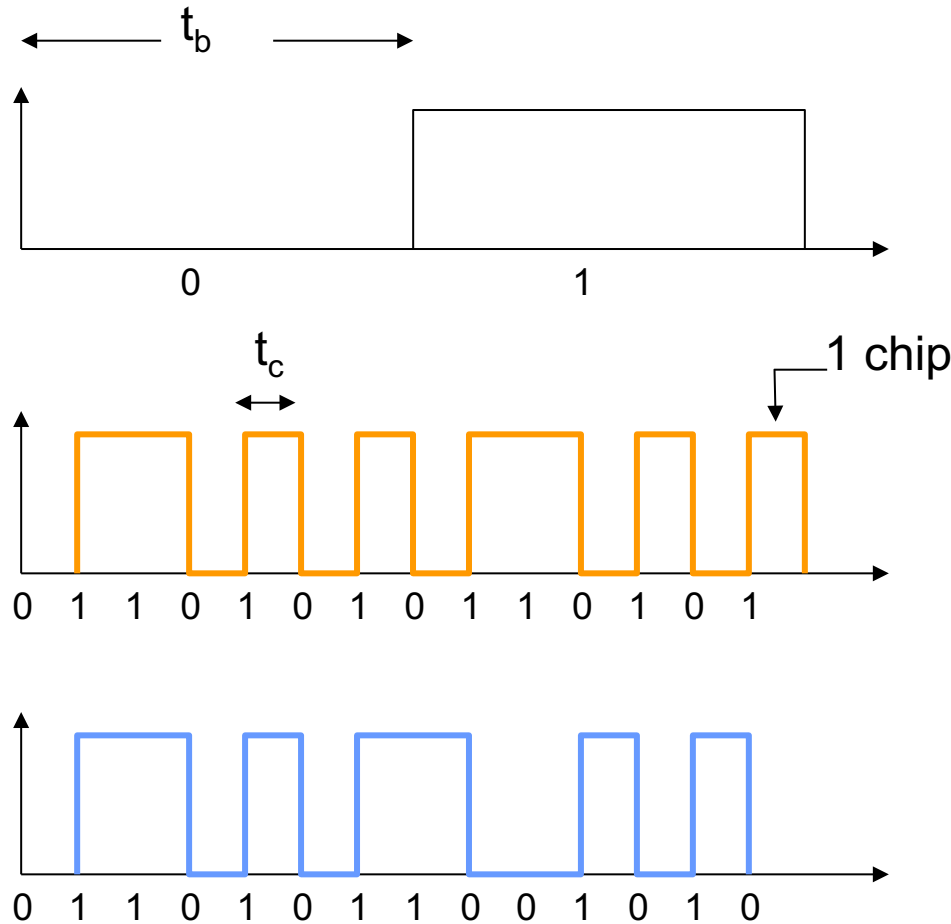




# Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)

- Spreizen des Signals durch Verknüpfung der Nutzdaten mit digitaler Codefolge (**Code, Chipping Sequence**)
  - Code-Bits der Codefolge werden als **Chips** bezeichnet
  - Nutzdaten-Bit wird mit mehreren Chips verknüpft
  - XOR-Verknüpfung sowohl beim Sender als auch beim Empfänger
    - Beispiel siehe nächste Folie
  - Spreizfaktor = Chip-Rate / Bitrate

# DSSS: Spreizen beim Sender



Nutzdaten

**XOR**

Chipping Sequence

=

Zu sendendes Signal

Chiprate:  $r_c = 1/t_c$

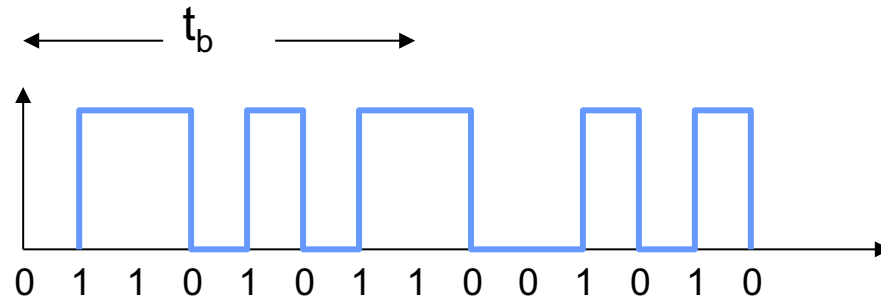
Bitrate:  $r_b = 1/t_b$

→ Spreizfaktor =  $r_c / r_b$

Größe des Spreizfaktors im Beispiel?

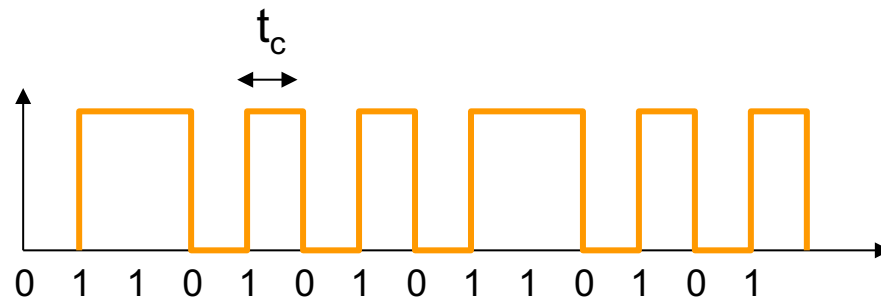


# DSSS – Entspreizen beim Empfänger



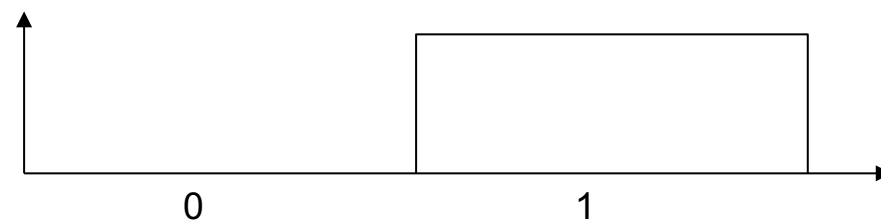
Empfangenes  
Signal

**XOR**



Chipping  
Sequence

=



Nutzdaten

# DSSS – Leistungsdichte (1)

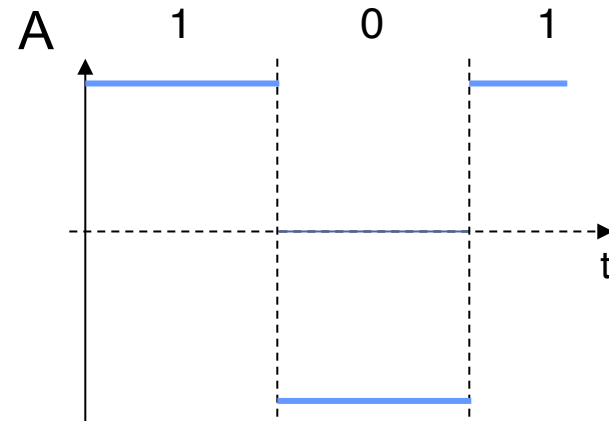
## ■ Annahmen:

- Eingabe: Bipolares (zufälliges) Datensignal  $s(t)$  mit Symboldauer  $T$  und Amplitude  $\pm A$
- Übertragung durch Signal  $v(t)$  mit binärer Phasenmodulation (Binary Phase Shift Keying, BPSK) und Trägerfrequenz  $f_0$

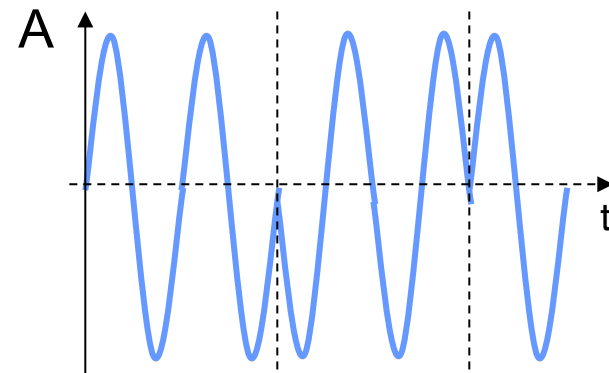
- Das Leistungsdichtespektrum des BPSK-Signals  $v(t)$  ist identisch zum um  $f_0$  verschobenen Leistungsdichtespektrum  $L_s(f)$  des ursprünglichen Signals  $s(t)$ :

$$L_s(f) = A^2 T \left( \frac{\sin \pi f T}{\pi f T} \right)$$

## Datensignal $s(t)$ :



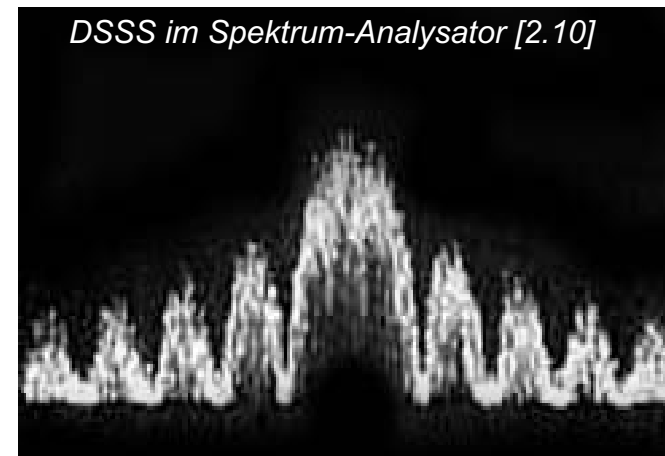
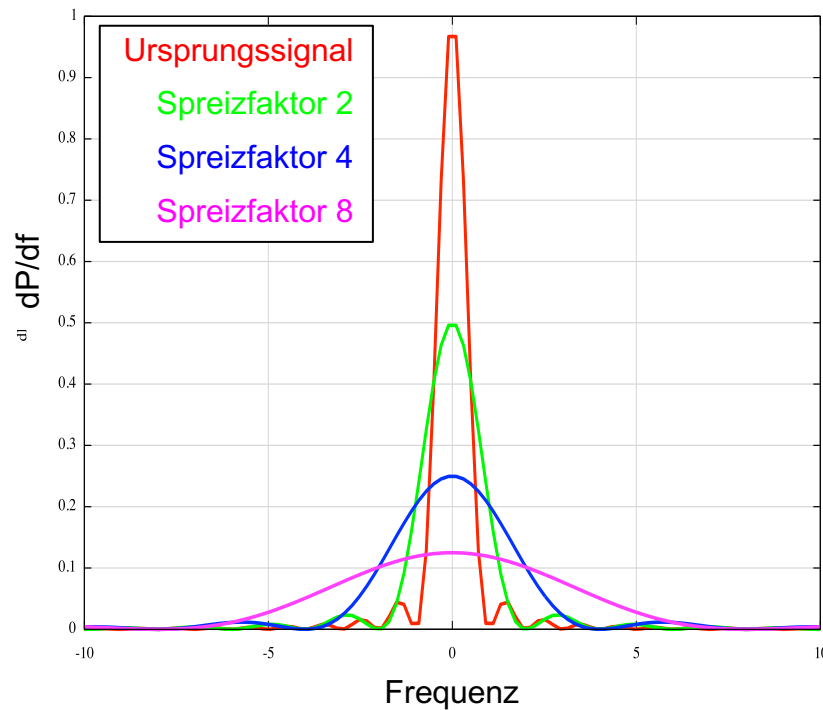
## Phasenmoduliertes Signal $v(t)$ :



[2.11]

# DSSS – Leistungsdichte (2)

- Mit DSSS werden statt eines Datenbits jeweils mehrere Chips moduliert
  - Symboldauer  $T$  sinkt mit dem Spreizfaktor („kleineres  $T$ “)
  - höhere Bandbreite des resultierenden Signals



[2.11]



# Vergleich FHSS vs. DSSS

| FHSS                                             | DSSS                                                |
|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Geringe Kosten durch einfache Sender / Empfänger | Höhere Kosten durch komplexe Sender / Empfänger     |
| Geringer Stromverbrauch                          | Höherer Stromverbrauch                              |
| Geringere Datenraten                             | Höhere Datenraten                                   |
| Geringere Reichweiten                            | Höhere Reichweiten                                  |
| Höchste Toleranz von Interferenzen               | Geringere Toleranz von schmalbandigen Interferenzen |



[2.9]



# Anwendungsbeispiele

| FHSS                                                                          | DSSS                                                                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• WiFi 802.11 (kaum Produkte)</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• WiFi 802.11 / 802.11b</li></ul>                                      |
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Bluetooth</li></ul>                   | <ul style="list-style-type: none"><li>• UMTS (Mehrfachzugriff durch Code Division Multiple Access)</li></ul> |



[2.13]

# OFDM: Die Grundidee (1)

- Orthogonales Frequenz-Multiplexing ist Spezialfall des Frequenz-Multiplexing

- Analogie:

**Klassisches FDM → Wasserhahn**



*Ein Wasserstrom, nicht unterteilbar*

**OFDM → Duschkopf**



*Viele kleine Wasserströme*

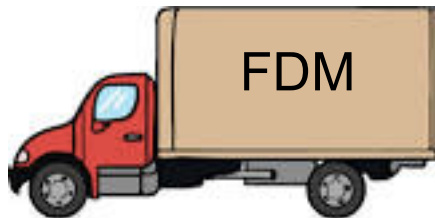
- Vorteile:

- Ich kann den Wasserhahn mit dem Daumen stoppen, den Duschkopf nicht
- Jeder kleine Wasserstrom führt weniger Wasser

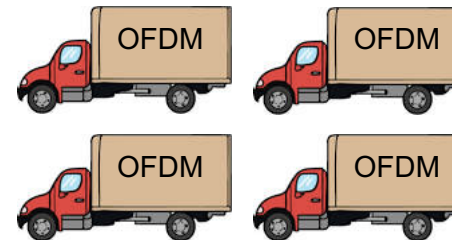
# OFDM: Die Grundidee (2)

■ Weitere Analogie: Versand einer (teilbaren) Lieferung per LKW

■ Wir haben die Wahl:  
**Ein großer LKW**



**Mehrere kleine LKW**



■ Vorteile:

- Im Falle eines Unfalls ist nur  $\frac{1}{4}$  der Ladung verloren
- Gibt es mehrere Fahrspuren, können die Laster parallel fahren (und mehr Abstand halten)

# Parallelisierung des seriellen Datenstroms

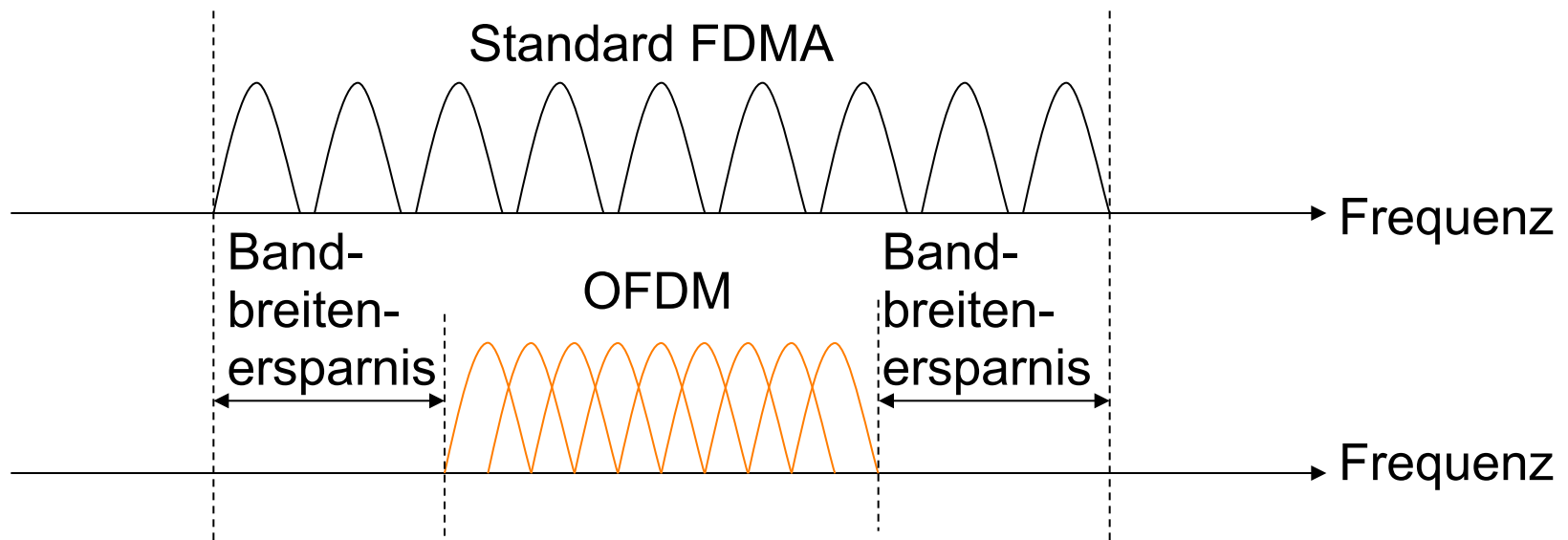
1, 1, -1, -1, 1, 1, 1, -1, 1, -1, -1, -1, 1, -1, -1, -1, 1, 1, -1, -1, -1, 1, 1

| Teildaten-<br>strom 1 | Teildaten-<br>strom 2 | Teildaten-<br>strom 3 | Teildaten-<br>strom 4 |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1                     | 1                     | -1                    | -1                    |
| 1                     | 1                     | 1                     | -1                    |
| 1                     | -1                    | -1                    | -1                    |
| -1                    | 1                     | -1                    | -1                    |
| -1                    | 1                     | 1                     | -1                    |
| -1                    | -1                    | 1                     | 1                     |

- Offene Frage: Wie werden die Teildatenströme übertragen?

# OFDM vs. FDM

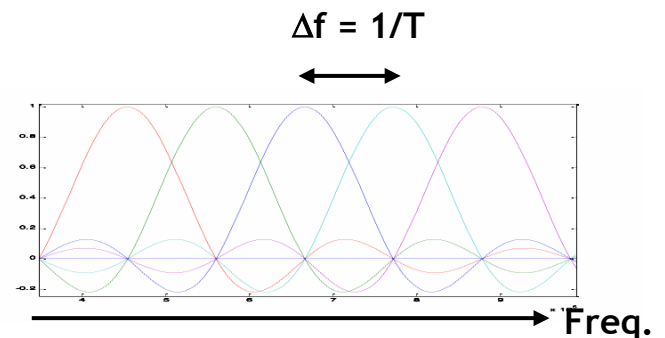
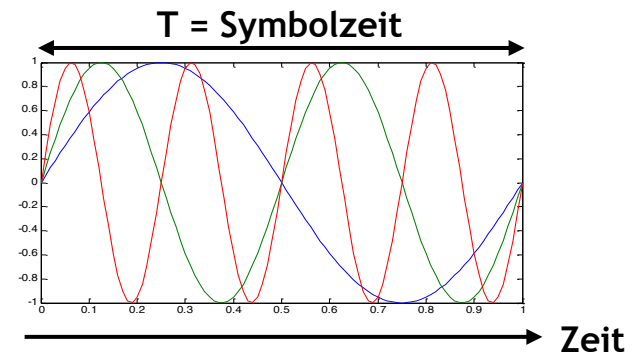
- Unterschied zu traditionellem FDM:  
Geringerer Abstand zwischen den verwendeten Frequenzen
  - Bei FDMA wegen großem Abstand relativ große Bandbreite erforderlich
  - Bei OFDM können sich die Träger sogar überlappen
    - Dadurch Ersparnis im Hinblick auf die benötigte Bandbreite



# Trägerfrequenzen in OFDM

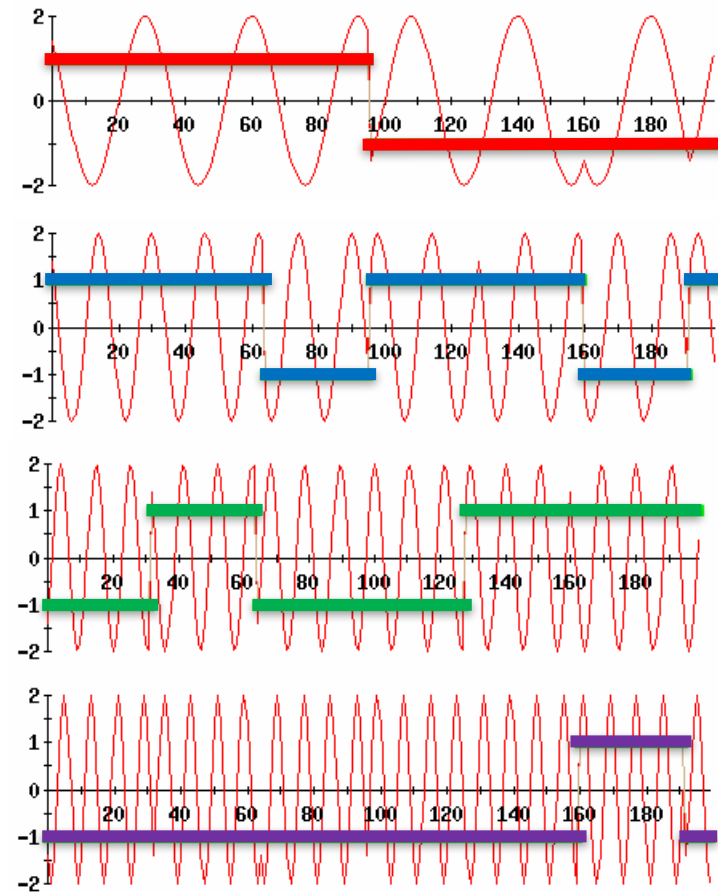
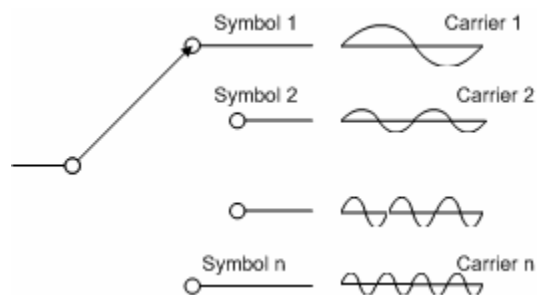
- Verwendete Trägerfrequenzen sind **Harmonische** einer Grundfrequenz
- Zeitdomäne: Einfache sinusförmige Schwingungen
  - Jede Schwingung hat eine ganzzahlige Anzahl von Zyklen über der Symbolzeit  $T$
  - Grundfrequenz  $f_0 = 1/T$
  - Weitere Frequenzen  $f_k = k \cdot f_0$

→ Schwingungen sind **orthogonal**
- Frequenzdomäne: Überlappende Sinusschwingungen
  - Bezeichnet als **Unterträger**
  - Typischerweise sehr schmal, z.B. 15 kHz



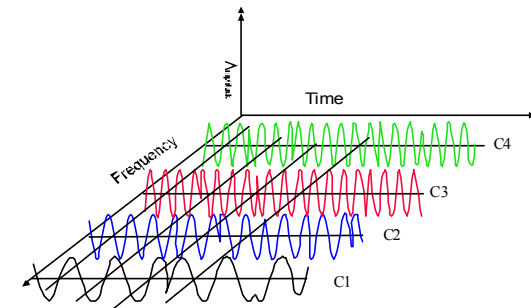
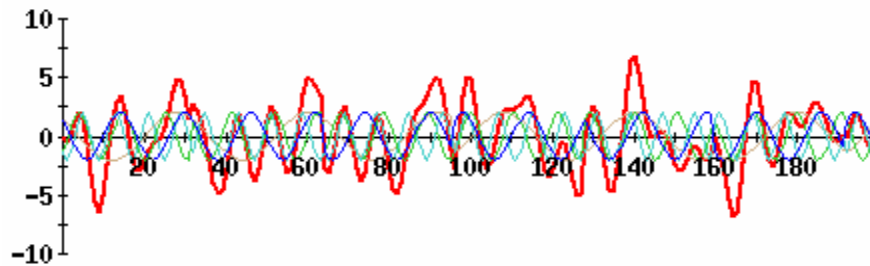
# Modulation der Teildatenströme auf die Unterträger

| Teildaten-<br>strom 1 | Teildaten-<br>strom 2 | Teildaten-<br>strom 3 | Teildaten-<br>strom 4 |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1                     | 1                     | -1                    | -1                    |
| 1                     | 1                     | 1                     | -1                    |
| 1                     | -1                    | -1                    | -1                    |
| -1                    | 1                     | -1                    | -1                    |
| -1                    | 1                     | 1                     | -1                    |
| -1                    | -1                    | 1                     | 1                     |



# Resultierendes OFDM-Signal

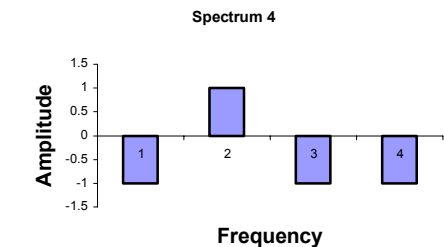
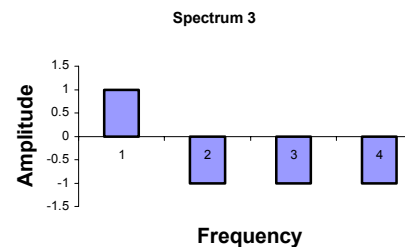
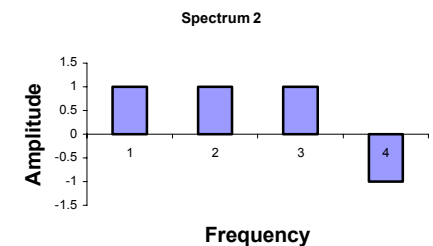
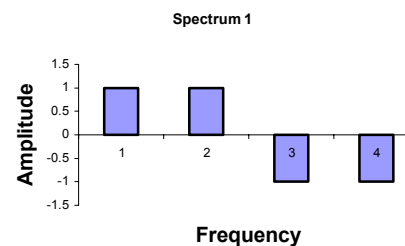
- Übertragenes Signal ist Summe der Signale der Unterträger



# Bestimmung des OFDM-Signals

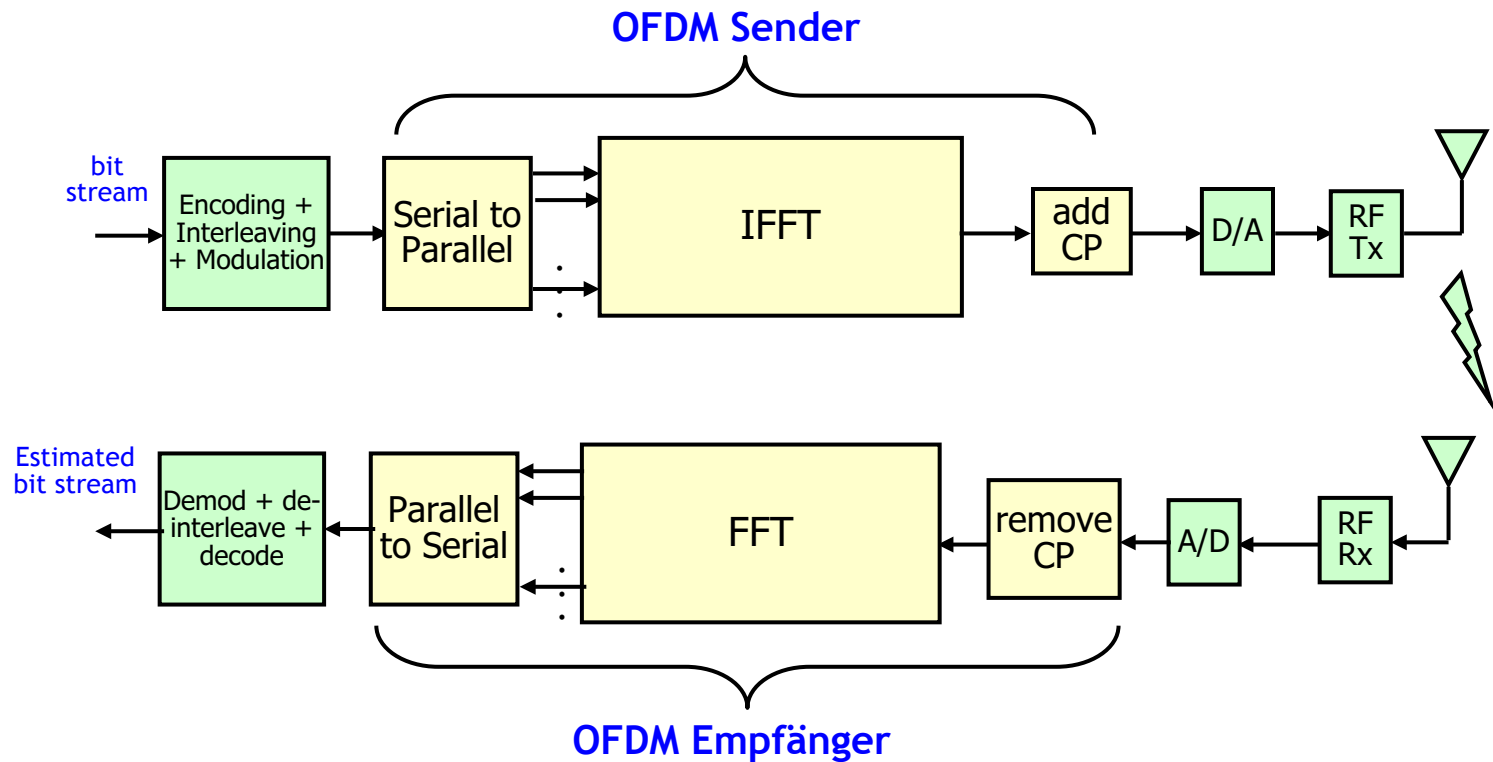
- Der eingehende (parallele) Bitstrom kann als **diskretes Frequenzspektrum** mit vier Frequenzen interpretiert werden

| Teildatenstrom 1 | Teildatenstrom 2 | Teildatenstrom 3 | Teildatenstrom 4 |
|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 1                | 1                | -1               | -1               |
| 1                | 1                | 1                | -1               |
| 1                | -1               | -1               | -1               |
| -1               | 1                | -1               | -1               |
| -1               | 1                | 1                | -1               |
| -1               | -1               | 1                | 1                |



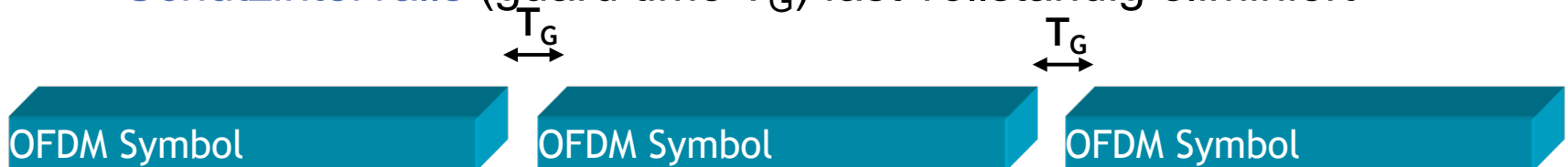
- Eine **inverse schnelle Fourier-Transformation (IFFT)** transformiert dieses vom Frequenzbereich in den Zeitbereich

# Bsp: OFDM Transceiver (in LTE)



# Cyclic Prefix: Schutz vor ISI

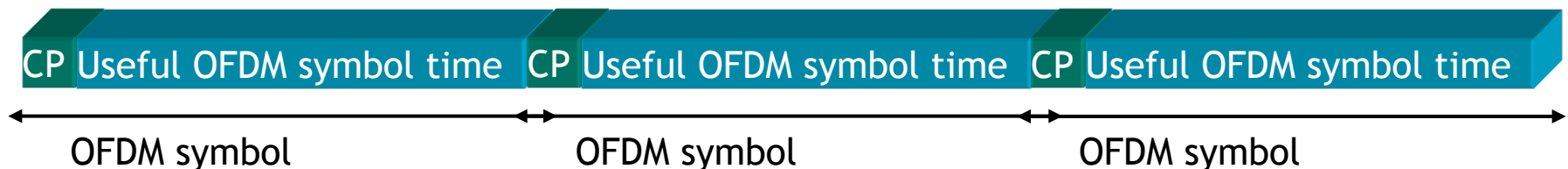
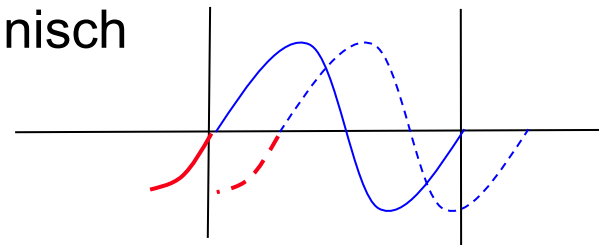
- OFDM alleine schützt nicht vor Intersymbol-Interferenzen!
  - ISI (zwischen OFDM Symbolen) wird durch Einfügen eines **Schutzintervalls** (guard time  $T_G$ ) fast vollständig eliminiert



- Offene Frage: Was wird während der Schutzintervalle übertragen?

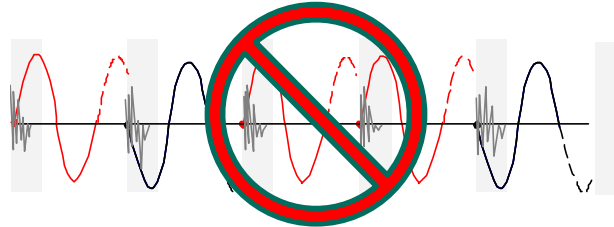
- “Lücken” in Signalen sind technisch nicht möglich!

→ Einfügen von **Cyclic Prefix**



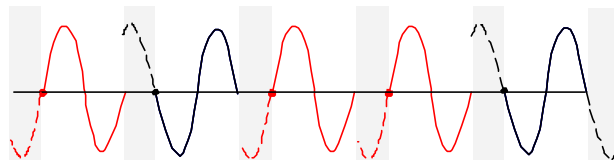
# Auffüllen der Schutzintervalle

## ■ Lösungsidee 1: Symbol „länger laufen lassen“



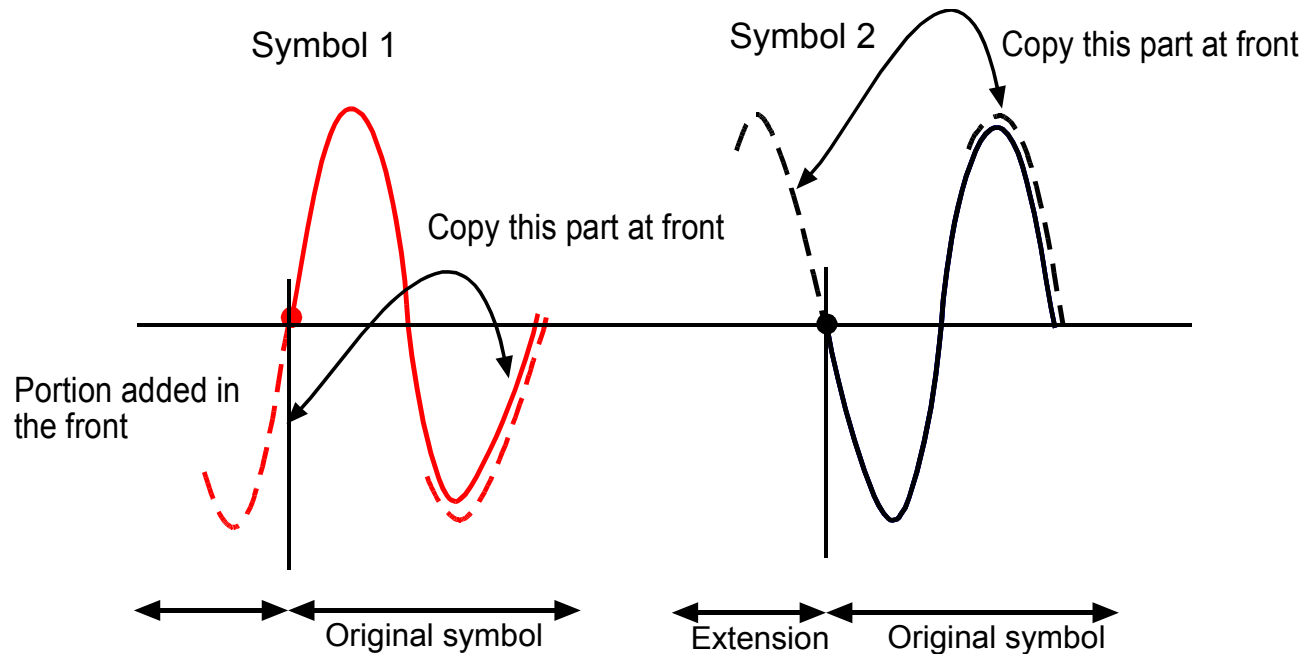
- Hilft nicht weiter, da ISI gerade Symbolanfang (Erkennung der Phase) betrifft!

## ■ Lösungsidee 2: Symbol „früher beginnen“



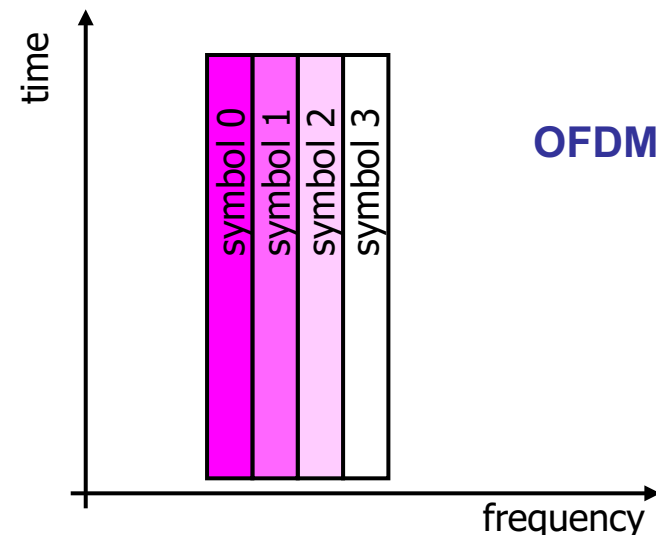
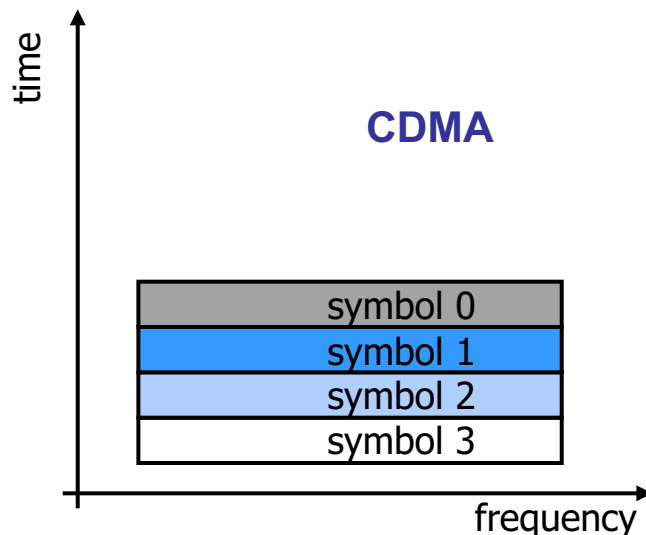
- Symbolanfang liegt außerhalb von ISI Bereich!

# Bestimmung des Cyclic Prefix



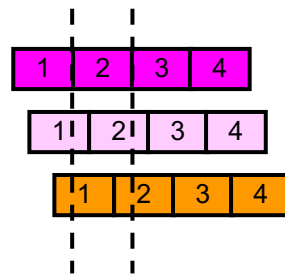
# Vergleich OFDM vs. CDMA (1)

- CDMA: Zu modulierendes Symbol wird über **relativ kurze Symbolzeit und große Bandbreite** übertragen
  - Bsp. UMTS HSPA: 4.17  $\mu$ sec Symbolzeit und 3.84 MHz Bandbreite
  - Um mehr Bandbreite zu erhalten → Mehr CDMA-Codes verwenden
- OFDM: Zu modulierendes Symbol wird über **relativ lange Symbolzeit und schmale Bandbreite** übertragen
  - Bsp. LTE: 66.6  $\mu$ sec Symbolzeit und 15 kHz Bandbreite
  - Für höhere Datenraten können mehr Symbole über mehr Unterträger gesendet werden → Erhöht Bandbreitenbelegung



# Vergleich OFDM vs. CDMA (2)

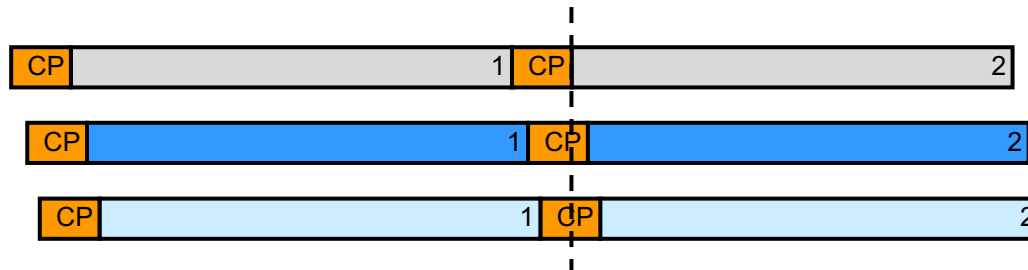
- Kurze Symbolzeiten in CDMA führen zu ISI bei Mehrwegausbreitung



CDMA Symbole

Mehrweg-Reflektionen eines Symbols überlappen nachfolgende Symbole → ISI

- Lange Symbolzeiten in OFDM (zusammen mit CP) unterdrücken ISI bei Mehrwegausbreitung



Kleine bis keine Überlappung in Symbolen

- Charakteristik drahtlose Übertragungen
  - Ideal: Dämpfung mit Quadrat der Entfernung
  - Real: I.d.R. schlimmer
    - Streuung, Beugung, Abschattung Reflektion
    - Intersymbolinterferenzen, schnelles und langsames Fading
- Modulation
  - Darstellung von Symbolen durch Modifikation elektromagnetischer Wellen
  - Ein oder mehrere Nutzbits pro Symbol
    - Z.B. 4 Bits/Symbol bei 16-QAM
- Multiplexing
  - Mehrere parallele Übertragungen
  - Dimensionen Raum, Zeit, Frequenz, Code
- Bandspitz-Techniken
  - Verringerung des Einflusses von Interferenzen
  - Frequency Hopping oder Direct Sequence
- Orthogonales Frequenz-Multiplexing ist Spezialfall des Frequenz-Multiplexing
  - Verwendet schmale Unterträger mit geringem Abstand
  - Serielle Datenströme werden parallel auf die Unterträger verteilt, ermöglichen lange Symbolzeiten

- 2.1 In welcher Relation stehen Sende- und Empfangsleistung?
- 2.2 Was versteht man unter Mehrwegeausbreitung?
- 2.3 Wie entsteht Intersymbolinterferenz und was für Auswirkungen hat sie?
- 2.4 Welcher Zusammenhang besteht zwischen Frequenz und Wellenlänge?
- 2.5 In welchen Frequenzbereichen befinden sich die gängigen Netze der Mobilkommunikation?
- 2.6 Welche Techniken zur digitalen Modulation kennen Sie?
- 2.7 Welche Aufgabe hat die analoge Modulation?
- 2.8 Auf welche Arten können Signale dargestellt werden?
- 2.9 Welche Vorteile hat CDMA und wie funktioniert es?
- 2.10 Vergleichen Sie OFDM mit Frequenzmultiplexen.
- 2.11 Welche Typen von Spreizspektrum-Techniken gibt es und wie funktionieren diese?

# Referenzen und weiterführende Literatur

- [2.1] J. Schiller; Mobilkommunikation; Addison-Wesley, 2003  
Kapitel 2 – Drahtlose Übertragung
- [2.2] R. Read, Nachrichten- und Informationstechnik; Pearson Studium 2004  
Einfach lesbare Einführung in die Nachrichten- und Informationstechnik
- [2.3] F. Jondral; Nachrichtensysteme. Grundlagen - Verfahren – Anwendungen
- [2.4] K. Roethermel, B. Koldehofe, Vorlesung Mobile Computing SS 2011, [http://www.ipvs.uni-stuttgart.de/abteilungen/vs/lehre/lehrveranstaltungen/vorlesungen/SS11/Mobile\\_Computing](http://www.ipvs.uni-stuttgart.de/abteilungen/vs/lehre/lehrveranstaltungen/vorlesungen/SS11/Mobile_Computing)
- [2.5] V. Jungnickel, Vorlesung MIMO Übertragungssysteme I SS 2002, [ftp://ftp.hhi.de/jungnickel/Vorlesung%20MIMO/Mimo\\_VL\\_Einleitung.pdf](ftp://ftp.hhi.de/jungnickel/Vorlesung%20MIMO/Mimo_VL_Einleitung.pdf)
- [2.6] J. Åkerberg, Industrial Wireless Communications, PhD student course „Communications for Cyber-Physical Systems“, Mälardalen University, 2014. <http://www.idt.mdh.se/kurser/comcyps/Johan-2.pdf>
- [2.7] V. Gungor, G. Hancke, Industrial Wireless Sensor Networks, in: B. Wilamowski, D. Irwin (eds.), Industrial Electronics Handbook, 2nd Edition, CRC Press and IEEE Press, 2011.
- [2.8] T. Heimbold, Einführung in die Automatisierungstechnik – Automatisierungssysteme, Komponenten, Projektierung und Planung, Carl Hanser Verlag, 2014.
- [2.9] S. Mahmud, Lecture Notes of ECE 5620: Spread Spectrum and Wi-Fi Basics, Wayne State University, Detroit, MI, 2015. <http://ece.eng.wayne.edu/~smahmud/ECECourses/ECE5620/Notes/Wi-Fi-Lecture.pdf>
- [2.10] Maxim / Dallas Semiconductor, Application Note 1890: An Introduction to Direct-Sequence Spread-Spectrum Communications, White Paper, 2003.
- [2.11] M. Rupf, Skript zur Vorlesung Nachrichtentechnik und Mobilkommunikation (NTM), Züricher Hochschule Winterthur, 2004. <https://home.zhaw.ch/~rur/ntm.html>
- [2.12] A. Willig, Wireless LAN Technology for the Factory Floor: Challenges and Approaches, in: R. Zurawski (ed.), Networked Embedded Systems, CRC Press, 2009.
- [2.13] G. Zaho, Wireless Sensor Networks for Industrial Process Monitoring and Control: A Survey, Network Protocols and Algorithms 3(1), 2011.