

Kapitel 2 – Drahtlose Übertragung

Vorlesung Mobilkommunikation Wintersemester 2016/17
Prof. Dr. Oliver Waldhorst (HS Karlsruhe), Markus Jung

INSTITUT FÜR TELEMATIK





Mobiles TCP



Mobile Ad Hoc Netze



Mobile IP



WLAN, Bluetooth



GSM, UMTS, LTE



Mobilitätsmanagement



Medienzugriff



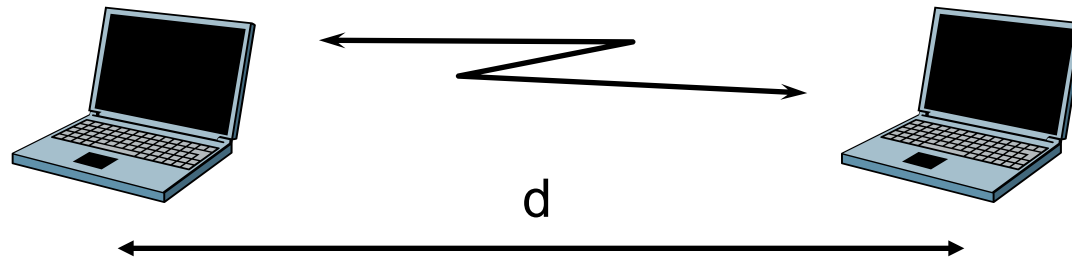
Drahtlose Übertragung

- *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

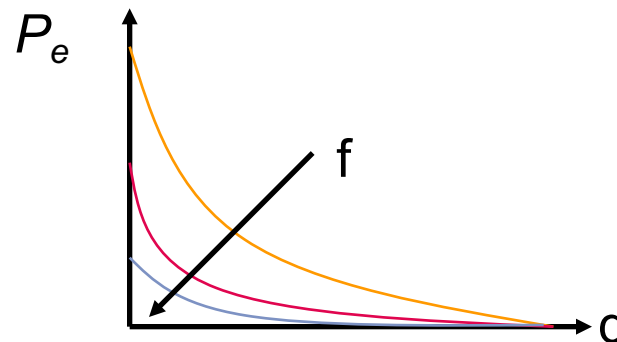
■ Signalausbreitung im idealen Fall

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

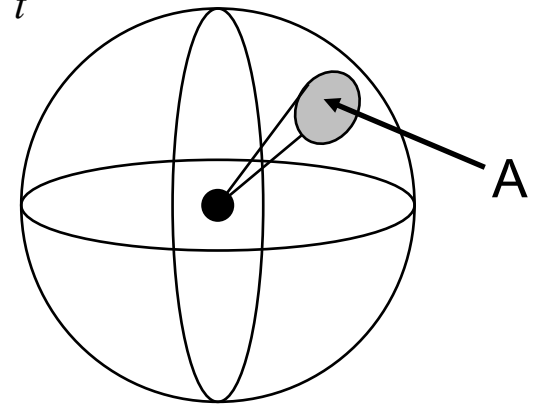
■ Leistung des empfangenen Signals (d = Abstand!)

- 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?

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

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

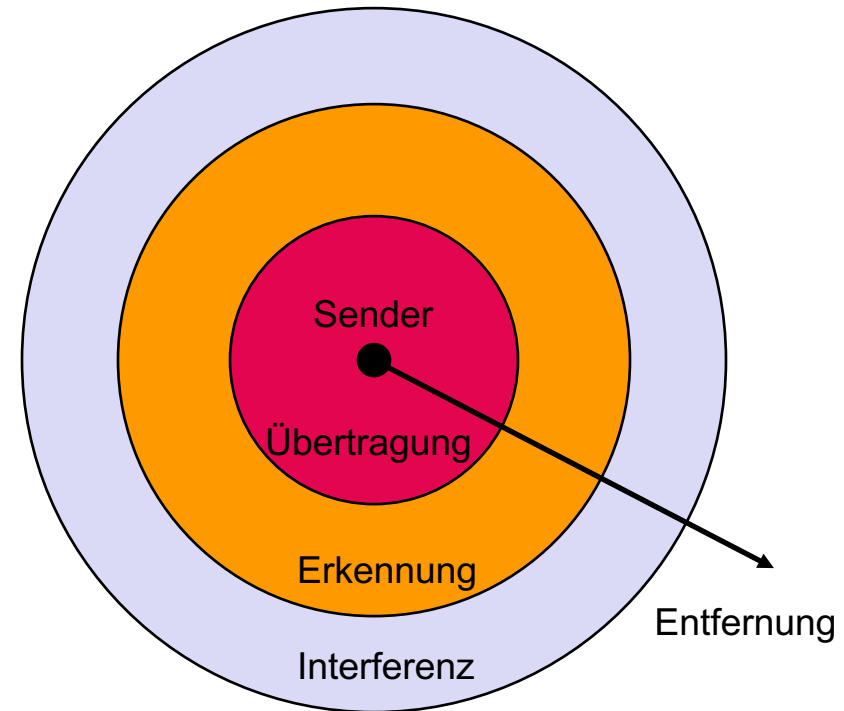
- Übertragungsbereich
 - Kommunikation möglich
 - niedrige Fehlerrate
- Erkennungsbereich
 - Signalerkennung möglich
 - Kommunikation nicht möglich
- Interferenzbereich
 - Signal kann nicht detektiert werden
 - Signal trägt zum Hintergrundrauschen bei

■ 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)

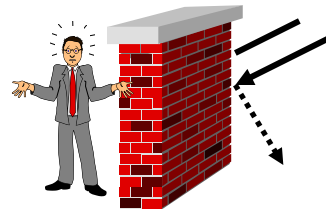
- Ablenkung von Wellen an einem Hindernis
- Welle wird in den Abschattungsbereich eines Hindernisses gebeugt
- Beugung stärker bei größerem Verhältnis von Wellenlänge zu Abmessung des Hindernisses
 - Oberhalb von etwa 5 GHz vernachlässigbar



Einflussfaktoren

■ Abschattung durch Hindernisse

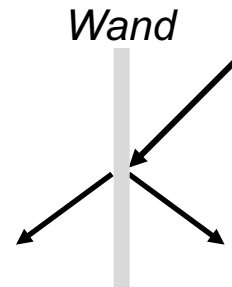
- Extreme Form der Dämpfung



Abschattung
(idealisiert)

■ Reflexion

- Abschwächung des Signals



Reflexion
(idealisiert)

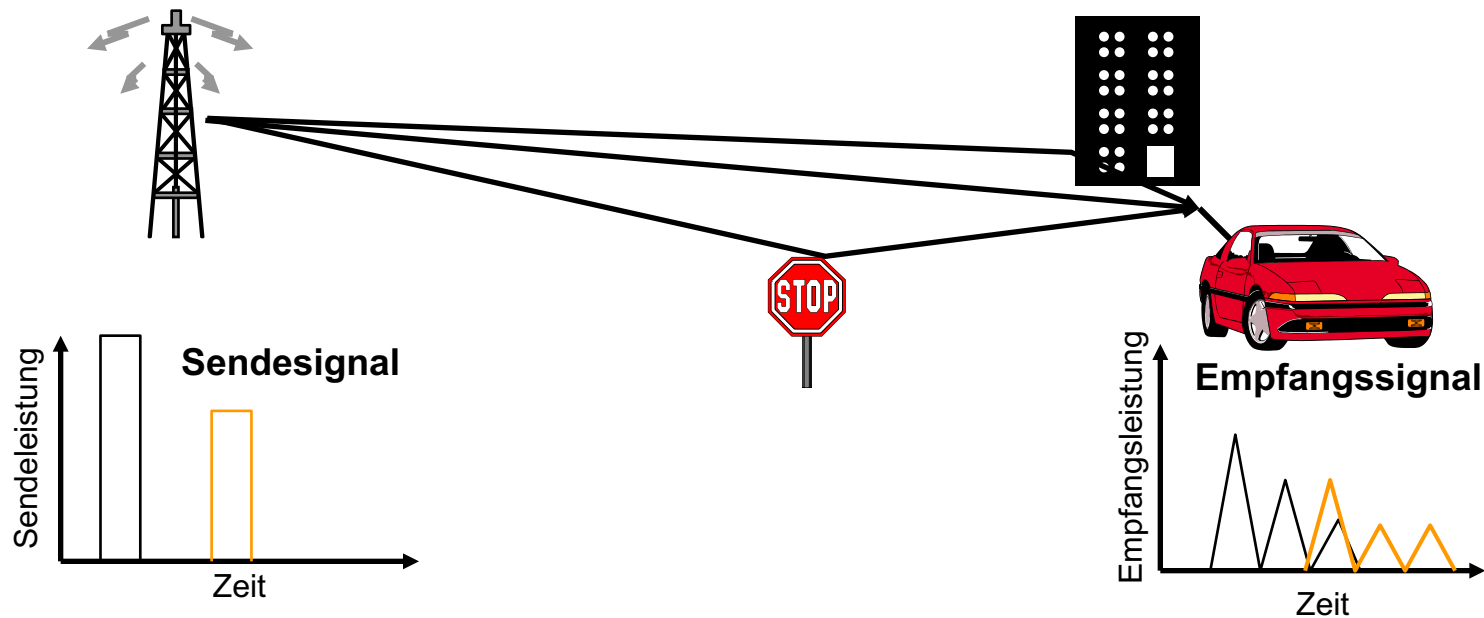
■ Freiraumdämpfung

- 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

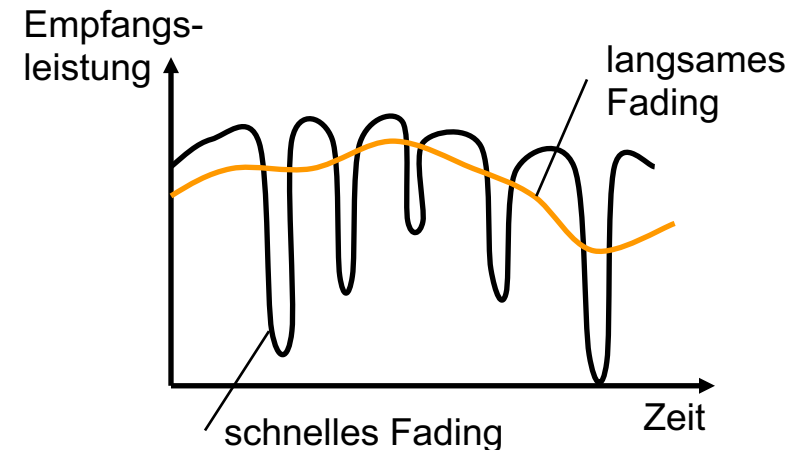
- kurzzeitige Einbrüche in der Empfangsleistung durch gegenseitige Auslöschung der überlagerten Signale

■ Zusätzlich ändern sich

- Entfernung von der Basisstation
- Hindernisse in weiterer Entfernung

■ Langsames Fading

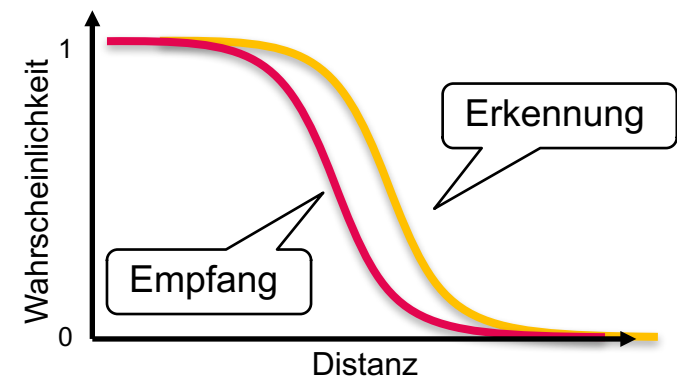
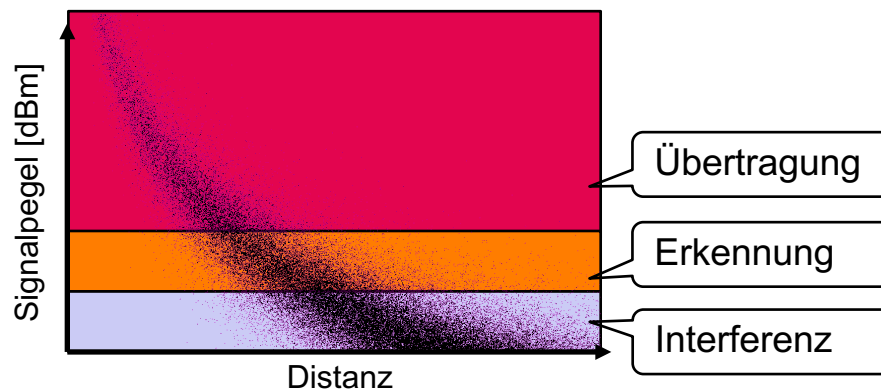
- langsame Änderungen in der (durchschnittlichen) Empfangsleistung





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)



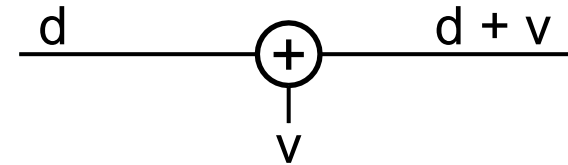


Kapazitätsgewinn durch parallele Übertragung (1)

■ Einzelner Datenpfad

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

[v = Rauschen]



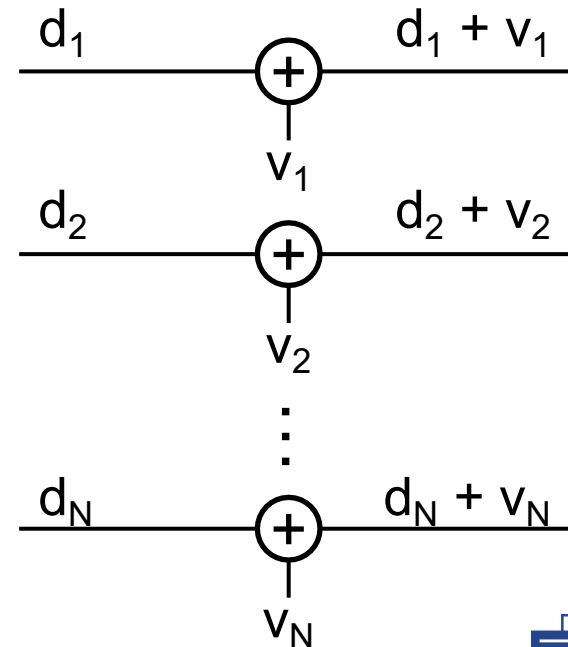
■ N parallele Übertragungen

- Sendeleistung wird auf alle N Pfade aufgeteilt

N Übertragungskanäle...

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

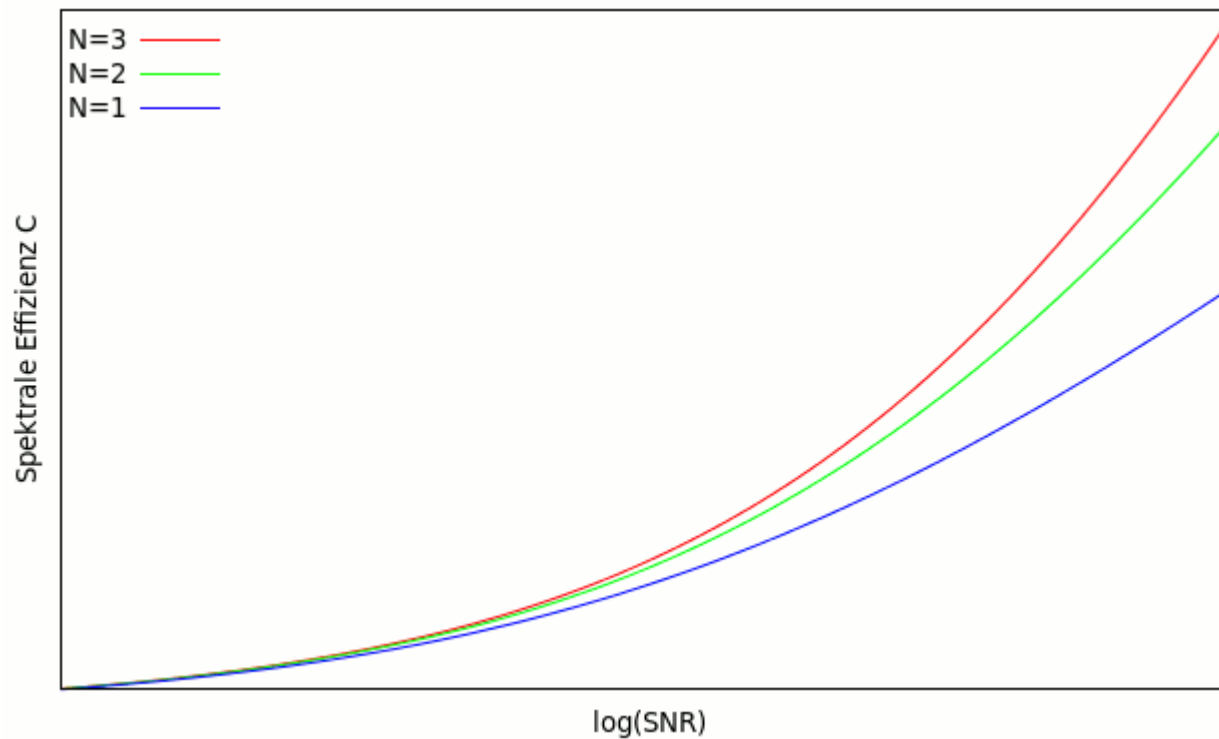
... mit je 1/N Sendeleistung

 [2.5]



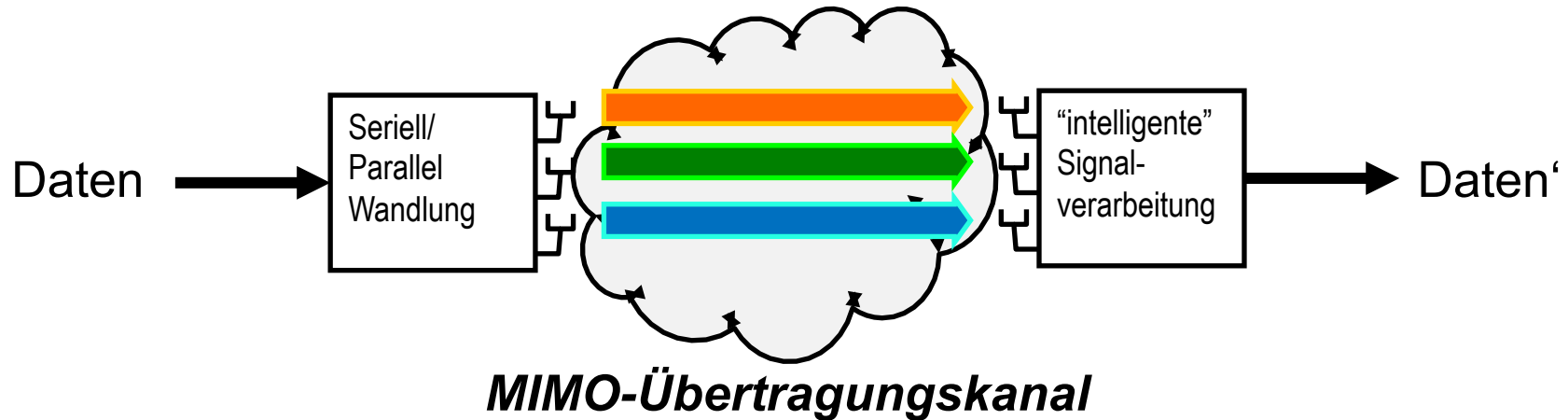
Kapazitätsgewinn durch parallele Übertragung (2)

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



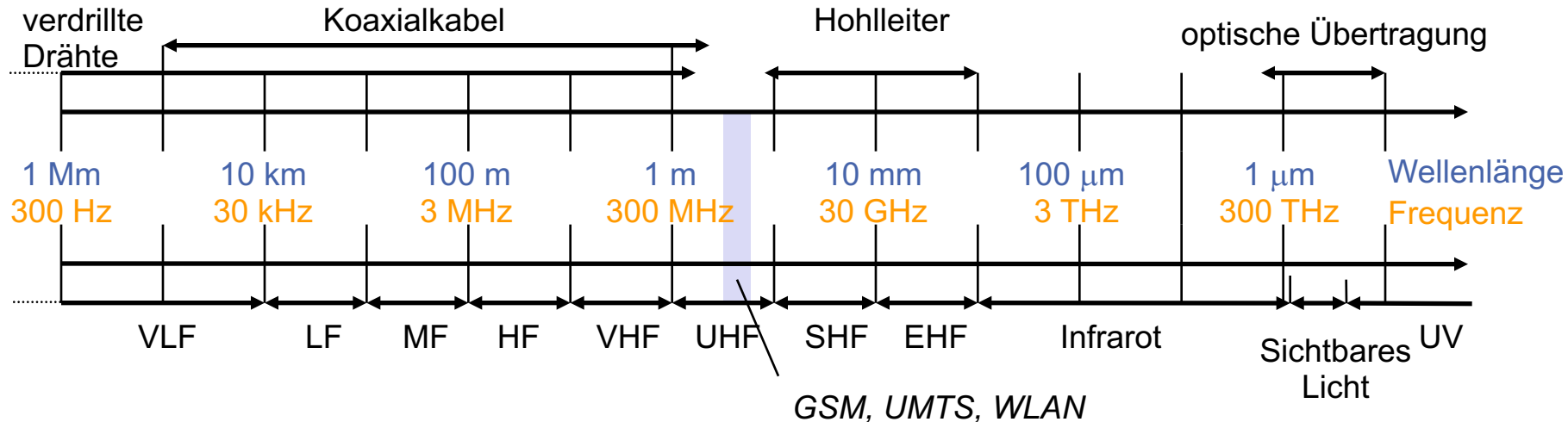


Anwendung: Multiple-Input-Multiple-Output (MIMO)



- 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 = Ultraviolette Licht

• Zusammenhang zwischen Frequenz und Wellenlänge

$$\lambda = c/f$$

mit

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



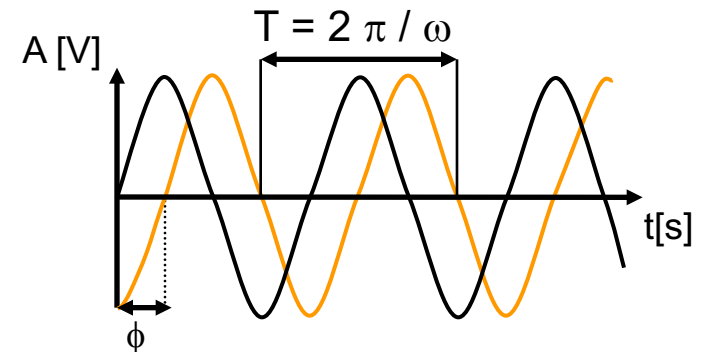
Signale

- 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** ϕ
 - Sinusförmige Trägerschwingung als spezielles periodisches Signal

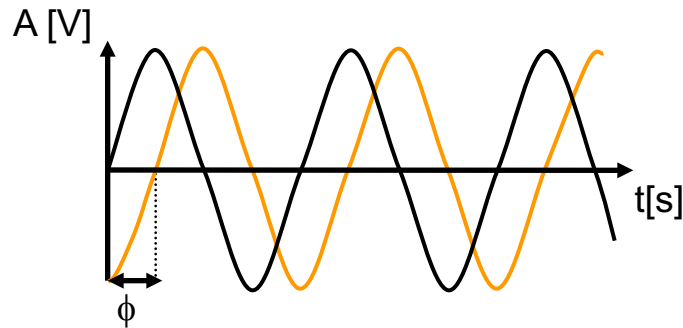


$$s(t) = A \sin(2 \pi f t + \phi) = A \sin(\omega t + \phi)$$

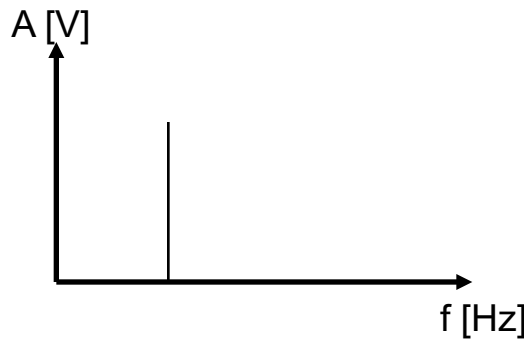
mit Kreisfrequenz $\omega = 2 \pi f$



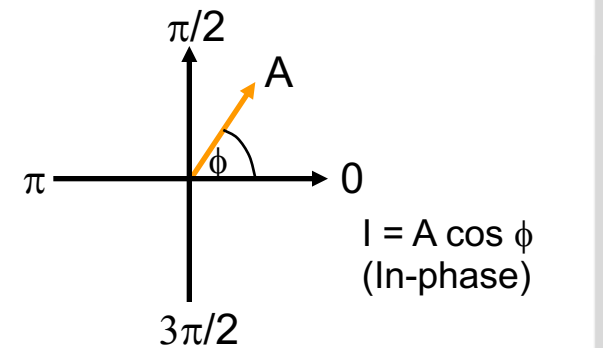
Darstellung von Signalen



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:

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

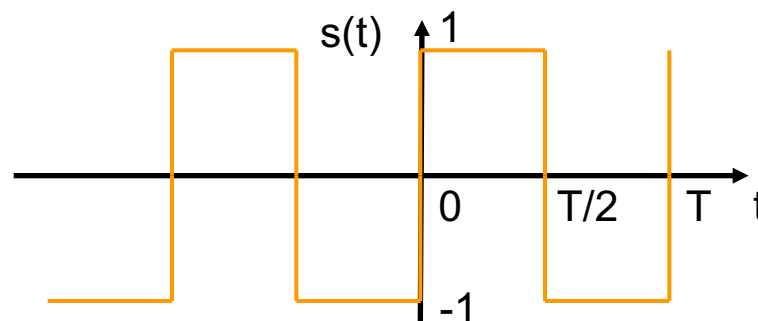
mit $\phi_n = \arctan \frac{a_n}{b_n}$

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

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



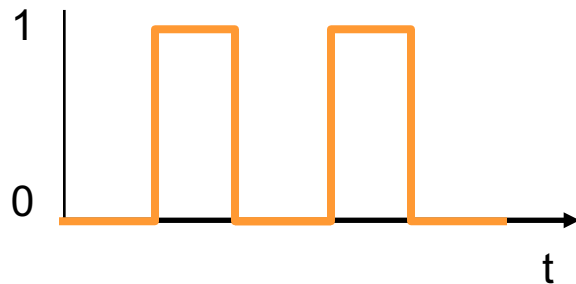
5. Harmonische



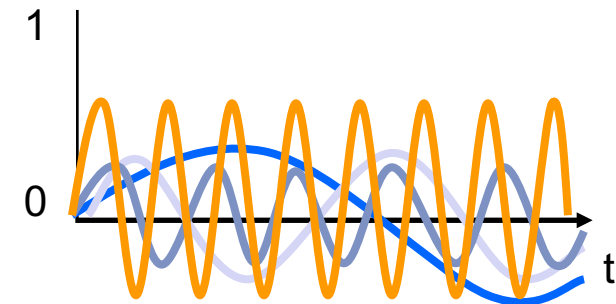
Ideale Rechteckfunktion benötigt **unendlich** viele Harmonische und damit theoretisch eine **unendlich** hohe Bandbreite



Fourier Repräsentation periodischer Signale



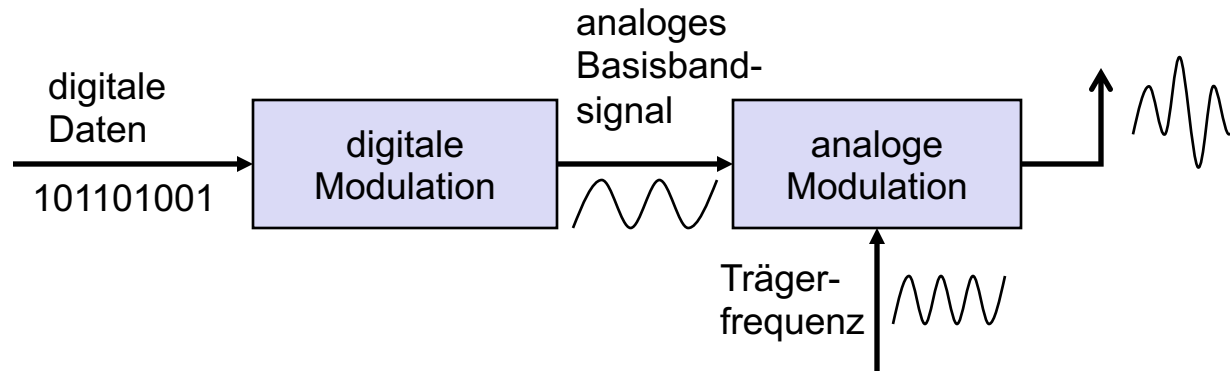
periodisches Signal



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)**

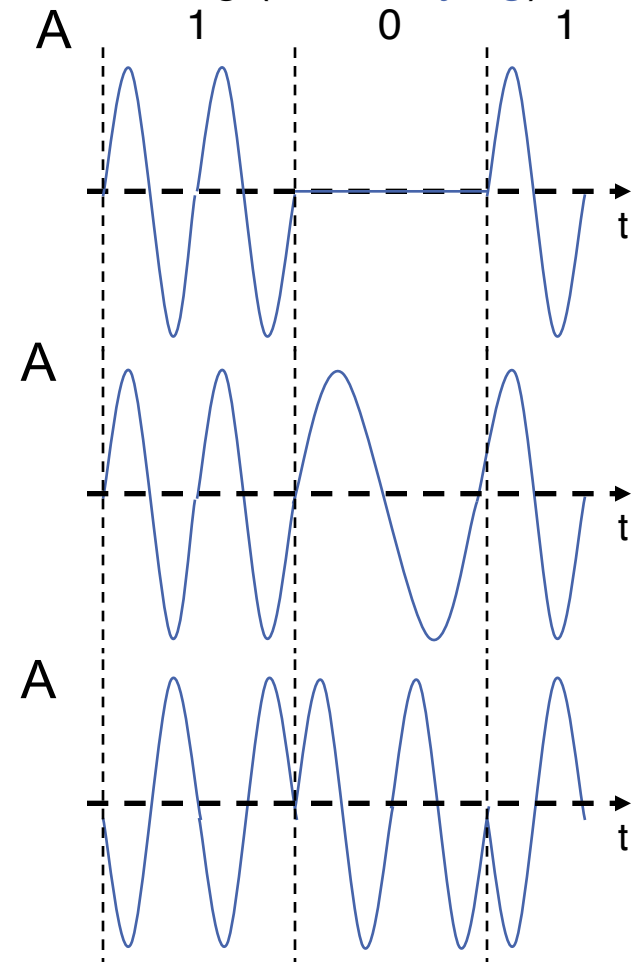
- technisch einfach
- benötigt wenig Bandbreite
- stör anfällig

■ **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 Trägerrückgewinnung
- relativ störungssicher

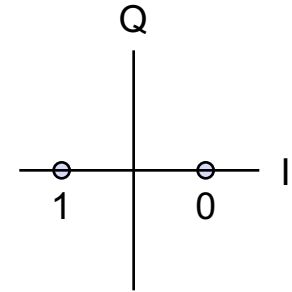




Fortgeschrittene PSK-Verfahren

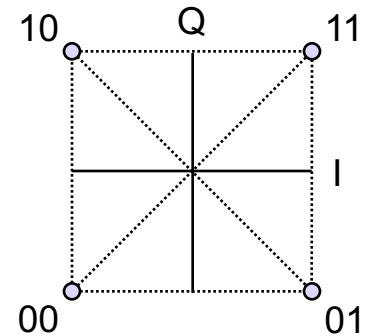
■ BPSK (Binary Phase Shift Keying)

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



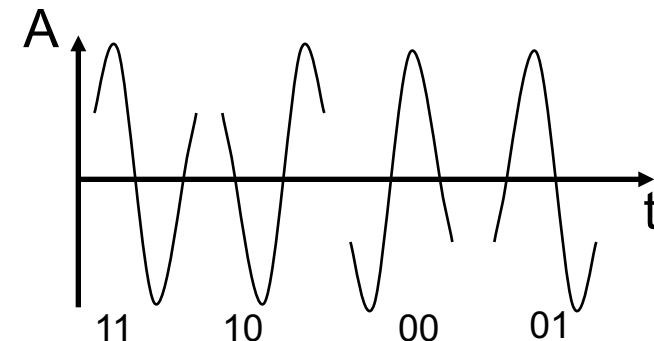
■ QPSK (Quaternary Phase Shift Keying)

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



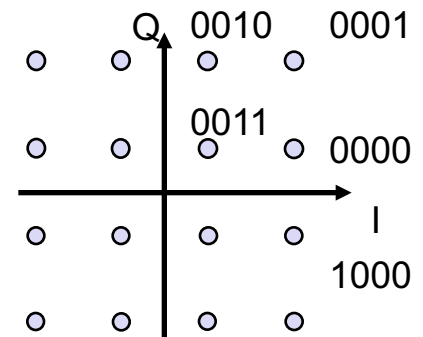
■ Oft Übertragung der relativen Phasenverschiebung (weniger Bitfehler)

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



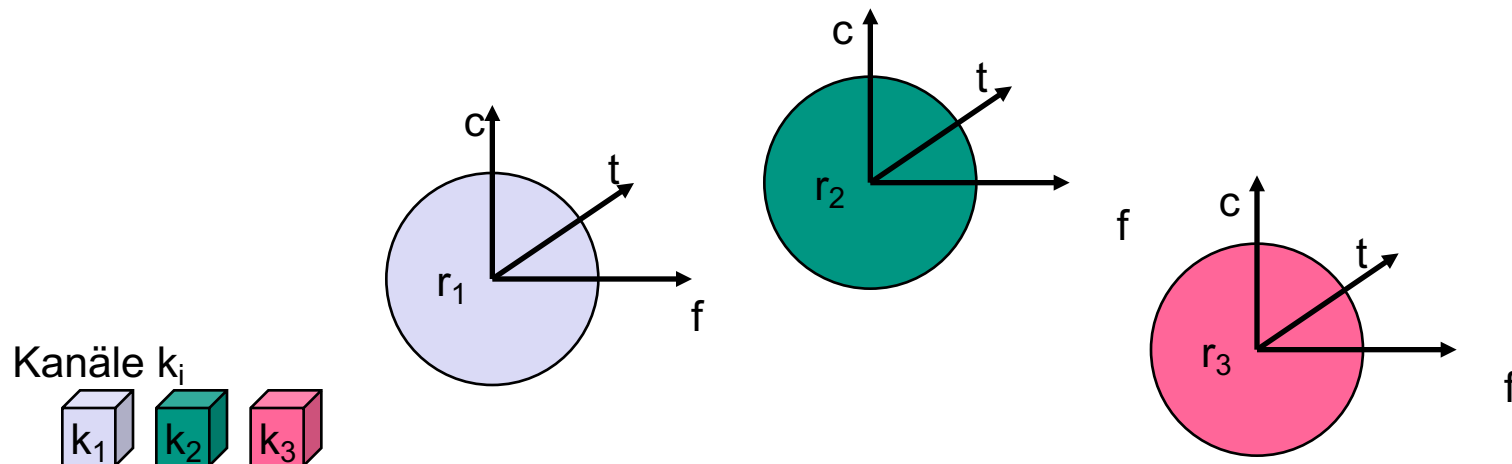
Quadraturamplitudenmodulation

- **Quadraturamplitudenmodulation (QAM):** kombiniertes Amplituden- und Phasenmodulationsverfahren
 - Aufteilung von Bits oder Bitgruppen auf zwei Kanäle
 - getrennte Amplitudenmodulation dieser Kanäle auf zwei um 90° 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

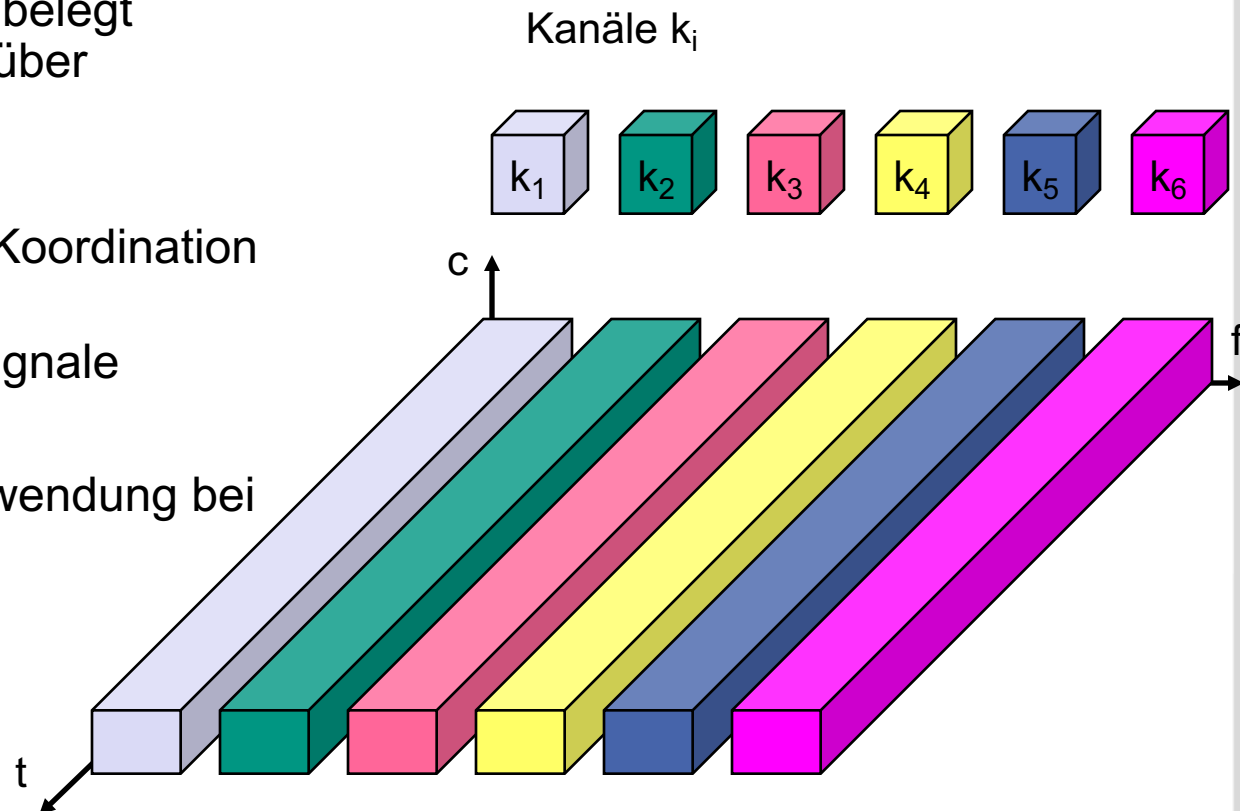
- Verfügbare Bandbreite wird in einzelne Frequenzabschnitte aufgeteilt
- Übertragungskanal belegt Frequenzabschnitt über gesamten Zeitraum

■ 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

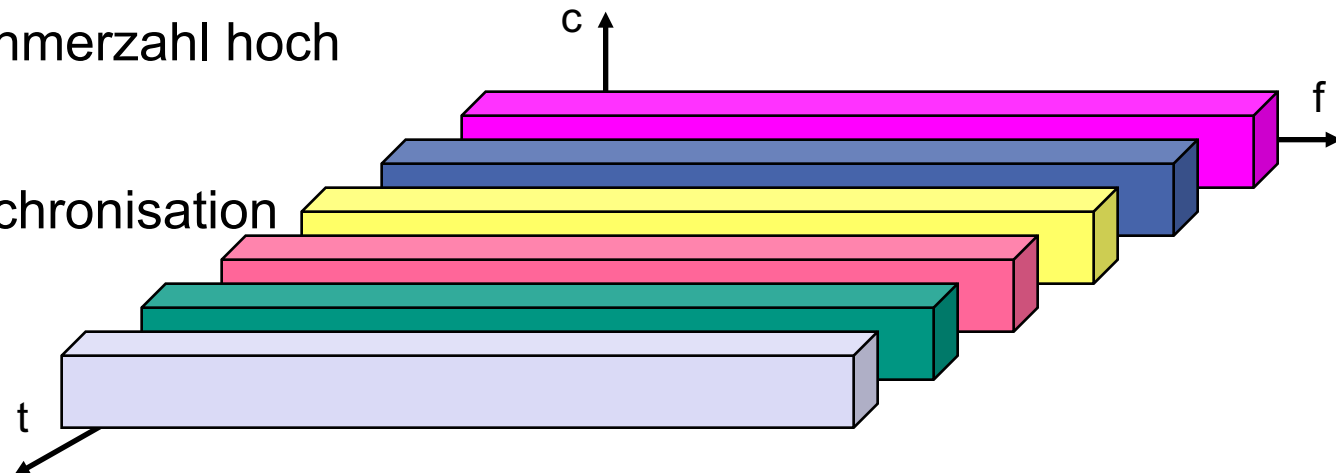
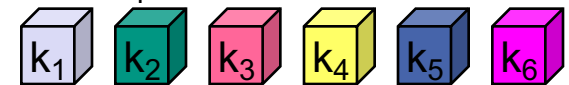
■ Vorteile

- 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

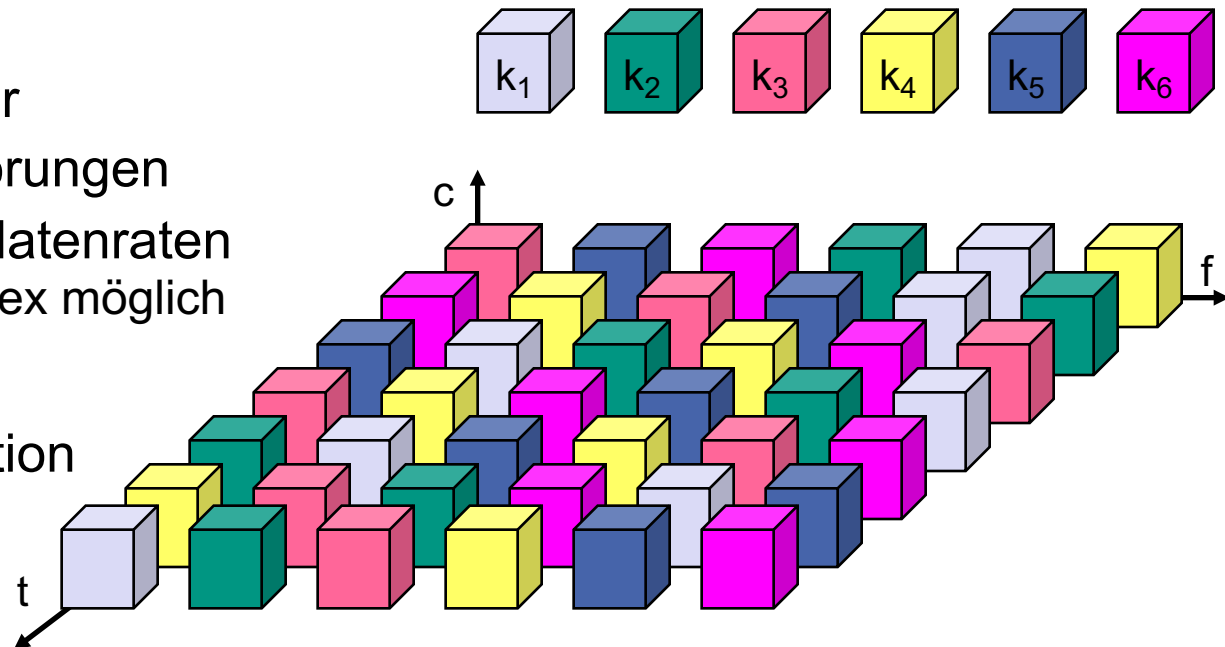
- Kombination der oben genannten Verfahren
- Belegen eines Frequenzabschnitts für einen Zeitabschnitt

■ 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

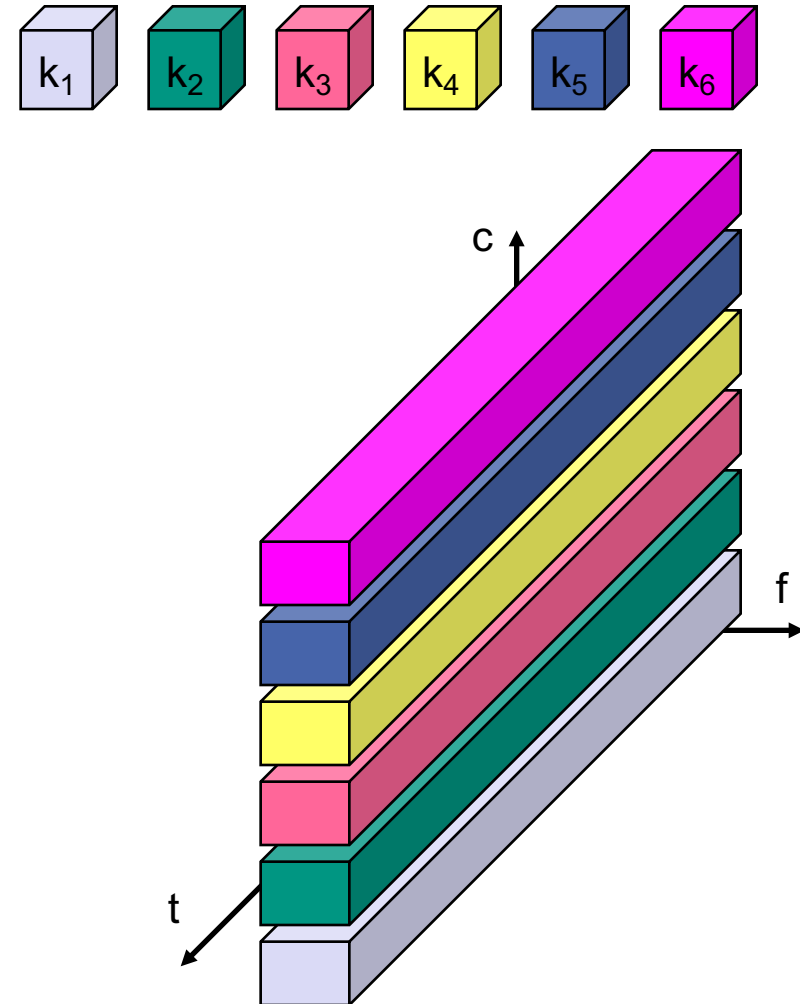
- Höhere Komplexität wegen Signalregenerierung
- Alle Signale müssen beim Empfänger gleich stark ankommen

Vorteile

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

Realisierung: Spreizspektrumtechnik

- (vgl. Folie 50 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“



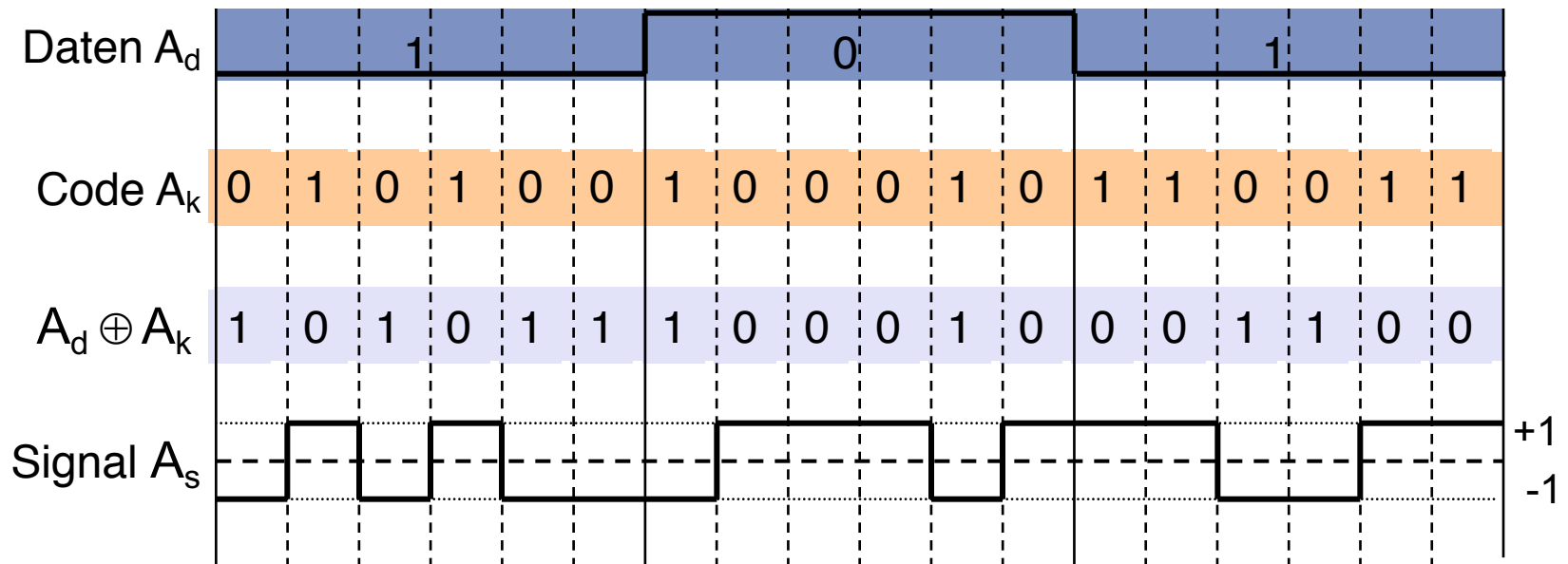
CDMA - Beispiel

■ 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.

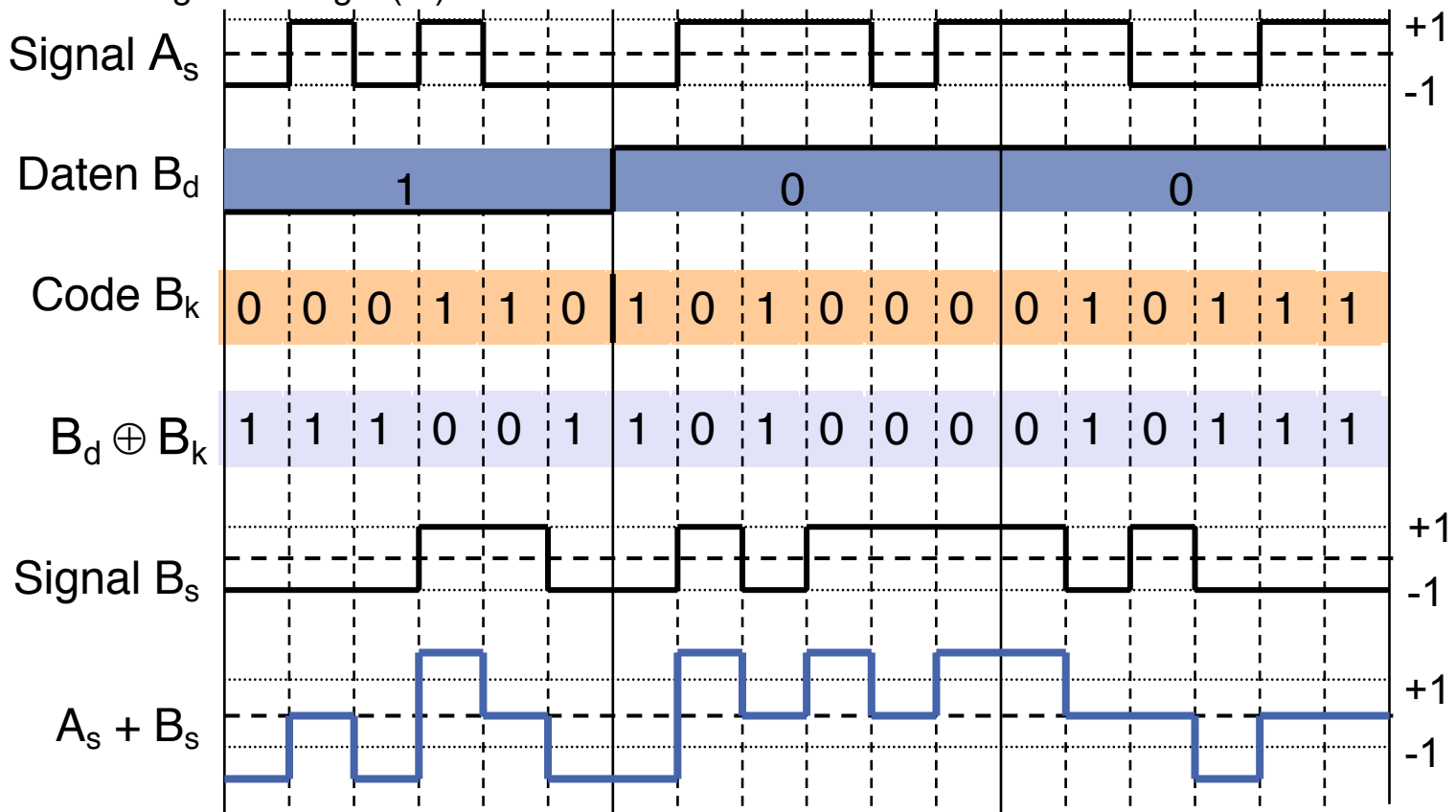
CDMA - Beispiel

■ Sender B will Bitfolge 100 übertragen

■ Signalpegel im Beispiel

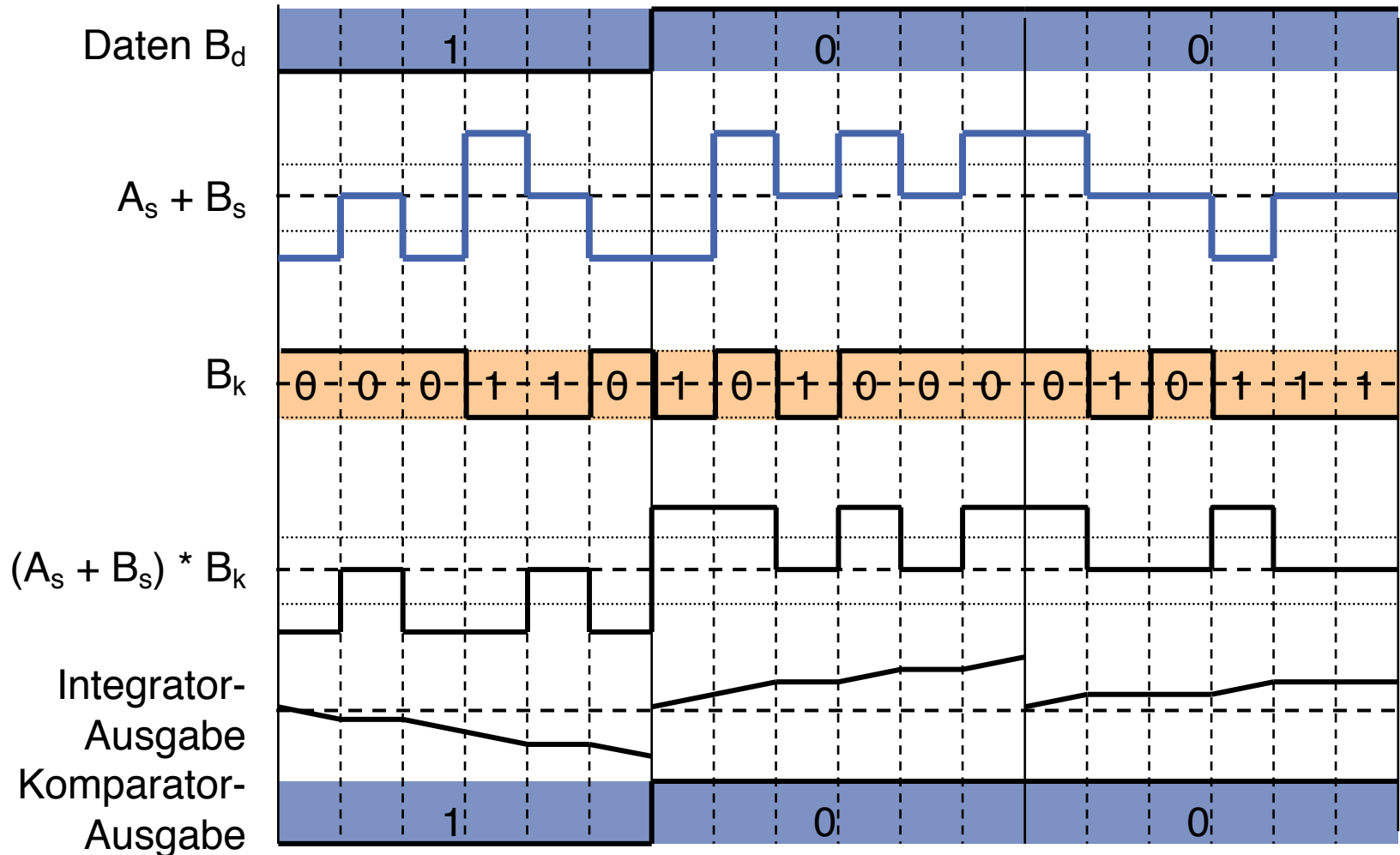
■ 0: positiver Pegel (+1)

■ 1: negativer Pegel (-1)



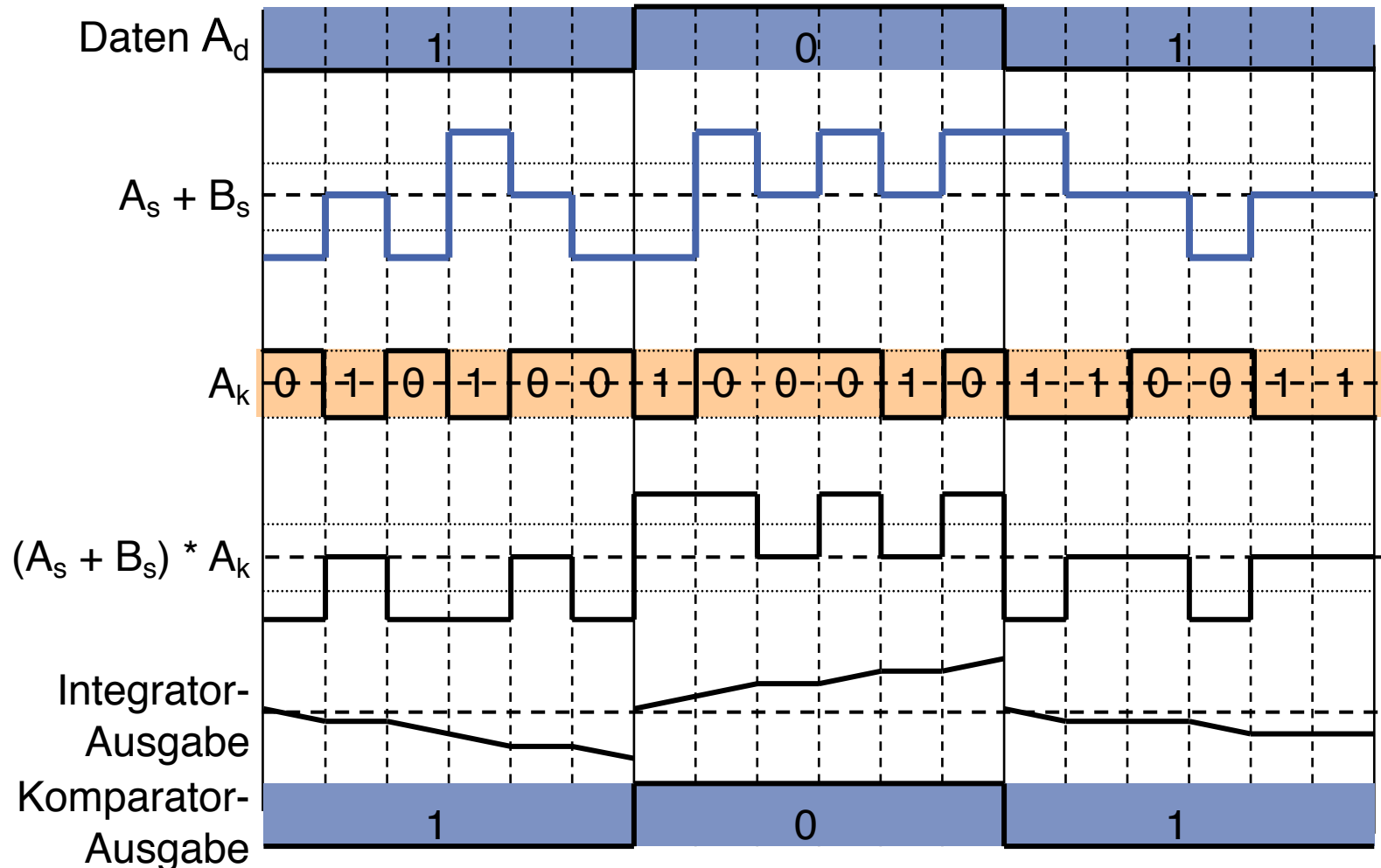
CDMA - Beispiel

- Empfänger rekonstruiert Daten von B



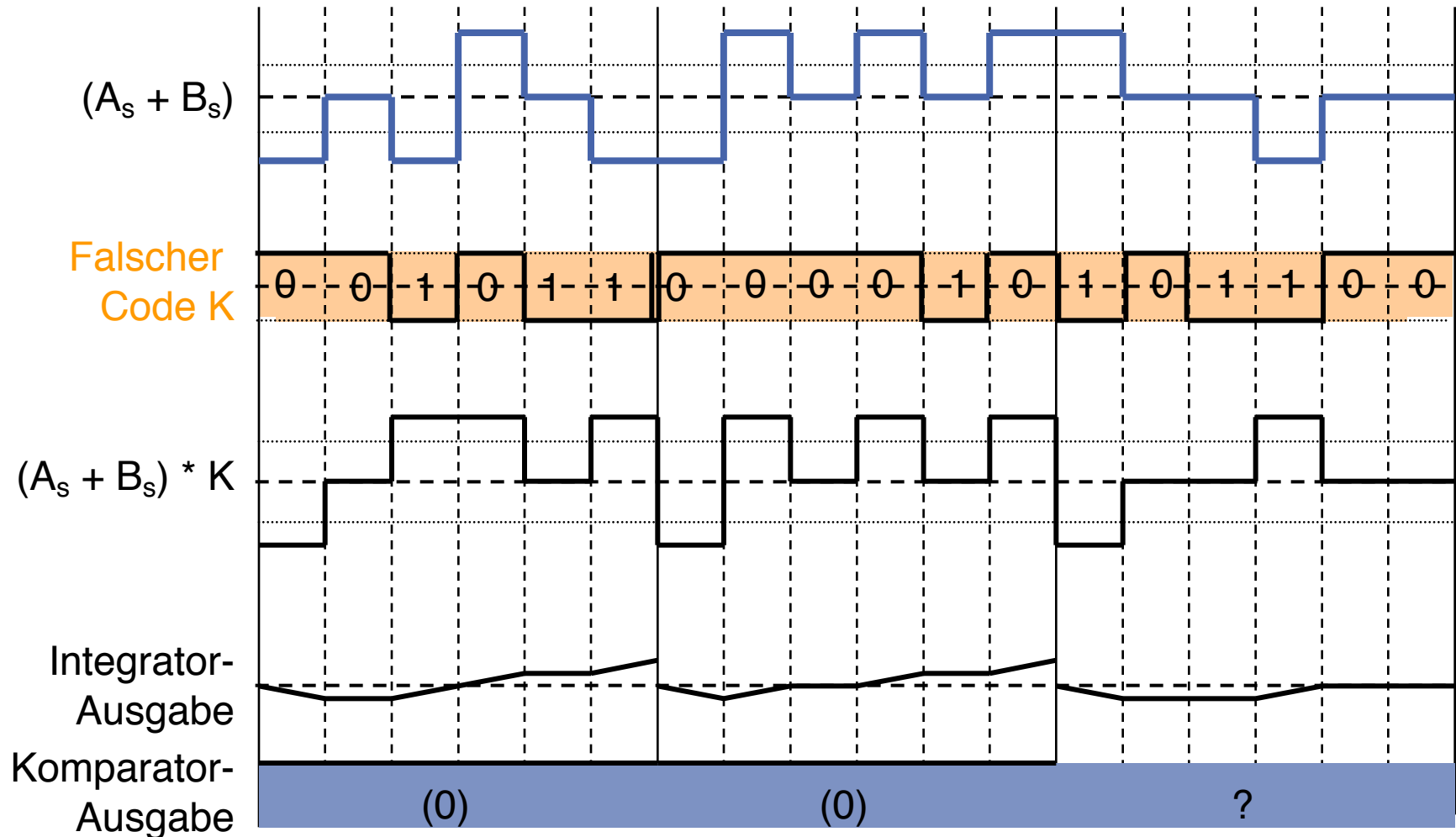
CDMA - Beispiel

- 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

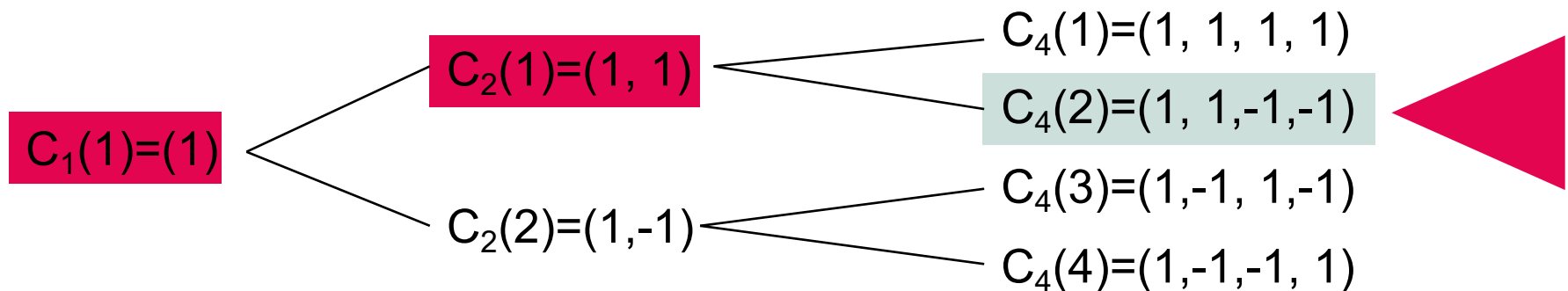
■ Paarweise orthogonal

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

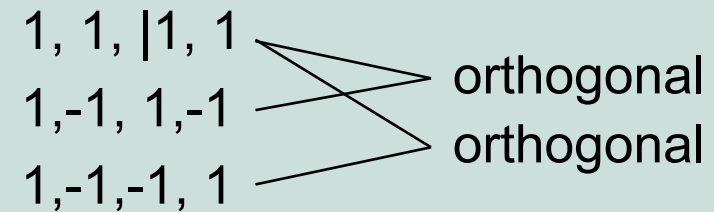
Beispiel Anwendung OVFSF

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

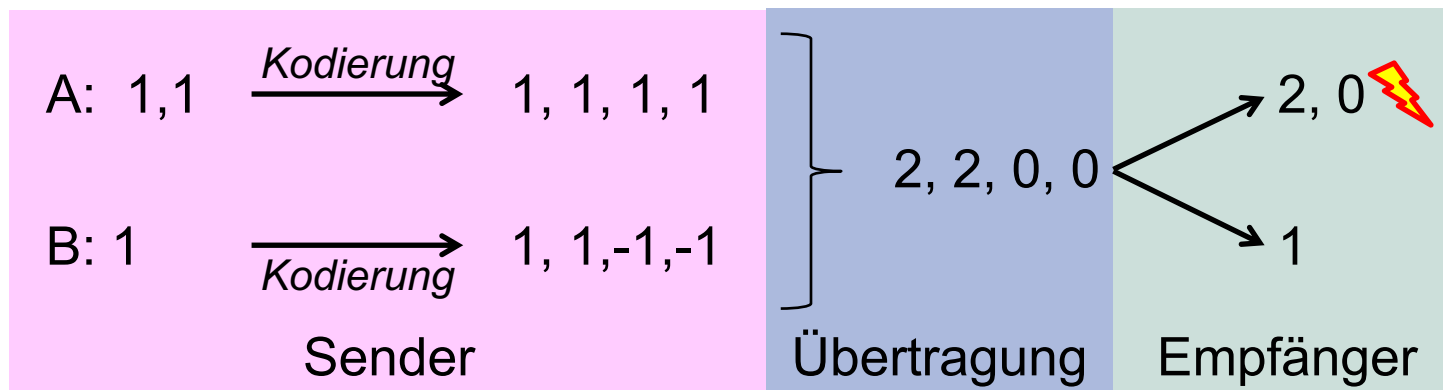
A, gewählte Sequenz, wiederholt

B, gewählte Sequenz

C, gewählte Sequenz



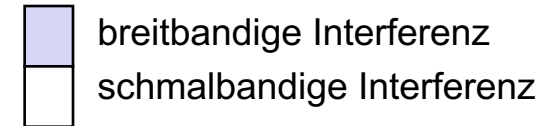
- Ungültige Auswahl: $C_2(1)=(1,1)$, $C_4(2)=(1,1,-1,-1)$



Vergleich SDMA/TDMA/FDMA/CDMA

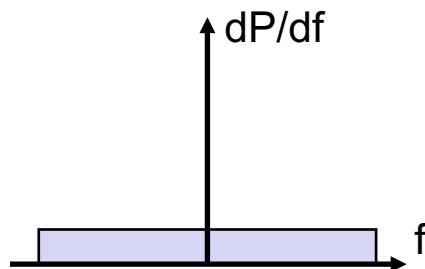
Verfahren	SDMA	TDMA	FDMA	CDMA
Idee	Einteilung des Raums in Zellen/Sektoren	Aufteilung der Sendezeiten in disjunkte Schlitze, anforderungs-gesteuert oder fest	Einteilung des Frequenzbereiches in disjunkte Bänder	Bandspreizung durch individuelle Codes
Teilnehmer	Nur ein Teilnehmer kann in einem Sektor 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

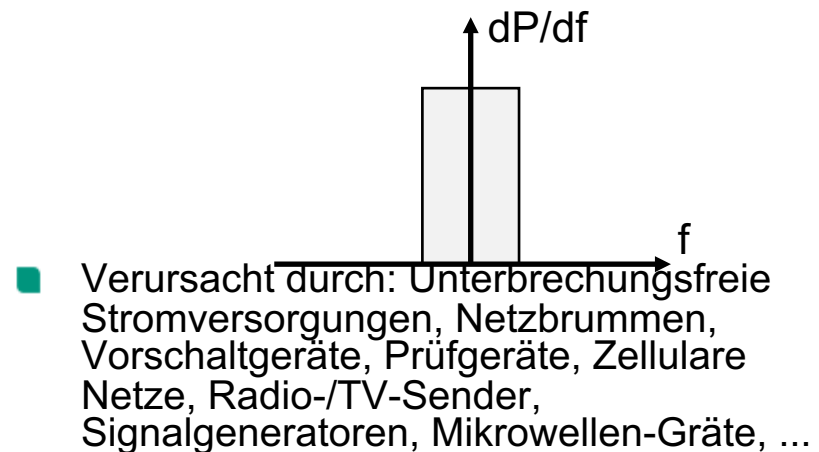
- Konstante Leistungsdichte über alle Frequenzen



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

Schmalbandige Interferenzen

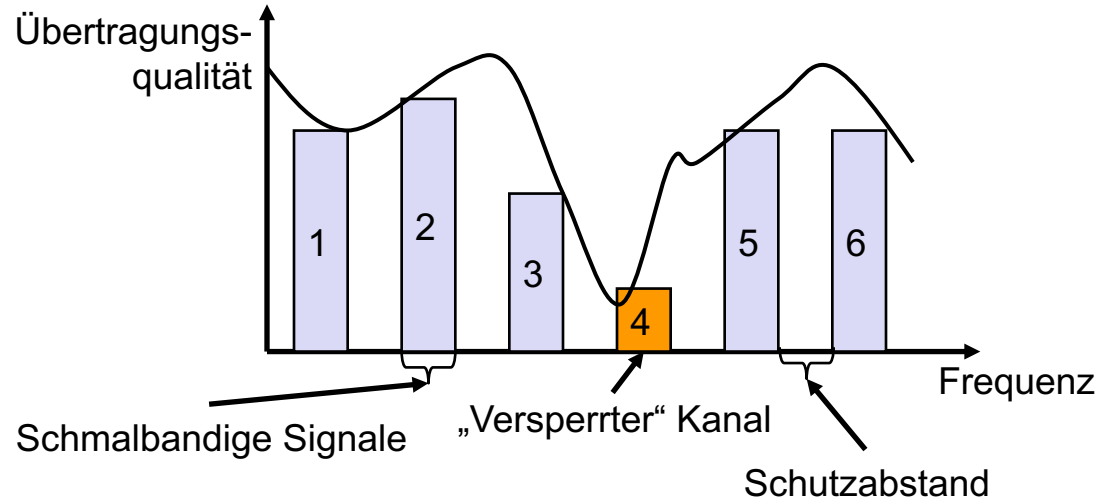
- Selektive Leistungsdichte auf einzelnen Frequenzen



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

Auswirkungen von Interferenzen

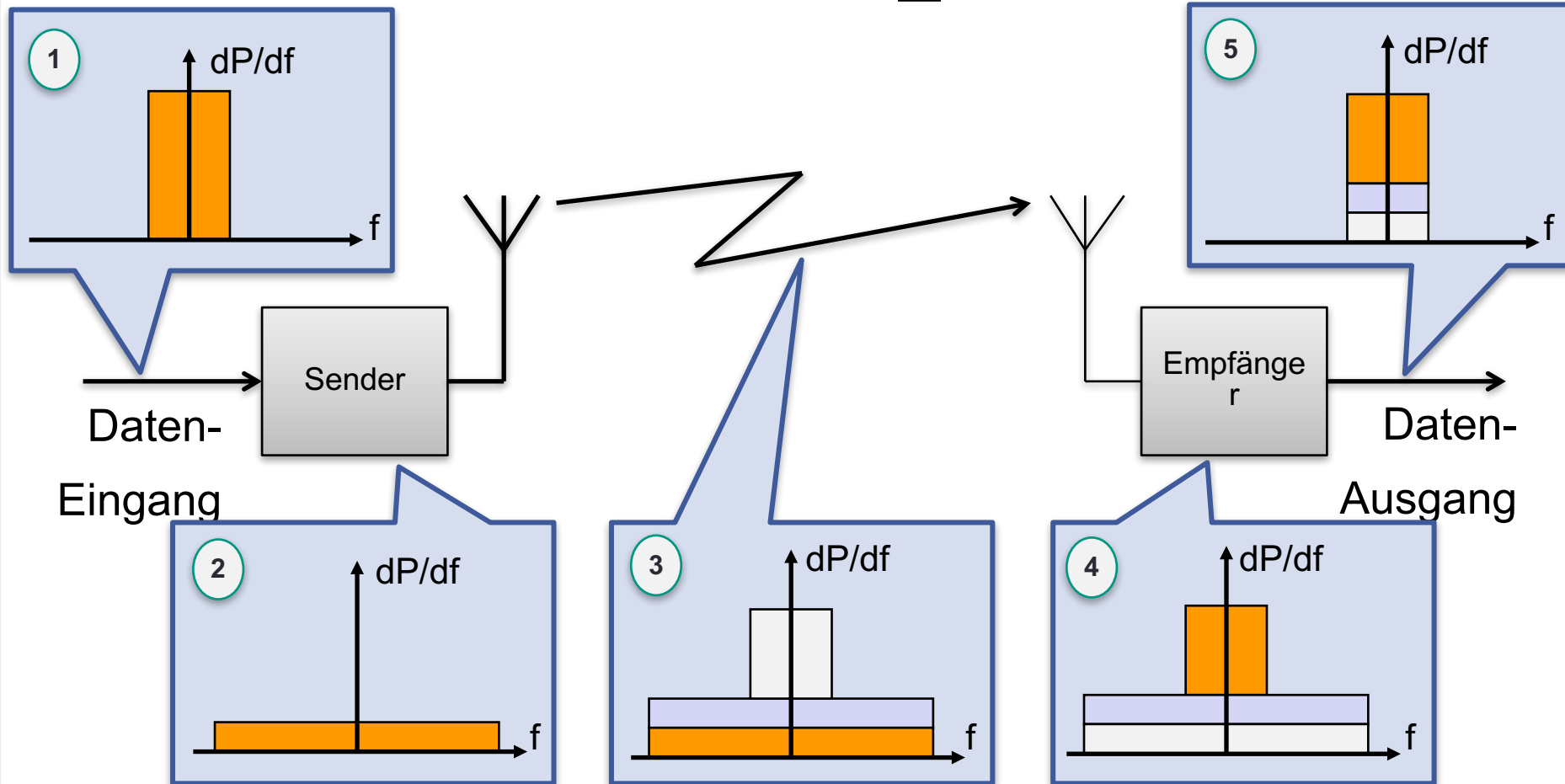
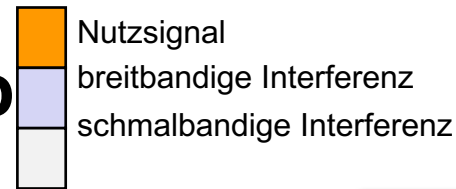
- Reduktion der Übertragungsqualität
 - Schmalbandige Kanäle können komplett versperrt sein



- 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

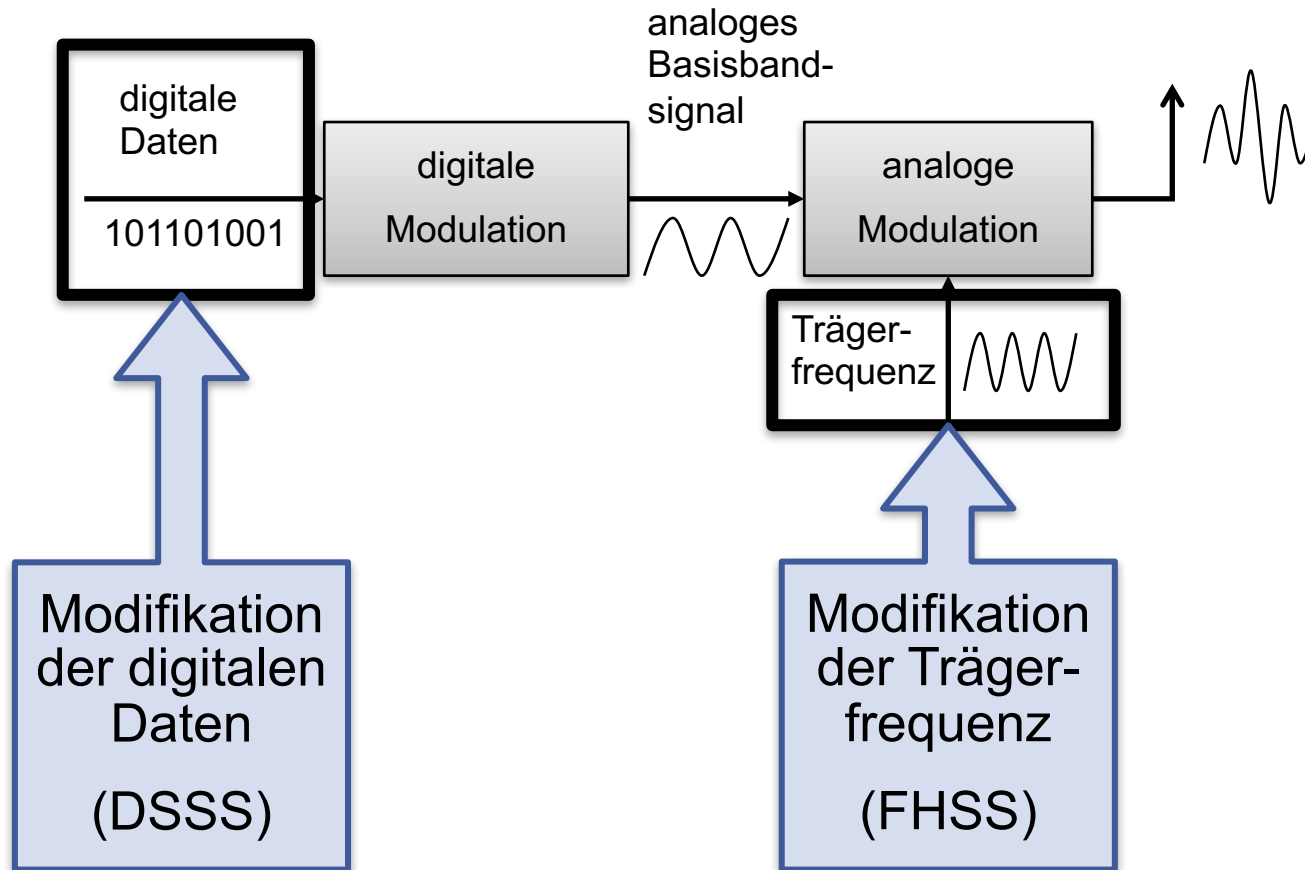
- ✓ Unempfindlichkeit gegen
 - verschiedene Arten von Interferenzen
 - Mehrwege-Ausbreitung durch Reflektionen

- ✓ Koexistenz vieler Benutzer mit geringen gegenseitigen Störungen

- ✓ Verstecken und Verschlüsseln von Signalen



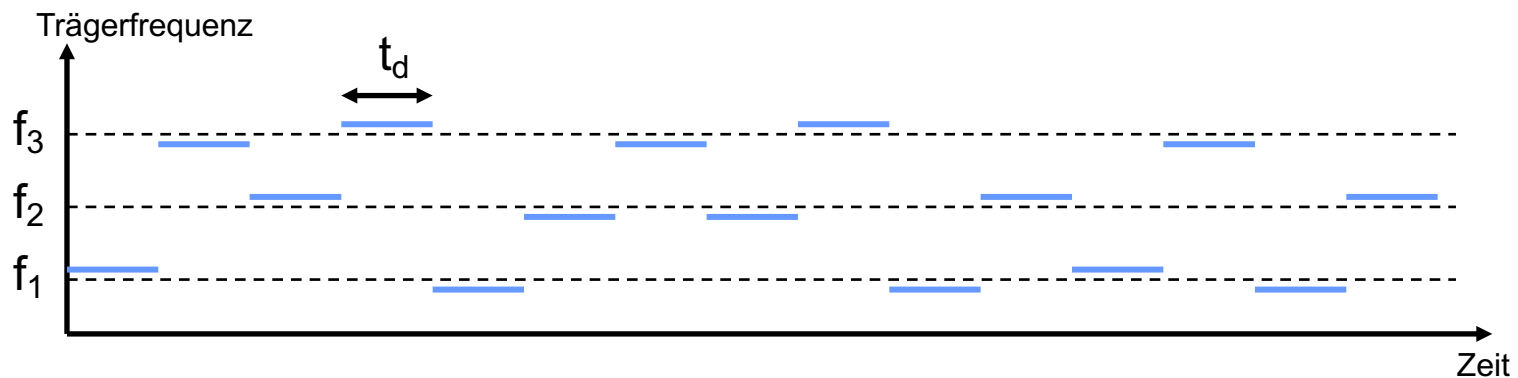
Bandspreizen – Wie macht man das?





Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)

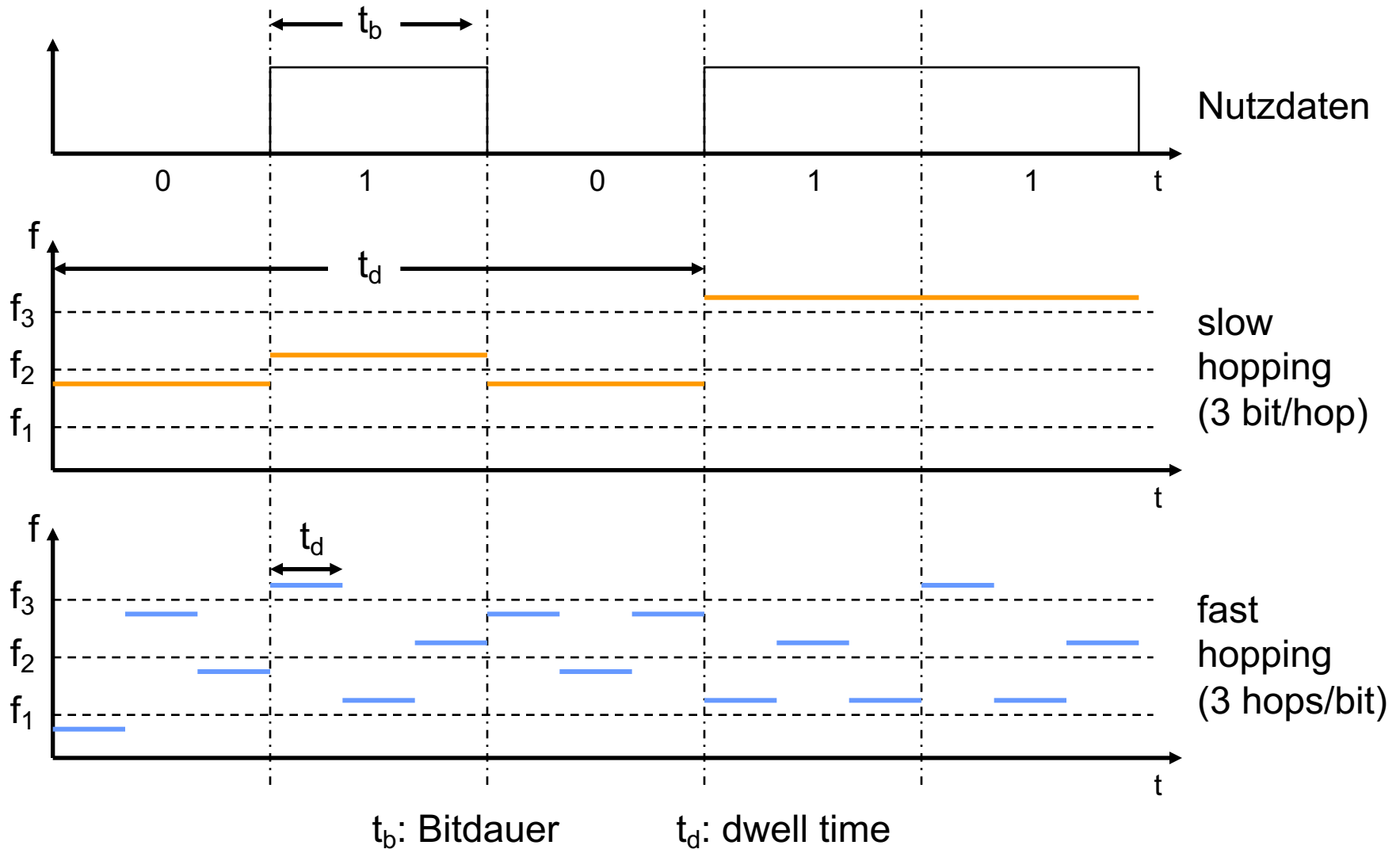
- Spreizen durch diskreten Wechsel der Trägerfrequenz
 - **Sprungsequenz:** Muster der Kanalbewegung (Hopping Sequence)
 - Wird durch Pseudozufallszahlenfolge bestimmt, bei Sender und Empfänger bekannt
 - Verweilzeit in einem Kanal: **Dwell Time t_d**
- Beispiel für eine Sprungsequenz über drei Trägerfrequenzen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

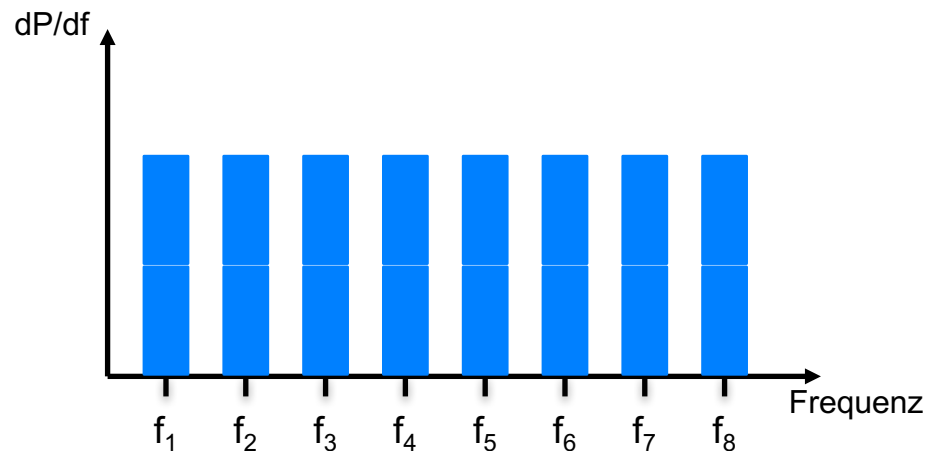
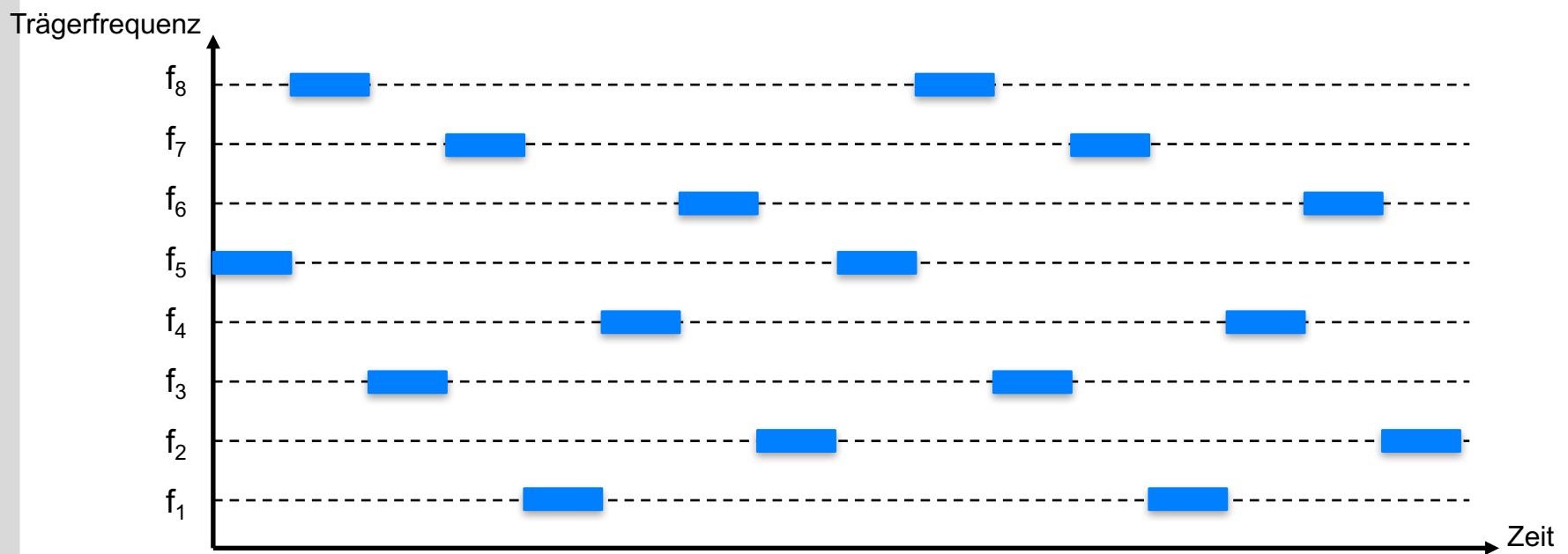


FHSS – Slow vs. Fast Hopping





FHSS: Leistungsdichte



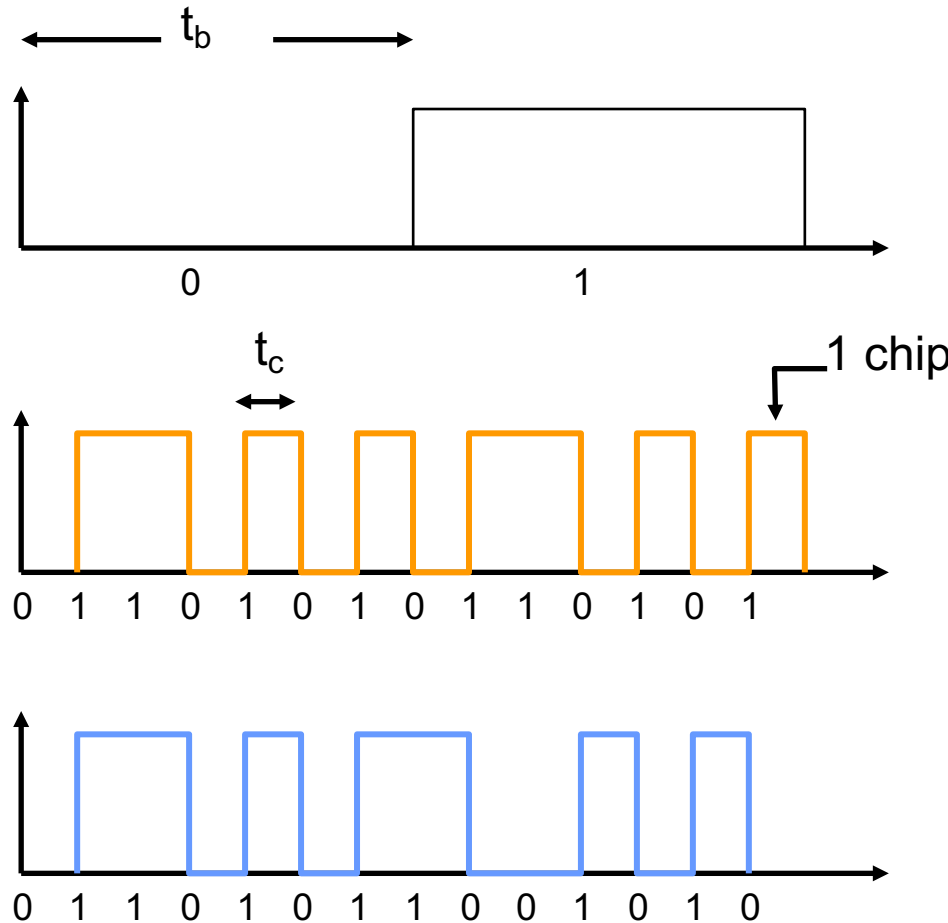


Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)

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



DSSS: Spreizen beim Sender



Nutzdaten

XOR

Chipping
Sequence

=

Zu sendendes
Signal

Chiprate: $r_c = 1/t_c$

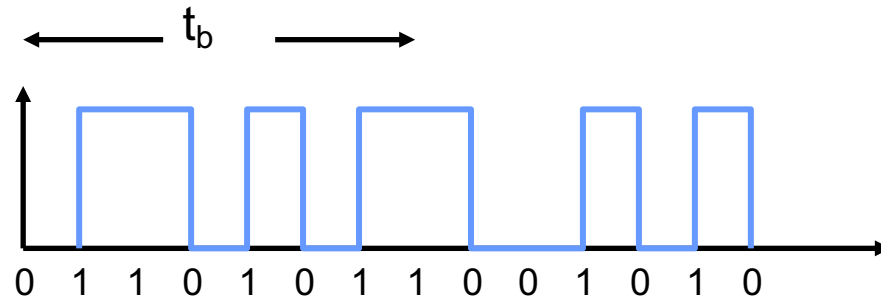
Bitrate: $r_b = 1/t_b$

→ Spreizfaktor = r_c / r_b

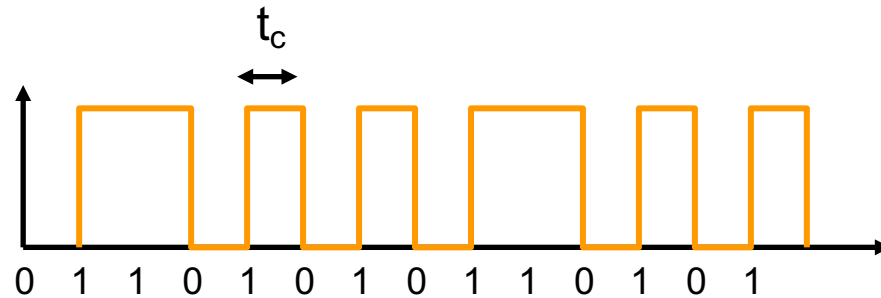
Größe des Spreizfaktors im Beispiel?



DSSS – Entspreizen beim Empfänger



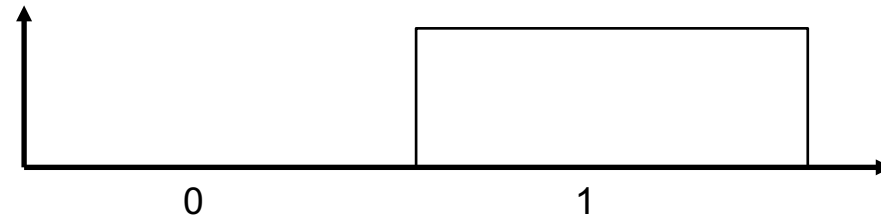
Empfangenes
Signal



XOR

Chipping
Sequence

=



Nutzdaten

DSSS – Leistungsdichte (1)

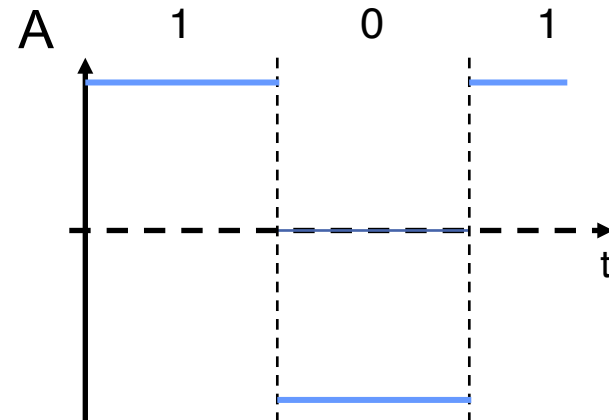
■ Annahmen:

- 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

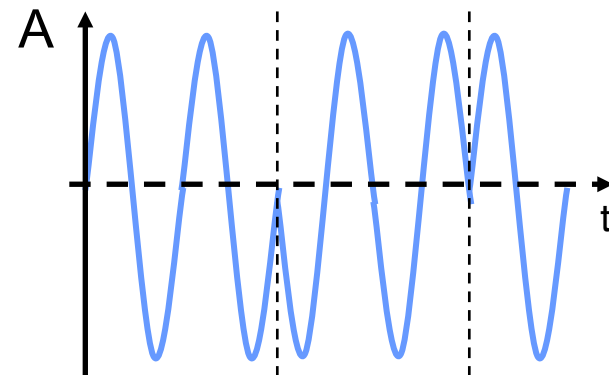
- Das Leistungsdichtespektrum des BPSK-Signals $v(t)$ ist identisch zum um f_0 verschobenen Leistungsdichtespektrum $L_s(f)$ des ursprünglichen Signals $s(t)$:

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

Datensignal $s(t)$:



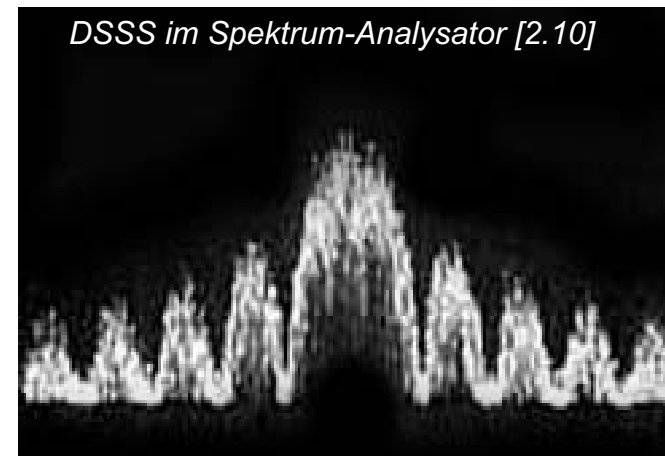
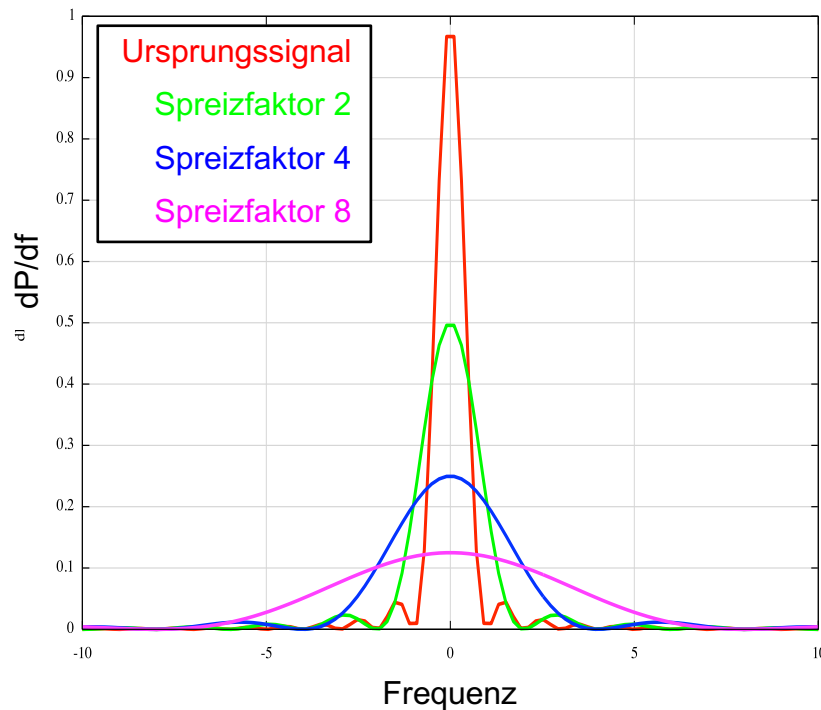
Phasenmoduliertes Signal $v(t)$:



[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
• WiFi 802.11 (kaum Produkte)	• WiFi 802.11 / 802.11b
• Bluetooth	• UMTS (Mehrfachzugriff durch Code Division Multiple Access)



[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

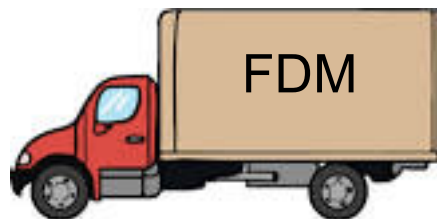
- Vorteile:

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

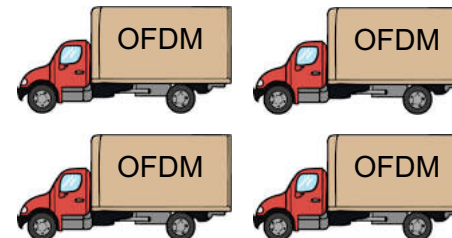
OFDM: Die Grundidee (2)

■ 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)

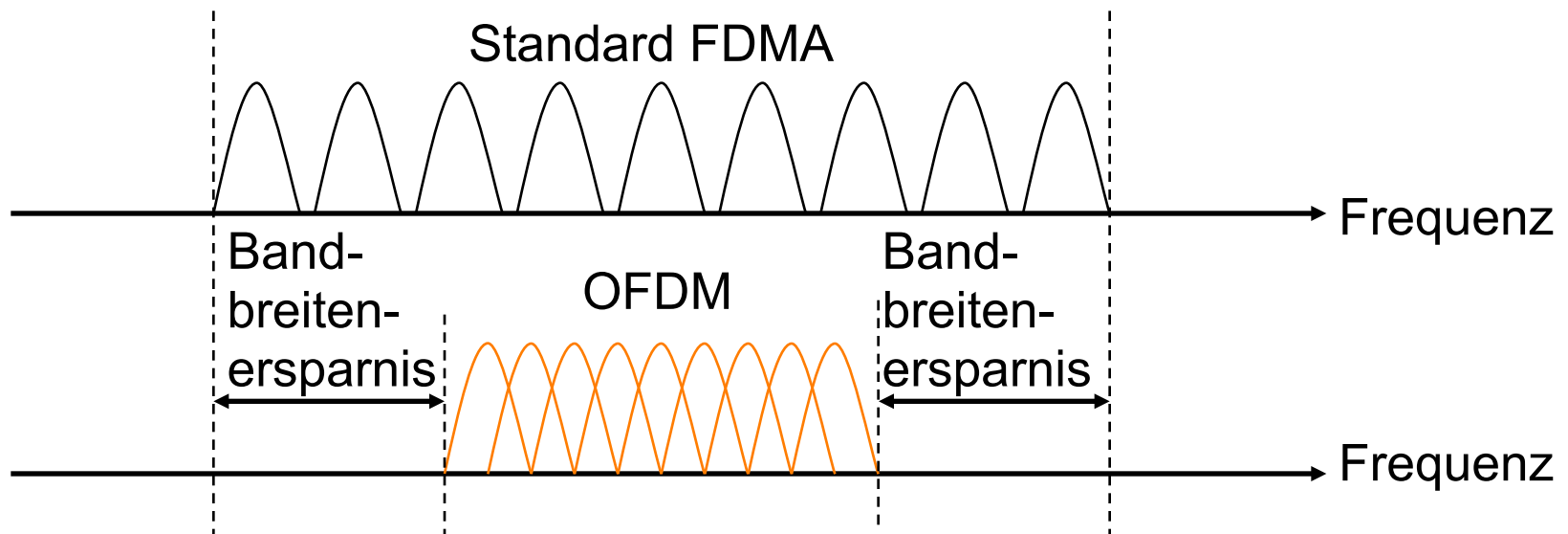
Parallelisierung des seriellen Datenstroms

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

Teildaten- strom 1	Teildaten- strom 2	Teildaten- strom 3	Teildaten- 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

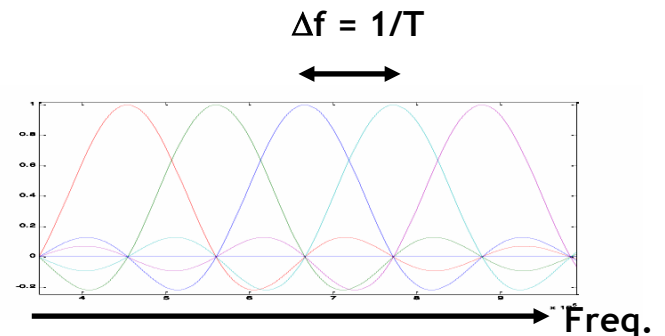
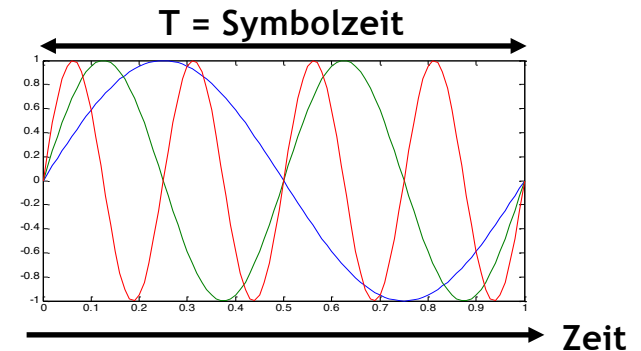
- Offene Frage: Wie werden die Teildatenströme übertragen?

- 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



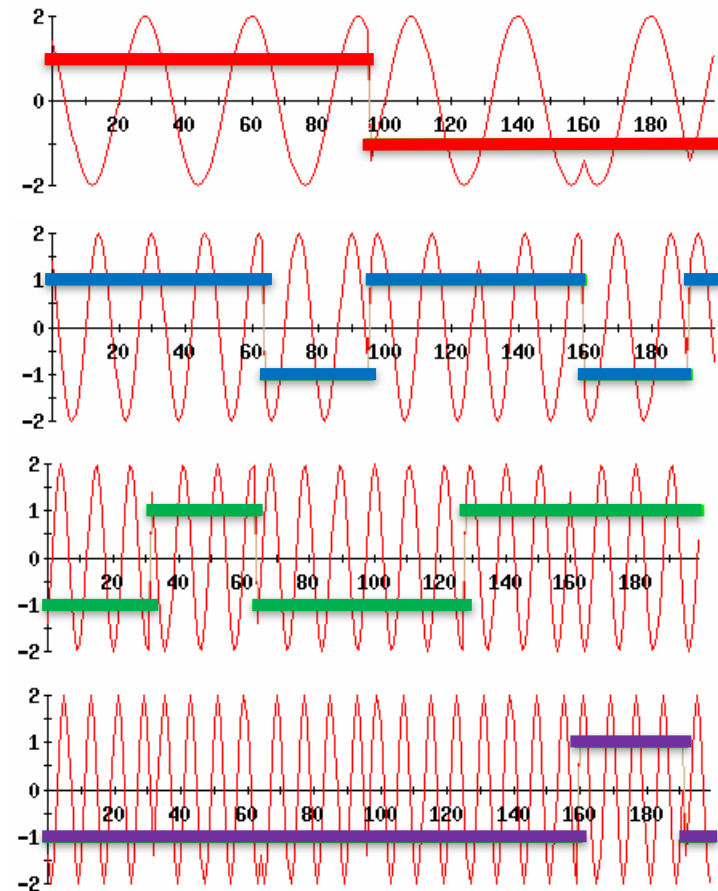
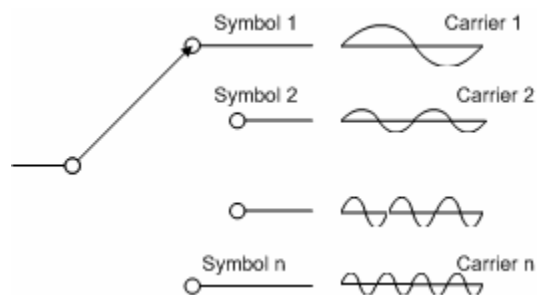
Trägerfrequenzen in OFDM

- 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



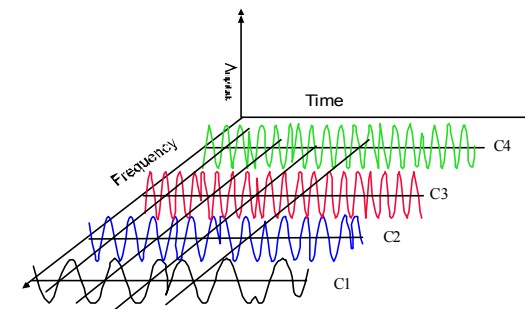
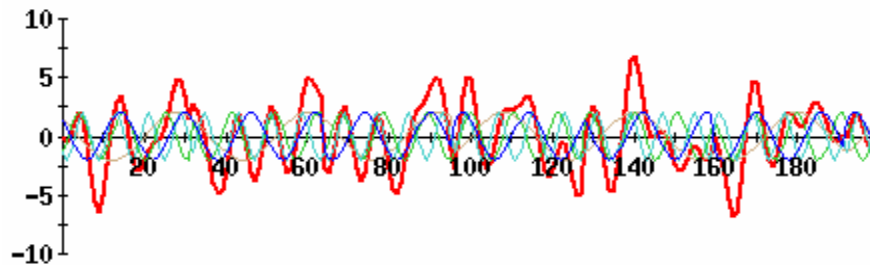
Modulation der Teildatenströme auf die Unterträger

Teildaten- strom 1	Teildaten- strom 2	Teildaten- strom 3	Teildaten- 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

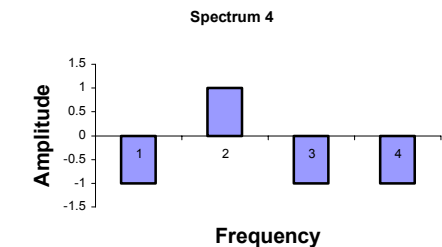
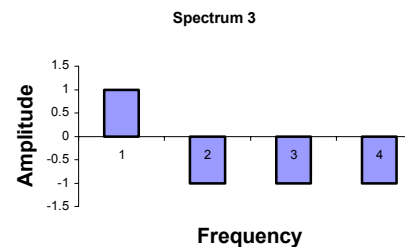
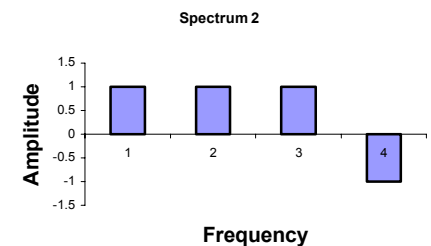
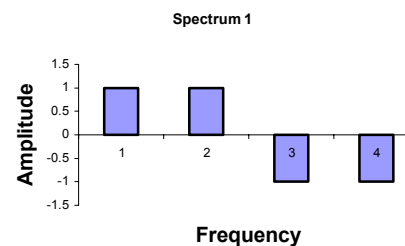
- Übertragenes Signal ist Summe der Signale der Unterträger



Bestimmung des OFDM-Signals

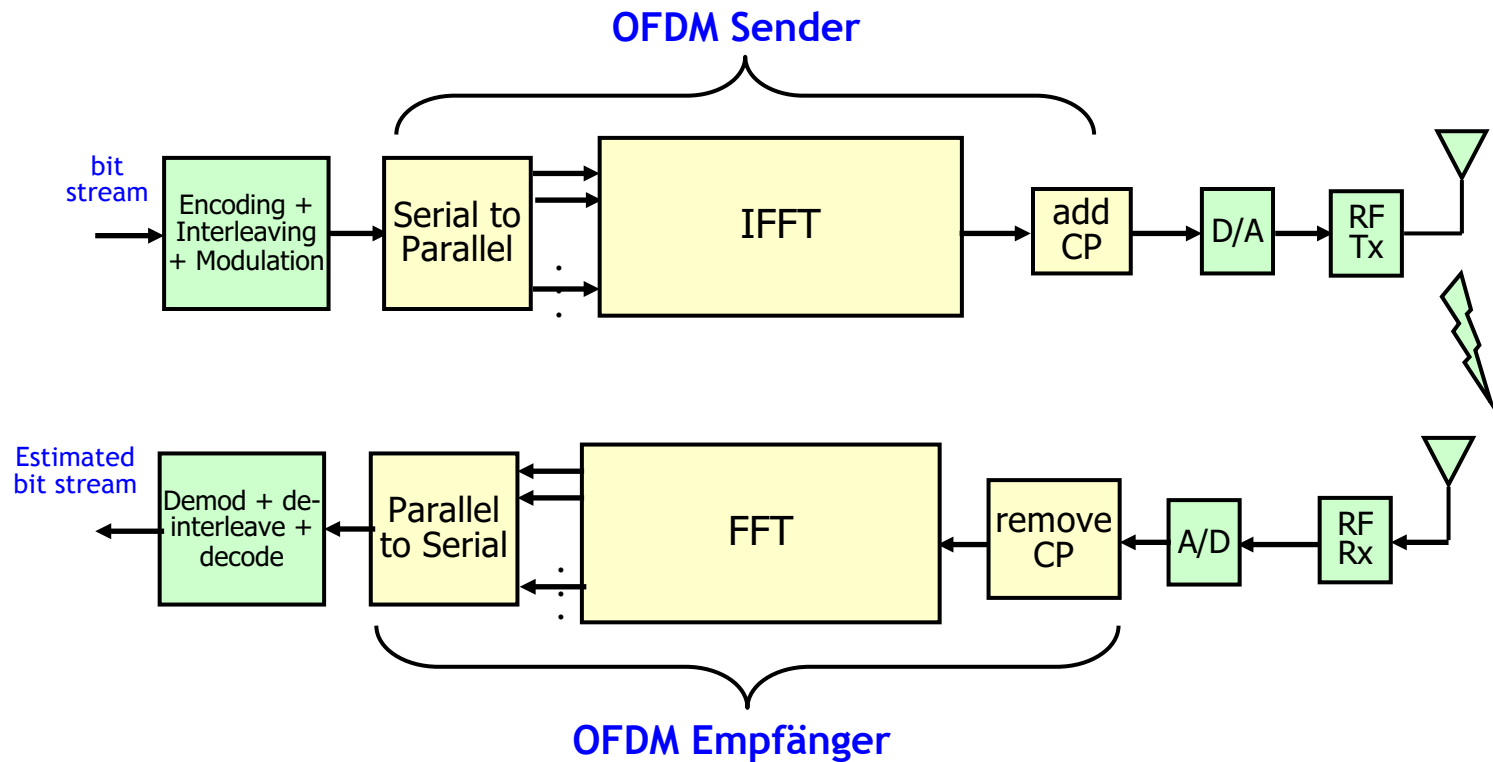
- Der eingehende (parallele) Bitstrom kann als **diskretes Frequenzspektrum** mit vier Frequenzen interpretiert werden

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



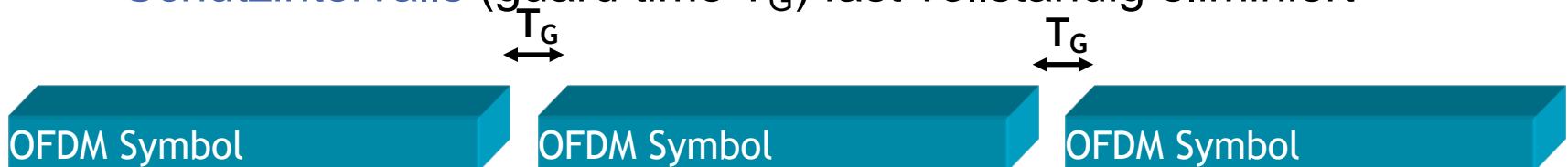
- Eine **inverse schnelle Fourier-Transformation (IFFT)** transformiert dieses vom Frequenzbereich in den Zeitbereich

Bsp: OFDM Transceiver (in LTE)



Cyclic Prefix: Schutz vor ISI

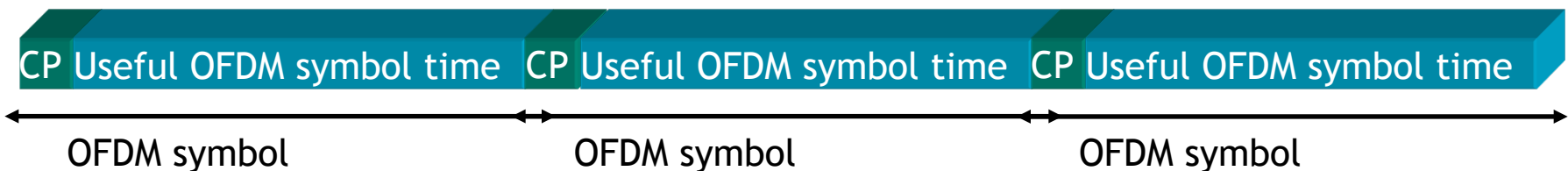
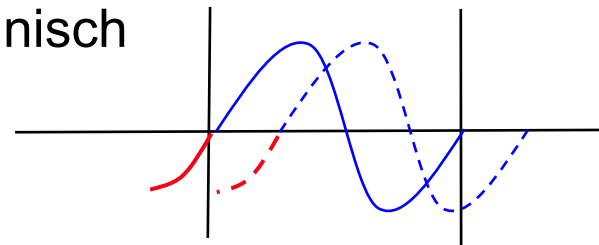
- OFDM alleine schützt nicht vor Intersymbol-Interferenzen!
 - ISI (zwischen OFDM Symbolen) wird durch Einfügen eines **Schutzintervalls** (guard time T_G) fast vollständig eliminiert



- Offene Frage: Was wird während der Schutzintervalle übertragen?

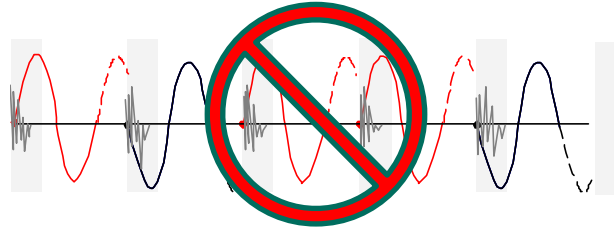
- “Lücken” in Signalen sind technisch nicht möglich!

→ Einfügen von **Cyclic Prefix**



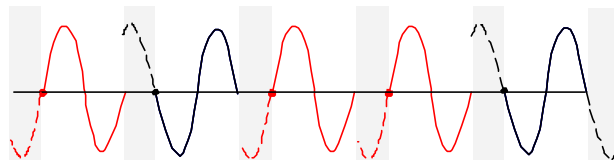
Auffüllen der Schutzintervalle

■ Lösungsidee 1: Symbol „länger laufen lassen“



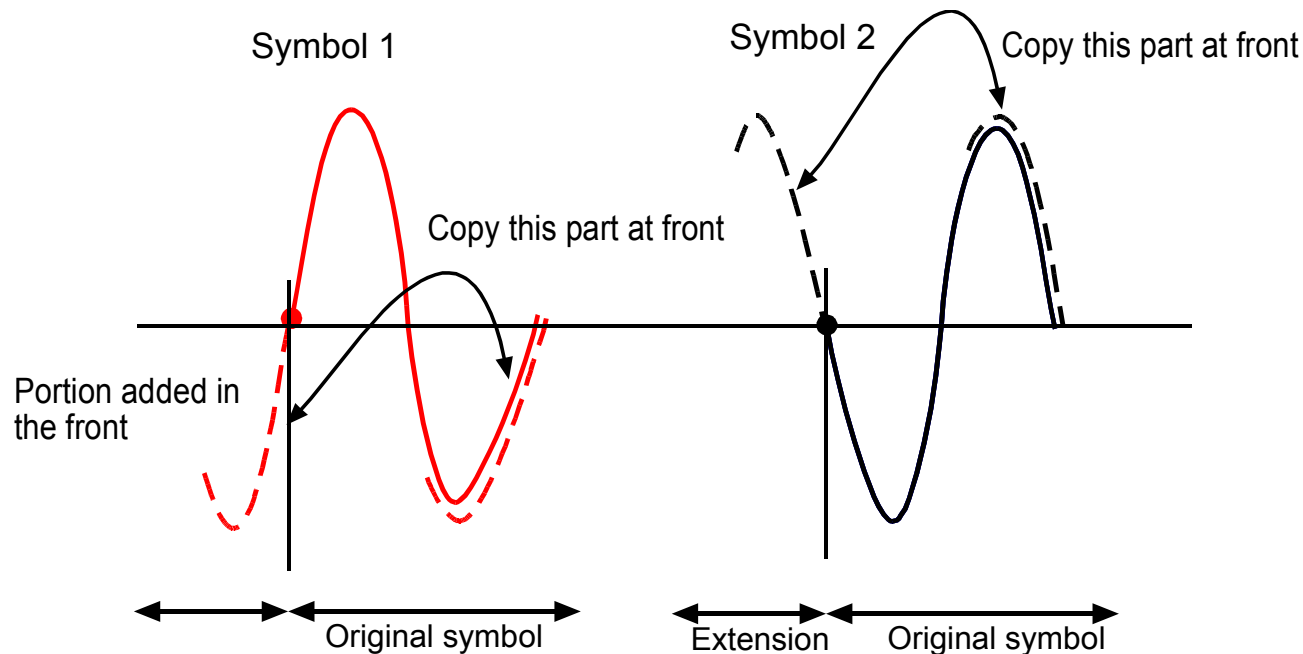
- Hilft nicht weiter, da ISI gerade Symbolanfang (Erkennung der Phase) betrifft!

■ Lösungsidee 2: Symbol „früher beginnen“



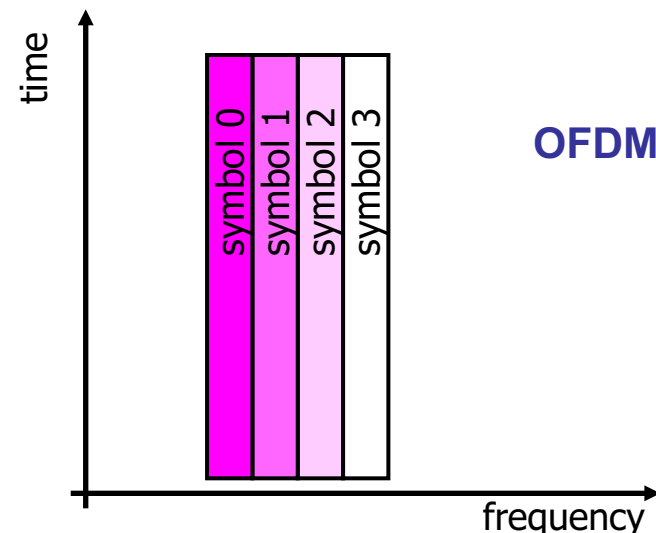
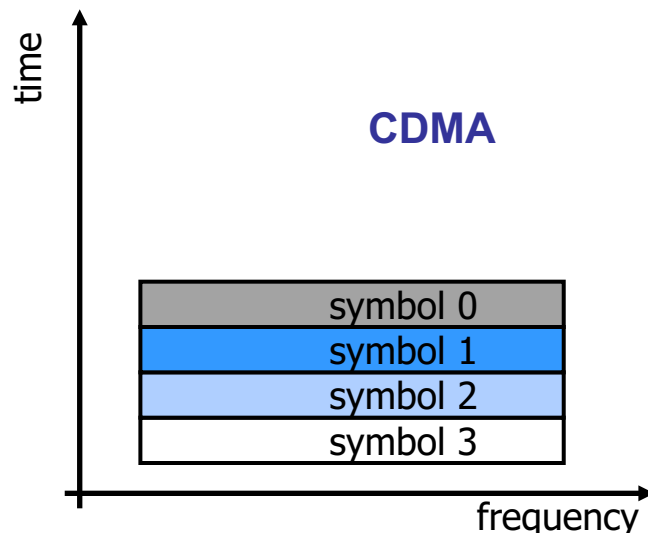
- Symbolanfang liegt außerhalb von ISI Bereich!

Bestimmung des Cyclic Prefix



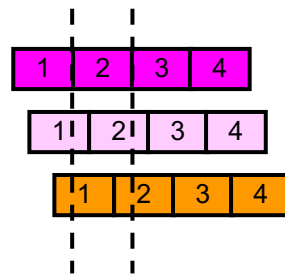
Vergleich OFDM vs. CDMA (1)

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



Vergleich OFDM vs. CDMA (2)

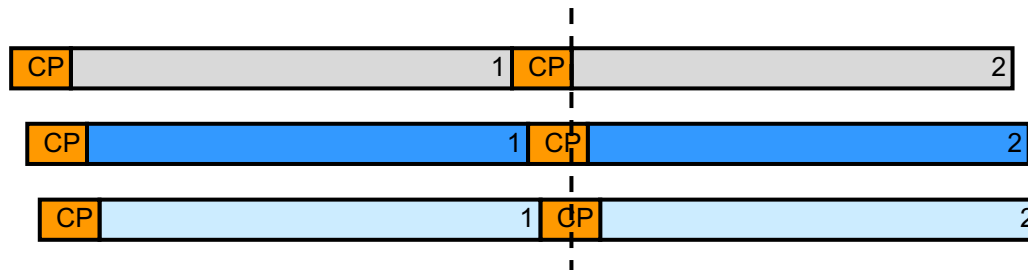
- Kurze Symbolzeiten in CDMA führen zu ISI bei Mehrwegausbreitung



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
- Bandbreite-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/lehveranstaltungen/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
- [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.