

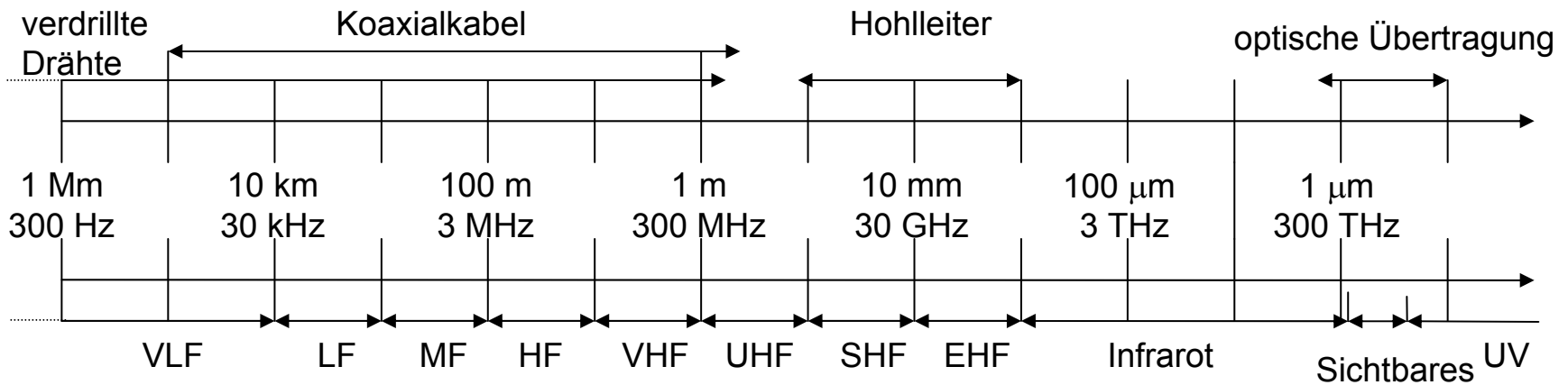
# Mobilkommunikation

## Kapitel 2: Technische Grundlagen

- Frequenzen
- Signale
- Antennen
- Signalausbreitung
- Multiplextechniken
- Spreizspektrumtechnik
- Modulationstechniken
- Zellenstrukturen



# Frequenzbereiche für die Kommunikation



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



# Frequenzbereiche für die Mobilkommunikation

- ❑ VHF-/UHF-Bereich für Mobilfunk
  - ❑ handhabbare, einfache Fahrzeugantennen
  - ❑ Ausbreitungsbedingungen vorhersehbar für zeitlich zuverlässige Verbindungen (wenig Überreichweiten, nicht zu stark reflektierte Wellen)
- ❑ Frequenzen ab SHF-Bereich für Richtfunkstrecken, Satellitenkommunikation
  - ❑ überschaubare Antennenabmessungen mit starker Bündelwirkung
  - ❑ größere Bandbreiten verfügbar
- ❑ 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 (WRC, World Radio Conferences)

Beispiele für Betriebsfrequenzen im Mobilkommunikationsbereich:

	Europe	USA	Japan
<b>Cellular Phones</b>	<b>GSM</b> 450-457, 479-486/460-467, 489-496, 890-915/935-960, 1710-1785/1805-1880 <b>UMTS (FDD)</b> 1920-1980, 2110-2190 <b>UMTS (TDD)</b> 1900-1920, 2020-2025	<b>AMPS, TDMA, CDMA</b> 824-849, 869-894 <b>TDMA, CDMA, GSM</b> 1850-1910, 1930-1990	<b>PDC</b> 810-826, 940-956, 1429-1465, 1477-1513
<b>Cordless Phones</b>	<b>CT1+</b> 885-887, 930-932 <b>CT2</b> 864-868 <b>DECT</b> 1880-1900	<b>PACS</b> 1850-1910, 1930-1990 <b>PACS-UB</b> 1910-1930	<b>PHS</b> 1895-1918 <b>JCT</b> 254-380
<b>Wireless LANs</b>	<b>IEEE 802.11</b> 2400-2483 <b>HIPERLAN 2</b> 5150-5350, 5470-5725	902-928 <b>IEEE 802.11</b> 2400-2483 5150-5350, 5725-5825	<b>IEEE 802.11</b> 2471-2497 5150-5250
<b>Others</b>	<b>RF-Control</b> 27, 128, 418, 433, 868	<b>RF-Control</b> 315, 915	<b>RF-Control</b> 426, 868



# Signale I

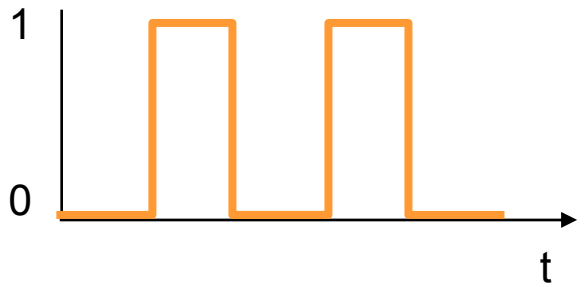
- ❑ Physikalische Darstellung von Daten
- ❑ Zeitabhängig oder ortsabhängig
- ❑ Signalparameter: Kenngrößen, deren Wert oder Werteverlauf die Daten repräsentieren
- ❑ Einteilung in Klassen nach Eigenschaften:
  - ❑ zeitkontinuierlich oder zeitdiskret
  - ❑ wertkontinuierlich oder wertdiskret
  - ❑ Analogsignal = zeit- und wertkontinuierlich
  - ❑ Digitalsignal = zeit- und wertdiskret
- ❑ Signalparameter periodischer Signale: Periode  $T$ , Frequenz  $f=1/T$ , Amplitude  $A$ , Phasenverschiebung  $\varphi$ 
  - ❑ Sinusförmige Trägerschwingung als spezielles periodisches Signal:

$$s(t) = A_t \sin(2 \pi f_t t + \varphi_t)$$

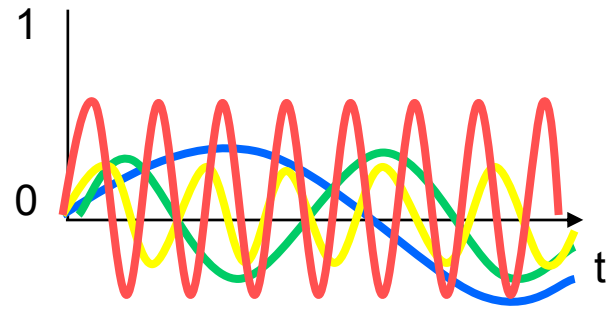


# Fourier-Repräsentation periodischer Signale

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



ideales periodisches Signal

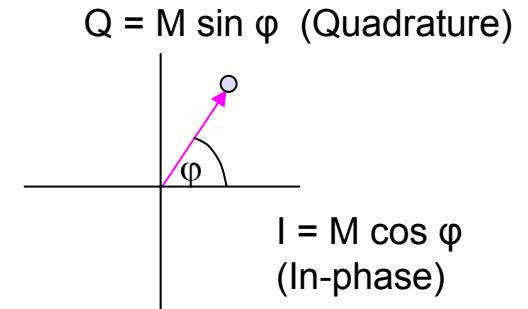
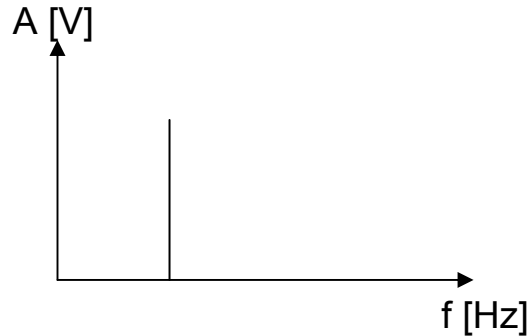
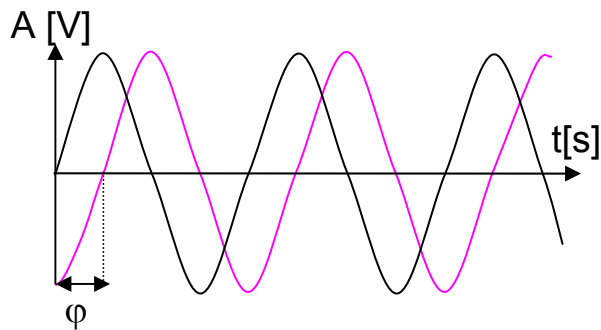


reale Komposition  
(basierend auf  
Harmonischen)



# Signale II

- ❑ Verschiedene Darstellungen eines Signals:
  - ❑ Amplitudenspektrum (Amplitude über Zeit)
  - ❑ Frequenzspektrum (Amplitude oder Phase über Frequenz)
  - ❑ Phasenzustandsdiagramm (Amplitude  $M$  und Phasenwinkel  $\varphi$  werden in Polarkoordinaten aufgetragen)

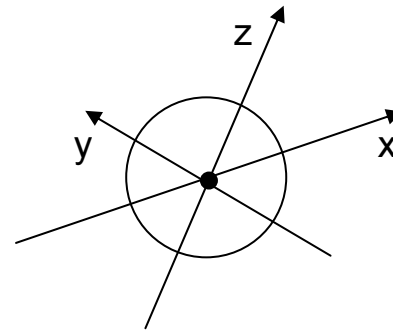
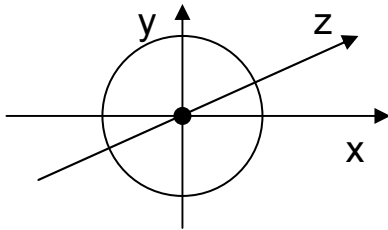


- ❑ Zusammengesetzte Signale mittels Fourier-Transformation in Frequenzkomponenten aufteilbar
- ❑ Digitalsignale besitzen Rechteckflanken
  - ❑ im Frequenzspektrum unendliche Bandbreite
  - ❑ zur Übertragung Modulation auf analoge Trägersignale



# Antennen: isotroper Punktstrahler

- ❑ Abstrahlung und Aufnahme elektromagnetischer Felder
- ❑ Isotroper Punktstrahler strahlt Leistung in alle Richtungen gleichmäßig ab (nur theoretische Bezugsantenne)
- ❑ Reale Antennen haben eine Richtwirkung in Vertikal- und/oder Horizontalebene
- ❑ Veranschaulichung im Richtdiagramm (durch Leistungsmessung rund um die Antenne ermittelt)



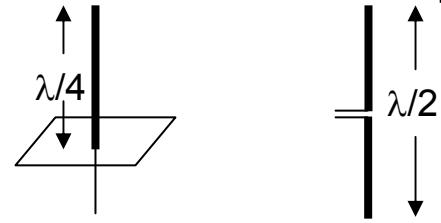
idealer  
isotroper  
Punktstrahler



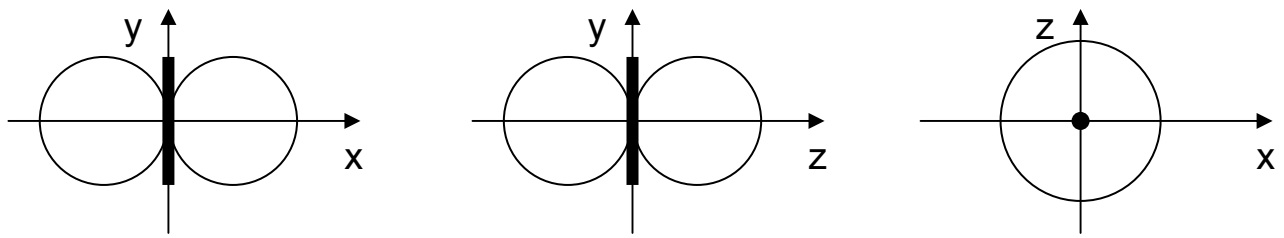


# Antennen: einfache Dipole

- Technische Antennen sind keine isotropen Punktstrahler, aber z.B. Viertelwellenstrahler (auf gut leitendem Grund wie ein Fahrzeugdach) und Halbwellendipole
  - Abmessung einer Antenne ist proportional zur Wellenlänge



- Beispiel: Richtdiagramm eines einfachen Dipols



einfacher Dipol

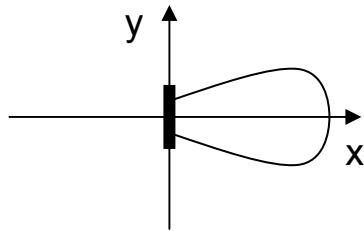
Seitenansicht (xy-Ebene)    Seitenansicht (yz-Ebene)    von oben (xz-Ebene)

- Gewinn: maximale Leistung in Richtung der Hauptstrahlungskeule verglichen mit der Leistung eines isotropen Punktstrahlers (gleiche Durchschnittsleistung)

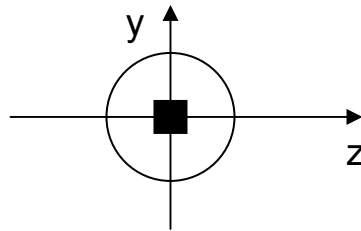


# Antennen: gerichtet und mit Sektoren

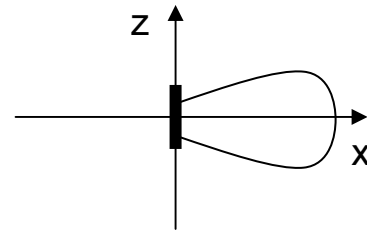
Häufig eingesetzte Antennenarten für direkte Mikrowellenverbindungen und Basisstationen für Mobilfunknetze (z.B. Ausleuchtung von Tälern und Straßenschluchten)



Seitenansicht (xy-Ebene)

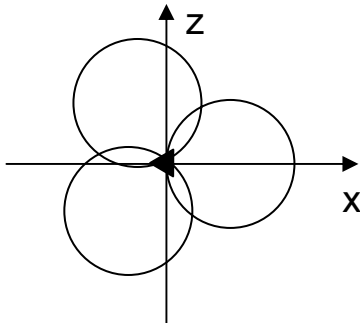


Seitenansicht (yz-Ebene)

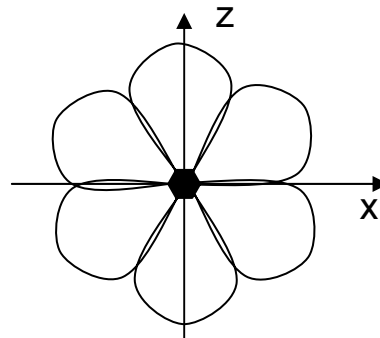


von oben (xz-Ebene)

gerichtete Antenne



von oben, 3 Sektoren



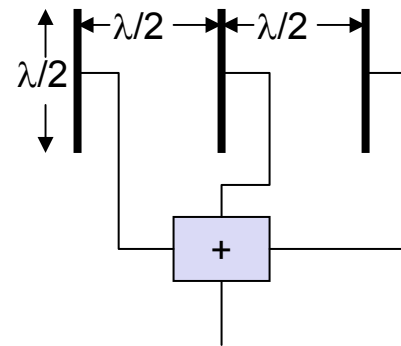
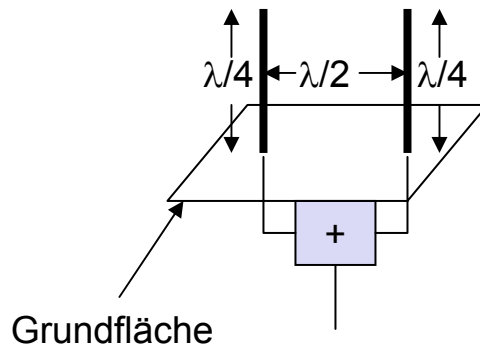
von oben, 6 Sektoren

Sektoren-  
antenne



# Antennen: Diversität

- ❑ Gruppierung von 2 oder mehr Antennen
  - ❑ Antennenfelder mit mehreren Elementen
- ❑ Antennendiversität
  - ❑ Umschaltung/Auswahl
    - Empfänger wählt die Antenne mit dem besten Empfang
  - ❑ Kombination
    - Kombination der Antennen für einen besseren Empfang
    - Phasenanpassung um Auslöschung zu vermeiden



# Signalausbreitungsbereiche

## Übertragungsbereich

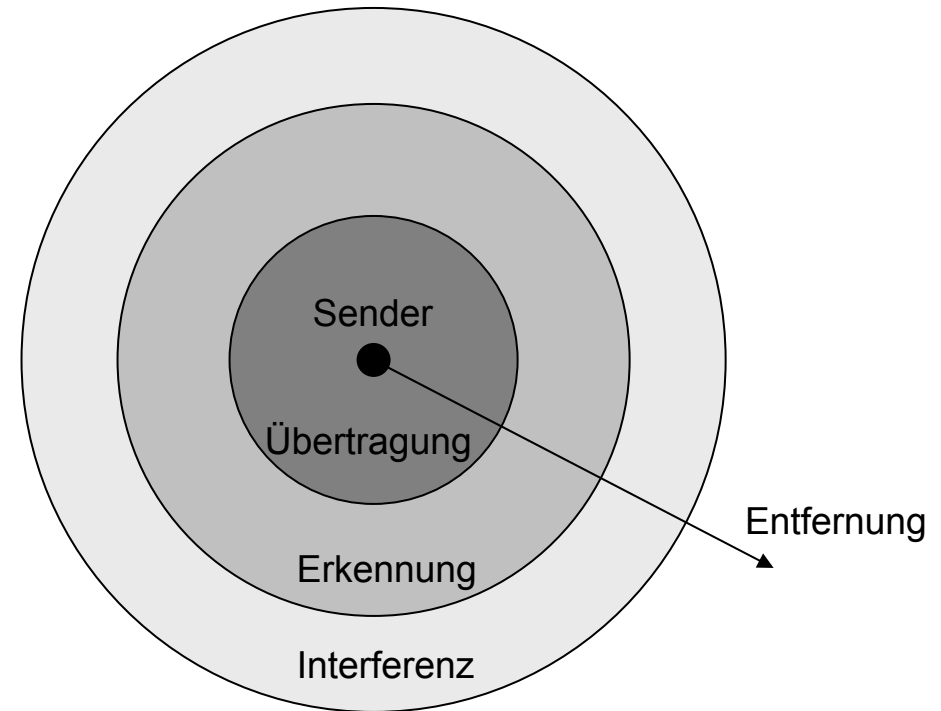
- ❑ Kommunikation möglich
- ❑ niedrige Fehlerrate

## Erkennungsbereich

- ❑ Signalerkennung möglich
- ❑ keine Kommunikation möglich

## Interferenzbereich

- ❑ Signal kann nicht detektiert werden
- ❑ Signal trägt zum Hintergrundrauschen bei

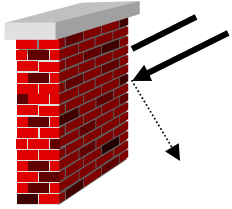


# Signalausbreitung

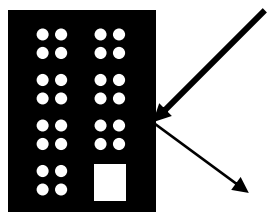
Ausbreitung im freien Raum grundsätzlich geradlinig (wie Licht)  
Empfangsleistung nimmt im Vakuum mit  $1/d^2$  ab – in realer Umgebung dramatischer (d = Entfernung zwischen Sender und Empfänger)

Empfangsleistung wird außerdem u.a. beeinflusst durch

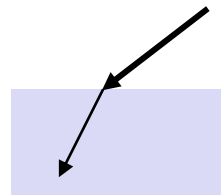
- ❑ Freiraumdämpfung (frequenzabhängig)
- ❑ Abschattung durch Hindernisse
- ❑ Reflexion (Spiegelung) an großen Flächen
- ❑ Refraktion (Brechung) in Abhängigkeit der Dichte eines Mediums
- ❑ Streuung (scattering) an kleinen Hindernissen
- ❑ Beugung (diffraction) an scharfen Kanten



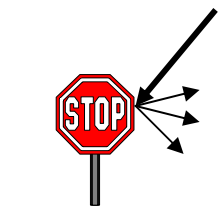
Abschattung



Reflexion



Refraktion



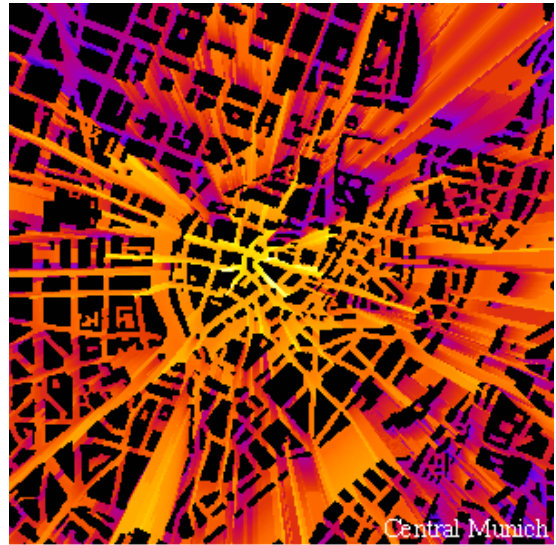
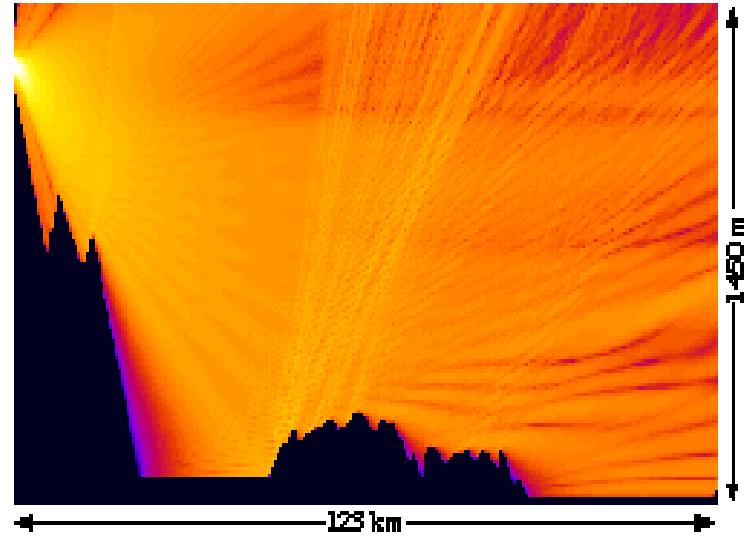
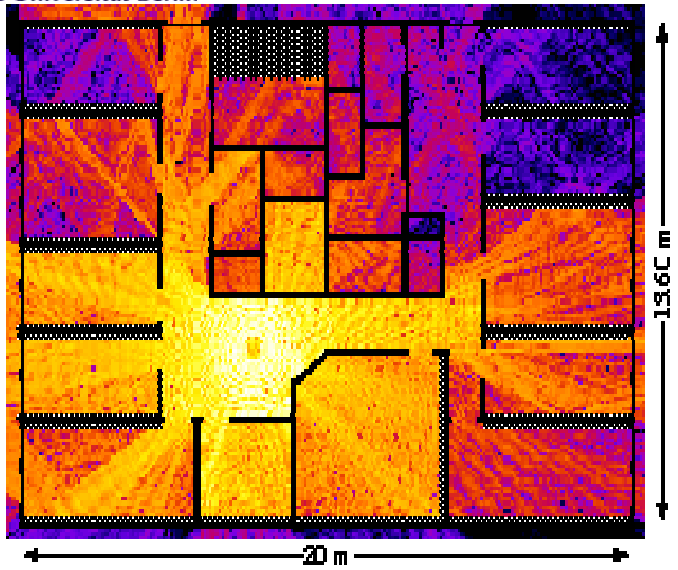
Streuung



Beugung

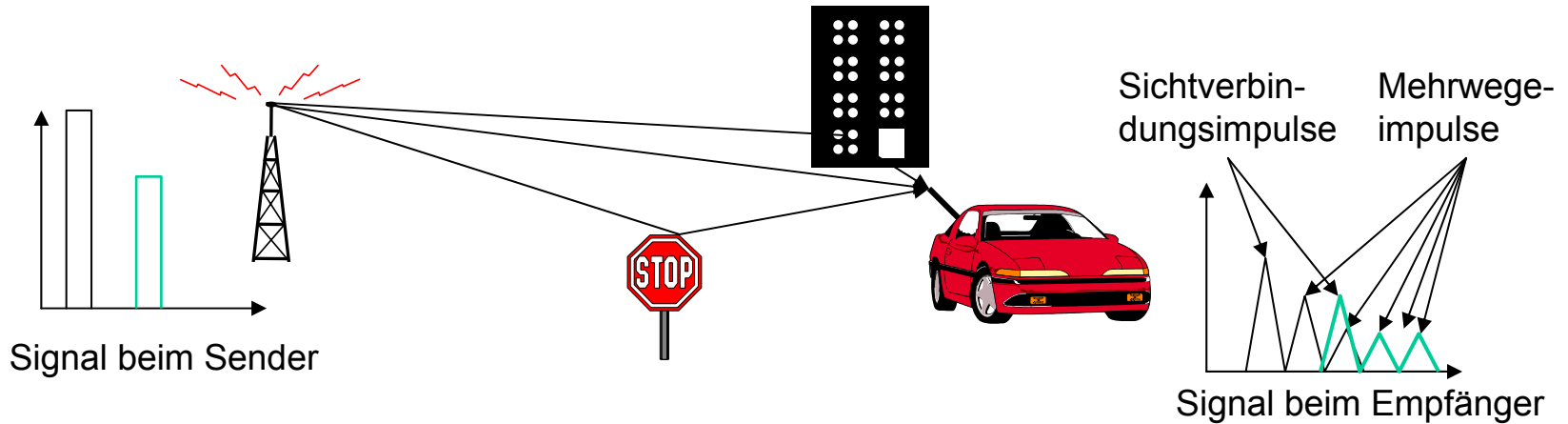


# Praxisbeispiele



# Mehrwegeausbreitung

Signal kommt aufgrund von Reflexion, Streuung und Beugung auf mehreren Wegen beim Empfänger an



Signal wird zeitlich gestreut (time dispersion)

→ Interferenz mit Nachbarsymbolen

Direkte und phasenverschobene Signalanteile werden empfangen

→ je nach Phasenlage abgeschwächtes Signal



# Auswirkungen der Mobilität

Übertragungskanal ändert sich mit dem Ort der Mobilstation und der Zeit

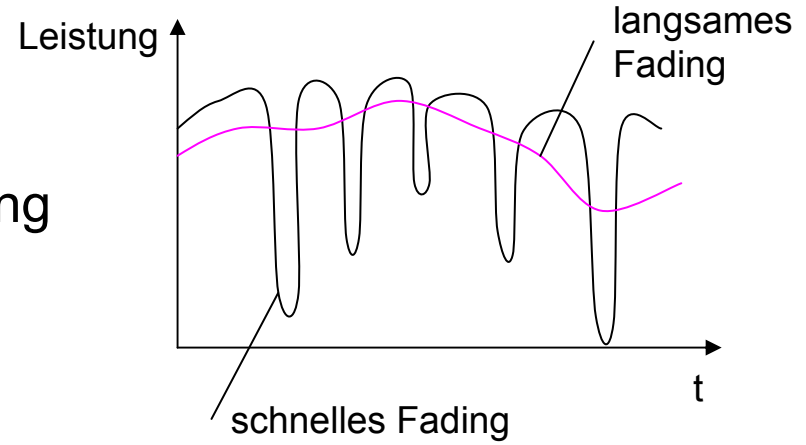
- ❑ Übertragungswege ändern sich
- ❑ unterschiedliche Verzögerungsbreite der Einzelsignale
- ❑ unterschiedliche Phasenlage der Signalanteile

➔ kurzzeitige Einbrüche in der Empfangsleistung (schnelles Fading)

Zusätzlich ändern sich

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

➔ langsame Veränderungen in der (durchschnittlichen) Empfangsleistung (langsames Fading)





# Multiplexen

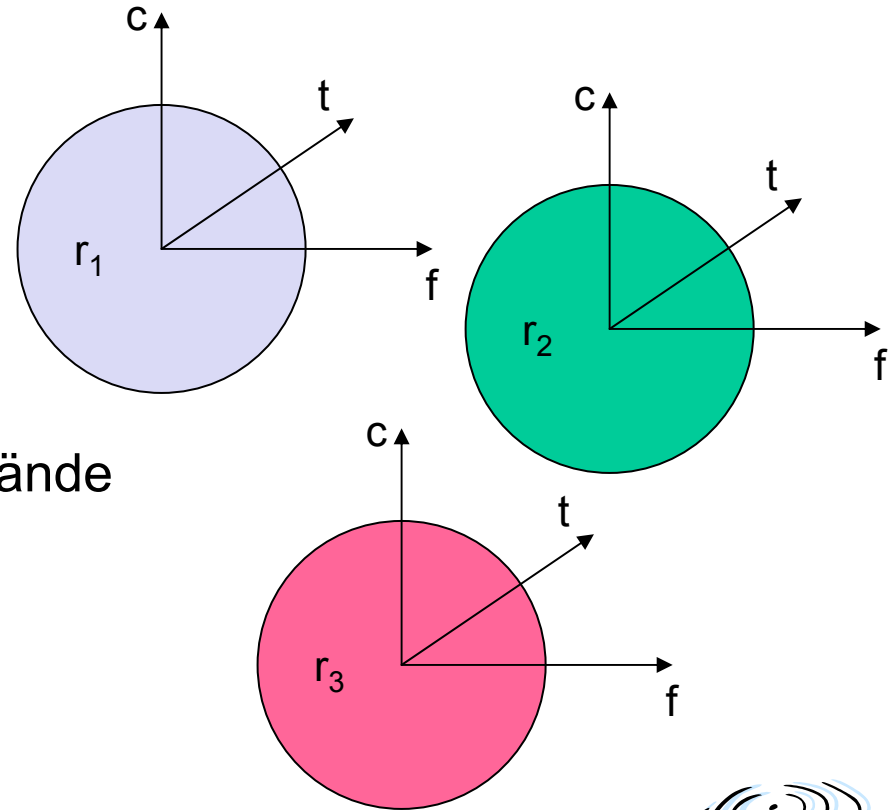
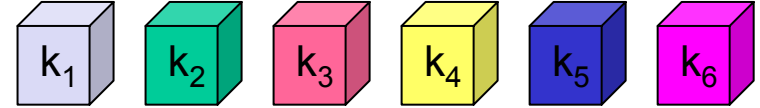
## Multiplexen in 4 Dimensionen:

- ❑ Raum ( $r_i$ )
- ❑ Zeit ( $t$ )
- ❑ Frequenz ( $f$ )
- ❑ Code ( $c$ )

Ziel: Mehrfachnutzung des gemeinsamen Mediums

Wichtig: Genügend große Schutzabstände nötig!

Kanäle  $k_i$



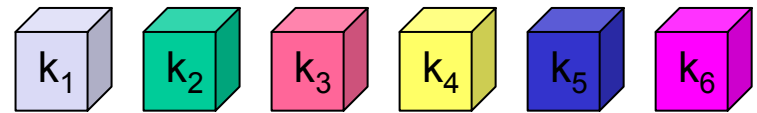
# Frequenzmultiplex

Gesamte verfügbare Bandbreite wird in einzelne Frequenzabschnitte aufgeteilt

Übertragungskanal belegt Frequenzabschnitt über gesamten Zeitraum

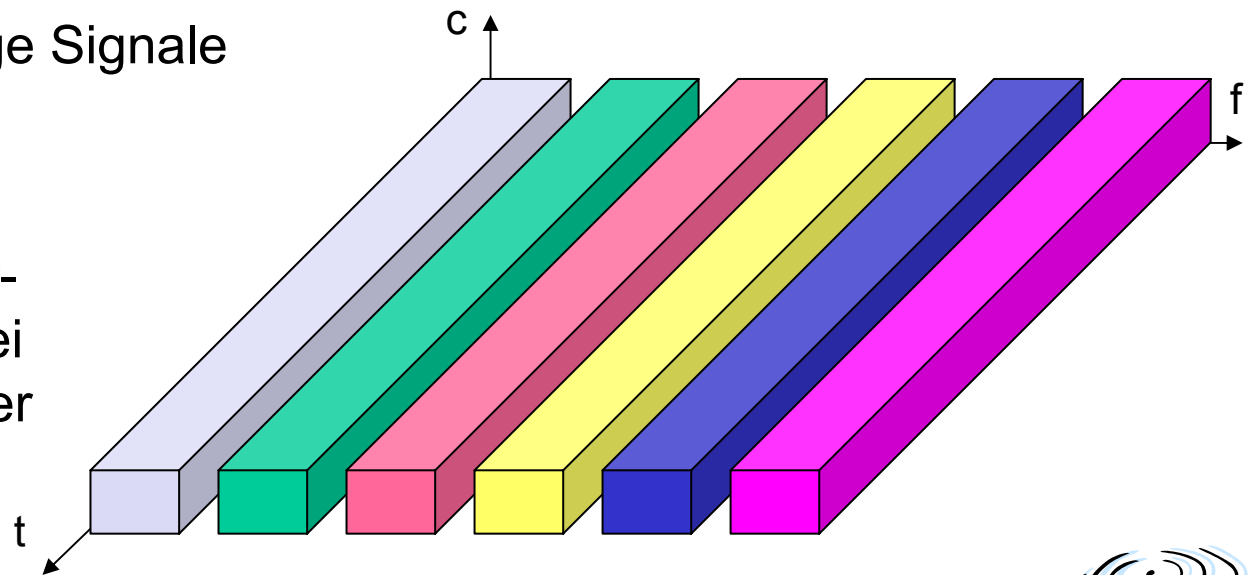
Vorteile:

- keine dynamische Koordination nötig
- auch für analoge Signale



Nachteile:

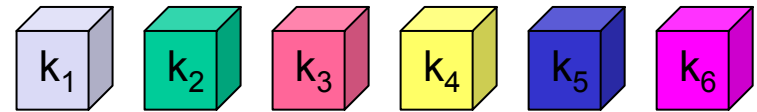
- Bandbreitenverschwendung bei ungleichmäßiger Belastung
- unflexibel



Kanal belegt gesamten Frequenzraum für einen gewissen Zeitabschnitt

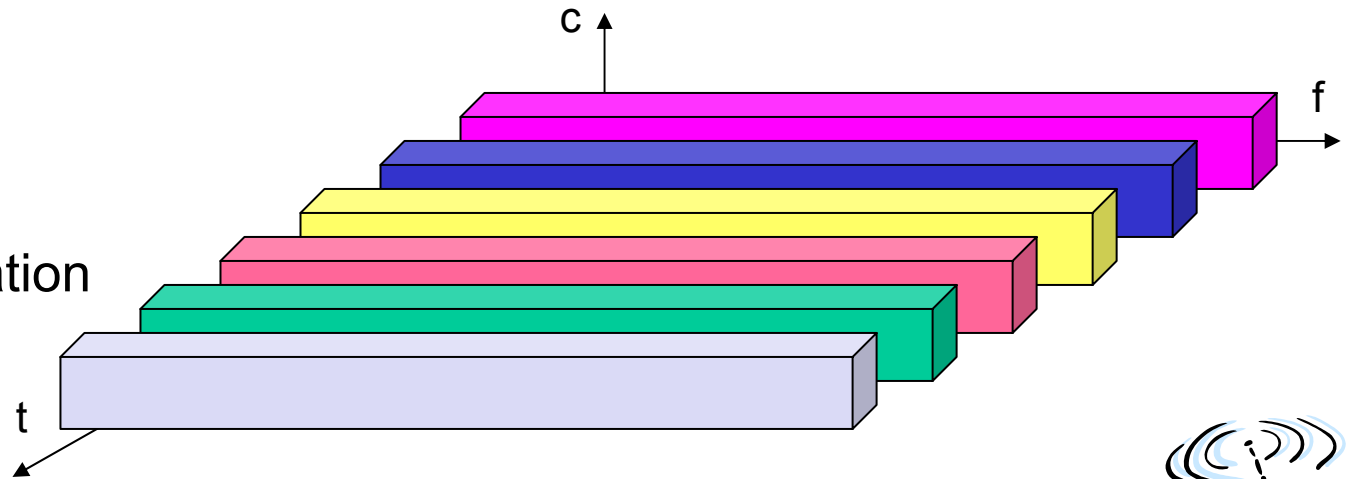
Vorteile:

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



Nachteile:

- genaue Synchronisation nötig



# Zeit- und Frequenzmultiplex

Kombination der oben genannten Verfahren

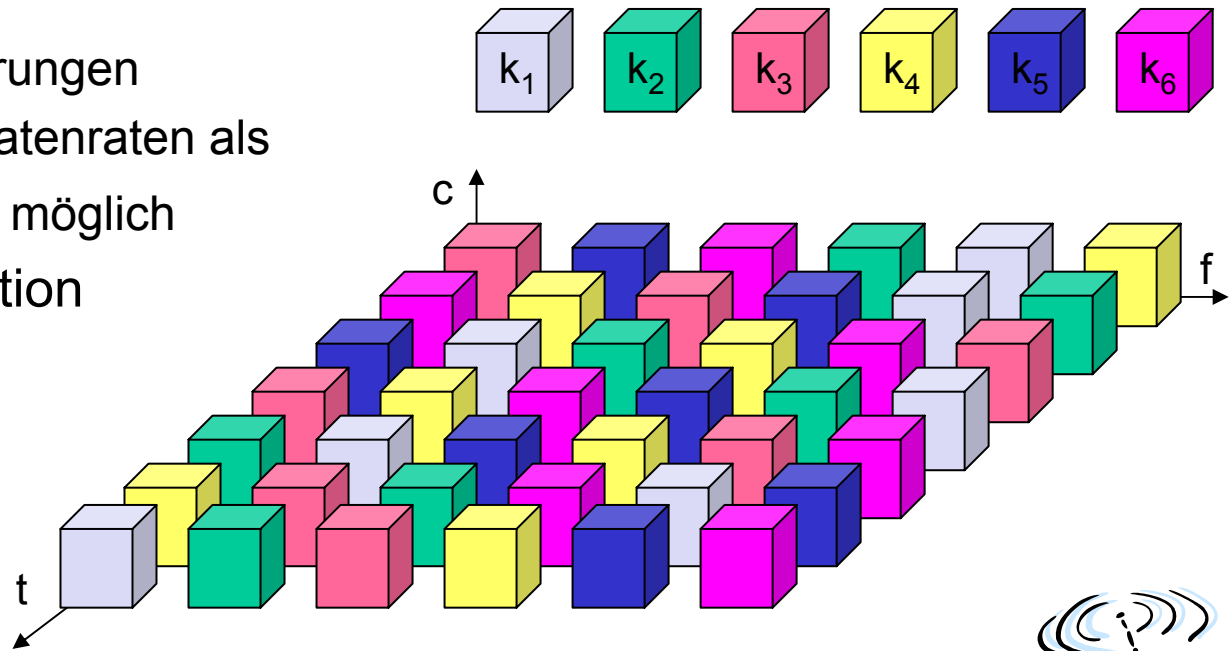
Sendungen belegen einen Frequenzabschnitt für einen Zeitabschnitt

Beispiel: GSM

Vorteile:

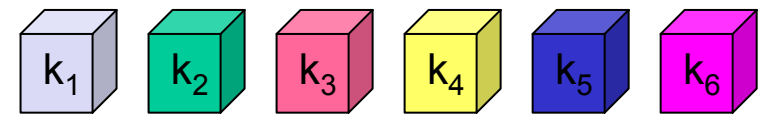
- ❑ relativ abhörsicher
- ❑ Schutz gegen Störungen
- ❑ höhere Benutzerdatenraten als  
bei Codemultiplex möglich

aber: genaue Koordination  
erforderlich



# Codemultiplex

Sendung ist durch persönlichen Code charakterisiert



Alle Teilnehmer können zur selben Zeit im selben Frequenzabschnitt senden

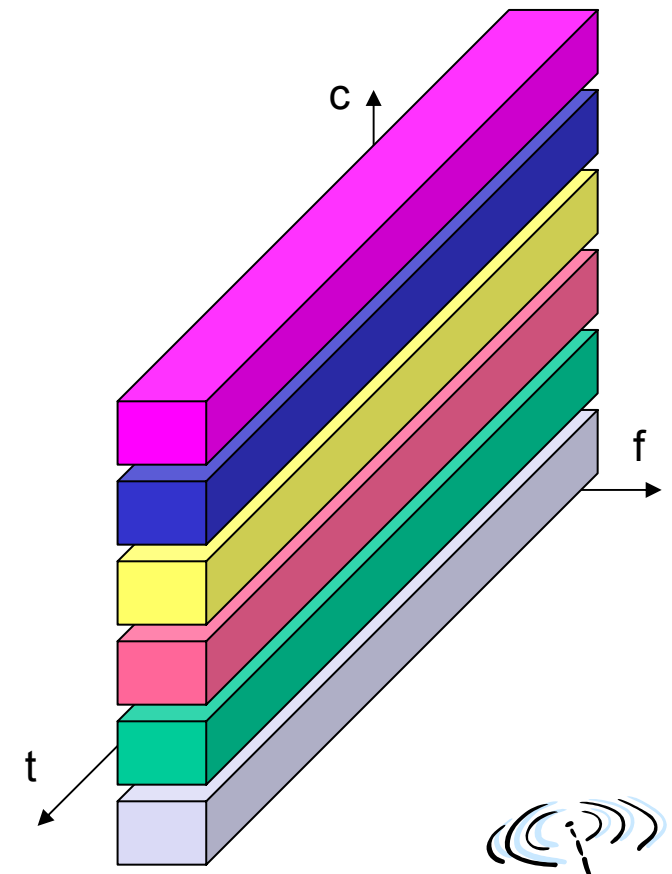
Vorteile:

- Bandbreiteneffizienz
- keine Koordination und Synchronisation notwendig
- Schutz gegen Störungen

Nachteile:

- Benutzerdatenrate begrenzt
- komplex wegen Signalregenerierung

Realisierung: Spreizspektrumtechnik



# Modulation

## Digitale Modulation

- ❑ digitale Daten werden in eine analoges (Basisband-) Signal umgesetzt
- ❑ ASK, FSK, PSK - hier der Schwerpunkt
- ❑ Unterschiede in Effizienz und Robustheit

## Analoge Modulation

- ❑ verschieben des Basisbandsignals auf die Trägerfrequenz

## Motivation

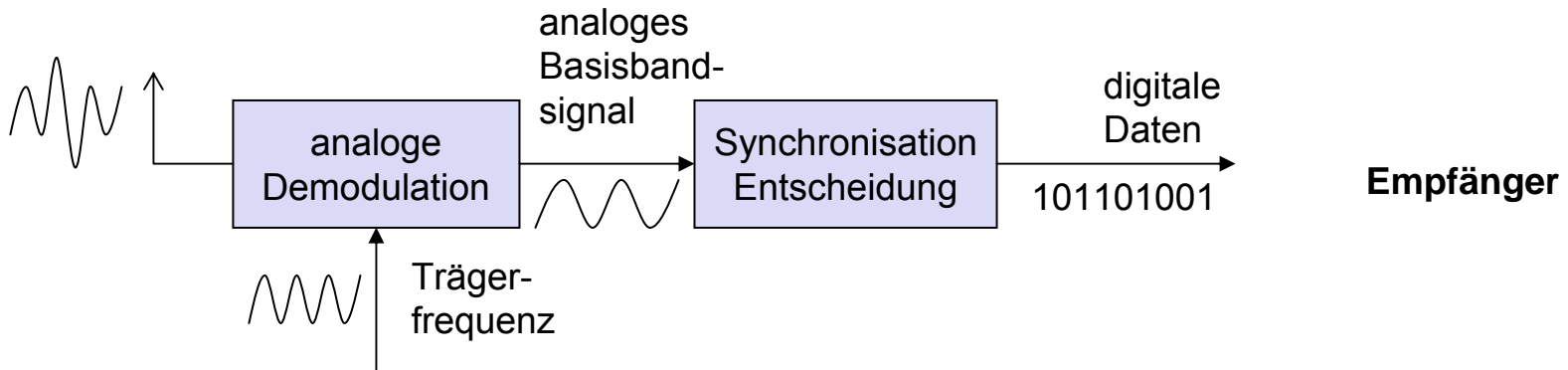
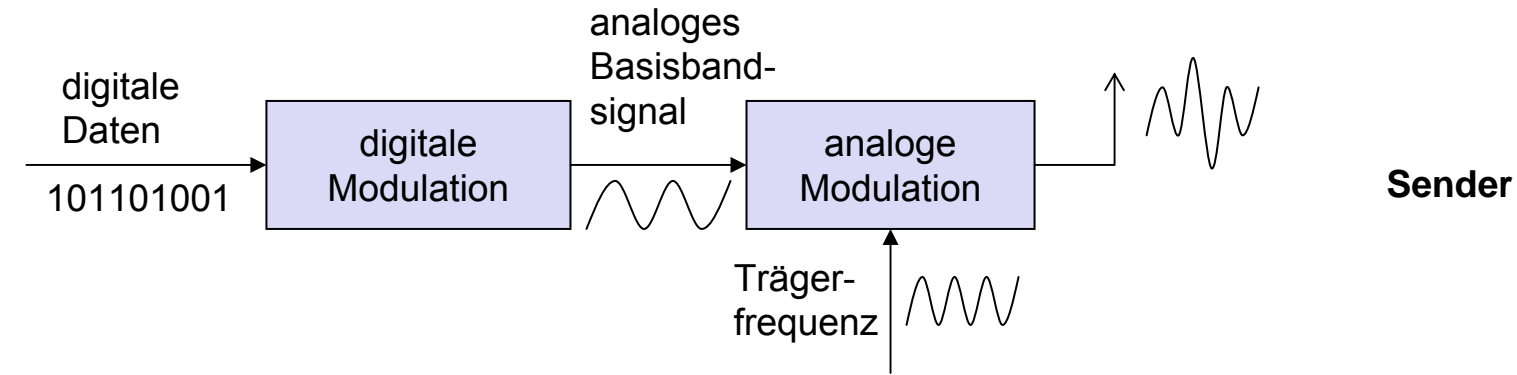
- ❑ kleinere Antennen (z.B.  $\lambda/4$ )
- ❑ Frequenzmultiplex
- ❑ Mediencharakteristika

## Varianten

- ❑ Amplitudenmodulation (AM)
- ❑ Frequenzmodulation (FM)
- ❑ Phasenmodulation (PM)

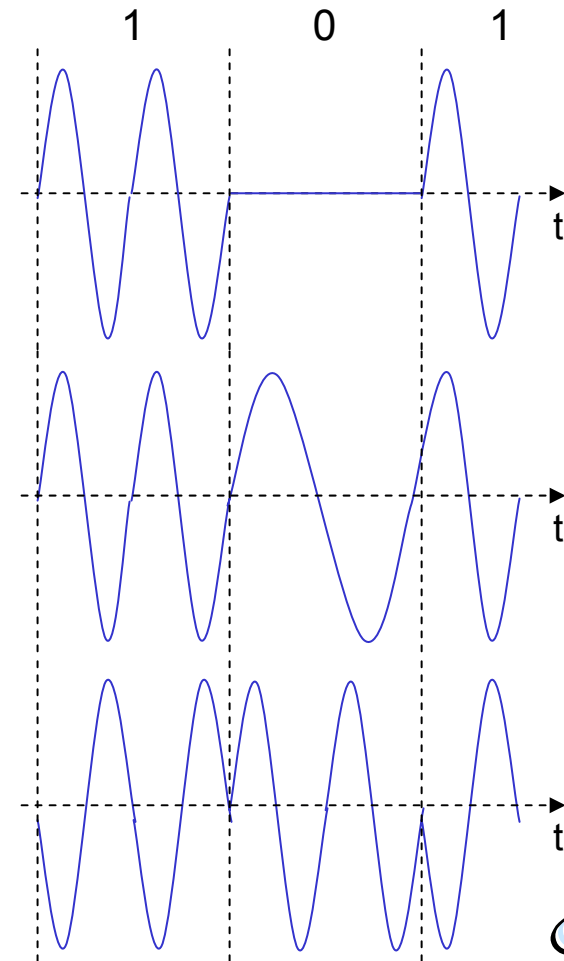


# Modulation und Demodulation



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
  
- ❑ Phasenmodulation (PSK):
  - ❑ komplexe Demodulation mit Trägerrückgewinnung
  - ❑ relativ störungssicher



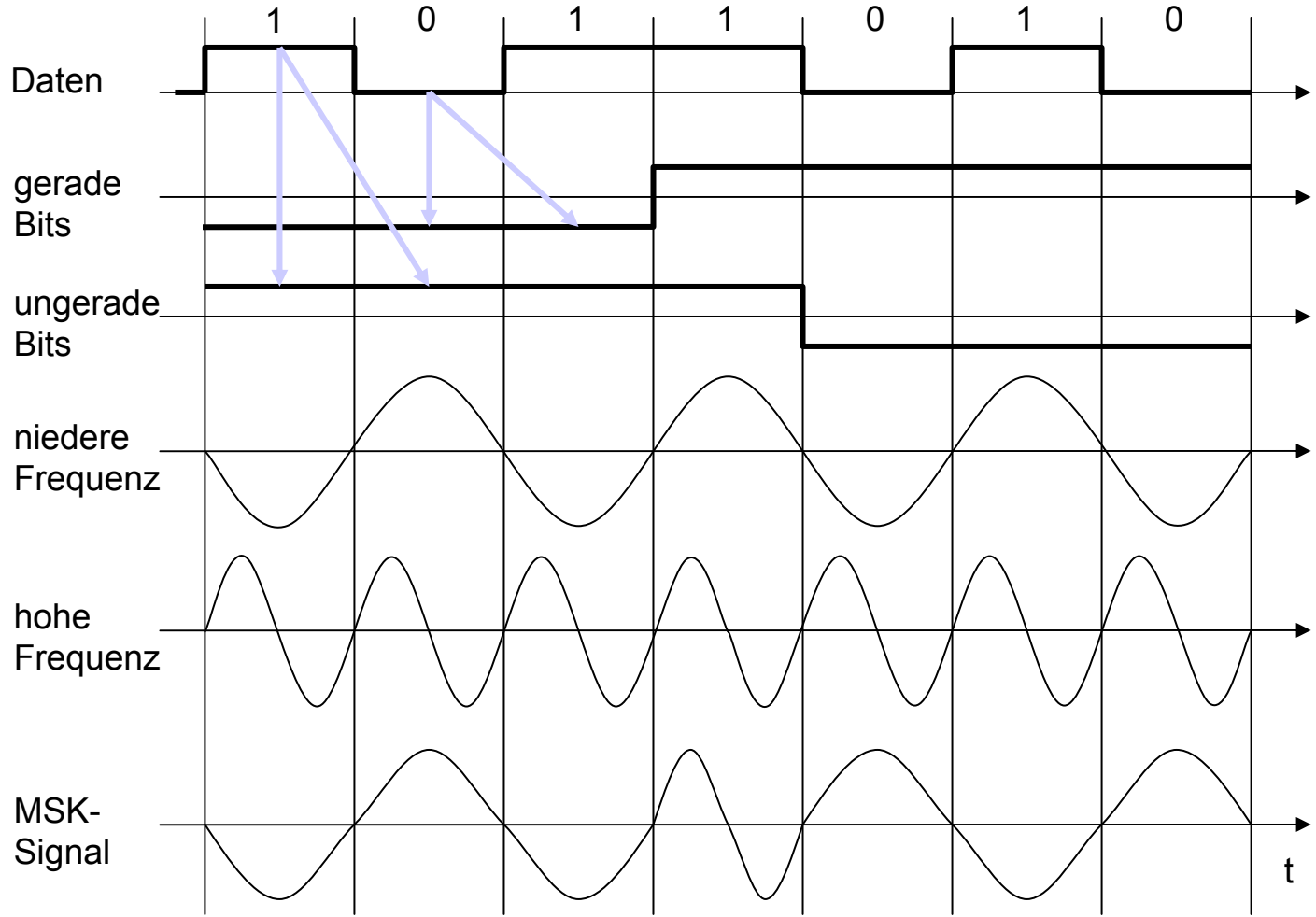


# Fortgeschrittene FSK-Verfahren

- ❑ Bei FSK-Verfahren Bandbreite vom Abstand der Trägerfrequenzen abhängig
- ❑ Durch Vorverarbeitung und spezielle Demodulation kann der Abstand bis auf den halben Wert der Bitrate verringert werden
  - ➔ MSK-Verfahren (Minimum Shift Keying)
- ❑ Bits werden auf zwei Kanäle aufgeteilt, die Bitdauer wird dabei verdoppelt
- ❑ Anhand der Bitwerte der beiden Kanäle werden die beiden Trägerfrequenzen mit ihrer Ausrichtung zugeordnet
- ❑ Höhere Trägerfrequenz führt während eines Bits eine halbe Schwingung mehr aus
- ❑ Äquivalent zu Offset-QPSK
- ❑ Weitere Bandbreiteneffizienz durch Gauß-Tiefpassfilter vor Modulator
  - ➔ GMSK (Gaussian MSK), z.B. bei GSM, DECT eingesetzt



# Beispiel für MSK als Modulationstechnik



Bit	
gerade	0 1 0 1
ungerade	0 0 1 1
Signalwert	h n n h - - + +

h: hohe bzw.  
 n: niedere Frequenz  
 +: positive bzw.  
 -: negative Ausrichtung

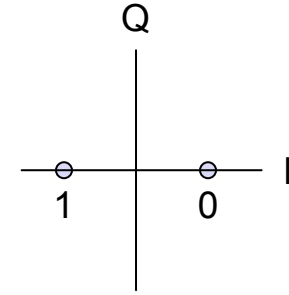
Keine Phasensprünge!



# Fortgeschrittene PSK-Verfahren

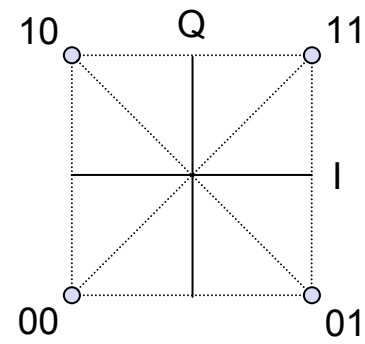
## BPSK (Binary Phase Shift Keying):

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



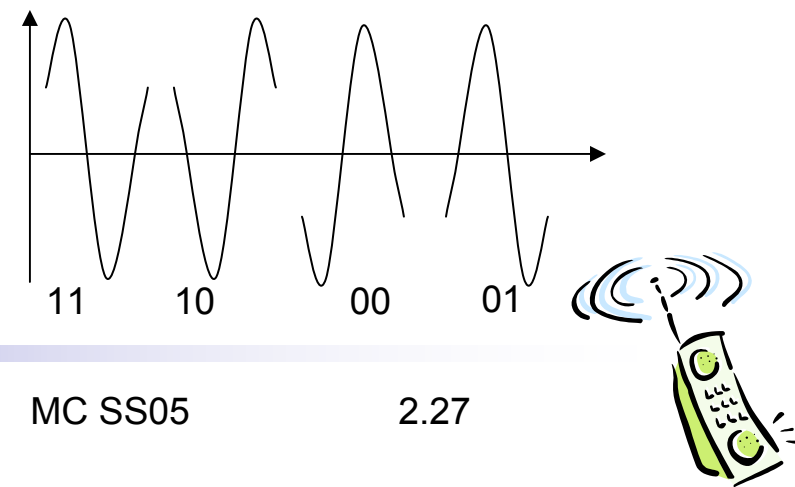
## QPSK (Quaternary Phase Shift Keying):

- ❑ 2 Bits werden in ein Symbol kodiert
- ❑ Symbol entspricht phasenverschobenem Sinussignal
- ❑ weniger Bandbreite als bei BPSK benötigt
- ❑ komplexer



Oft Übertragung der relativen Phasenverschiebung (weniger Bitfehler)

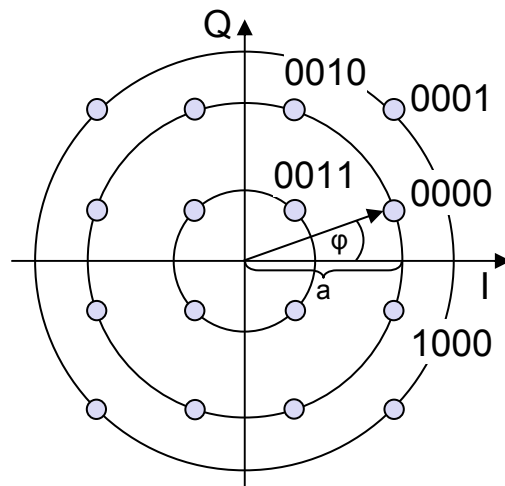
- ❑ DQPSK in z.B. IS-136, PHS



# Quadraturamplitudenmodulation

Quadraturamplitudenmodulation: 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)

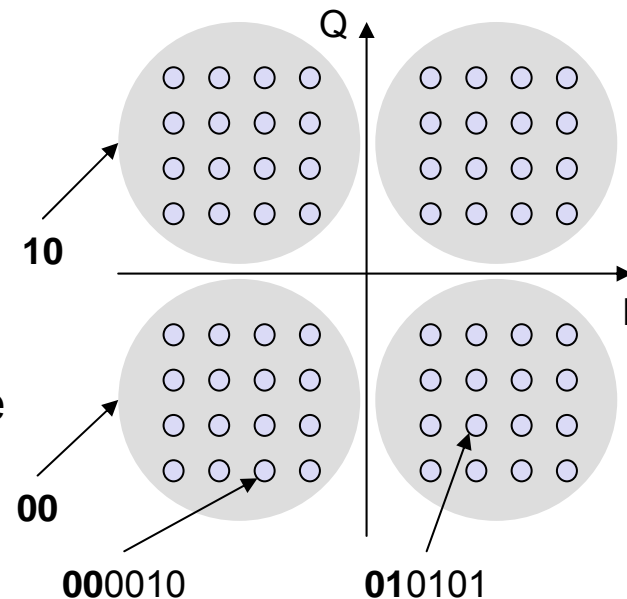
Die Symbole 0011 und 0001 haben gleiche Phase und unterschiedliche Amplitude. 0000 und 1000 haben unterschiedliche Phase und gleiche Amplitude.



# Hierarchische Modulation

DVB-T moduliert zwei separate Datenströme auf einen einzelnen DVB-T-Strom

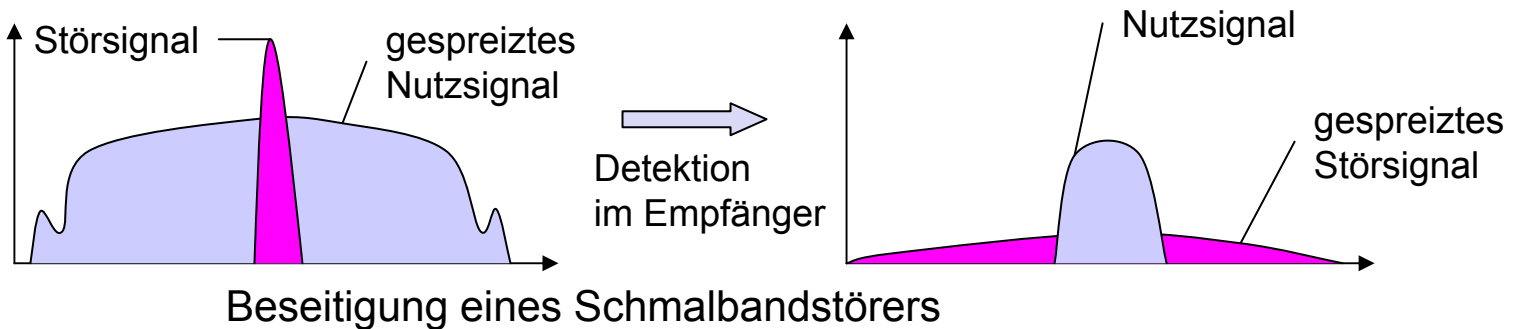
- ❑ Datenstrom hoher Priorität (HP) eingebettet in einen mit niedriger Priorität (LP)
- ❑ Mehrfachträgersystem, etwa 2000 oder 8000 Träger
- ❑ QPSK, 16 QAM, 64QAM
- ❑ Beispiel: 64QAM
  - ❑ Guter Empfang: Nutzung der 64QAM-Konstellation
  - ❑ Schlechter Empfang (z.B. mobil): Nutzung nur des QPSK-Teils
  - ❑ 6 bit pro QAM-Symbol, 2 höchstwertige bestimmen QPSK
  - ❑ HP-Dienst kodiert in QPSK (2 bit), LP nutzt verbleibende 4 bit



# Spreadspektrumtechnik

Problem bei Funkübertragung: frequenzabhängiges Fading löscht schmalbandige Signale für gewissen Zeitbereich aus

Lösung: Signal mittels Codefolge auf breiteren Frequenzbereich spreizen  
Schutz gegen schmalbandige Auslöschungen und Störungen



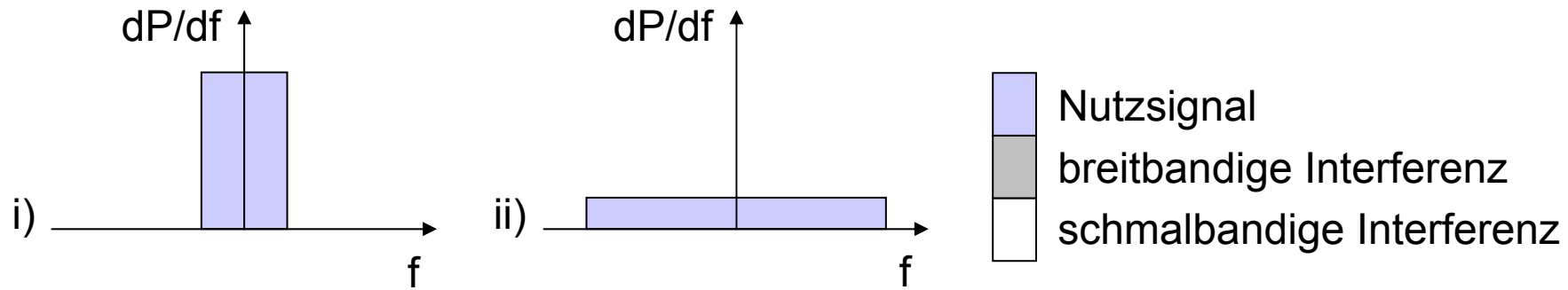
Nebeneffekte:

- ❑ Koexistenz mehrerer Nutzsignale ohne dynamische Koordination
- ❑ Abhörsicherheit

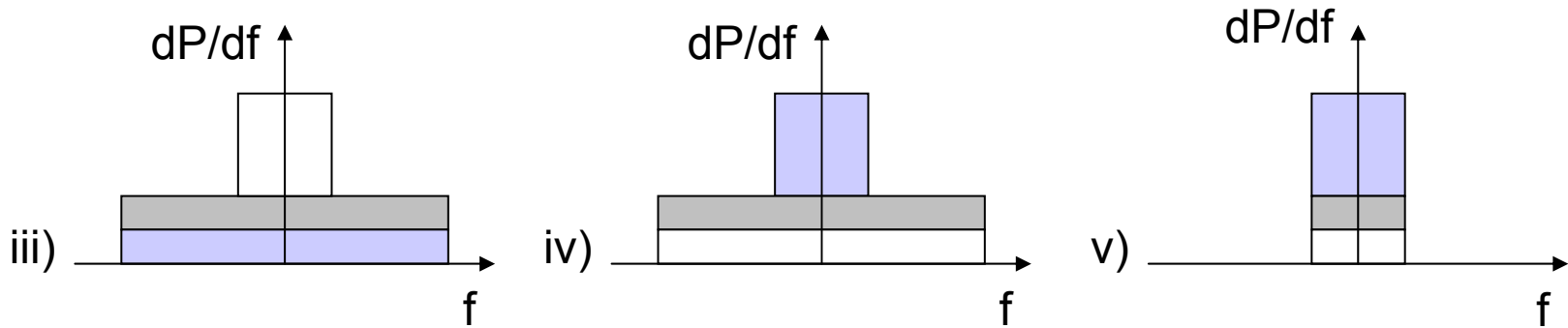
Alternativen: Direct Sequence, Frequency Hopping



# Auswirkungen von Spreizen und Interferenz



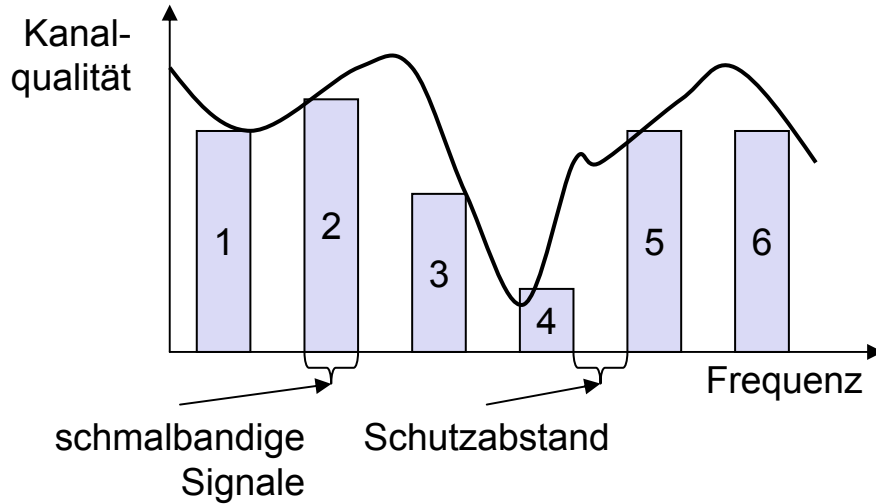
Sender



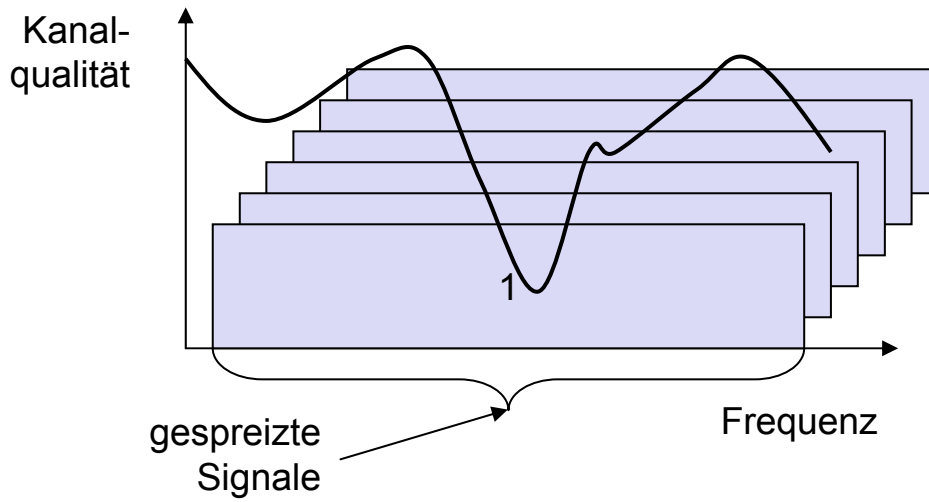
Empfänger



# Spreizen und frequenzselektives Fading



schmalbandige Kanäle



gespreizte Kanäle





# DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) I

XOR des Signals mit einer Pseudozufallszahl (chipping sequence)

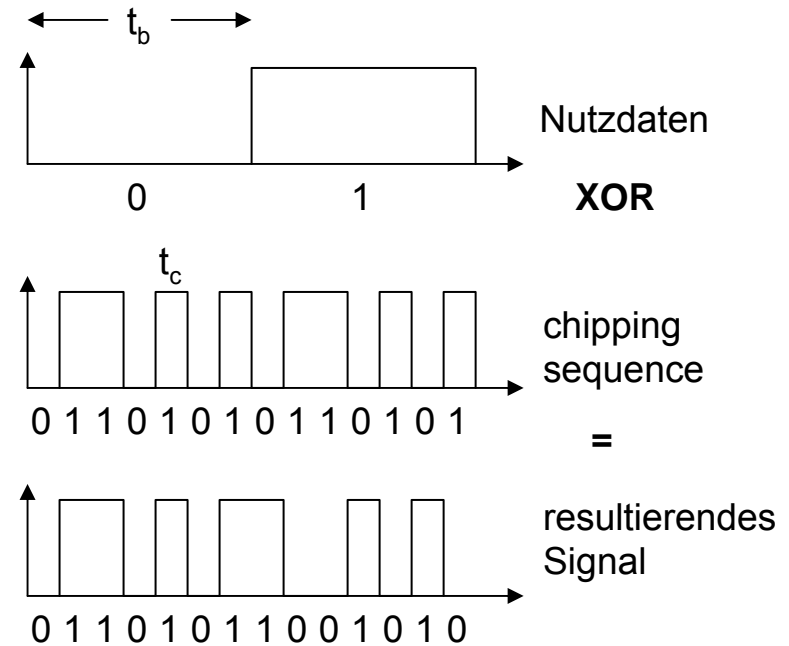
- ❑ viele chips pro Bit (z.B. 128) resultiert in einer höheren Bandbreite des Signals

## Vorteile

- ❑ reduziertes frequenz-abhängiges Fading
- ❑ in zellularen Netzen
  - Basisstationen können den gleichen Frequenzbereich nutzen
  - mehrere Basisstationen können das Signal erkennen und rekonstruieren
  - weiche handover

## Nachteile

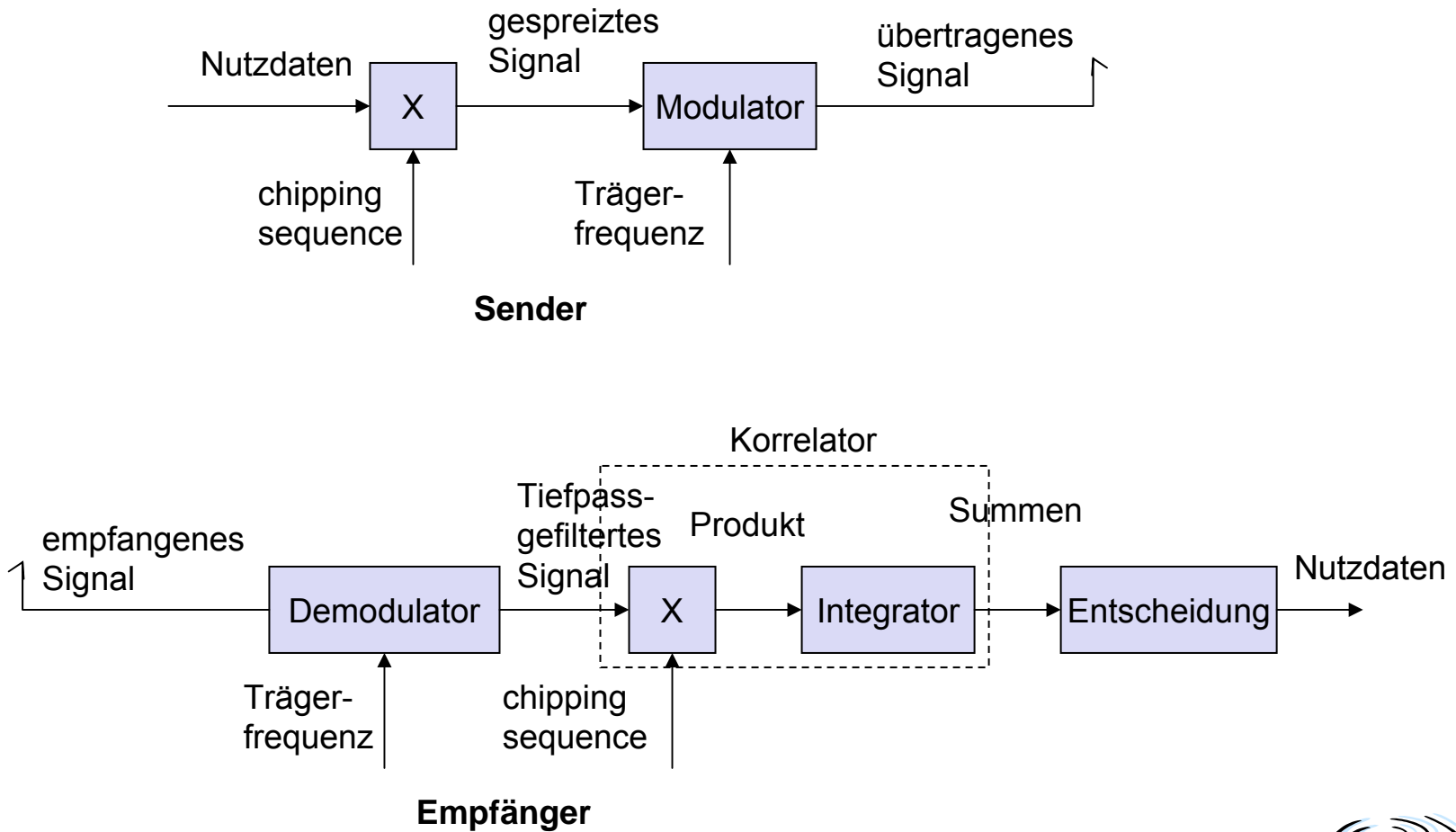
- ❑ exakte Leistungssteuerung notwendig



$t_b$ : Bitdauer  
 $t_c$ : chip Dauer



# DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) II



# FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) I

## Diskrete Wechsel der Trägerfrequenz

- ❑ Sequenz der Frequenzwechsel wird durch Pseudozufallszahlen bestimmt

## Zwei Versionen

- ❑ schneller Wechsel (fast hopping)  
mehrere Frequenzen pro Nutzdatenbit
- ❑ langsamer Wechsel (slow hopping)  
mehrere Nutzdatenbits pro Frequenz

## Vorteile

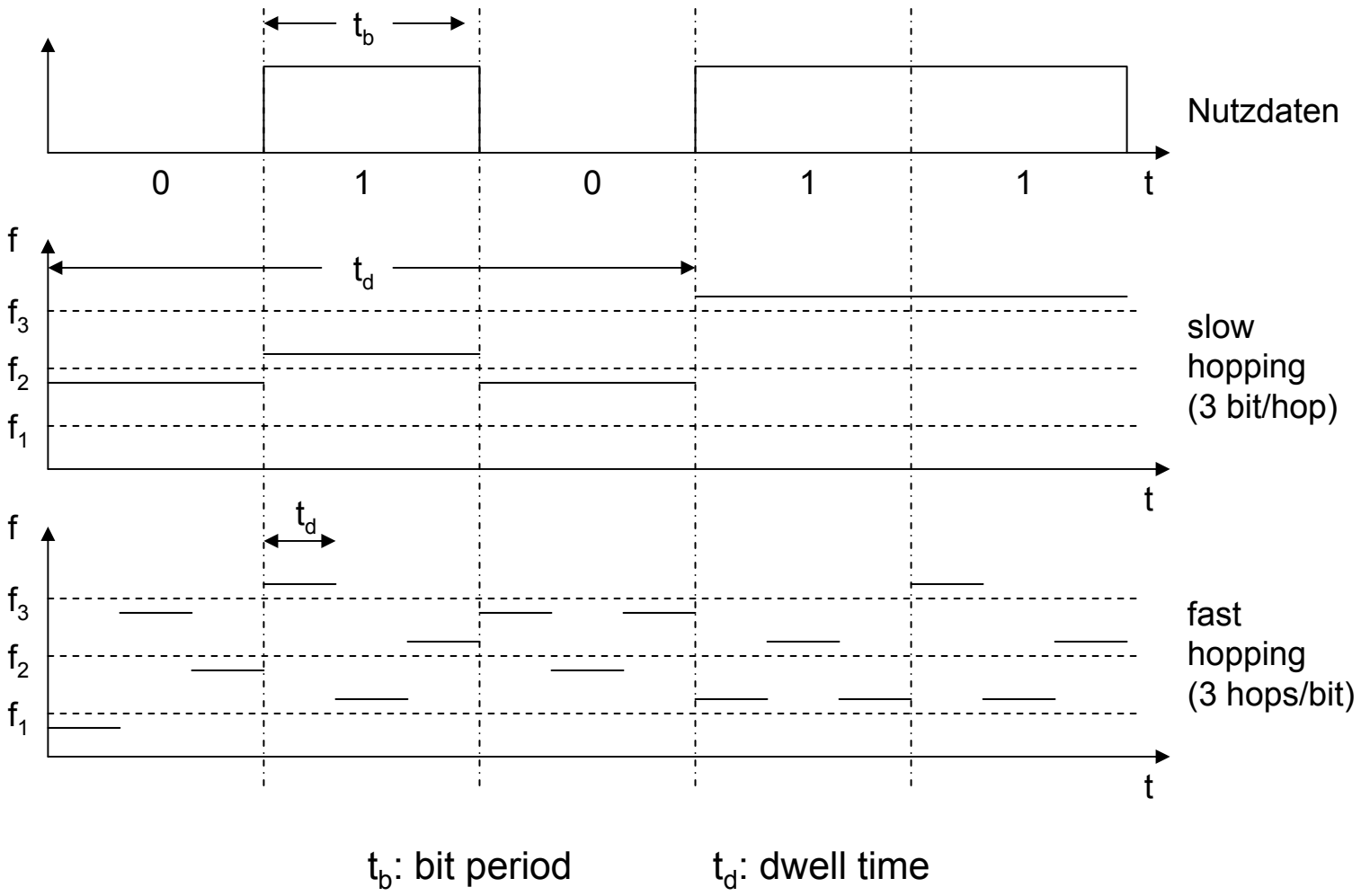
- ❑ frequenzselektives Fading und Interferenz auf kurze Perioden begrenzt
- ❑ einfache Implementierung
- ❑ nutzt nur schmalen Bereich des Spektrums zu einem Zeitpunkt

## Nachteile

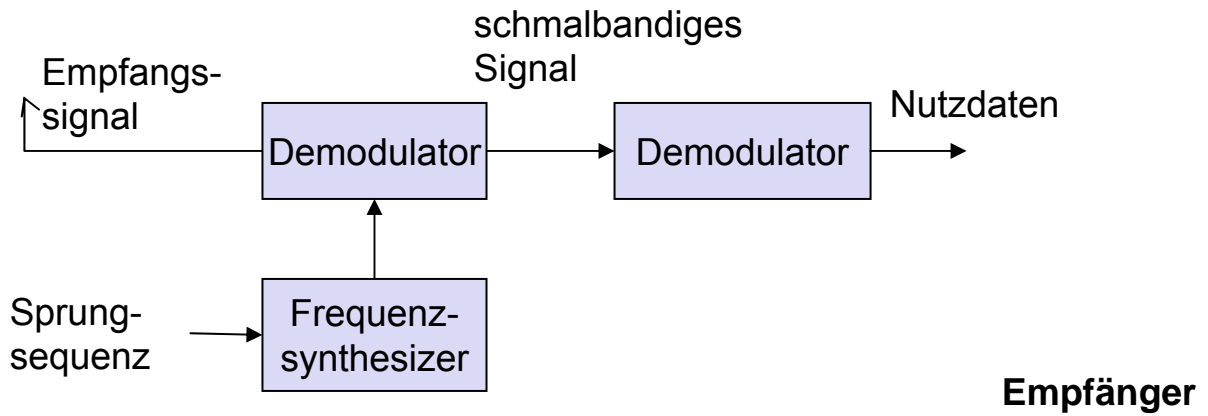
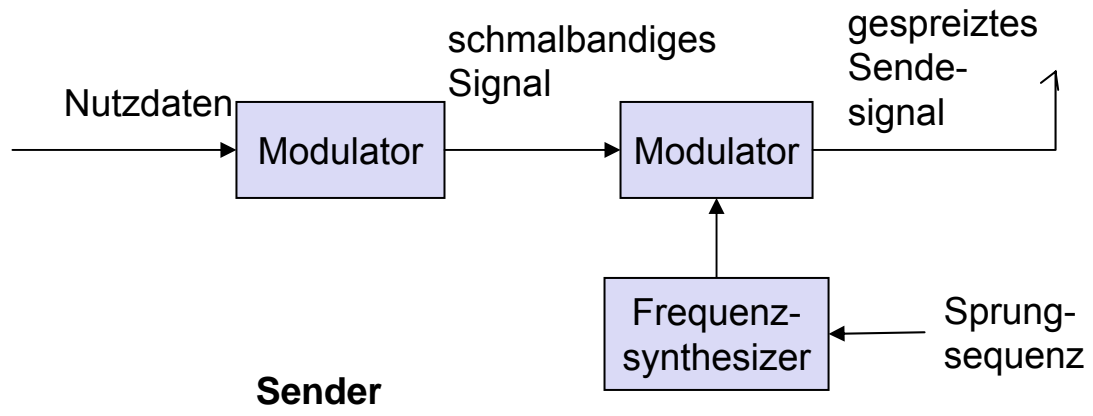
- ❑ nicht so robust wie DSSS
- ❑ einfacher abzuhören



# FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) II



# FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) III



# Zellenstruktur

Realisierung des Raummultiplex: Basisstationen decken jeweils gewissen räumlichen Bereich (Zelle) ab

Mobilstationen kommunizieren ausschließlich über Basisstationen

Vorteile der Zellenstruktur:

- ❑ mehr Kapazität, mehr Teilnehmer erreichbar
- ❑ weniger Sendeleistung notwendig
- ❑ robuster gegen Ausfälle
- ❑ überschaubarere Ausbreitungsbedingungen

Probleme:

- ❑ Netzwerk zum Verbinden der Basisstationen
- ❑ Handover (Übergang zwischen zwei Zellen) notwendig
- ❑ Störungen in andere Zellen
- ❑ Konzentration in bestimmten Bereichen

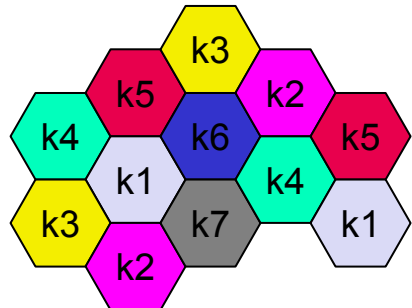
Zellengröße von z.B 100 m (Stadt) bis 35 km (ländliches Gebiet)  
bei GSM (auch kleiner bei höheren Frequenzen)



# Frequenzplanung I

Frequenzen können nur bei genügend großem Abstand der Zellen bzw. der Basisstationen wiederverwendet werden

Modell mit 7 Frequenzbereichen:



Feste Kanalzuordnung:

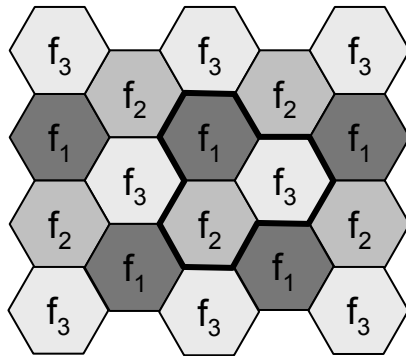
- ❑ bestimmte Menge von Kanälen fest gewisser Zelle zugeordnet
- ❑ Problem: Wechsel in Belastung der Zellen

Dynamische Kanalzuordnung:

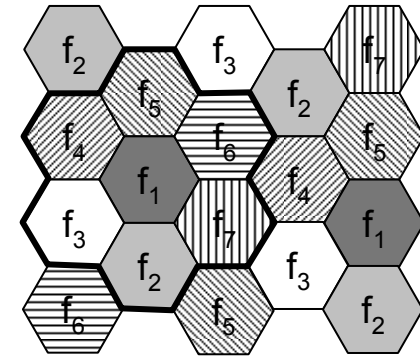
- ❑ Kanäle einer Zelle werden nach bereits zugeordneten Kanälen der benachbarten Zellen gewählt
- ❑ mehr Kapazität in Gebieten mit höherer Nachfrage
- ❑ auch Zuordnung aufgrund von Interferenzmessungen möglich



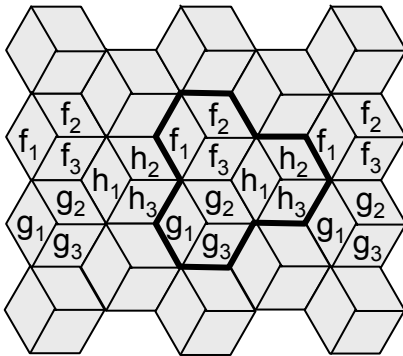
# Frequenzplanung II



3 Zellen/Cluster



7 Zellen/Cluster



3 Zellen/Cluster plus  
3 Sektoren/Zelle





# Zellatmung

CDM-Systeme: Zellgröße hängt unter anderem von der aktuellen Last ab  
Zusätzlicher Verkehr wirkt sich wie zusätzliches Rauschen auf andere Nutzer aus

Wenn das Rauschen zu stark wird fällt ein Nutzer aus der Zelle heraus

