

# Systeme II

## 2. Die physikalische Schicht

Christian Schindelhauer

Technische Fakultät

Rechnernetze und Telematik

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Version 26.04.2017

## ■ ISO-Definition

- Die Bitübertragungsschicht definiert
  - mechanische
  - elektrische
  - funktionale und
  - prozedurale
- Eigenschaften um eine physikalische Verbindung
  - aufzubauen,
  - aufrecht zu erhalten und
  - zu beenden.

# Signale, Daten und Information

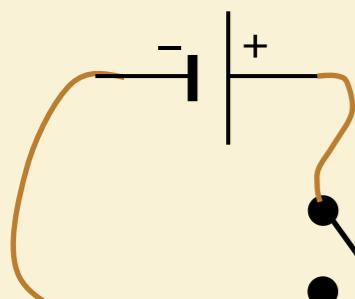
- **Information**
  - Menschliche Interpretation,
    - z.B. schönes Wetter
- **Daten**
  - Formale Präsentation,
    - z.B. 8 Grad Celsius, Niederschlagsmenge 0cm, Wolkenbedeckung 40%
- **Signal**
  - Repräsentation von Daten durch physikalische Variablen,
    - z.B. Stromfluss durch Thermosensor, Videosignale aus Kamera
  - Beispiele für Signale:
    - Strom, Spannung
  - In der digitalen Welt repräsentieren Signale Bits

- Leitungsgebundene Übertragungsmedien
  - Kupferdraht – Twisted Pair
  - Kupferdraht – Koaxialkabel
  - Glasfaser
- Drahtlose Übertragung
  - Funkübertragung
  - Mikrowellenübertragung
  - Infrarot
  - Lichtwellen

# Die einfachste Bitübertragung

- Bit 1: Strom an
- Bit 0: Strom aus

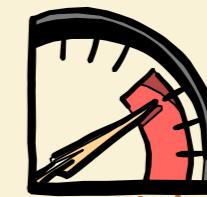
Schicht 1:  
Bit zu Spannung



Bit=1: Schalter zu  
Bit=0: Schalter auf

Schicht 1:  
Spannung zu Bit

Spannung: Bit 1  
Keine Spannung: Bit 0



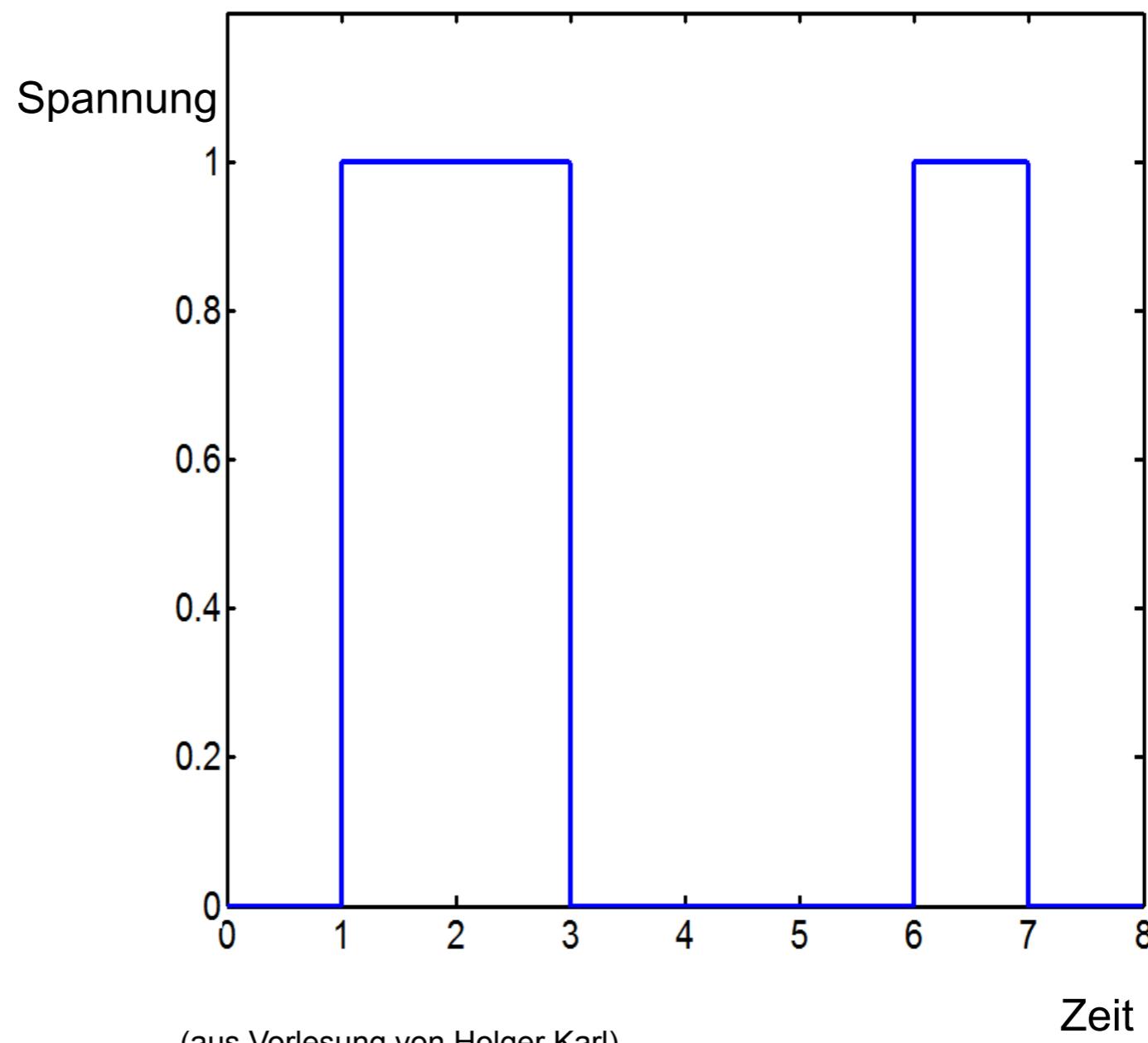
Schicht 0 "Physikalische Verbindung"



(aus Vorlesung von Holger Karl)

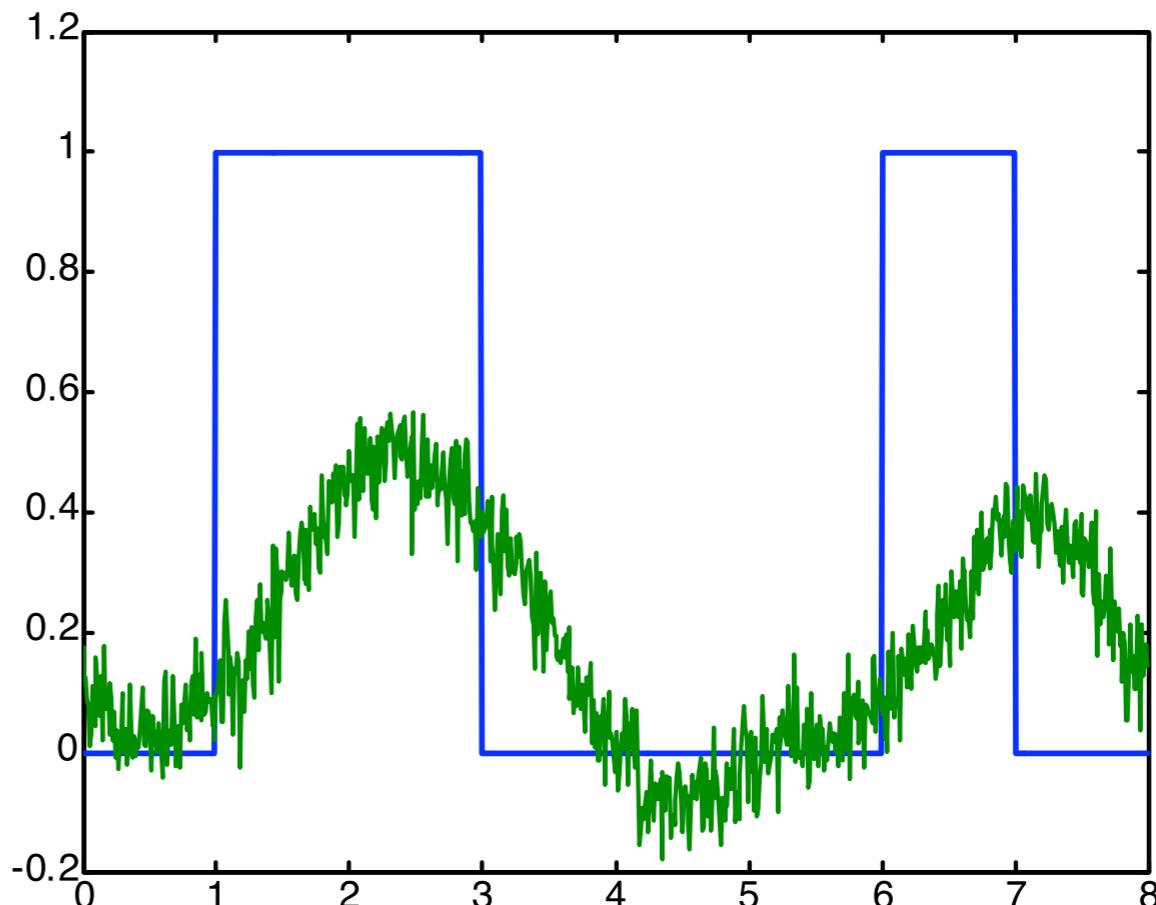
# Übertragung eines Buchstabens: “b”

- Zeichen “b” benötigt mehrere Bits
  - z.B. ASCII code of “b” als Binärzahl  
01100010
- Spannungsverlauf:



# Was kommt an?

- Übertrieben schlechter Empfang
- Was passiert hier?



# 5 Gründe für den schlechten Empfang

- 
1. Allgemeine Dämpfung
  2. Frequenzverlust
  3. Frequenzabhängige Dämpfung
  4. Störung und Verzerrung
  5. Rauschen

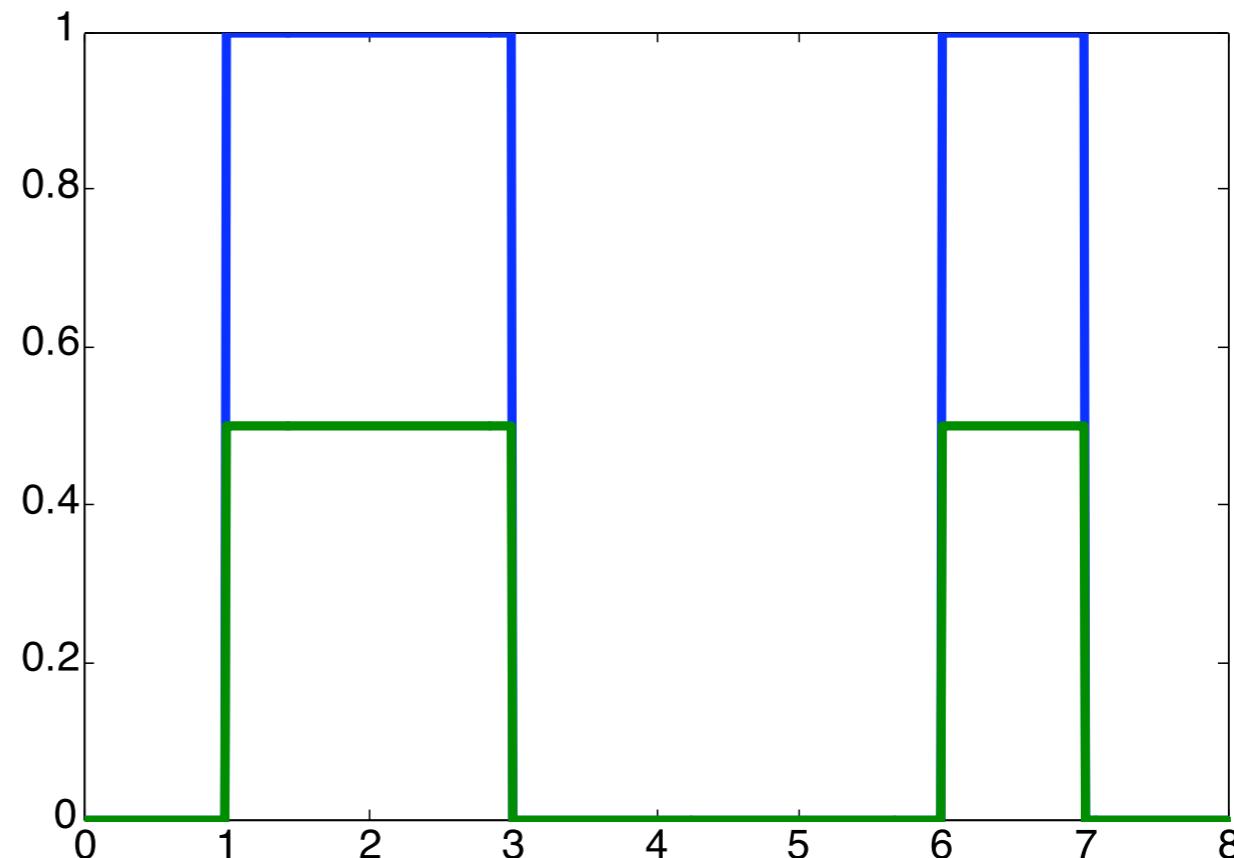
# 1. Signale werden gedämpft

- Dämpfung  $\alpha$  (attenuation)
  - Verhältnis von Sendeenergie  $P_1$  zu Empfangsenergie  $P_0$
  - Bei starker Dämpfung erreicht wenig Energie dem Empfänger
- Dämpfung hängt ab von
  - der Art des Mediums
  - Abstand zwischen Sender und Empfänger
  - ... anderen Faktoren
- Angegeben in deziBel

$$\log_{10} \frac{P_1}{P_0} \quad (\text{in Bel})$$

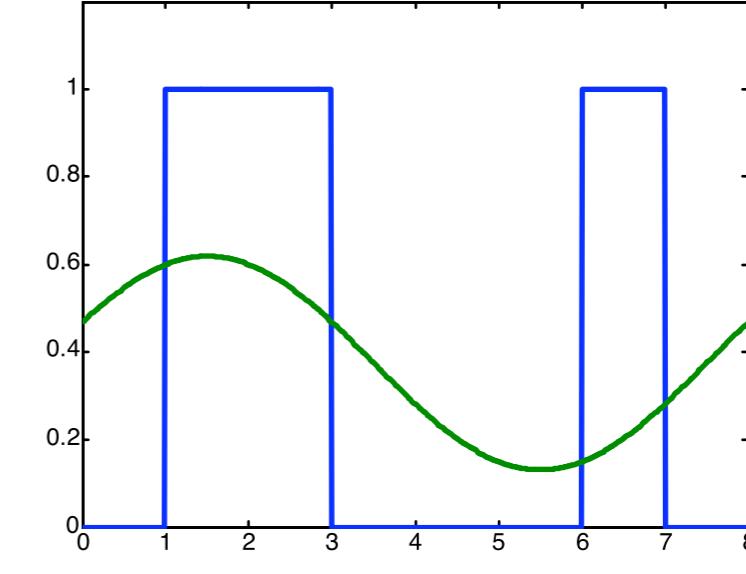
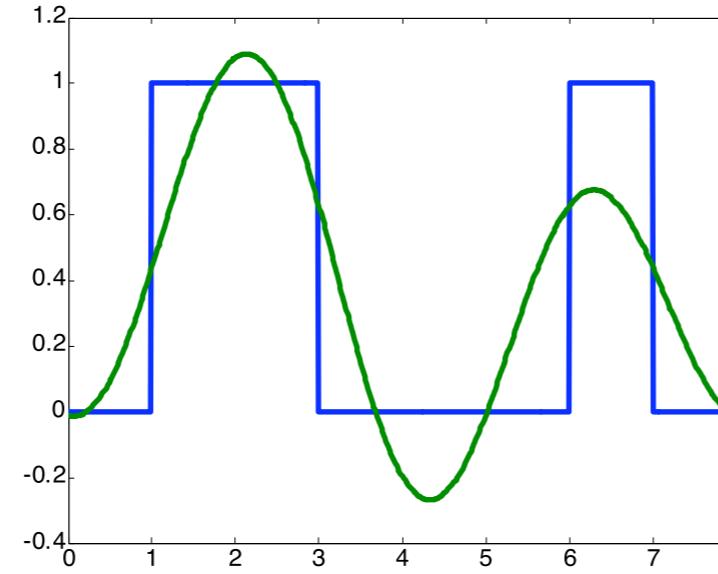
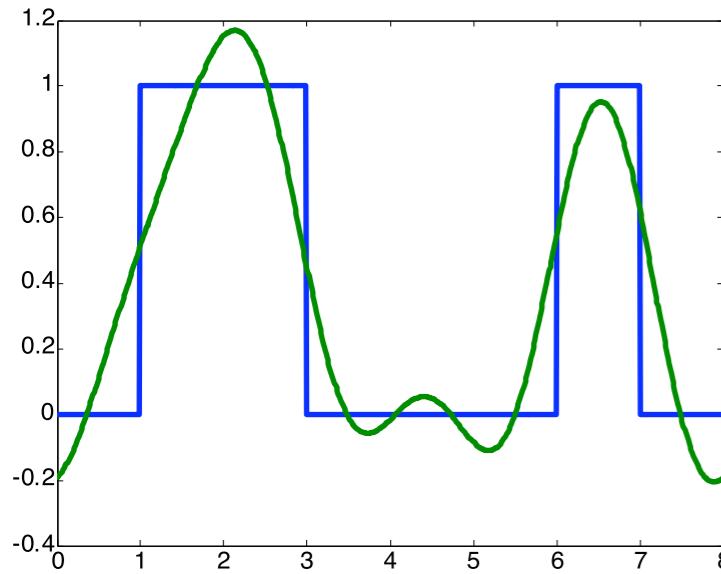
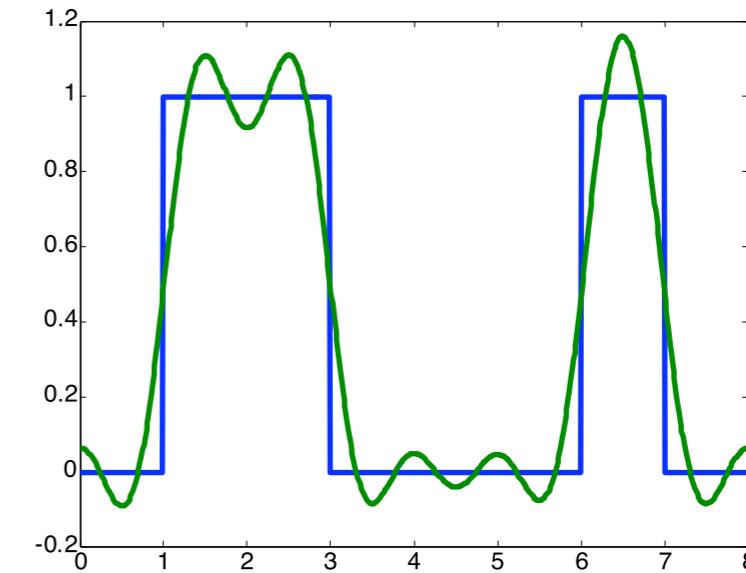
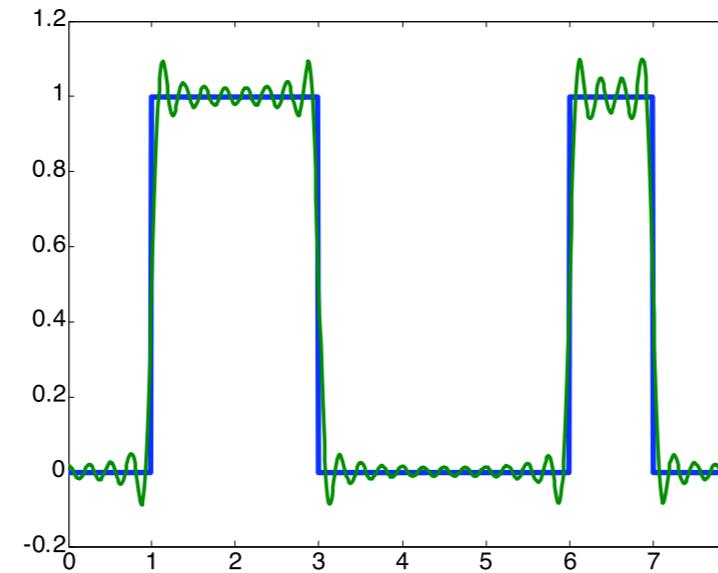
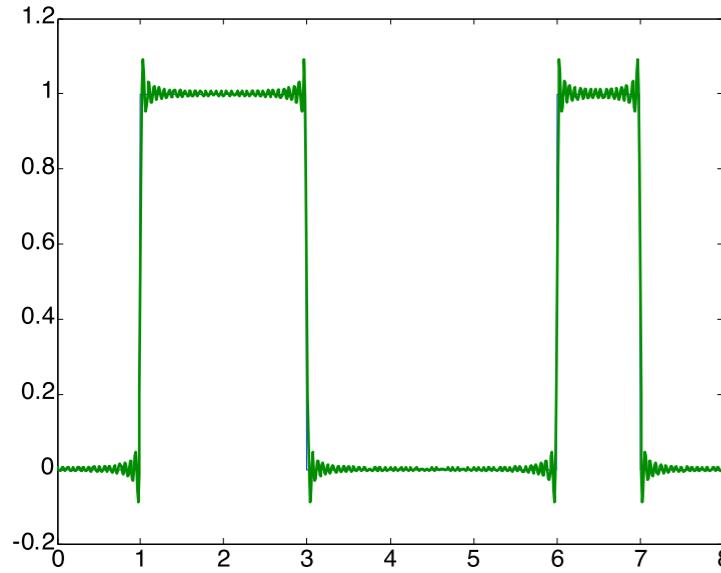
$$= 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_0} \quad (\text{in deziBel [dB]})$$

$$\alpha = \frac{P_1}{P_0}$$



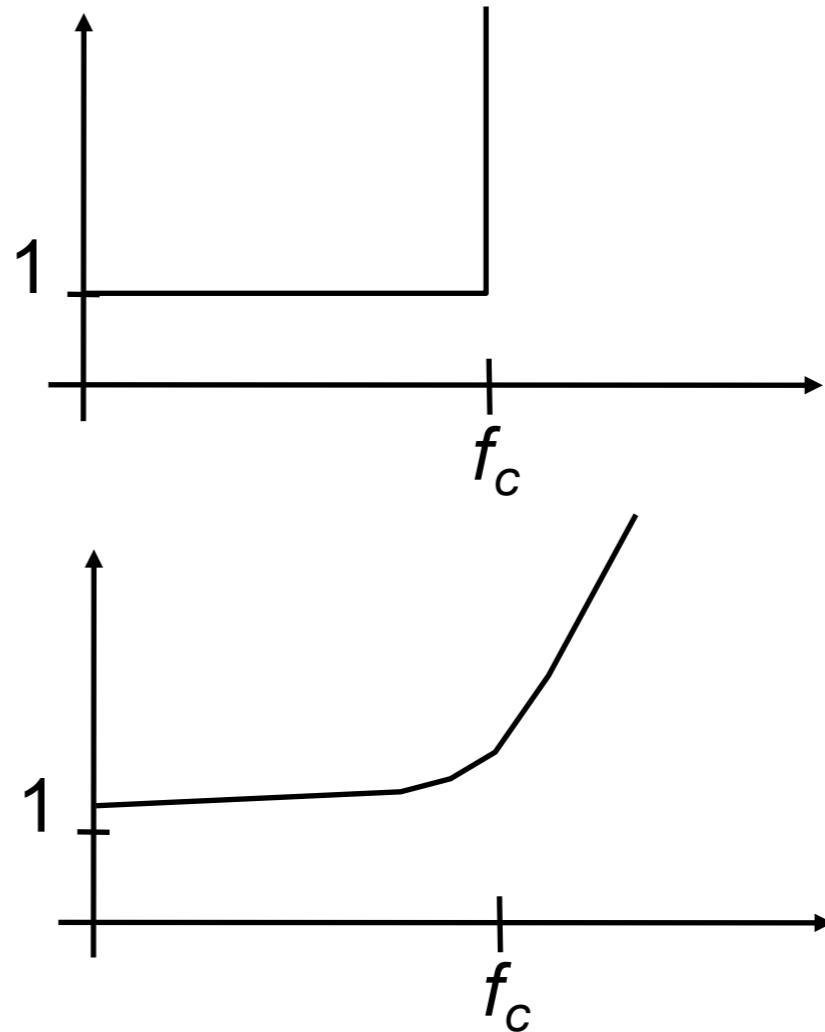
# 2. Nicht alle Frequenzen passieren das Medium

- Das Signal beim Verlust der hohen Frequenzen



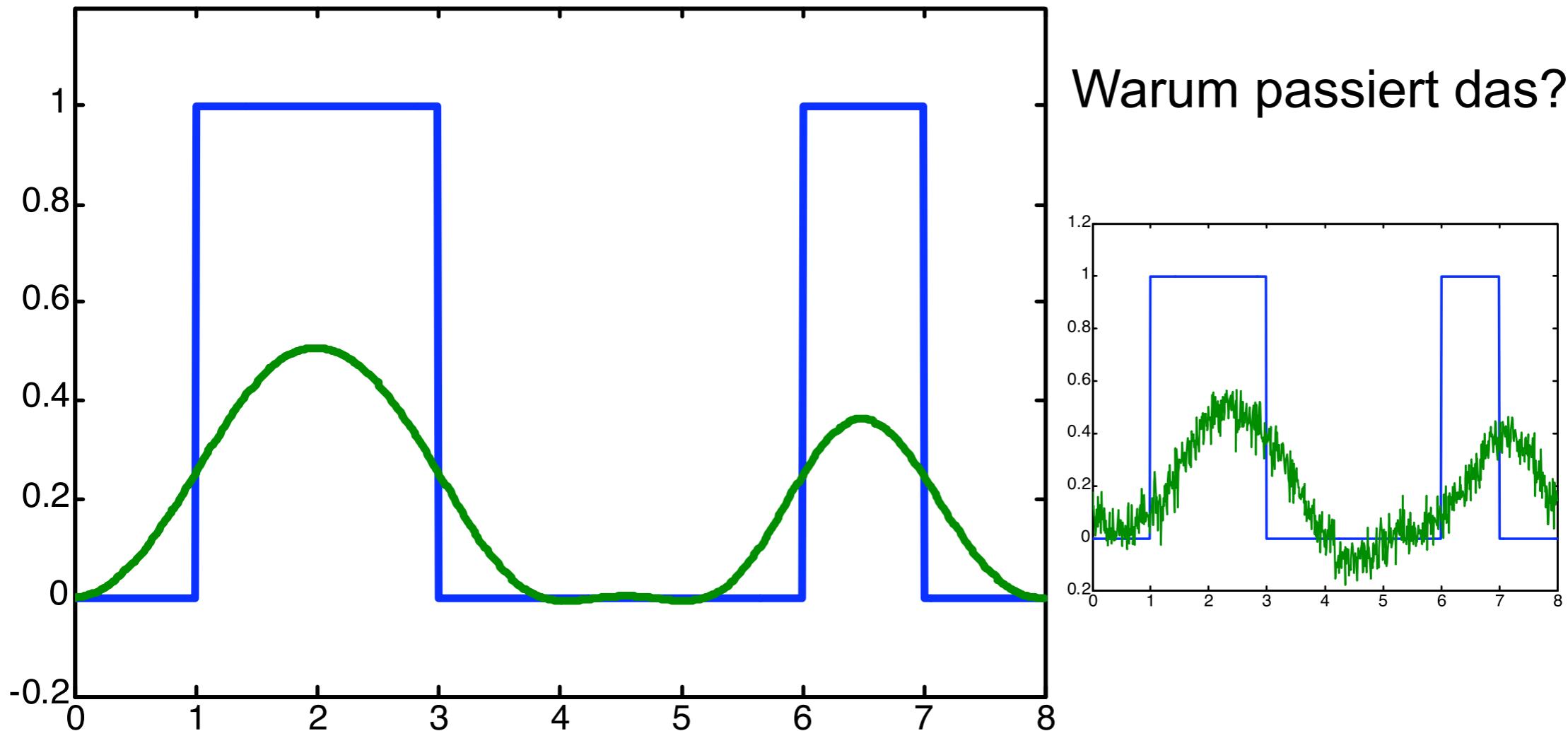
# 3. Frequenzabhängige Dämpfung

- Vorherige Seite: Cutoff
  - Zuerst ist die Dämpfung 1
  - und dann Unendlich
- Realistischer:
  - Dämpfung steigt kontinuierlich von 1 zu höheren Frequenzen
- Beides:
  - Bandweiten-begrenzter Kanal



# Beispiel mit realistischerer Dämpfung

- Beispiel: Dämpfung ist 2; 2,5, 3,333... , 5, 10, 1 für den ersten, zweiten, ... Fourier-koeffizienten



(aus Vorlesung von Holger Karl)

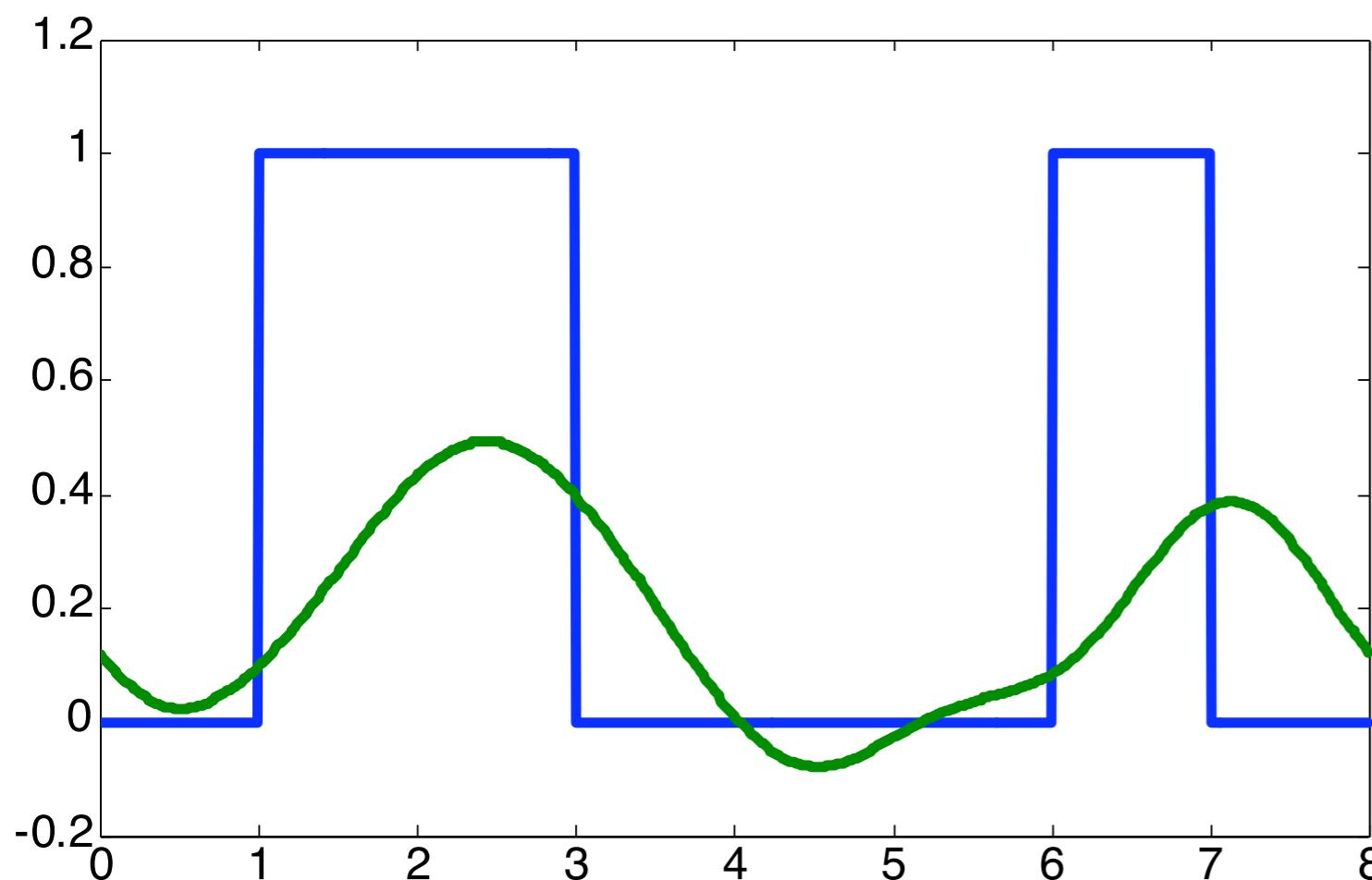
## 4. Das Medium stört und verzerrt

- In jedem Medium (außer dem Vakuum) haben verschiedene Frequenzen verschiedene Ausbreitungsgeschwindigkeit
  - Resultiert in Phasenverschiebung
  - Die zugrunde liegende Sinuskurve ist bestimmt durch Amplitude  $a$ , Frequenz  $f$ , and Phase  $\phi$

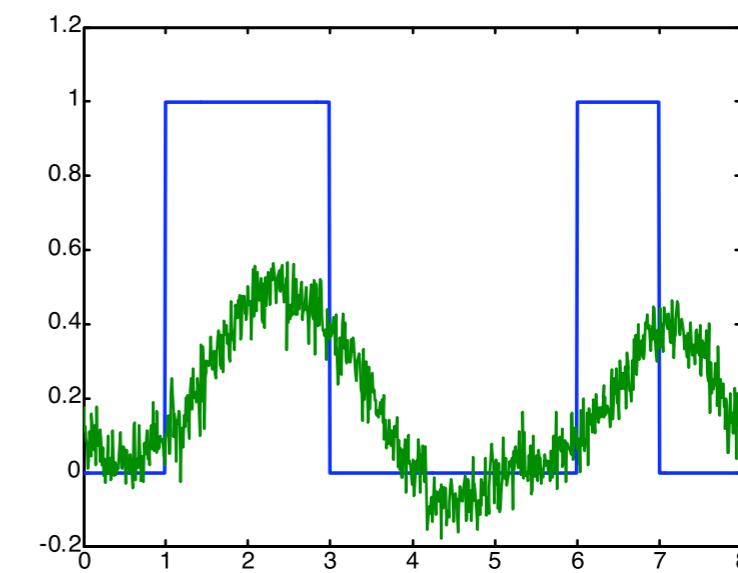
$$a \sin(2\pi ft + \phi)$$

- Die Größe dieser Phasenverschiebung hängt von der Frequenz ab
  - Dieser Effekt heißt Verzerrung (distortion)

# Frequenzabhängige Dämpfung und Verzerrung



Warum passiert das:

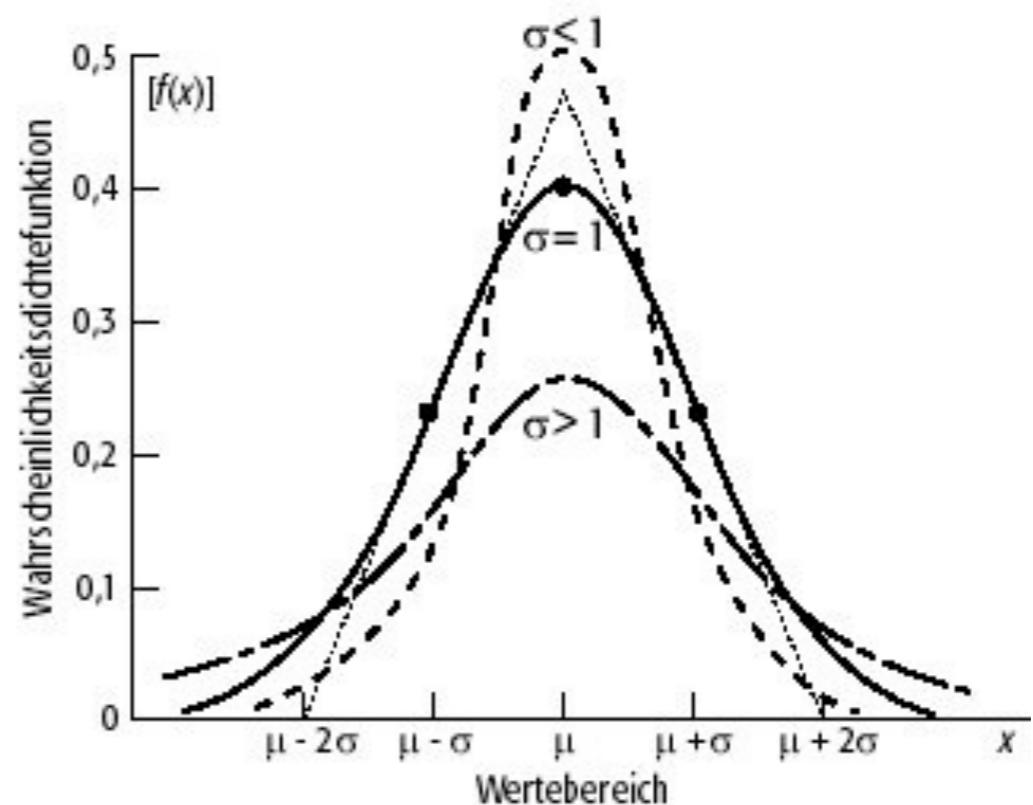


(aus Vorlesung von Holger Karl)

# 5. Echte Medien rauschen

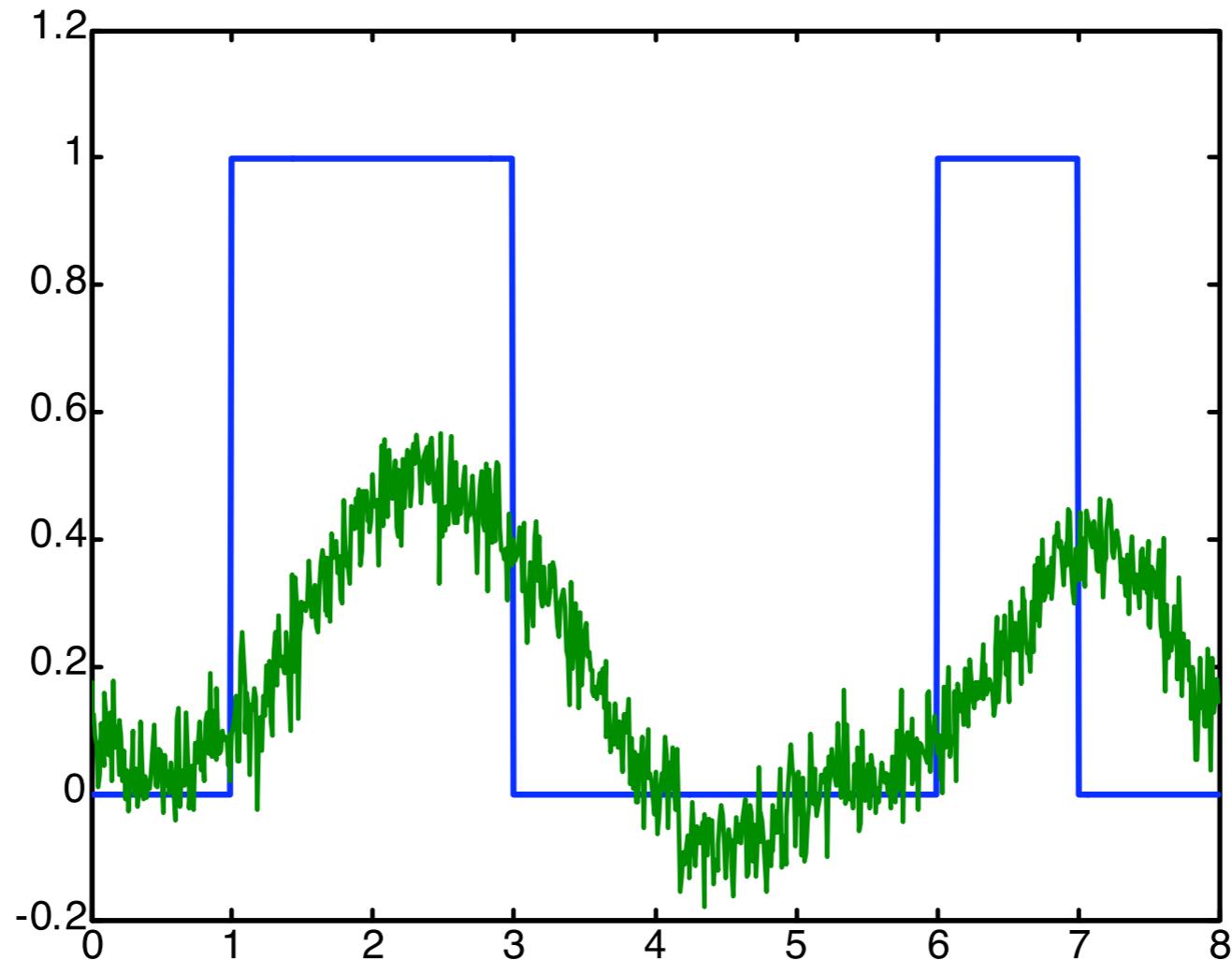
- Jedes Medium und jeder Sender und Empfänger produzieren Rauschen
  - Verursacht durch Wärme, Störungen anderer Geräte, Signale, Wellen, etc.
- Wird beschrieben durch zufällige Fluktuationen des (störungsfreien) Signals
  - Typische Modellierung: Gauß'sche Normalverteilung

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x - \mu}{\sigma} \right)^2}$$



# Zusammenfassung

- Dies alles kann das Eingangssignal erklären.



(aus Vorlesung von Holger Karl)

# Basisband und Breitband

## ■ Basisband (baseband)

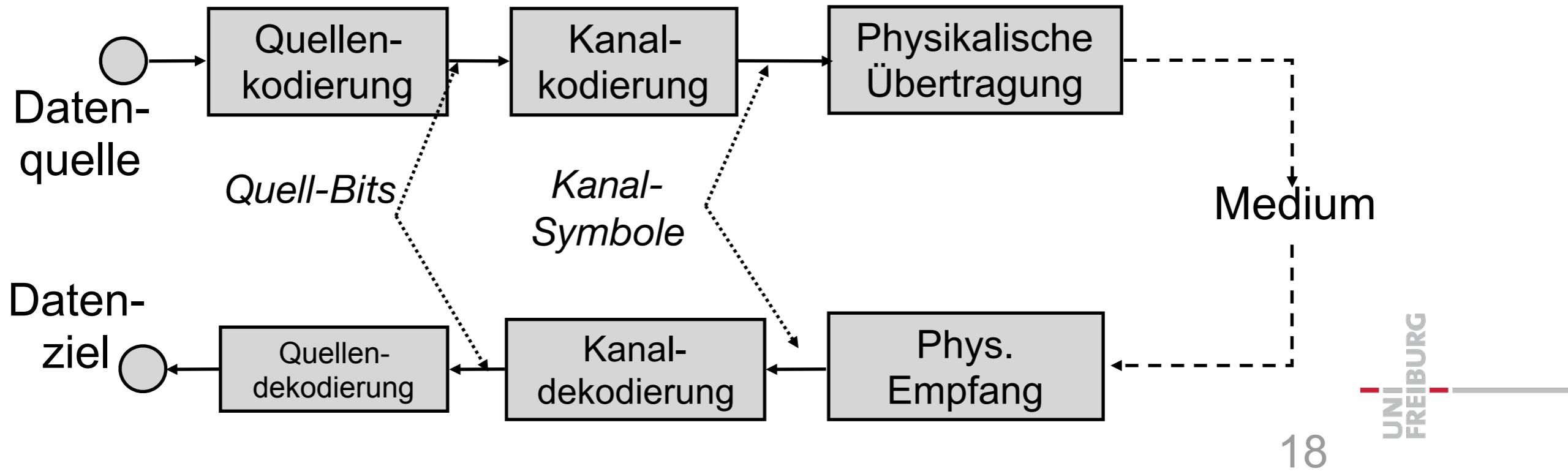
- Das digitale Signal wird direkt in Strom- oder Spannungsveränderungen umgesetzt
- Das Signal wird mit allen Frequenzen übertragen
  - z.B. Durch NRZ (Spannung hoch = 1, Spannung niedrig = 0)
- Problem: Übertragungseinschränkungen

## ■ Breitband (broadband)

- Die Daten werden durch einen weiten Frequenzbereich übertragen
- Weiter Bereich an Möglichkeiten:
  - Die Daten können auf eine Trägerwelle aufgesetzt werden (Amplitudenmodulation)
  - Die Trägerwelle kann verändert (moduliert) werden (Frequenz/ Phasenmodulation)
  - Verschiedene Trägerwellen können gleichzeitig verwendet werden

# Struktur einer digitalen Basisband-Übertragung

- Quellkodierung
  - Entfernen redundanter oder irrelevanter Information
  - Z.B. mit verlustbehafteter Komprimierung (MP3, MPEG 4)
  - oder mit verlustloser Komprimierung (Huffman-Code)
- Kanalkodierung
  - Abbildung der Quellbits auf Kanal-Symbole
  - Möglicherweise Hinzufügen von Redundanz angepasst auf die Kanaleigenschaften
- Physikalische Übertragung
  - Umwandlung in physikalische Ereignisse



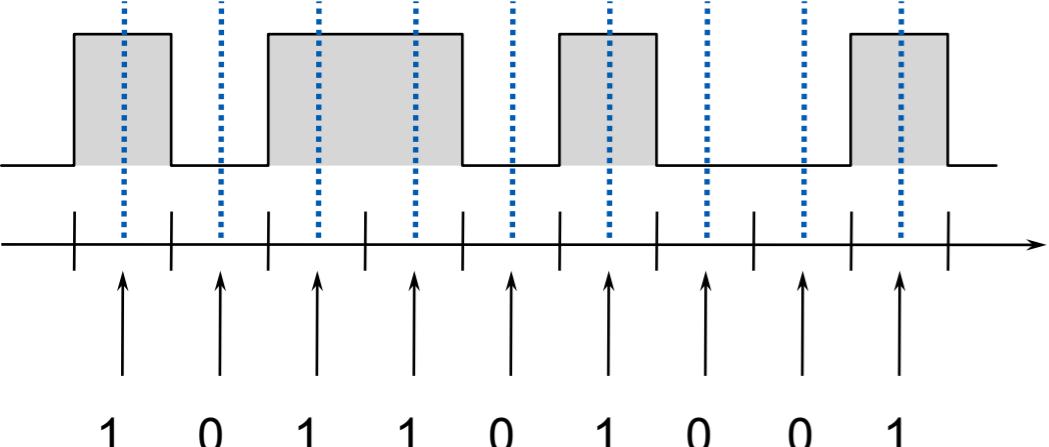
# Selbsttaktende Kodierungen

- Wann muss man die Signale messen
  - Typischerweise in der Mitte eines Symbols
  - Wann startet das Symbol?
    - Die Länge des Symbols ist üblicherweise vorher festgelegt.
- Der Empfänger muss auf der Bit-ebene mit dem Sender synchronisiert sein
  - z.B. durch *Frame Synchronization*

# Synchronisation

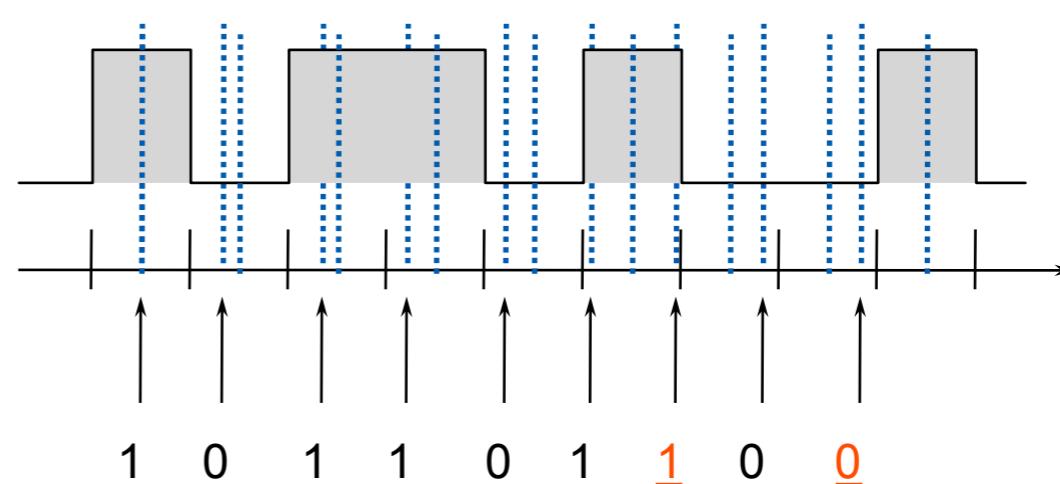
- Was passiert wenn man einfach Uhren benutzt
- Problem
  - Die Uhren driften auseinander
  - Keine zwei (bezahlbare Uhren) bleiben perfekt synchron
- Fehler by Synchronisationsverlust (NRZ):

Sender:



Empfänger mit driftender Uhr

Kanal



# Lösung der Synchronisation

- Ohne Kontrolle keine Synchronisation
- Lösung: explizites Uhrensignal
  - Benötigt parallele Übertragung über Extra-Kanal
  - Muss mit den Daten synchronisiert sein
  - Nur für kurze Übertragungen sinnvoll
- Synchronisation an kritischen Zeitpunkten
  - z.B. Start eines Symbols oder eines Blocks
  - Sonst läuft die Uhr völlig frei
  - Vertraut der kurzzeitig funktionierenden Synchronität der Uhren
- Uhrensignal aus der Zeichenkodierung

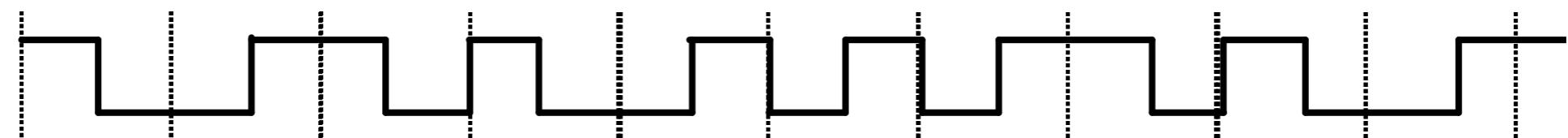
# Selbsttaktende Codes

- z.B. Manchester Code (Biphase Level)
  - 1 = Wechsel von hoch zu niedrig in der Intervallmitte
  - 0 = Umgekehrter Wechsel

Daten:

1 0 1 1 0 0 0 1 1 0

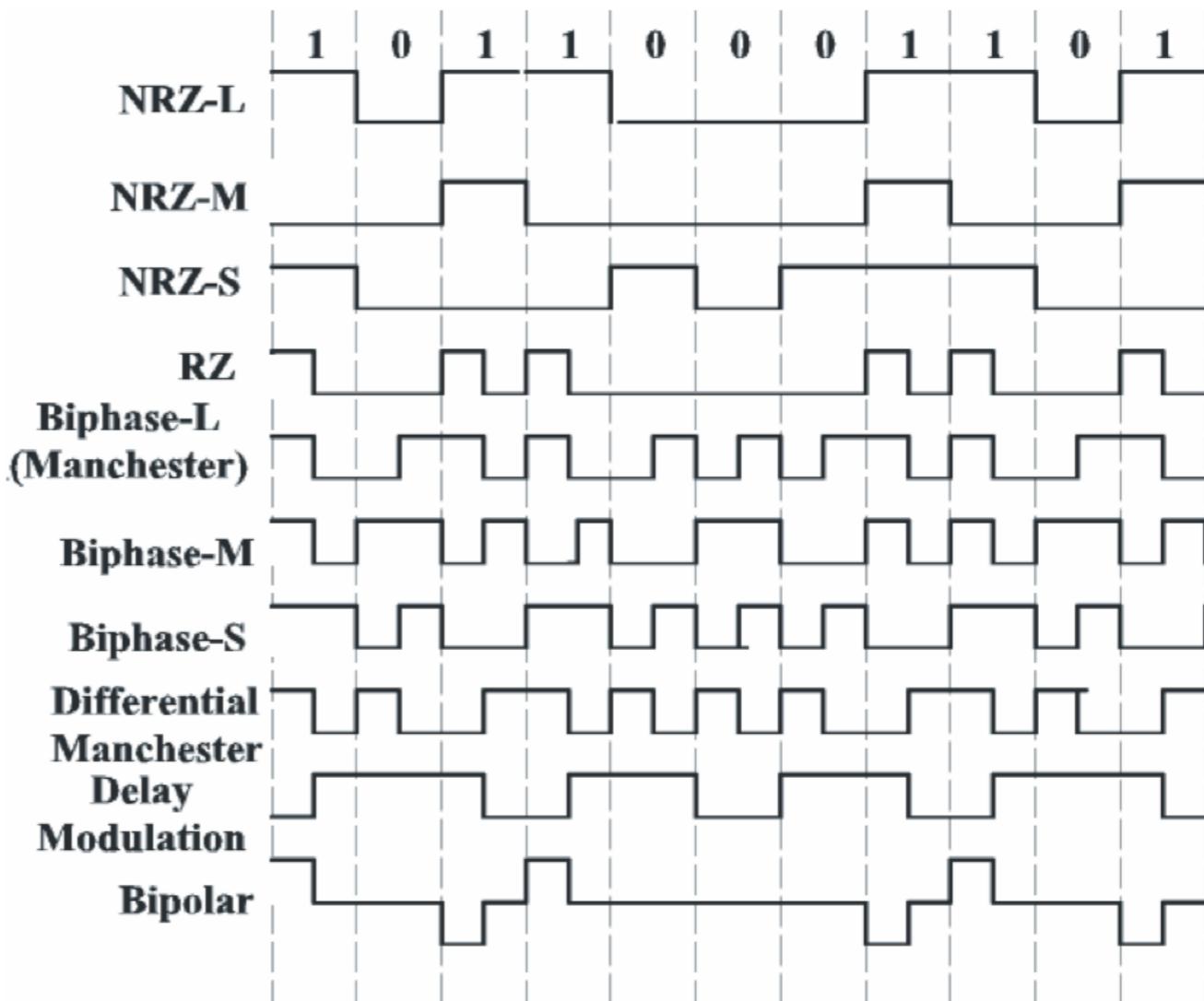
Manchester



- Das Signal beinhaltet die notwendige Information zur Synchronisation

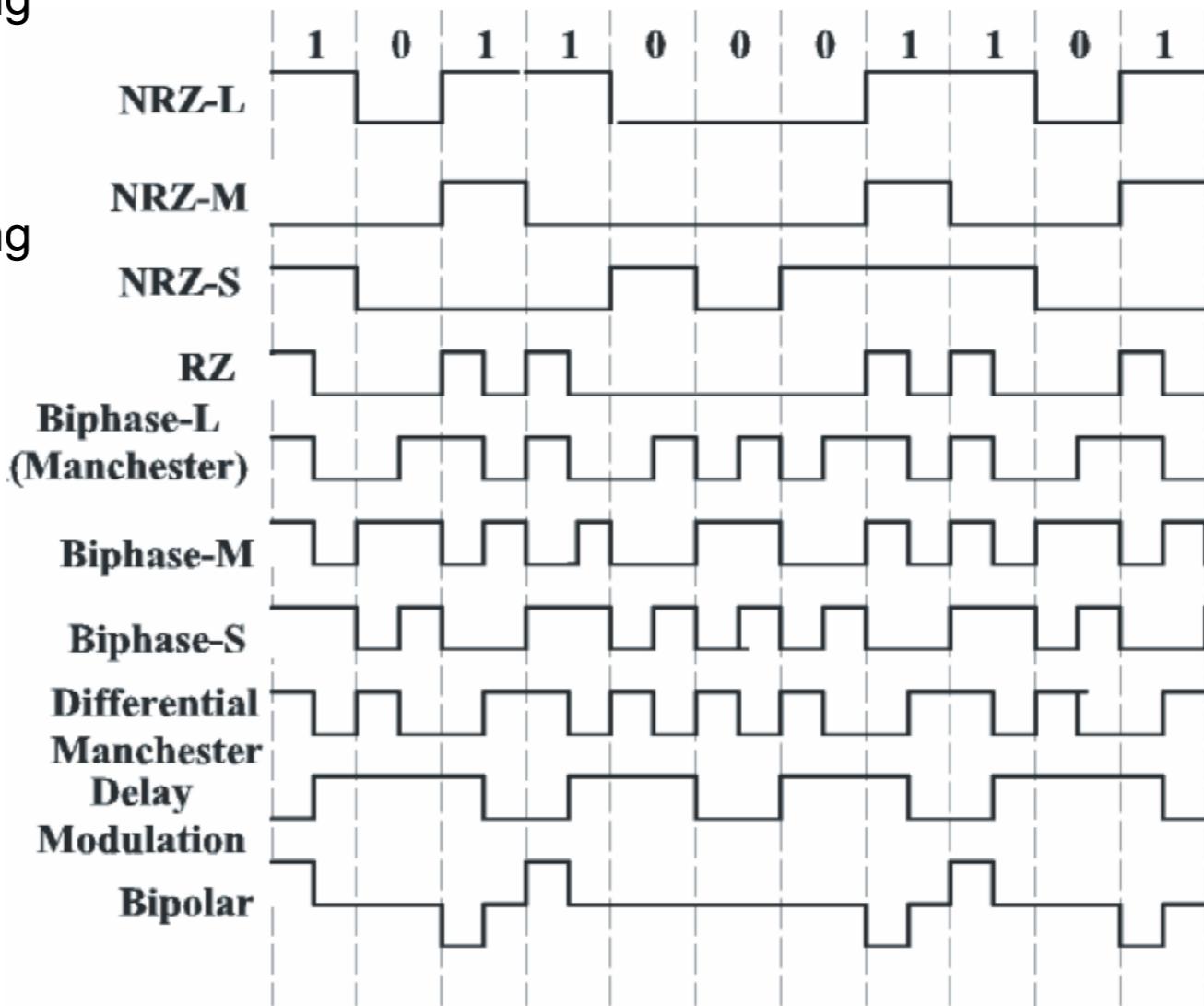
# Digitale Kodierungen (I)

- Non-Return to Zero-Level (NRZ-L)
  - 1 = hohe Spannung, 0 = niedrig
- Non-Return to Zero-Mark (NRZ-M)
  - 1 = Wechsel am Anfang des Intervalls
  - 0 = Kein Wechsel
- Non-Return to Zero-Space (NRZ-S)
  - 0 = Wechsel am Intervallanfang
  - 1 = Kein Wechsel
- Return to Zero (RZ)
  - 1 = Rechteckpuls am Intervallanfang
  - 0 = Kein Impuls
- Manchester Code (Biphase Level)
  - 1 = Wechsel von hoch zu niedrig in der Intervallmitte
  - 0 = Umgekehrter Wechsel



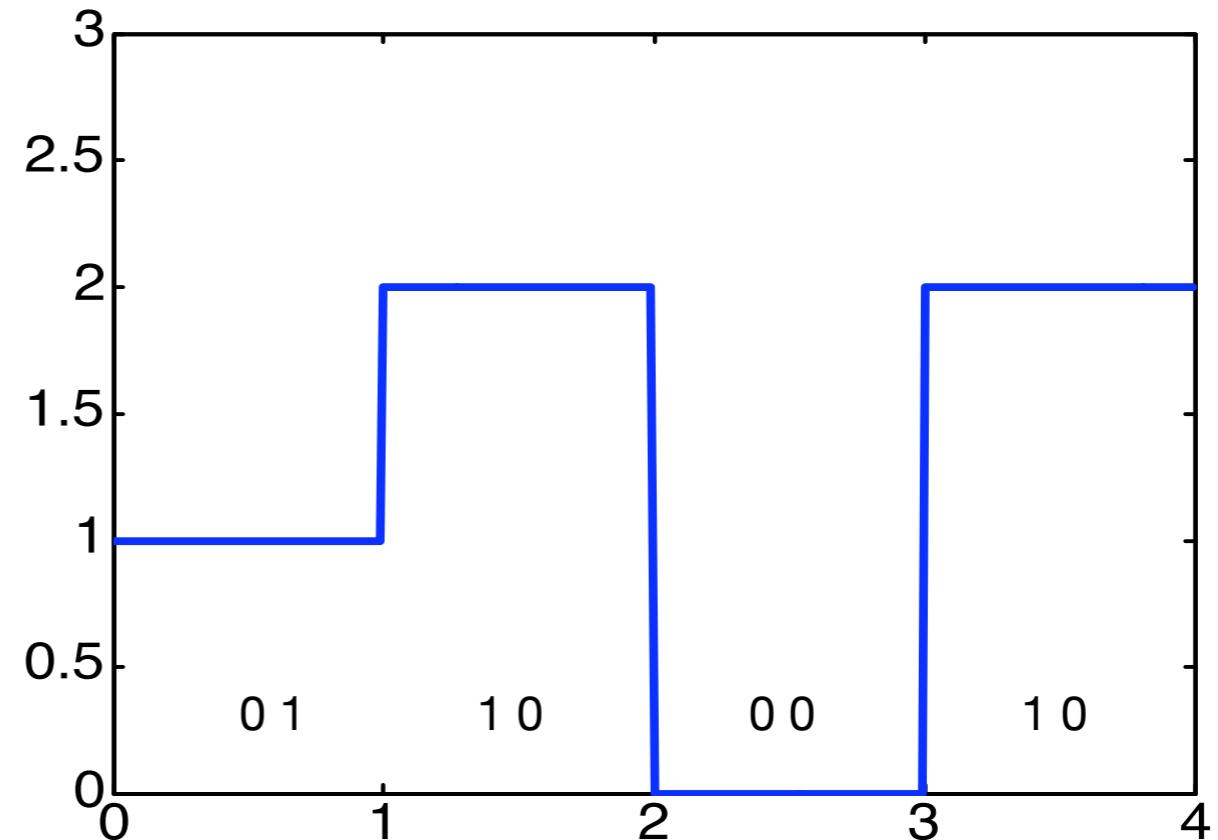
# Digitale Kodierungen (II)

- Biphase-Mark
  - Immer: Übergang am Intervallanfang
  - 1 = zweiter Übergang in der Mitte
  - 0 = kein zweiter Übergang
- Biphase-Space
  - Immer: Übergang am Intervallanfang
  - 1/0 umgekehrt wie Biphase-Mark
- Differential Manchester-Code
  - Immer: Übergang in Intervallmitte
  - 1 = Kein Übergang am Intervallanfang
  - 0 = Zusätzlicher Übergang am Intervallanfang
- Delay Modulation (Miller)
  - Übergang am Ende, falls 0 folgt
  - 1 = Übergang in der Mitte des Intervalls
  - 0 = Kein Übergang falls 1 folgt
- Bipolar
  - 1 = Rechteckpuls in der ersten Hälfte, Richtung alterniert (wechselt)
  - 0 = Kein Rechteckpuls



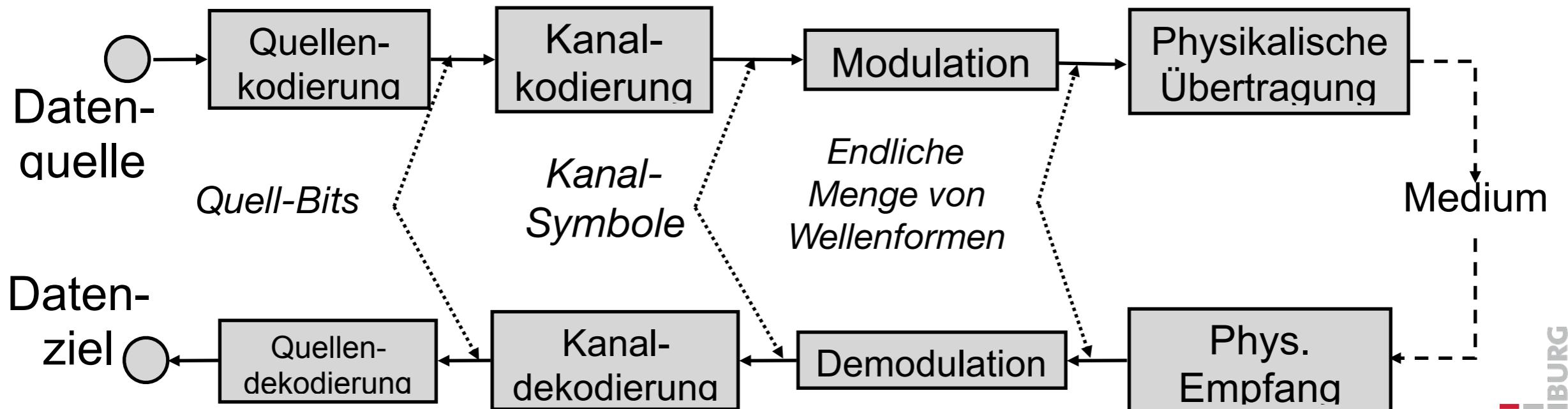
# Symbole und Bits

- Für die Datenübertragung können statt Bits auch Symbole verwendet werden
- Z.B. 4 Symbole: A,B,C,D mit
  - A=00, B=01, C=10, D=11
- Symbole
  - Gemessen in Baud
  - Anzahl der Symbole pro Sekunde
- Datenrate
  - Gemessen in Bits pro Sekunde (bit/s)
  - Anzahl der Bits pro Sekunde
- Beispiel
  - 2400 bit/s Modem hat 600 Baud (verwendet 16 Symbole)



# Struktur einer digitalen Breitband-Übertragung

- MODulation/DEModulation
  - Übersetzung der Kanalsymbole durch
    - Amplitudenmodulation
    - Phasenmodulation
    - Frequenzmodulation
    - oder einer Kombination davon



# Physikalische Grundlagen

- Bewegte elektrisch geladene Teilchen verursachen elektromagnetische Wellen
  - **Frequenz**
    - $f$ : Anzahl der Oszillationen pro Sekunde
      - Maßeinheit: Hertz
  - **Wellenlänge**
    - $\lambda$ : Distanz (in Metern) zwischen zwei Wellenmaxima
  - Durch Antennen können elektro-magnetische Wellen erzeugt und empfangen werden
  - Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von elektro-magnetischen Wellen im Vakuum ist konstant:
    - **Lichtgeschwindigkeit**  $c \approx 3 \cdot 10^8$  m/s
- Zusammenhang:

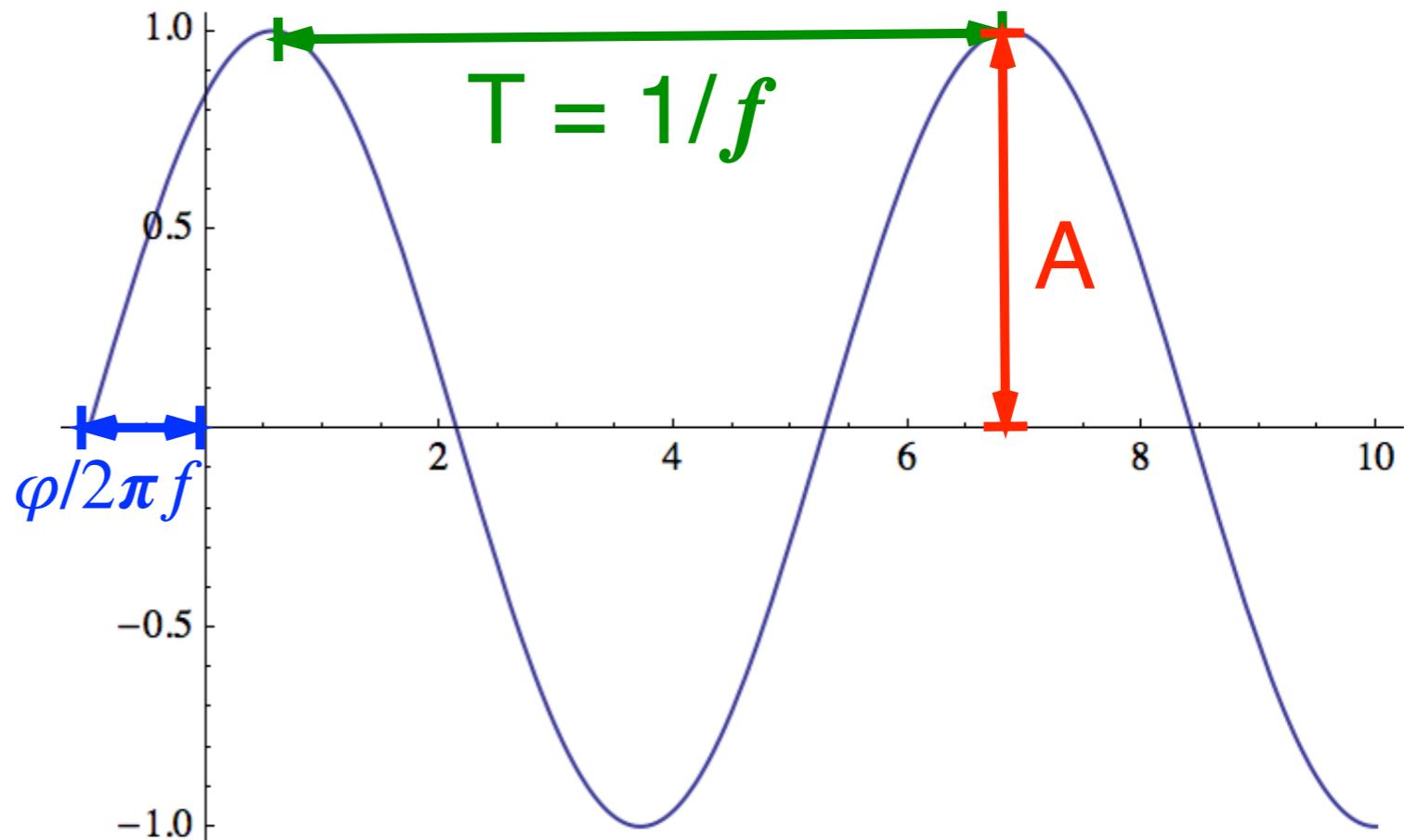
$$\lambda \cdot f = c$$

# Amplitudendarstellung

## ■ Amplitudendarstellung einer Sinusschwingung

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

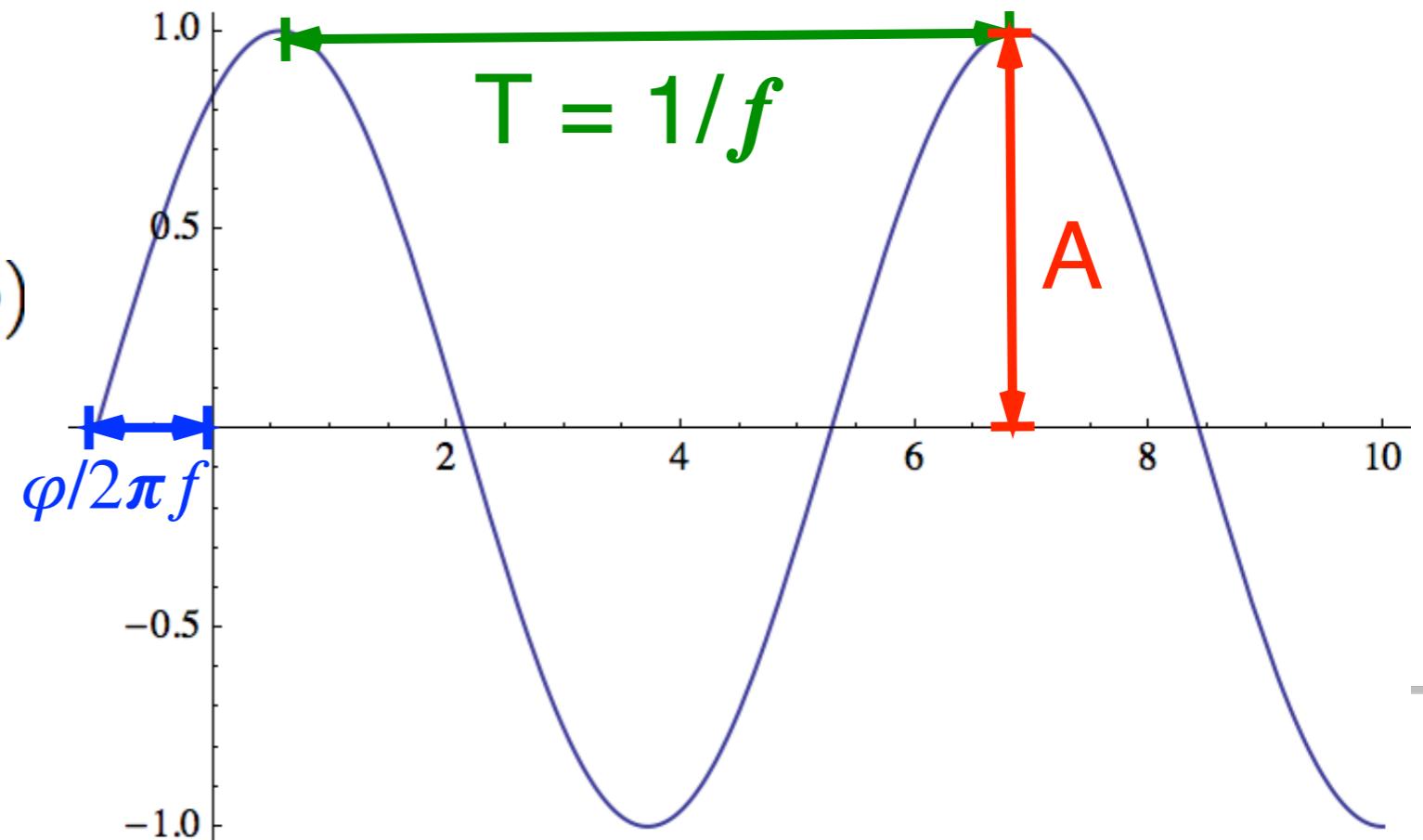
- A: Amplitude
- $\phi$ : Phasenverschiebung
- f : Frequenz =  $1/T$
- T: Periode



# Breitband

- Idee:
  - Konzentration auf die idealen Frequenzen des Mediums
  - Benutzung einer Sinuskurve als Trägerwelle der Signale
- Eine Sinuskurve hat keine Information
- Zur Datenübertragung muss die Sinuskurve fortlaufend verändert werden (moduliert)
  - Dadurch Spektralweitung (mehr Frequenzen in der Fourier-Analyse)
- Folgende Parameter können verändert werden:
  - Amplitude A
  - Frequenz  $f=1/T$
  - Phase  $\phi$

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



# Amplitudenmodulation

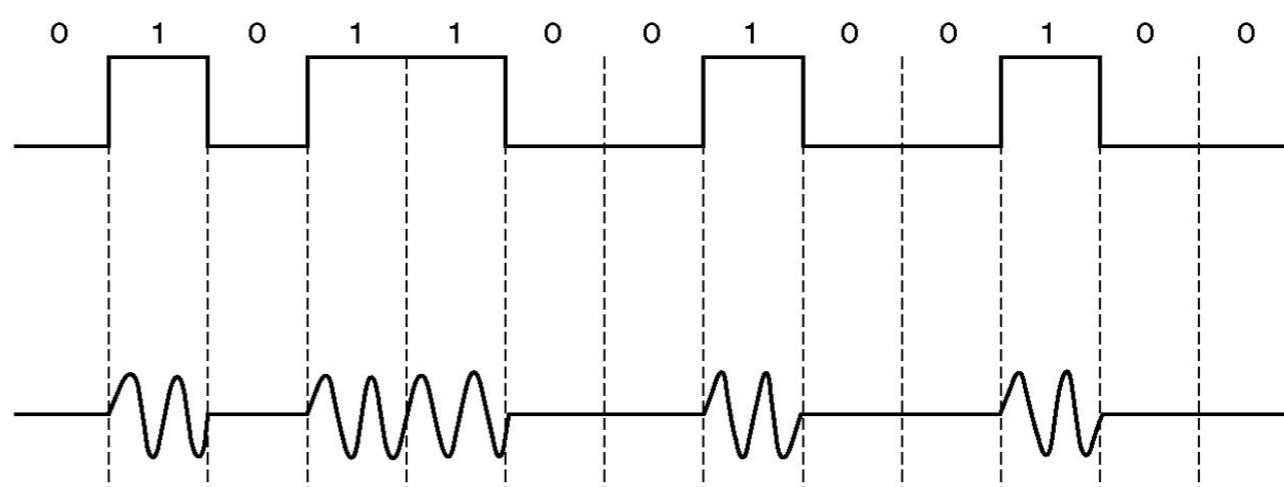
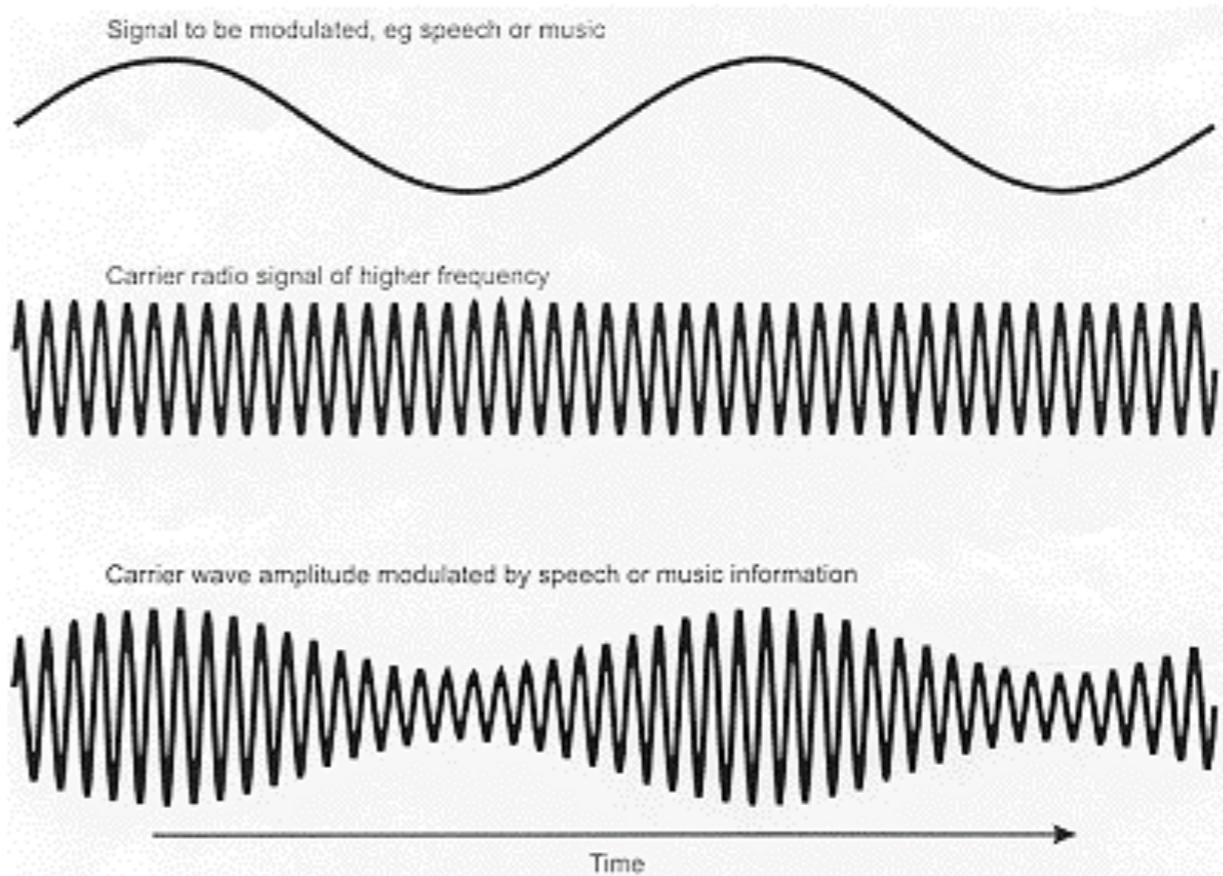
- Das zeitvariable Signal  $s(t)$  wird als Amplitude einer Sinuskurve kodiert:

$$f_A(t) = s(t) \sin(2\pi ft + \phi)$$

- Analoges Signal
  - Amplitude Modulation
  - Kontinuierliche Funktion in der Zeit

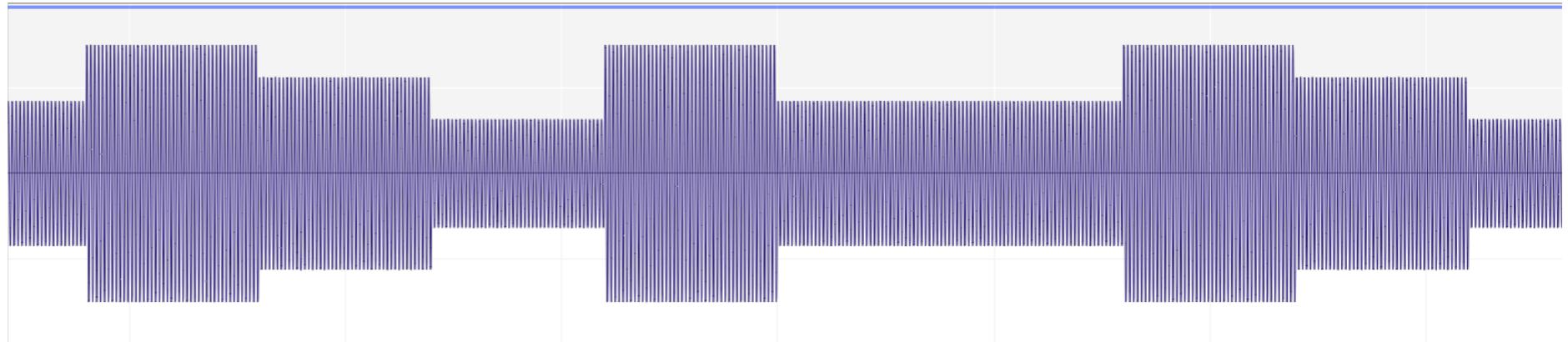
- z.B. zweites längeres Wellensignal (Schallwellen)

- Digitales Signal
  - Amplitude Keying
  - Z.B. durch Symbole gegeben als Symbolstärken
  - Spezialfall: Symbole 0 oder 1
    - on/off keying



# Hörbeispiel

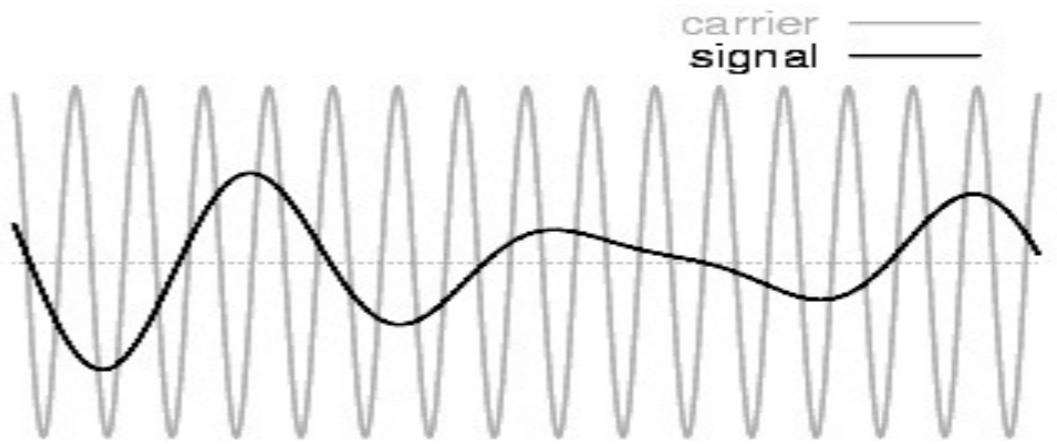
- Amplituden-modulierte Sinuskurve



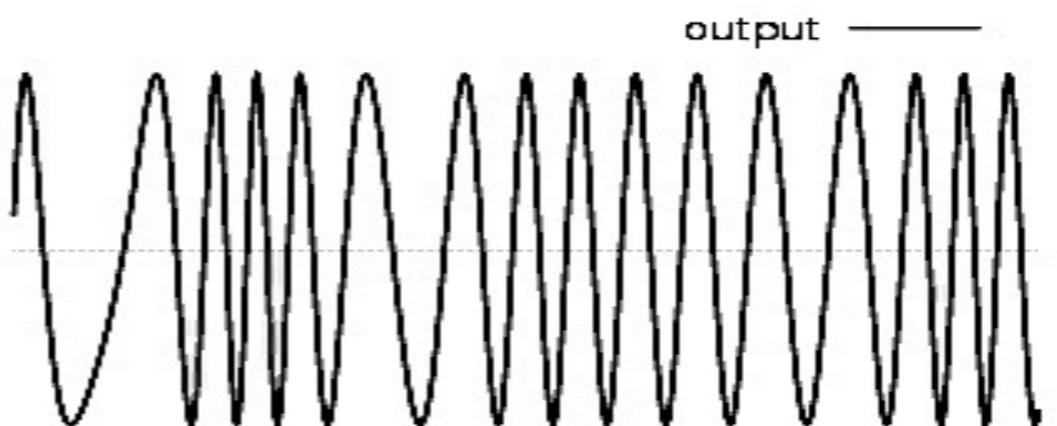
# Frequenzmodulation

- Das zeitvariable Signal  $s(t)$  wird in der Frequenz der Sinuskurve kodiert:

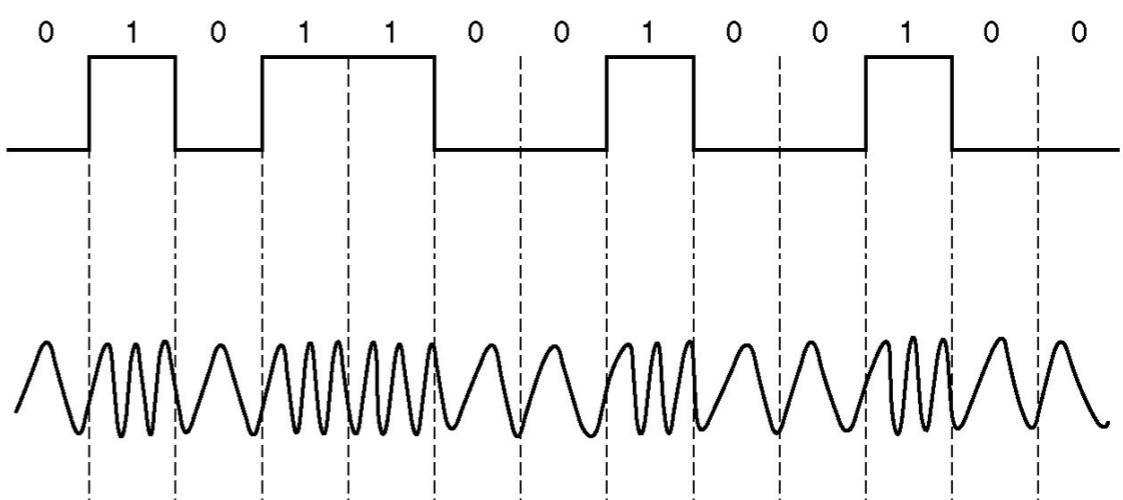
$$f_F(t) = a \sin(2\pi s(t)t + \phi)$$



- Analoges Signal
  - Frequency Modulation (FM)
  - Kontinuierliche Funktion in der Zeit

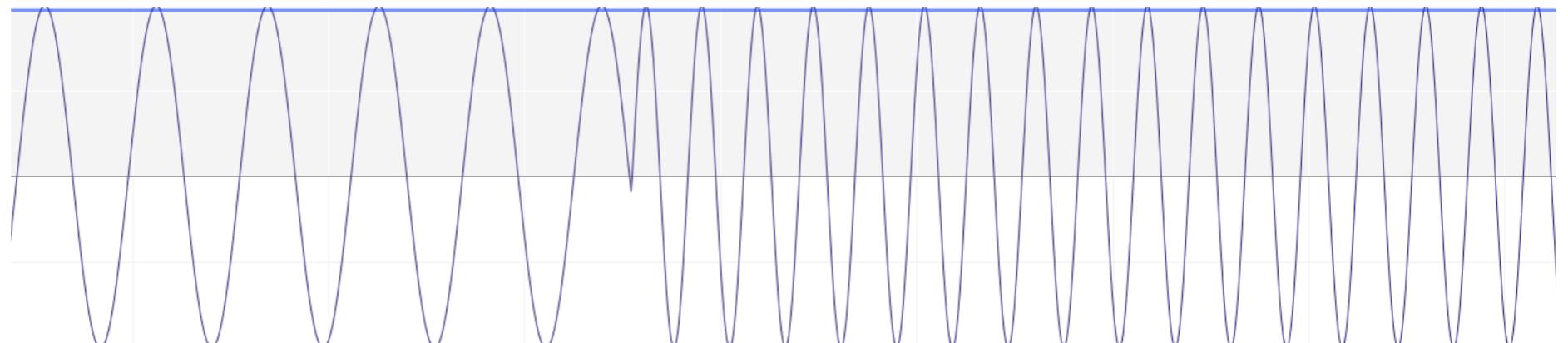
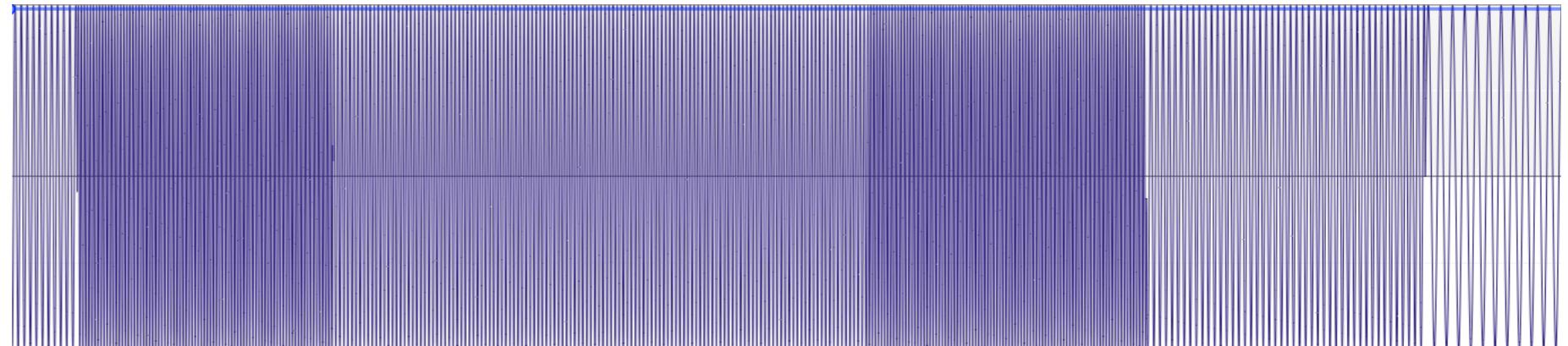


- Digitales Signal
  - Frequency Shift Keying (FSK)
  - Z.B. durch Symbole gegeben als Frequenzen



# Hörbeispiel

- frequenz-  
modulierte  
Sinuskurve

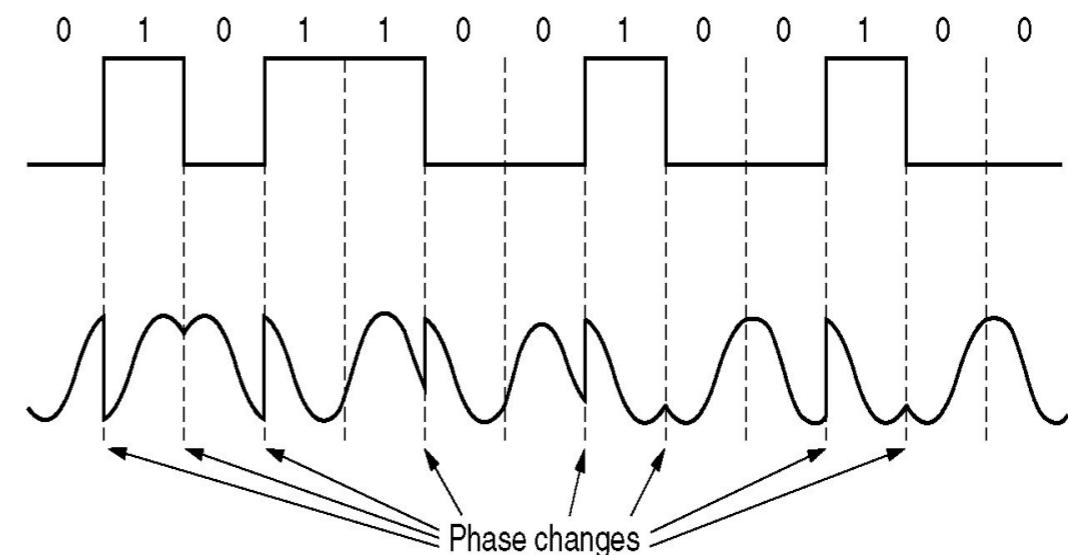
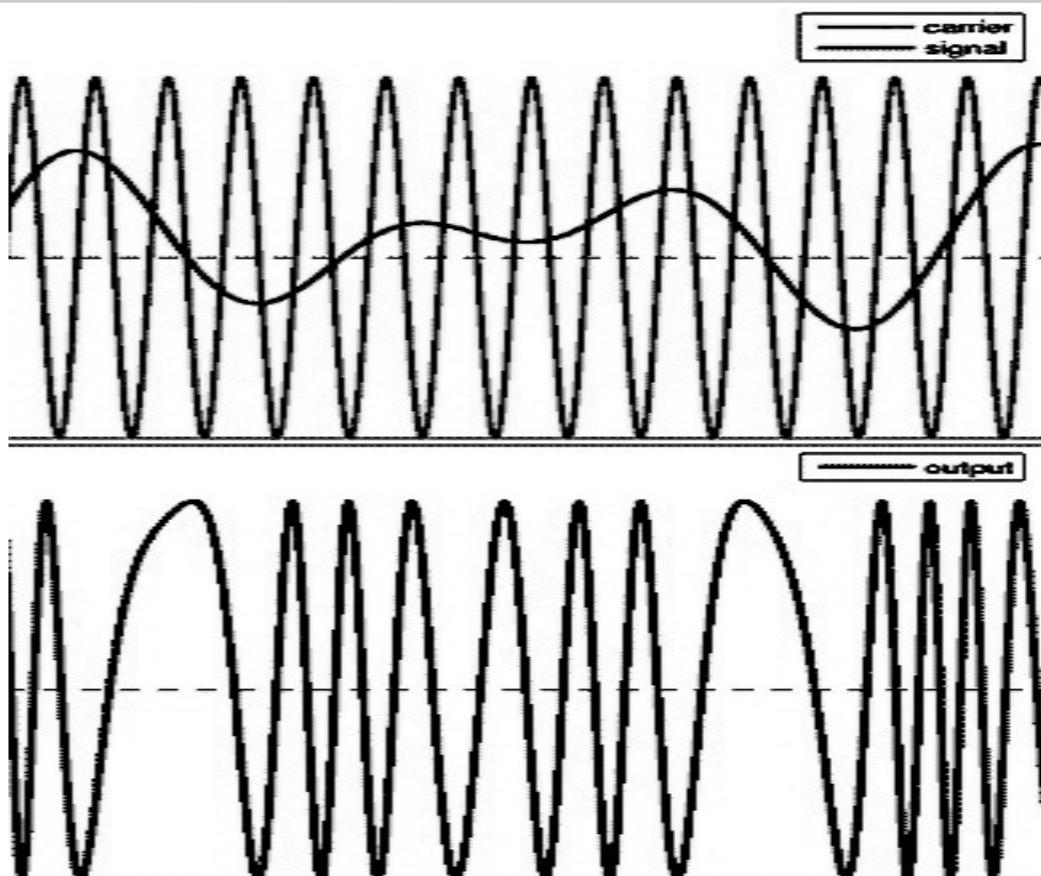


# Phasenmodulation

- Das zeitvariable Signal  $s(t)$  wird in der Phase der Sinuskurve kodiert:

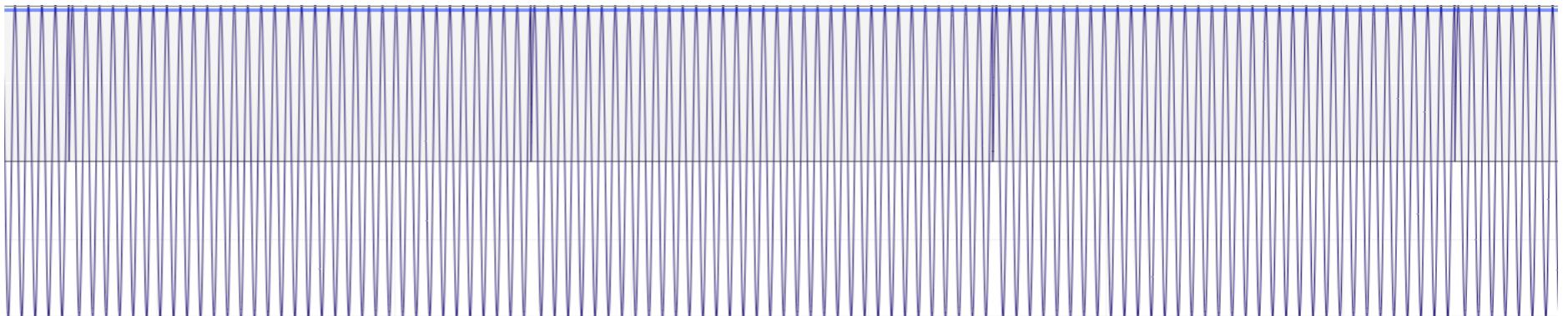
$$f_P(t) = a \sin(2\pi ft + s(t))$$

- Analoges Signal
  - Phase Modulation (PM)
  - Sehr ungünstige Eigenschaften
  - Wird nicht eingesetzt
- Digitales Signal
  - Phase-Shift Keying (PSK)
  - Z.B. durch Symbole gegeben als Phasen



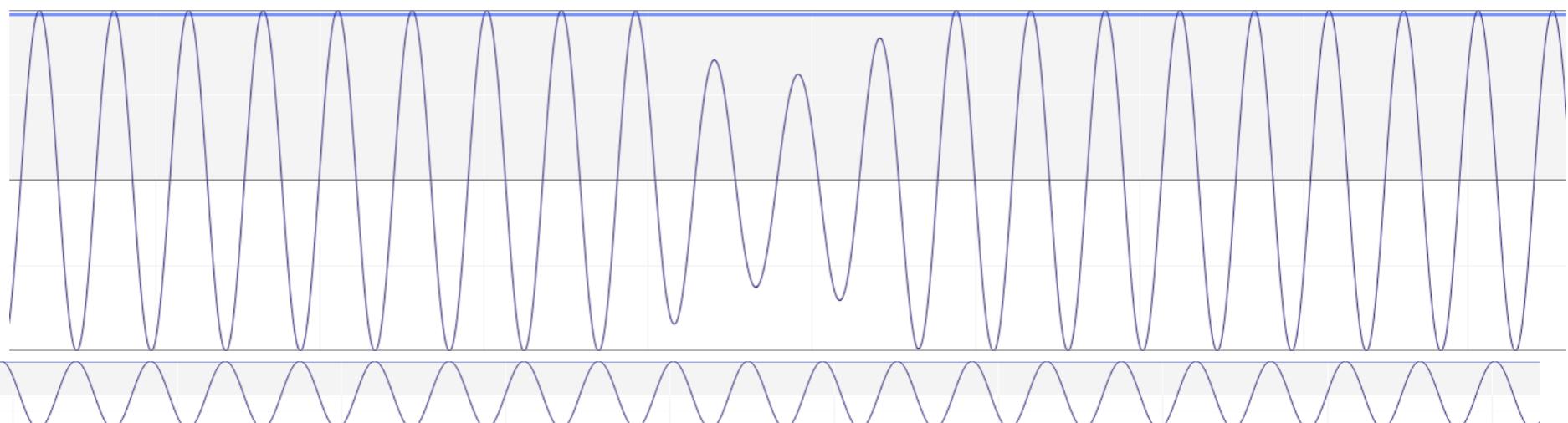
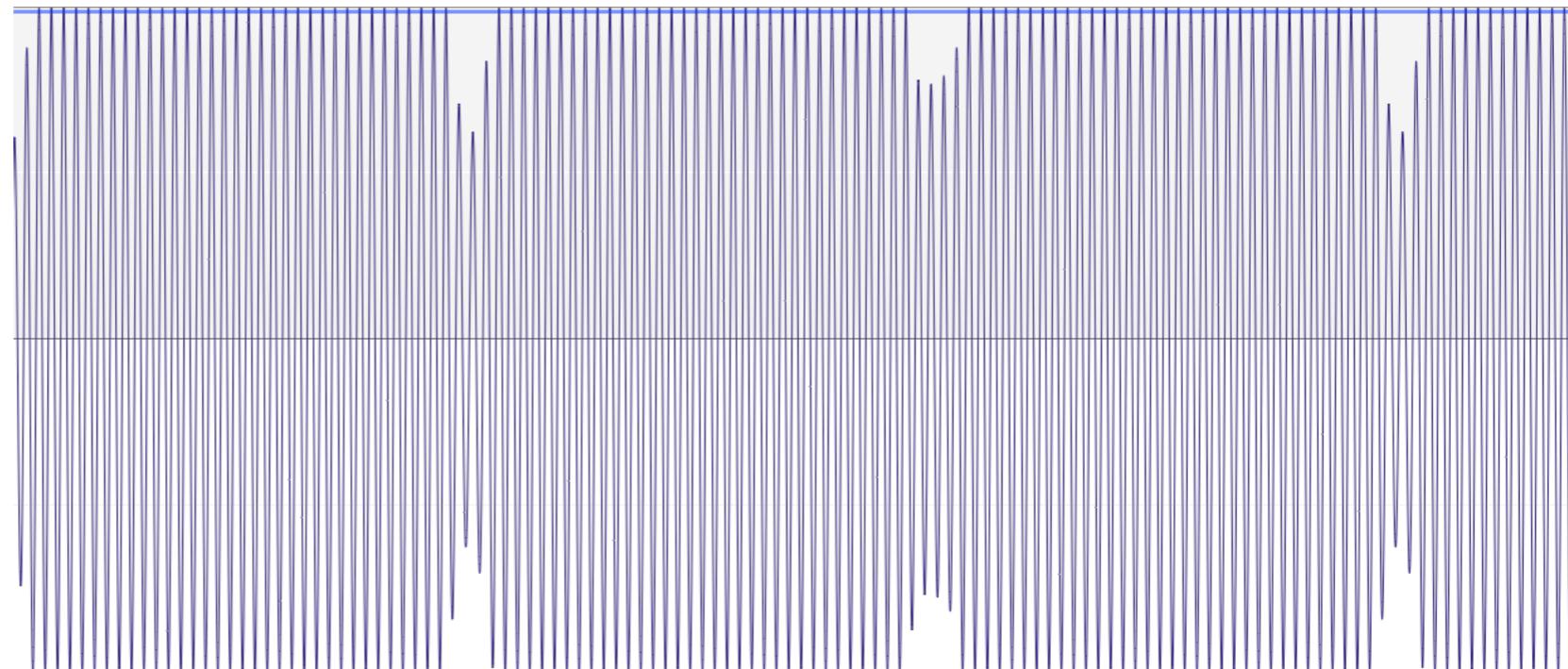
# Hörbeispiel

- phasen-  
modulierte  
Sinuskurve



# Hörbeispiel

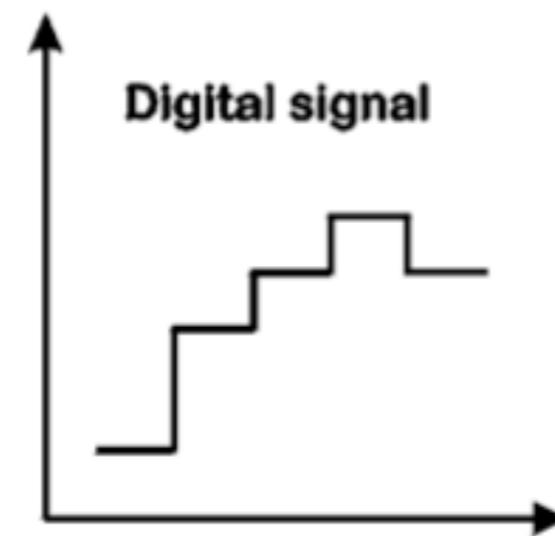
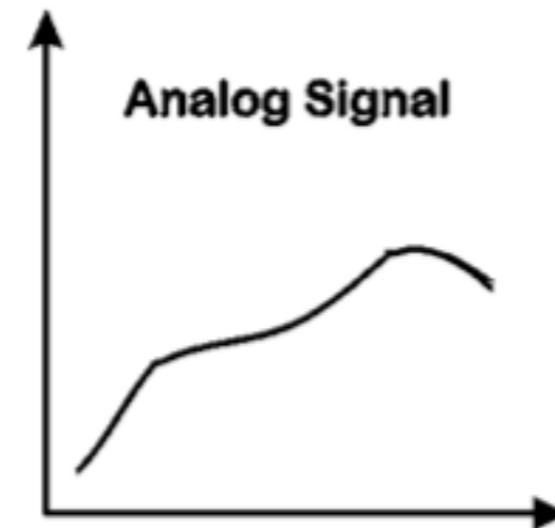
- phasen-modulierte Sinuskurve
  - mit glatten Übergang



zum Vergleich

# Digitale und analoge Signale im Vergleich

- Für einen Sender gibt es zwei Optionen
  - Digitale Übertragung
    - Endliche Menge von diskreten Signalen
    - Z.B. endliche Menge von Spannungsgrößen/Stromstärken
  - Analoge Übertragung
    - Unendliche (kontinuierliche) Menge von Signalen
    - Z.B. Signal entspricht Strom oder Spannung im Draht
- Vorteil der digitalen Signale:
  - Es gibt die Möglichkeit Empfangsungenauigkeiten zu reparieren und das ursprüngliche Signal zu rekonstruieren
  - Auftretende Fehler in der analogen Übertragung können sich weiter verstärken



# Fouriertransformation

- Fouriertransformation einer periodischen Funktion:
  - Zerlegung in verschiedene
  - Sinus/Cosinus-Funktionen
- Dirichletsche Bedingungen einer periodischen Funktion  $f$ :
  - $f(x) = f(x+2\pi)$
  - $f(x)$  ist in  $(-\pi, \pi)$  in endlich vielen Intervallen stetig und monoton
  - Falls  $f$  nicht stetig in  $x_0$ , dann ist  $f(x_0) = (f(x_0-0) + f(x_0+0))/2$
- Satz von Dirichlet:
  - $f(x)$  genüge in  $(-\pi, \pi)$  den Dirichletschen Bedingungen. Dann existieren Fourerkoeffizienten  $a_0, a_1, a_2, \dots, b_1, b_2, \dots$  so dass gilt:

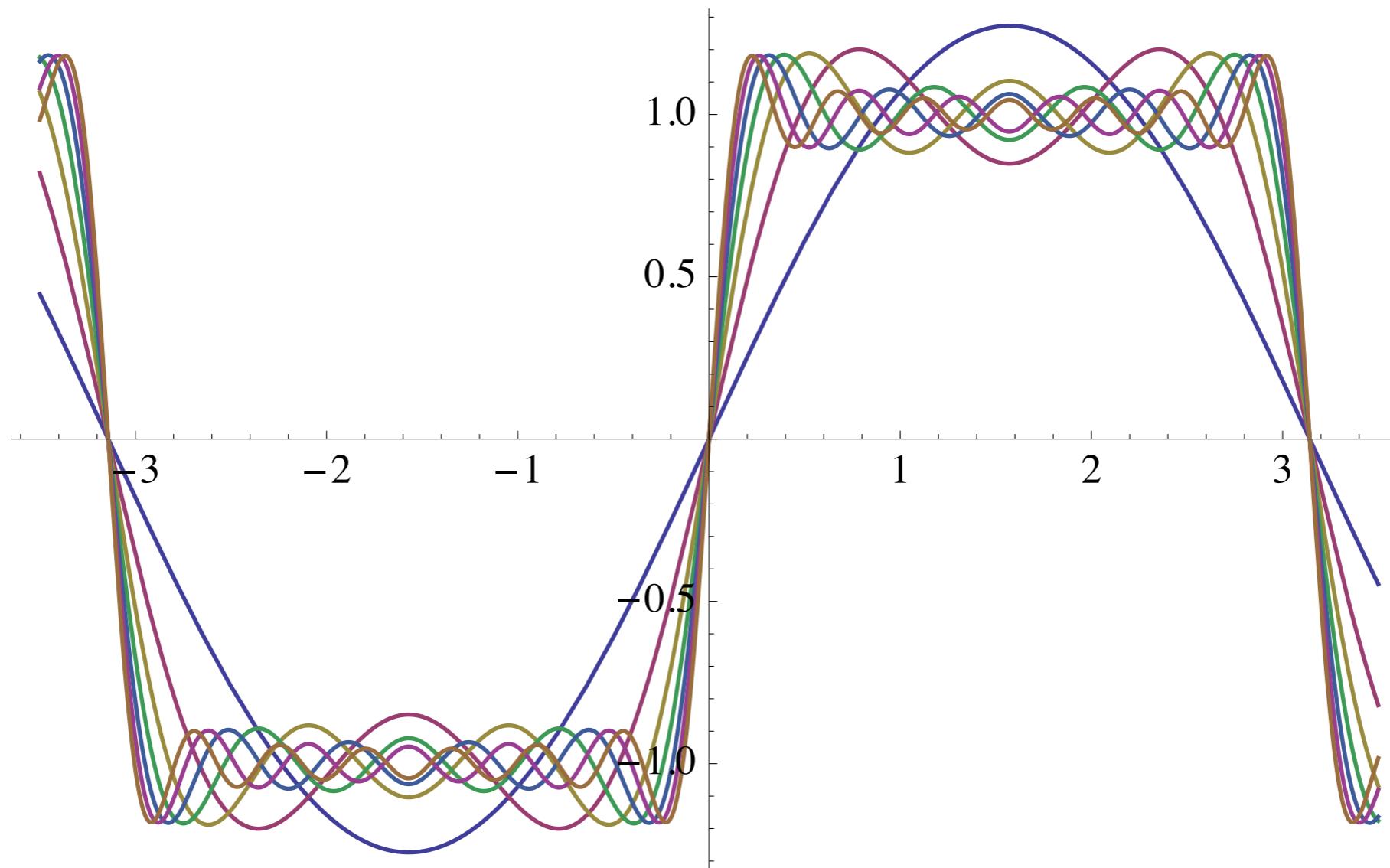
$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n a_k \cos kx + b_k \sin kx = f(x)$$

# Fouriertransformation

## ■ Fouriertransformation einer periodischen Funktion:

- Zerlegung in verschiedene
- Sinus/Cosinus-Funktionen

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n a_k \cos kx + b_k \sin kx = f(x)$$



# Berechnung der Fourierkoeffizienten

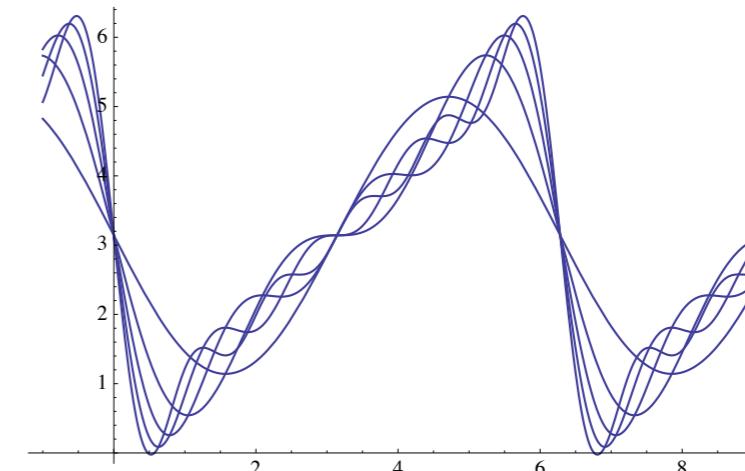
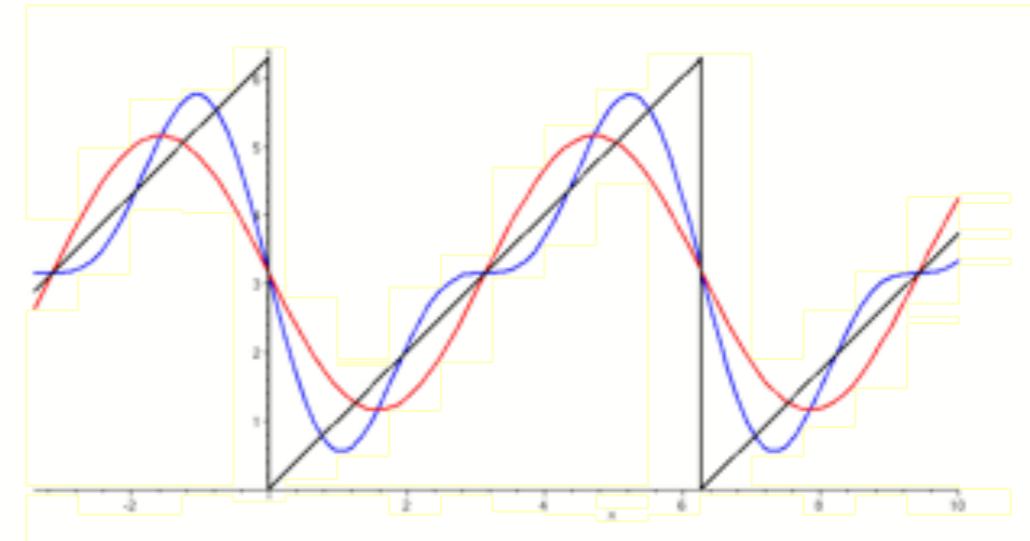
- Die Fourierkoeffizienten  $a_i, b_i$  können wie folgt berechnet werden:

- Für  $k = 0, 1, 2, \dots$

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos kx \, dx$$

- Für  $k = 1, 2, 3, \dots$

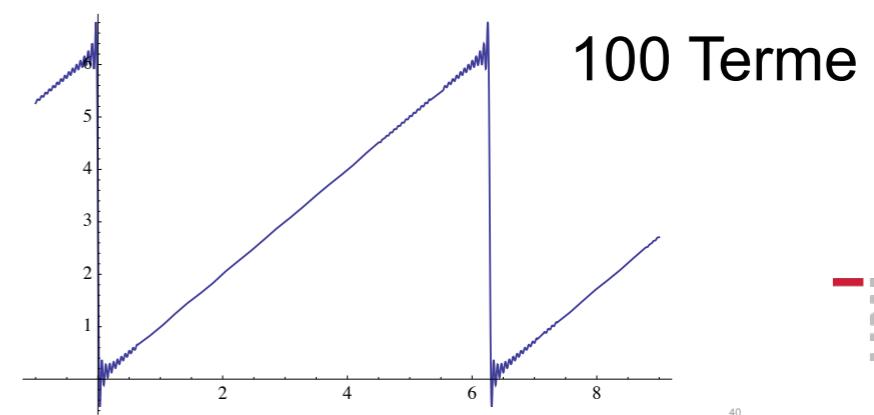
$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin kx \, dx$$



- Beispiel: Sägezahnkurve

$$f(x) = x, \text{ für } 0 < x < 2\pi$$

$$f(x) = \pi - 2 \left( \frac{\sin x}{1} + \frac{\sin 2x}{2} + \frac{\sin 3x}{3} + \dots \right)$$



# Fourier-Analyse für allgemeine Periode

- Der Satz von Fourier für Periode  $T=1/f$ :
  - Die Koeffizienten  $c$ ,  $a_n$ ,  $b_n$  ergeben sich dann wie folgt

$$g(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos(2\pi k f t) + b_k \sin(2\pi k f t)$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \cos(2\pi n f t) dt$$

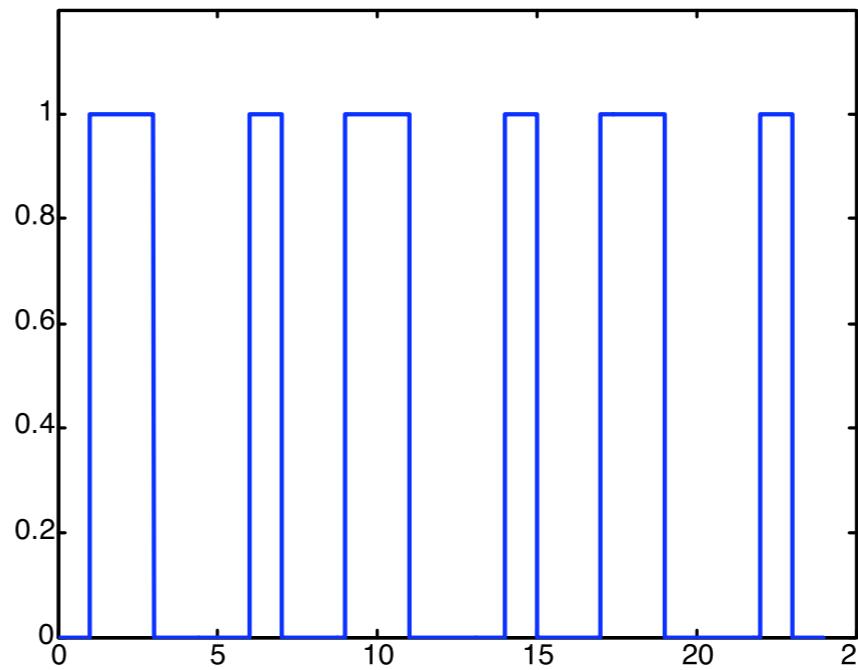
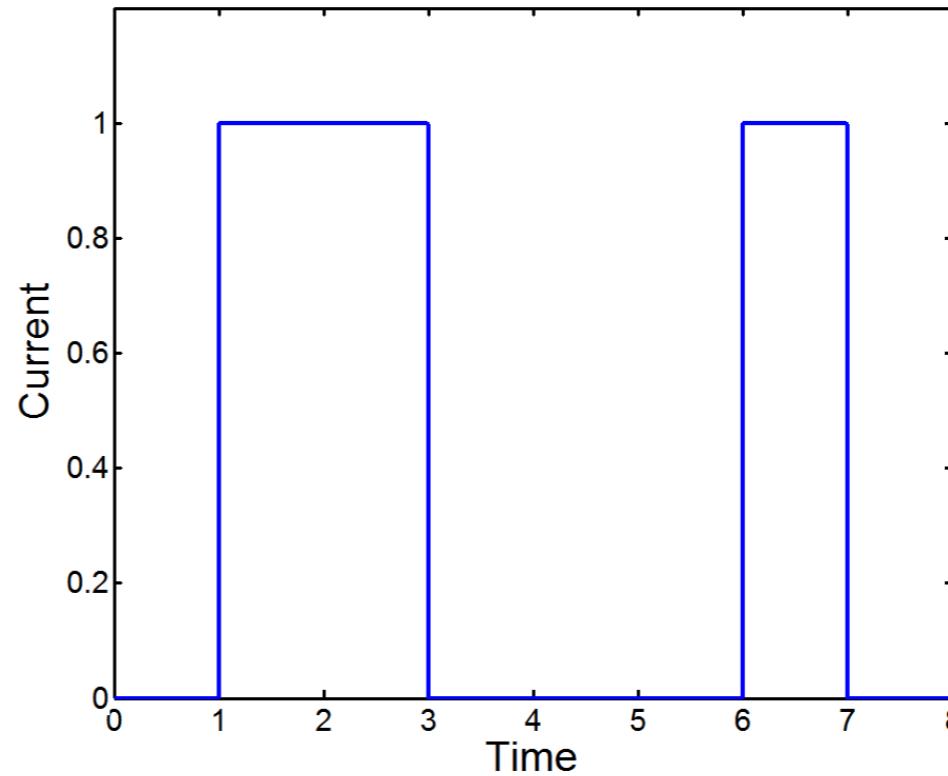
$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \sin(2\pi n f t) dt$$

- Die Quadratsumme der  $k$ -ten Terme ist proportional zu der Energie, die in dieser Frequenz verbraucht wird:

$$(a_k)^2 + (b_k)^2$$

# Anwendung der Fourier-Analyse

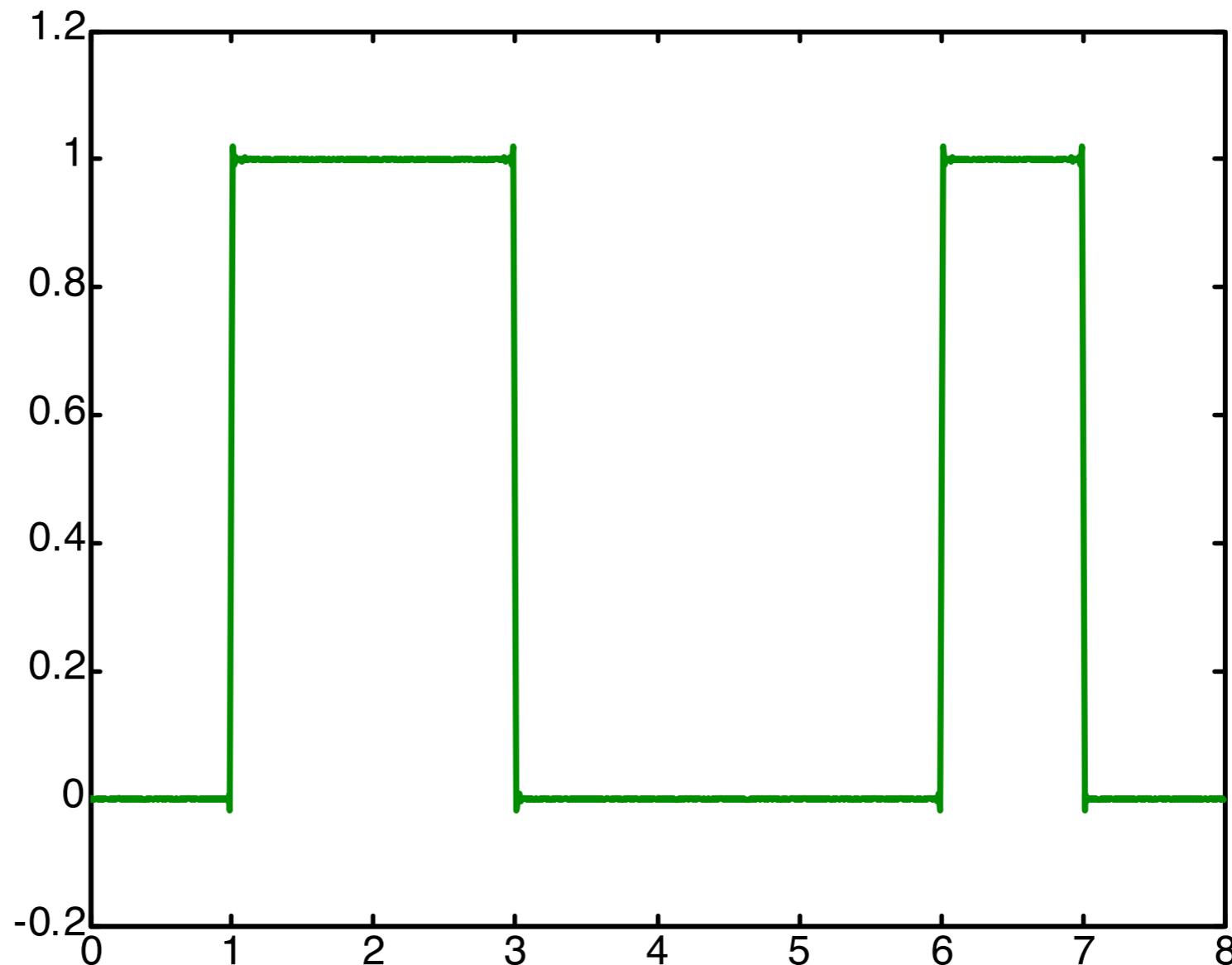
- Problem:
  - Signal ist nicht periodisch
- Lösung:
  - Wiederholung des Signals mit Periode 8



(aus Vorlesung von Holger Karl)

# Anwendung der Fourier-Analyse

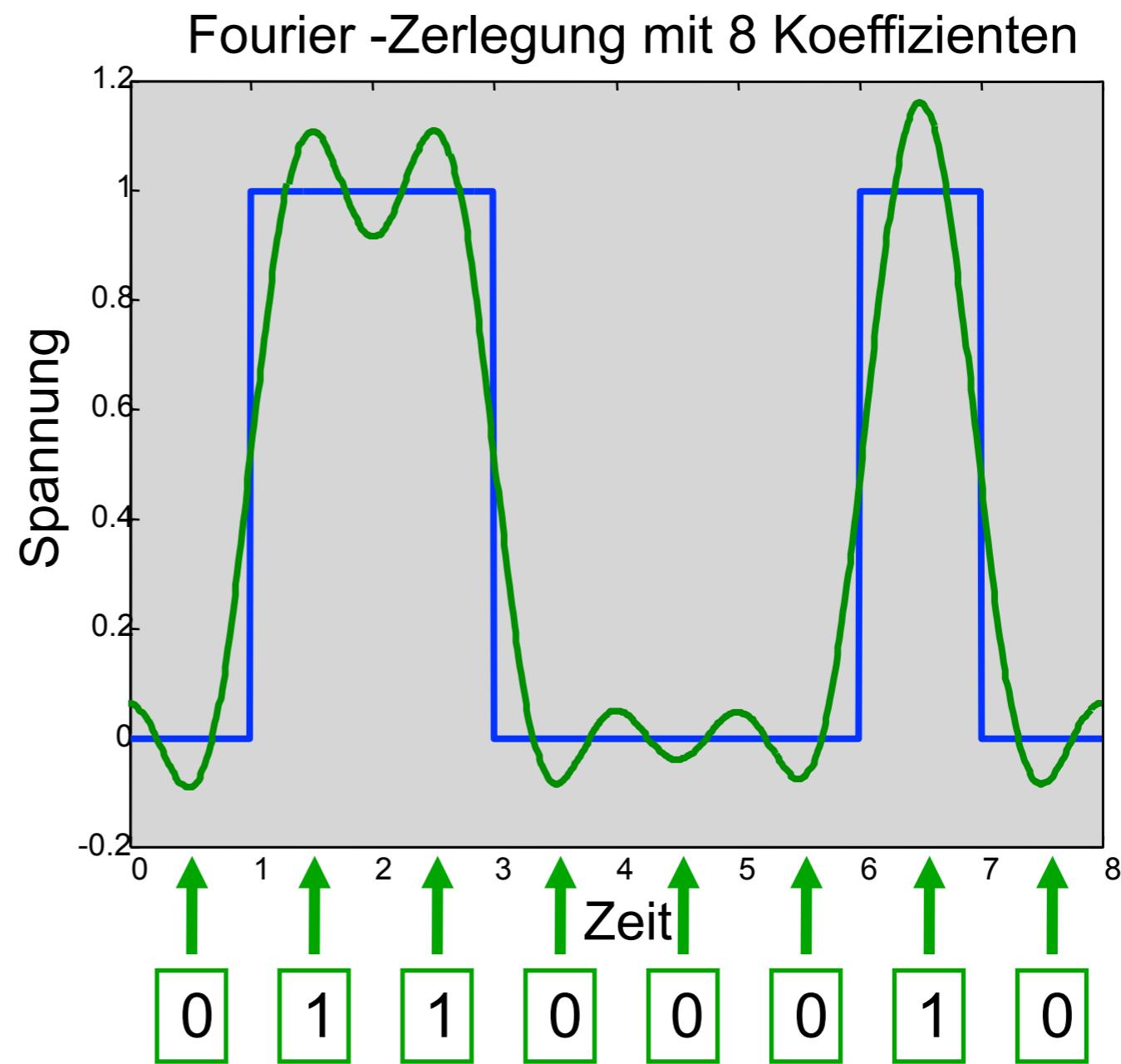
- Fourier-Analyse mit 512 Termen:



(aus Vorlesung von Holger Karl)

# Wie oft muss man messen?

- Wie viele Messwerte sind notwendig, um eine Fouriertransformation bis zur k.-ten Komponenten genau zu bestimmen?
- Nyquist-Shannon-Abtasttheorem
  - Um ein kontinuierliches bandbegrenztes Signal mit einer Maximalfrequenz  $f_{\max}$  zu rekonstruieren, braucht man mindestens eine Abtastfrequenz von  $2 f_{\max}$ .



# Nyquists Theorem

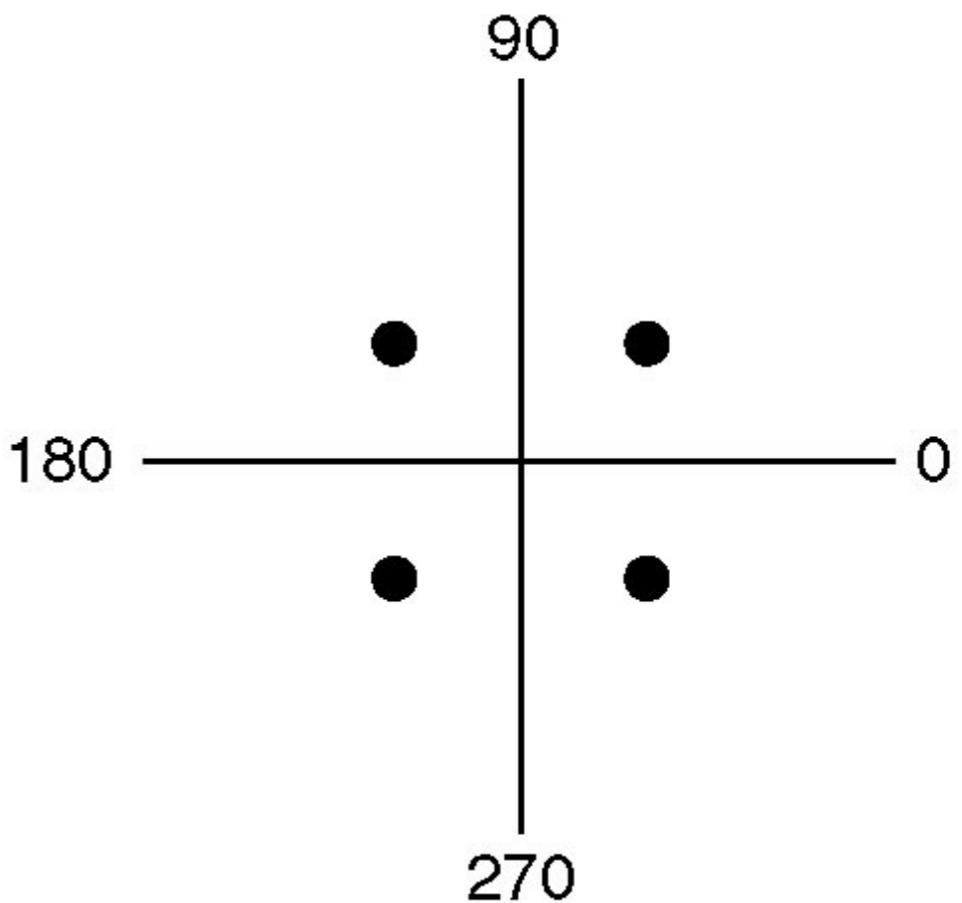
- Definition
  - Die Bandweite  $H$  ist die Maximalfrequenz in der Fourier-Zerlegung
- Angenommen:
  - Die maximale Frequenz des empfangenen Signals ist  $f=H$  in der Fouriertransformation
    - (Komplette Absorption [unendliche Dämpfung] aller höheren Frequenzen)
  - Die Anzahl der verschiedenen verwendeten Symbole ist  $V$
  - Es treten keinerlei anderen Störungen, Verzerrungen oder Dämpfungen auf
- Theorem von Nyquist
  - Die maximal mögliche Symbolrate ist höchstens  $2 H$  baud.
  - Die maximal mögliche Datenrate ist höchstens  $2 H \log_2 V$  bit/s.

# Helfen mehr Symbole?

- Nyquists Theorem besagt, dass rein theoretisch die Datenrate mit der Anzahl der verwendeten Symbole vergrößert werden könnten
- Diskussion:
  - Nyquists Theorem liefert nur eine theoretische obere Schranke und kein Verfahren zur Übertragung
  - In der Praxis gibt es Schranken in der Messgenauigkeit
  - Nyquists Theorem berücksichtigt nicht das Problem des Rauschens

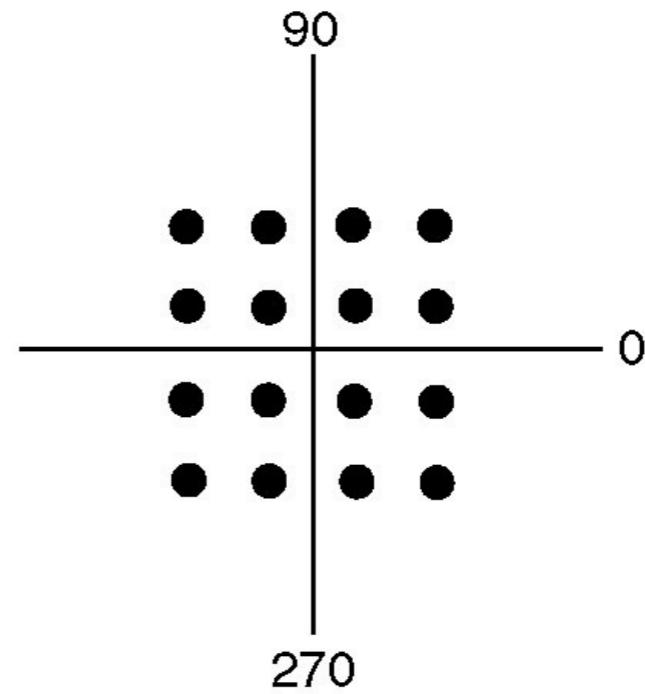
# PSK mit verschiedenen Symbolen

- Phasenverschiebungen können vom Empfänger sehr gut erkannt werden
- Kodierung verschiedener Symbole sehr einfach
  - Man verwendet Phasenverschiebung z.B.  $\pi/4$ ,  $3/4\pi$ ,  $5/4\pi$ ,  $7/4\pi$ 
    - selten: Phasenverschiebung 0 (wegen Synchronisation)
  - Bei vier Symbolen ist die Datenrate doppelt so groß wie die Symbolrate
- Diese Methode heißt Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)



# Amplituden- und Phasenmodulation

- Amplituden- und Phasenmodulation können erfolgreich kombiniert werden
- Beispiel: 16-QAM (Quadrature Amplitude Modulation)
  - Man verwendet 16 verschiedene Kombinationen von Phasen und Amplituden für jedes Symbol
  - Jedes Symbol kodiert vier Bits ( $2^4 = 16$ )
  - Die Datenrate ist also viermal so groß wie die Symbolrate

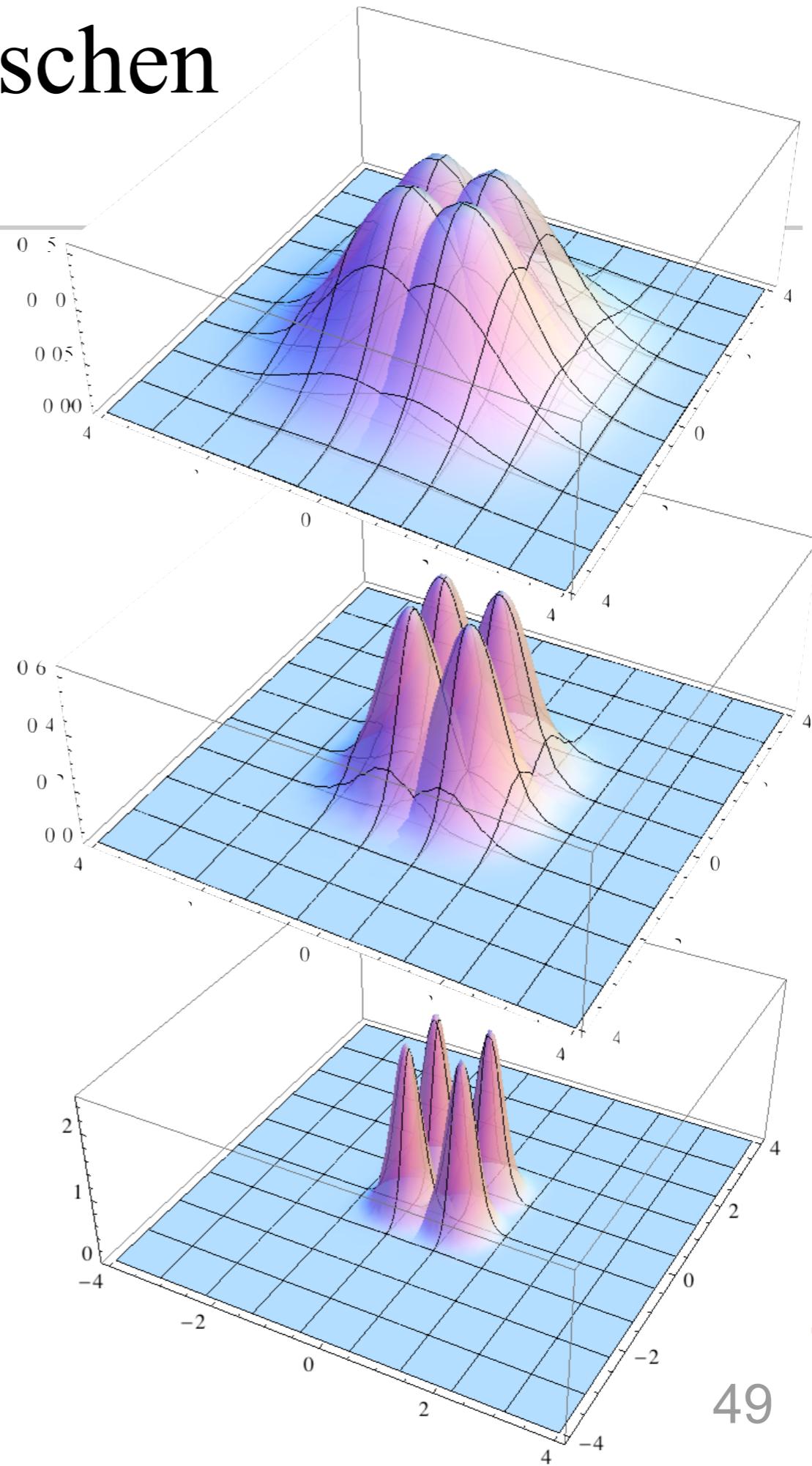


# QAM und Rauschen

- Rauschen wird mit der Normalverteilung beschrieben

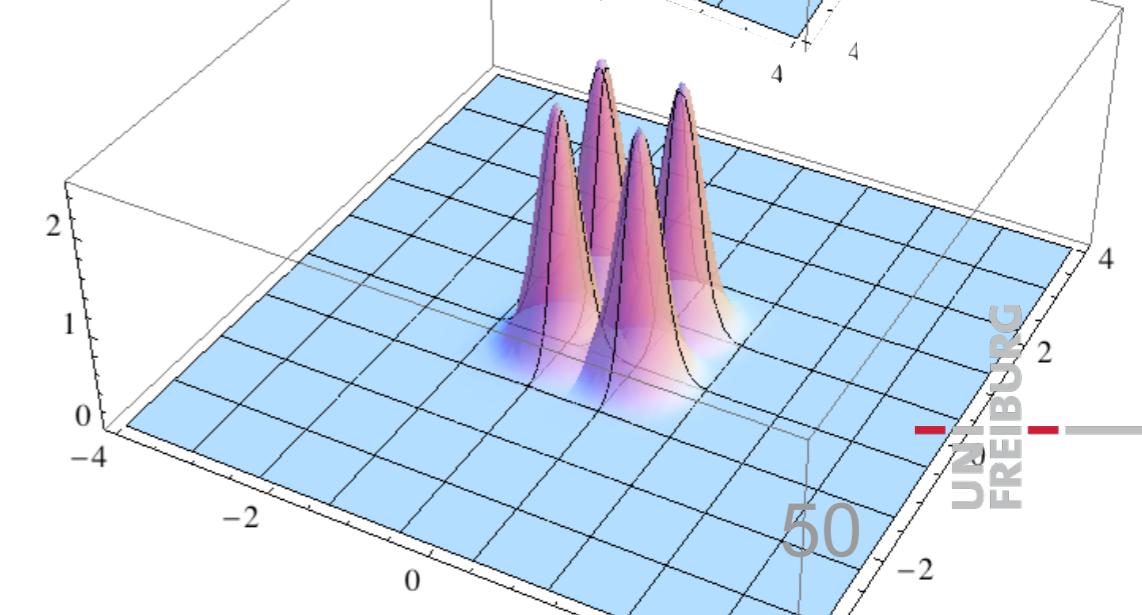
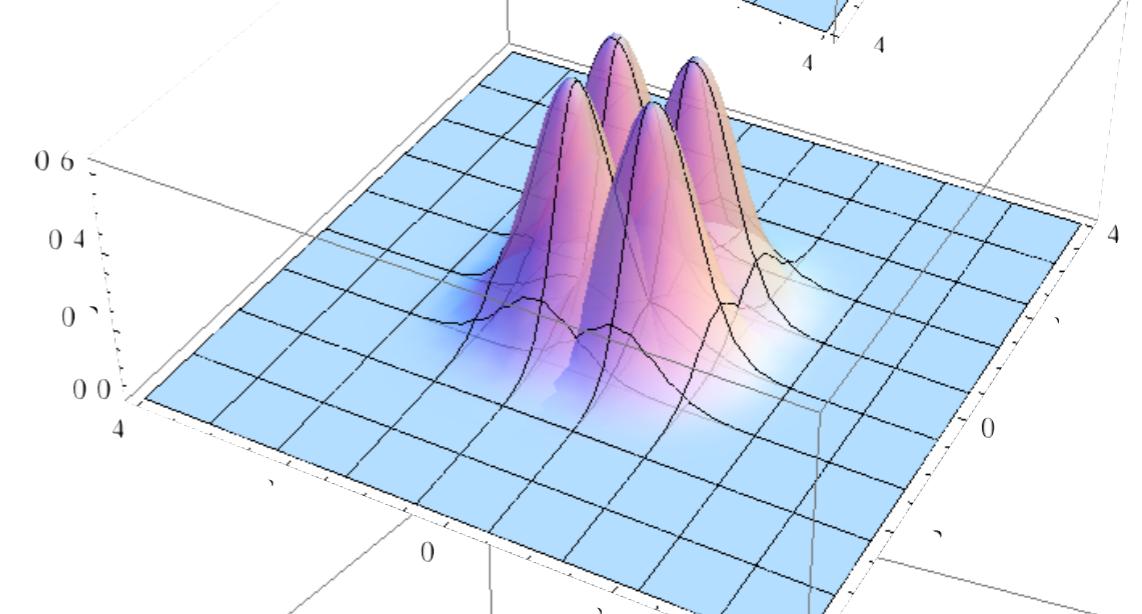
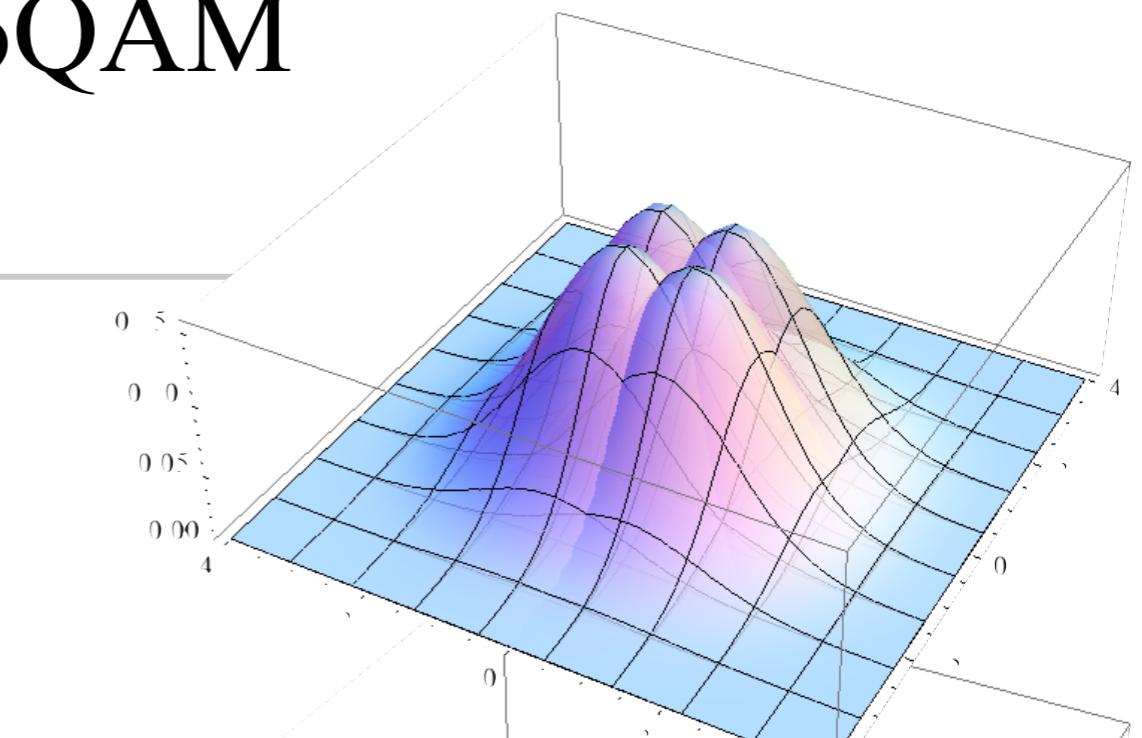
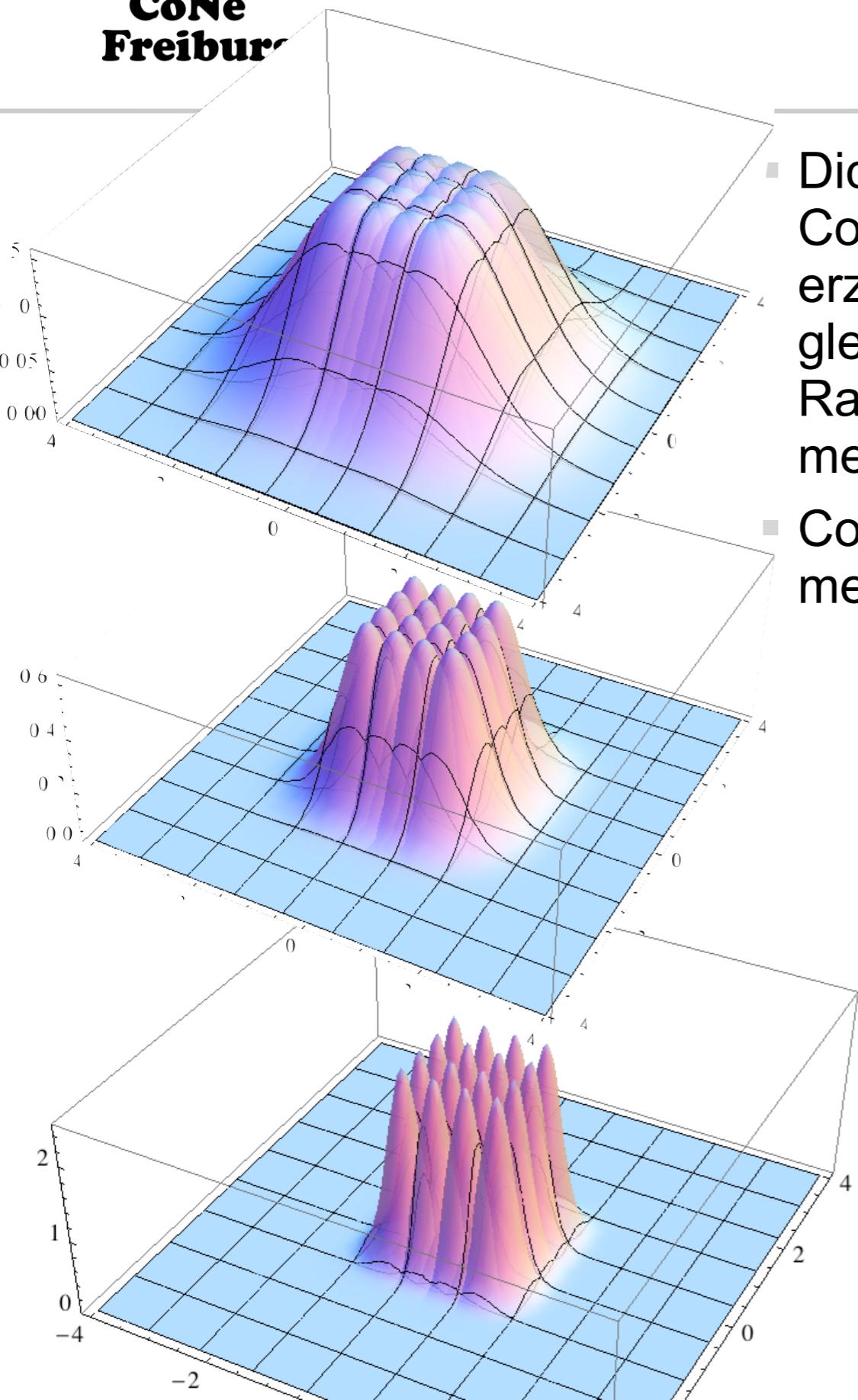
$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x - \mu}{\sigma} \right)^2}$$

- Bitfehler entstehen, wenn das dekodierte Signal zu stark abweicht
- Das Signal/Rauschverhältnis korreliert mit der Standardabweichung  $\sigma$



# QAM versus 16QAM

- Dichtere Codes erzeugen bei gleichem Rauschen mehr Fehler
- Codieren aber mehr Bits



# Die Bitfehlerhäufigkeit und das Signalrauschverhältnis

- Je höher das Signal-Rausch-Verhältnis, desto geringer ist der auftretende Fehler
- Bitfehlerhäufigkeit (bit error rate - BER)
  - Bezeichnet den Anteil fehlerhaft empfangener Bits
- Abhängig von
  - Signalstärke,
  - Rauschen,
  - Übertragungsgeschwindigkeit
  - Verwendetem Verfahren
- Abhängigkeit der Bitfehlerhäufigkeit (BER) vom Signal-Rausch-Verhältnis
  - Beispiel:  
4 QAM, 16 QAM, 64 QAM, 256 QAM

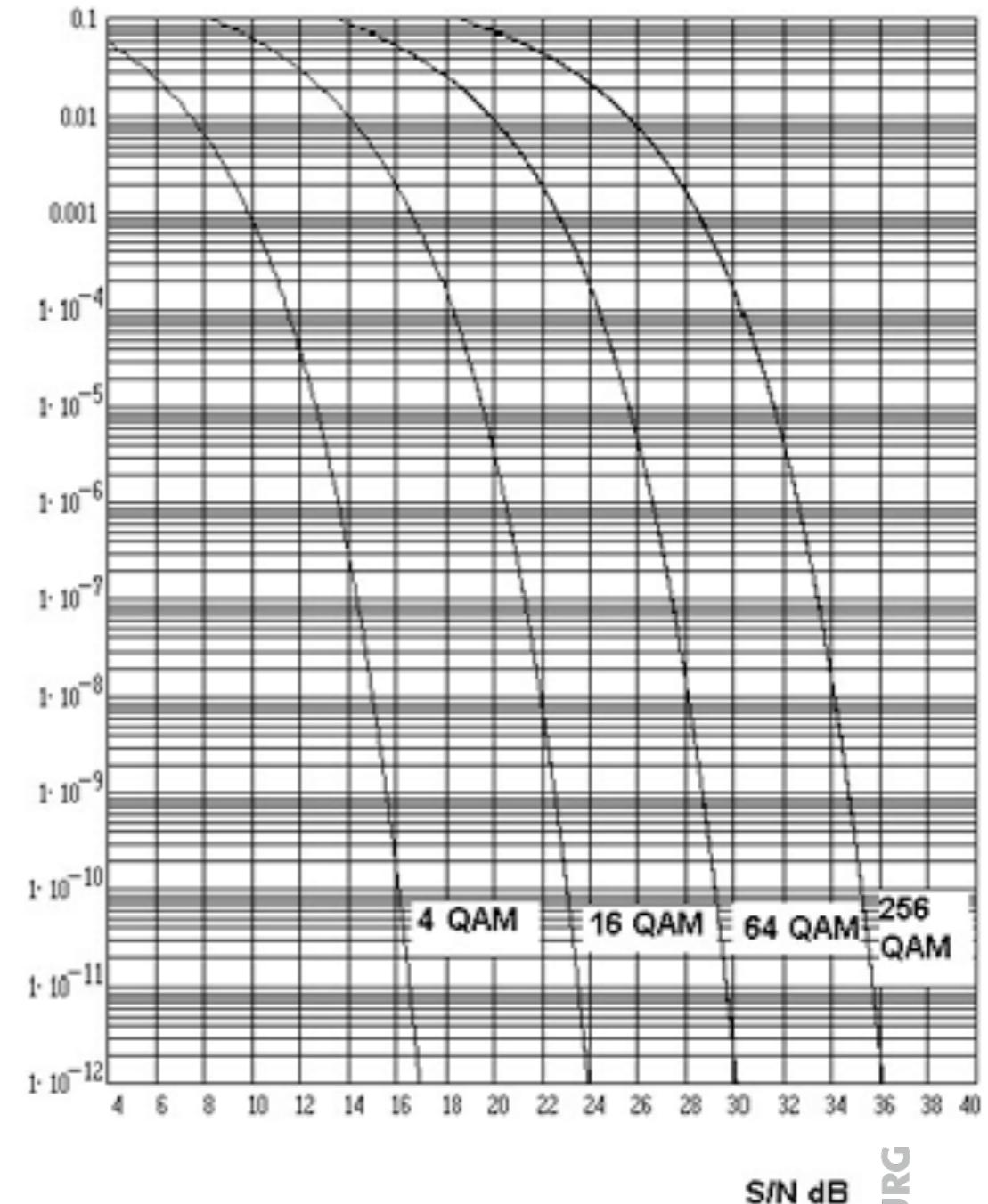


Abb. aus [http://www.blondertongue.com/QAM-Transmodulator/Digital\\_Signal\\_Analysis.php](http://www.blondertongue.com/QAM-Transmodulator/Digital_Signal_Analysis.php)

# Der Satz von Shannon

- Tatsächlich ist der Einfluss des Rauschens fundamental
  - Betrachte das Verhältnis zwischen Sendestärke S zur Stärke des Rauschens N
  - Je weniger Rauschen desto besser können Signale erkannt werden
- Theorem von Shannon
  - Die maximale mögliche Datenrate ist  $H \log_2 (1+S/N)$  bit/s
    - bei Bandweite H
    - Signalstärke S
- Achtung
  - Dies ist eine theoretische obere Schranke
  - Existierende Kodierungen erreichen diesen Wert nicht

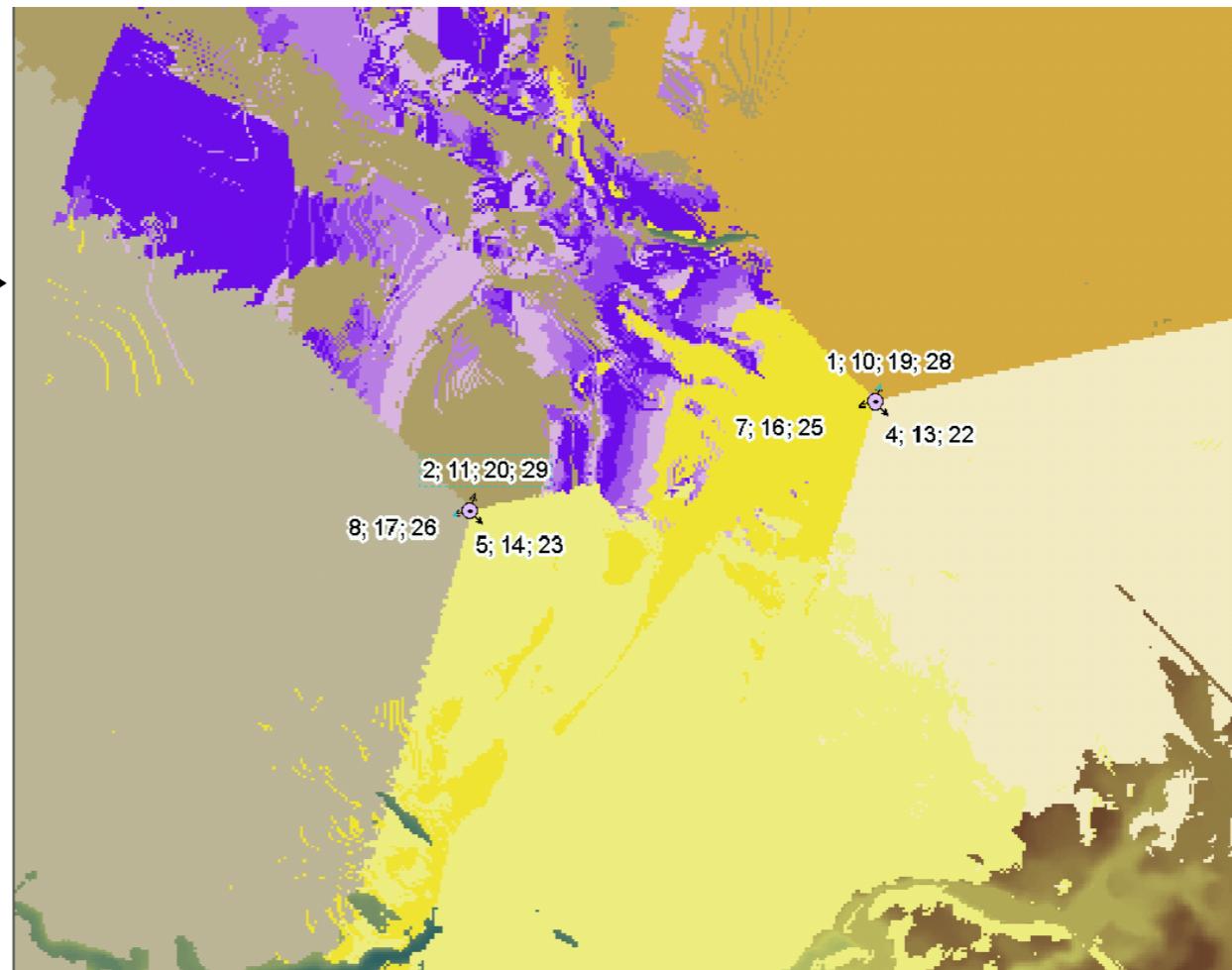
# Mehrfachnutzung des Mediums

- Raummultiplexverfahren
  - Parallele und exklusive Nutzung von Übertragungskanäle
    - z.B. Extraleitungen/Zellen/Richtantenne
- Frequenzmultiplexverfahren
  - Mehrere zu übertragende Signale in einem Frequenzbereich gebündelt;
  - Bei Funkübertragung werden unterschiedlichen Sendern unterschiedliche Frequenzen zugewiesen.
- Zeitmultiplexverfahren
  - Zeitversetztes Senden mehrerer Signale
- Wellenlängenmultiplexverfahren
  - Optisches Frequenzmultiplexverfahren für die Übertragung in Glasfaserkabel
- Codemultiplexverfahren
  - Nur in Funktechnik: Kodierung des Signals in orthogonale Codes, die nun gleichzeitig auf einer Frequenz gesendet werden können
  - Dekodierung auch bei Überlagerung möglich

# Raum

- Raumaufteilung (Space-Multiplexing)

- Ausnutzung des Abstandsverlusts zum parallelen Betriebs verschiedener Funkzellen → zellulare Netze
- Verwendung gerichteter Antennen zur gerichteten Kommunikations
  - GSM-Antennen mit Richtcharakteristik
  - Richtfunk mit Parabolantenne
  - Laserkommunikation
  - Infrarotkommunikation



# Frequenz

## ■ Frequenzmultiplex

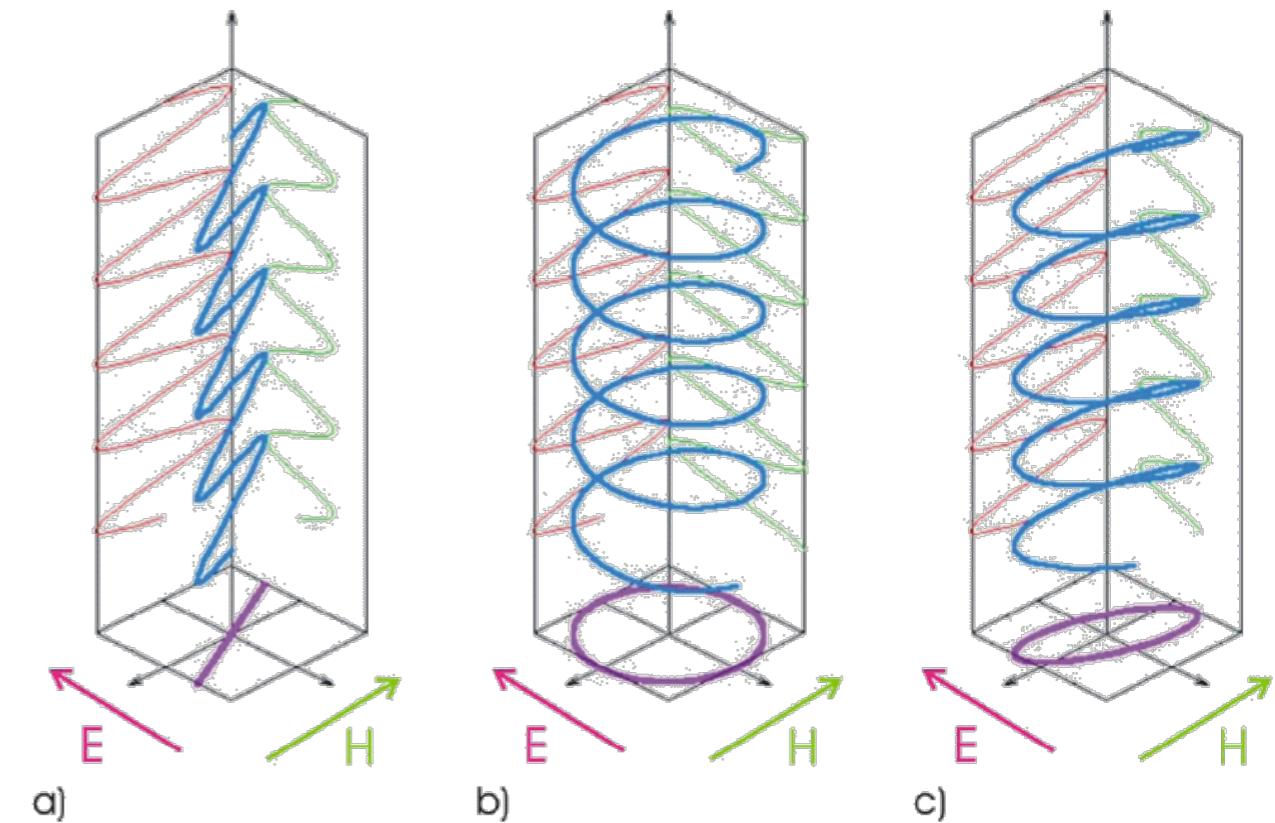
- Aufteilung der Bandbreite in Frequenzabschnitte
- Spreizen der Kanäle und Hopping
  - Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)
    - Xor eines Signals mit einer Folge Pseudozufallszahlen beim Sender und Empfänger (Verwandt mit Codemultiplex)
    - Fremde Signale erscheinen als Hintergrundrauschen
  - Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)
    - Frequenzwechsel durch Pseudozufallszahlen
    - Zwei Versionen
      - Schneller Wechsel (fast hopping): Mehrere Frequenzen pro Nutzdatenbit
      - Langsamer Wechsel (slow hopping): Mehrere Nutzdatenbits pro Frequenz

# Code

- CDMA (Code Division Multiple Access)
  - z.B. GSM (Global System for Mobile Communication)
  - oder UMTS (Universal Mobile Telecommunications System)
- Beispiel:
  - Sender A:
    - 0 ist  $(-1, -1)$
    - 1 ist  $(+1, +1)$
  - Sender B:
    - 0 ist  $(-1, +1)$
    - 1 ist  $(+1, -1)$
  - A sendet 0, B sendet 0:
    - Ergebnis:  $(-2, 0)$
  - C empfängt  $(-2, 0)$ :
    - Dekodierung bzgl. A:  $(-2, 0) \cdot (-1, -1) = (-2)(-1) + 0(-1) = 2$
    - A hat also 0 gesendet (da Ergebnis positiv)

# Polarization-division multiplexing

- Spezialfall des Wellenlängenmultiplex-Verfahren
- Polarisation
  - Durch die Bewegungsrichtung der elektrischen Ladung ergibt sich eine Polarisation
- Z.B.
  - linear: horizontal, vertikal
  - zirkular
  - elliptisch (allgemeiner Fall)
- Die Verwendung verschiedener Polarisationen kann zur Trennung oder zur Modulation verwendet werden
  - in Kombination mit QPSK = 4-PSK
  - Z.B. 112 Gb/s PM-QPSK in Glasfaser mit Übertragungen bis zu 6000 km mit 200 km Distanz zwischen den Verstärkern



<http://optikwiki.harzoptics.de/doku.php?id=polarisation>

- Leitungsgebundene Übertragungsmedien
  - Kupferdraht – Twisted Pair
  - Kupferdraht – Koaxialkabel
  - Glasfaser
- Drahtlose Übertragung
  - Funkübertragung
  - Mikrowellenübertragung
  - Infrarot
  - Lichtwellen

# Twisted Pair



(a)

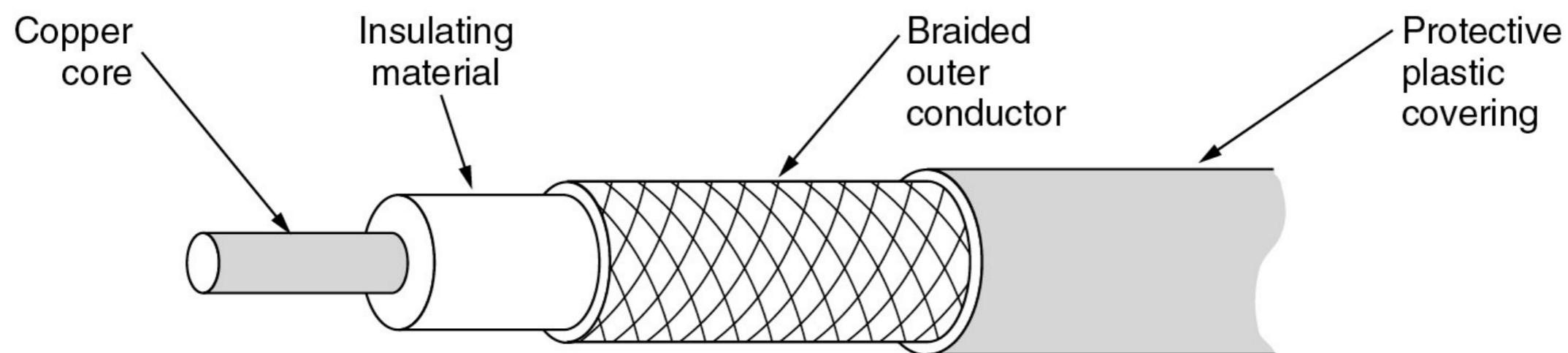


(b)

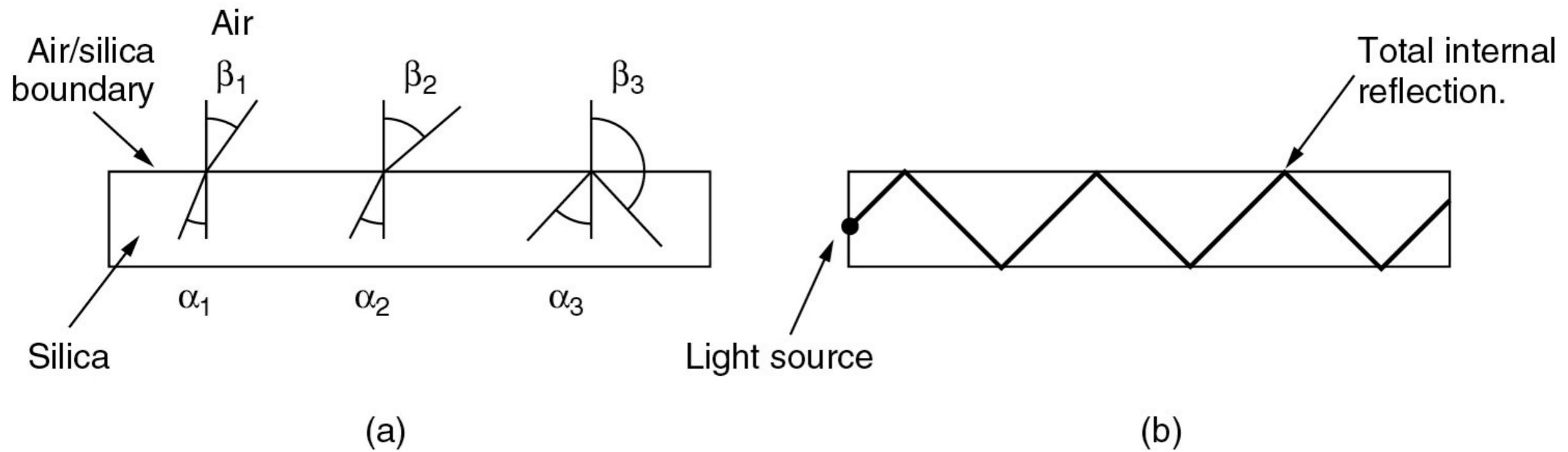
(a) Category 3 UTP.

(b) Category 5 UTP.

# Koaxialkabel



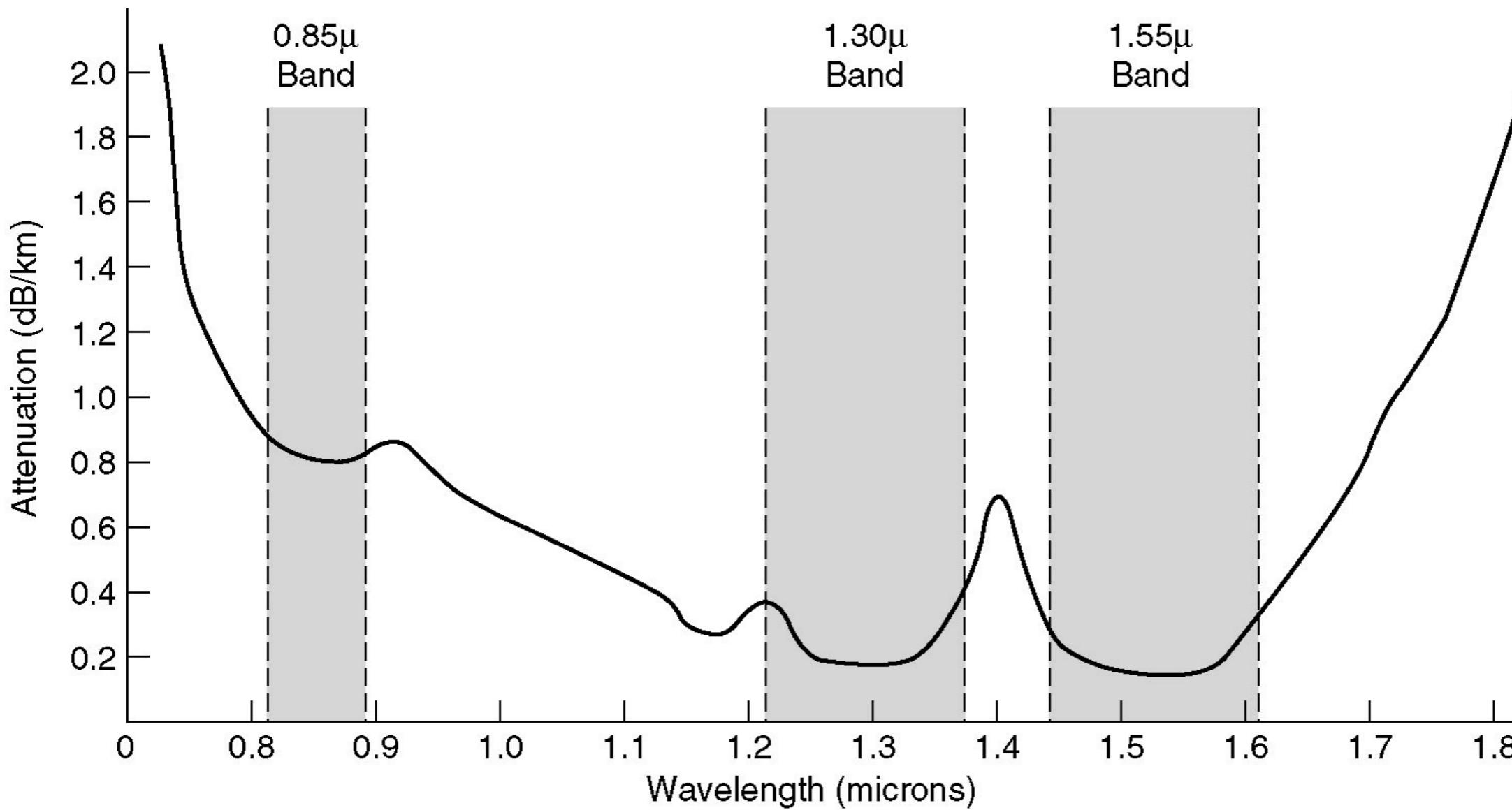
# Glasfaser



**Gesetz von Snellius:** 
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_{\text{Glas}}}{c_{\text{Luft}}}$$

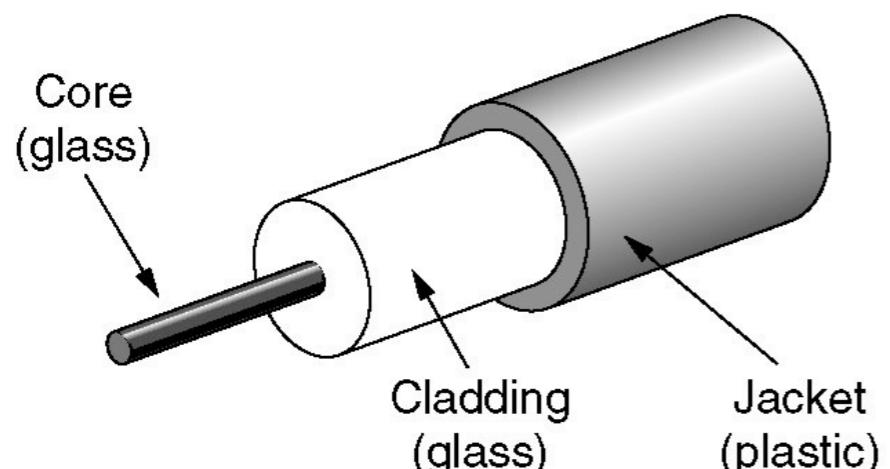
- (a) Beugung und Reflektion an der Luft/Silizium-Grenze bei unterschiedlichen Winkeln
- (b) Licht gefangen durch die Reflektion

- Dämpfung von Infrarotlicht in Glasfaser

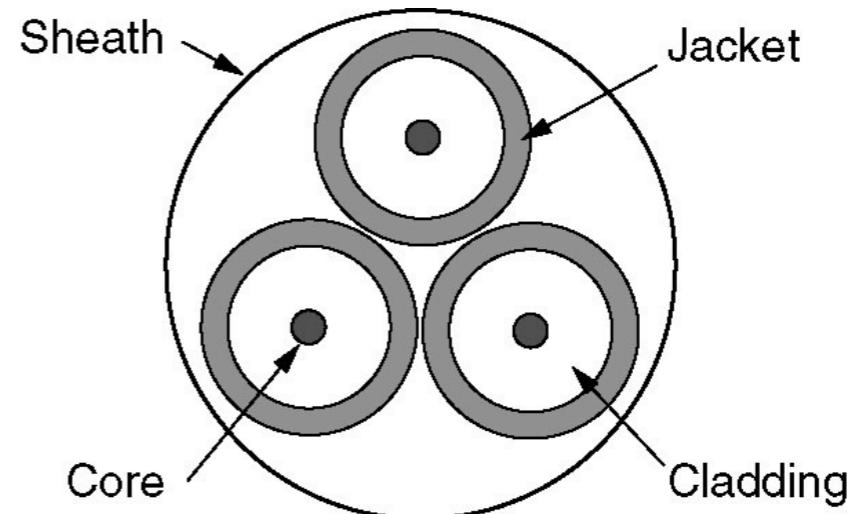


# Glasfaser

- (a) Seitenansicht einer einfachen Faser
- (b) Schnittansicht eines Dreier-Glasfaserbündels

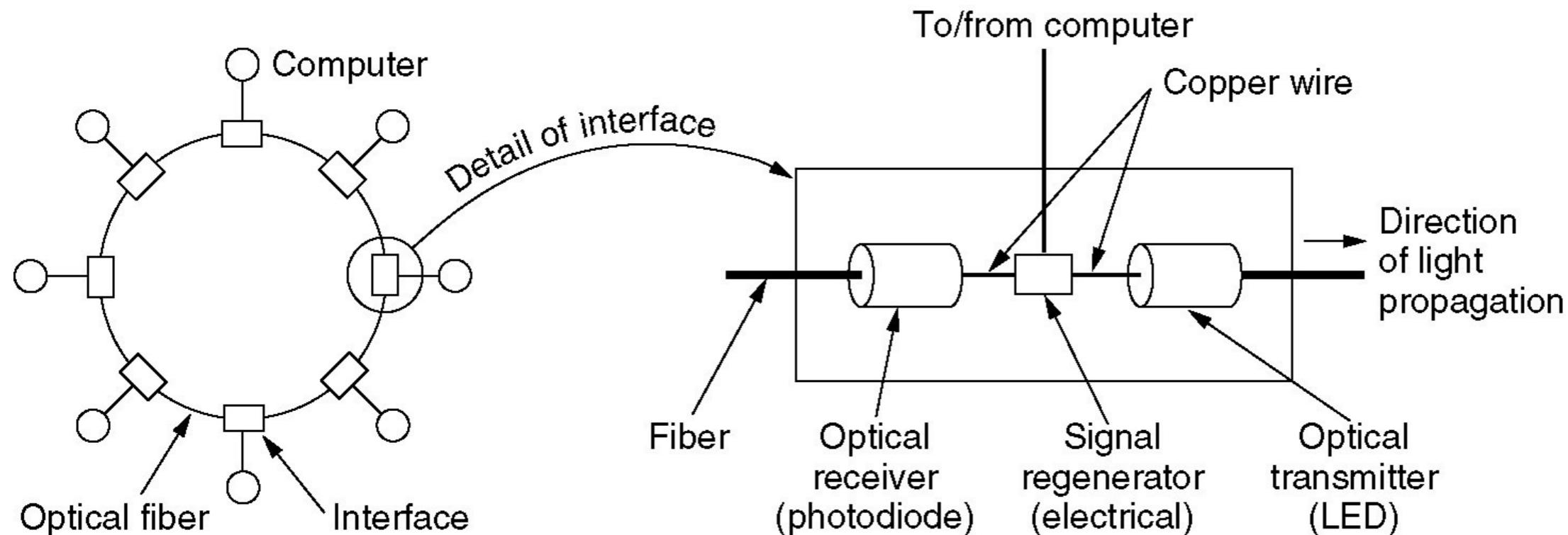


(a)



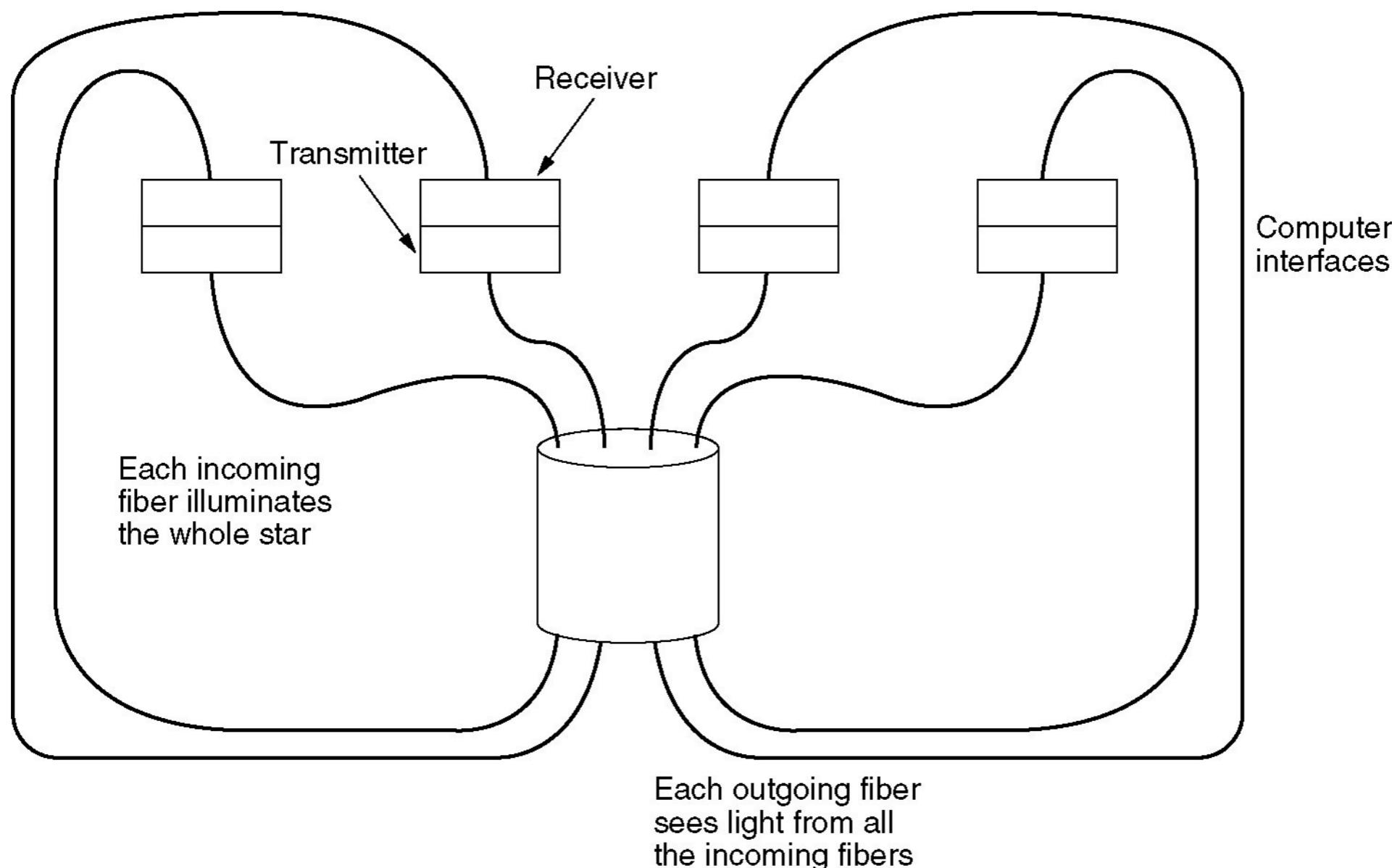
(b)

## Glasfaserring mit aktiven Repeatern



# Glasfaser-Netzwerke

## Eine passive Sternverbindung in einem Glasfasernetz



# Fallbeispiel: Ethernet

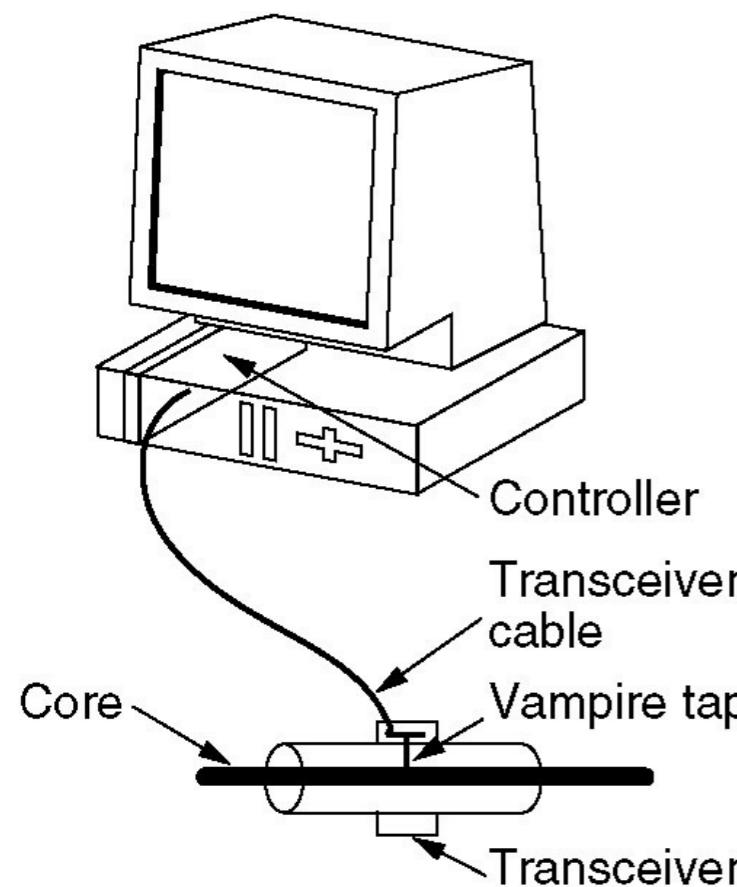
- Beispiel aus der Praxis mit Mediumzugriff:  
Ethernet
  - IEEE Standard 802.3
- Punkte im Standard
  - Verkabelung
  - Bitübertragungsschicht
  - Sicherungsschicht mit Mediumzugriff

# Bitübertragungsschicht Ethernet

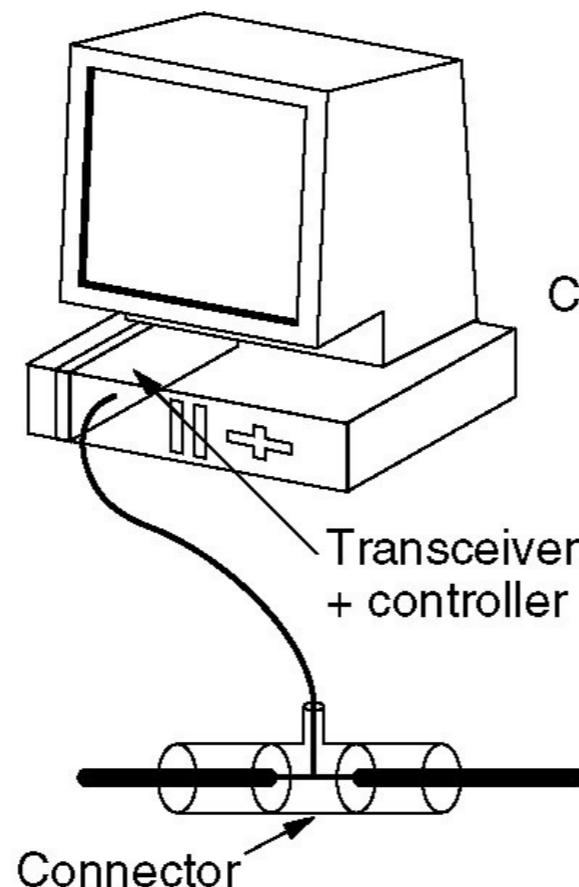
- Mediumabhängig
- Typisch: Manchester encoding
  - mit +/- 0.85 V
- Code-Verletzung zeigt Frame-Grenzen auf

# Ethernet cabling

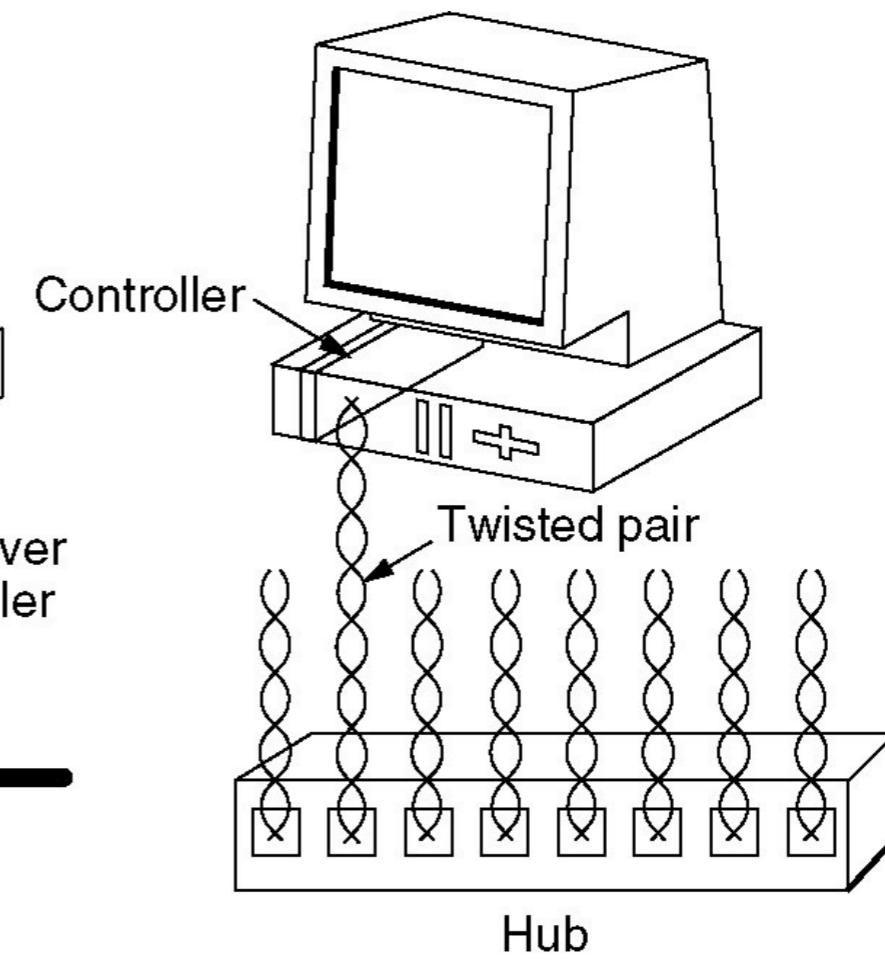
Name	Cable	Max. seg.	Nodes/seg.	Advantages
10Base5	Thick coax	500 m	100	Original cable; now obsolete
10Base2	Thin coax	185 m	30	No hub needed
10Base-T	Twisted pair	100 m	1024	Cheapest system
10Base-F	Fiber optics	2000 m	1024	Best between buildings



10Base5



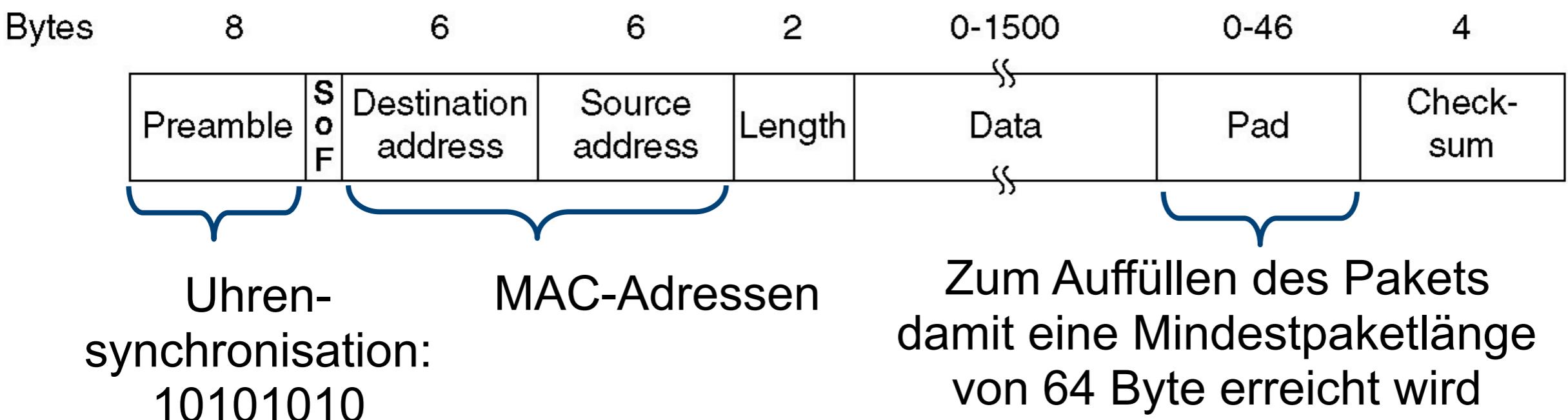
10Base2



10BaseT

# Ethernet MAC-Schicht

- Im wesentlichen: CSMA/CD mit binary exponential backoff
- Frame-Format



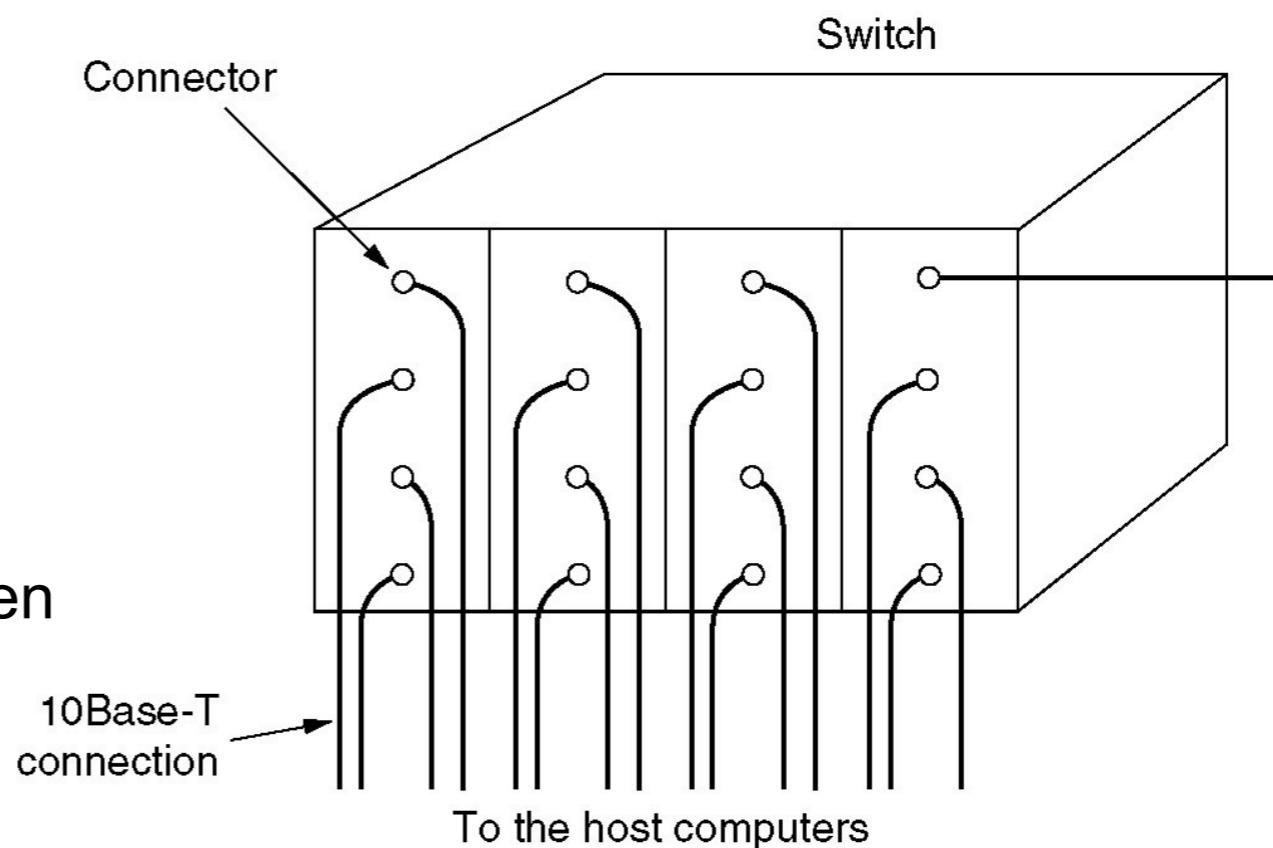
# Switch versus Hub

## ■ Hub

- verknüpft Ethernet-Leitungen nabenförmig
- jede Verbindung hört alles
- Durch CSMA/CD wird die Übertragungsrate reduziert

## ■ Switch

- unterteilt die eingehenden Verbindungen in kleinere Kollisionsteilmengen
- die Prüfsumme eines eingehenden Pakets wird überprüft
- Kollisionen werden nicht weiter gegeben
- interpretiert die Zieladresse und leitet das Paket nur in diese Richtung weiter



# Fast Ethernet

- Ursprünglich erreichte Ethernet 10 MBit/s
- 1992: Fast Ethernet
  - Ziele: Rückwärtskompatibilität
  - Resultat: 802.3u
- Fast Ethernet
  - Frame-Format ist gleichgeblieben
  - Bit-Zeit wurde von 100 ns auf 10 ns reduziert
  - Dadurch verkürzt sich die maximale Kabellänge (und die minimale Paket-Größe steigt).
    - Unvermeidbare Kollisionen CSMA

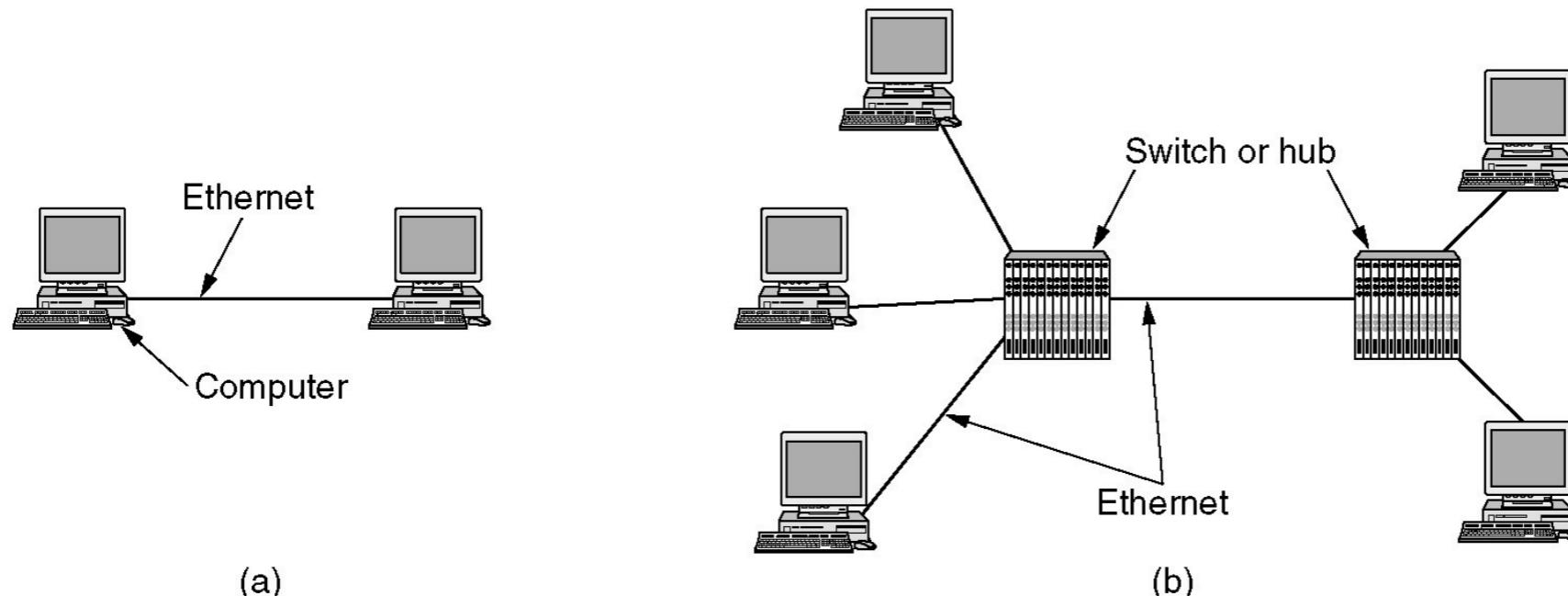
# Fast Ethernet – Verkabelung

- Standard Cat-3 twisted pair unterstützt nicht 200 MBaud über 100 m
  - Lösung: Verwendung von 2 Kabelpaaren bei reduzierter Baudrate
- Wechseln von Manchester auf 4B/5B-Kodierung auf Cat-5-Kabeln

Name	Cable	Max. segment	Advantages
100Base-T4	Twisted pair	100 m	Uses category 3 UTP
100Base-TX	Twisted pair	100 m	Full duplex at 100 Mbps
100Base-FX	Fiber optics	2000 m	Full duplex at 100 Mbps; long runs

# Gigabit Ethernet

- Gigabit-Ethernet: 1995
  - Ziel: Weitgehende Übernahme des Ethernet-Standards
- Ziel wurde erreicht durch Einschränkung auf Punkt-zu-Punkt-Verbindungen
  - In Gigabit-Ethernet sind an jedem Kabel genau zwei Maschinen
    - oder zumindestens ein Switch oder Hub



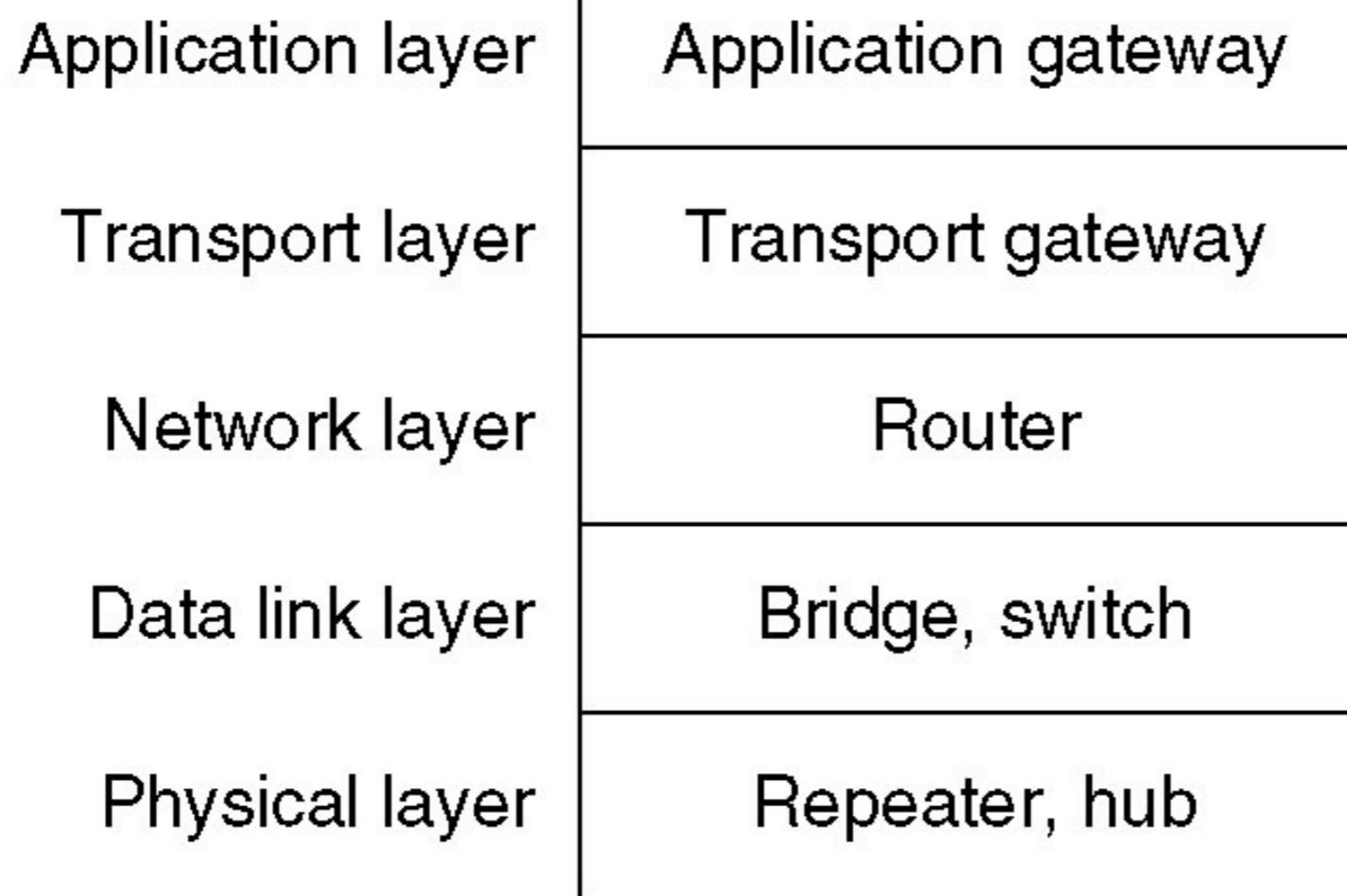
# Gigabit Ethernet

- Mit Switch
  - Keine Kollisionen! CSMA/CD unnötig
  - Erlaubt full-duplex für jeden Link
- Mit Hub
  - Kollisionen, nur Halb-Duplex (d.h. abwechselnd Simplex), CSMA/CD
  - Kabellängen auf 25 m reduziert

# Gigabit Ethernet – Cabling

Name	Cable	Max. segment	Advantages
1000Base-SX	Fiber optics	550 m	Multimode fiber (50, 62.5 microns)
1000Base-LX	Fiber optics	5000 m	Single (10 $\mu$ ) or multimode (50, 62.5 $\mu$ )
1000Base-CX	2 Pairs of STP	25 m	Shielded twisted pair
1000Base-T	4 Pairs of UTP	100 m	Standard category 5 UTP

# Verbinden von LANs

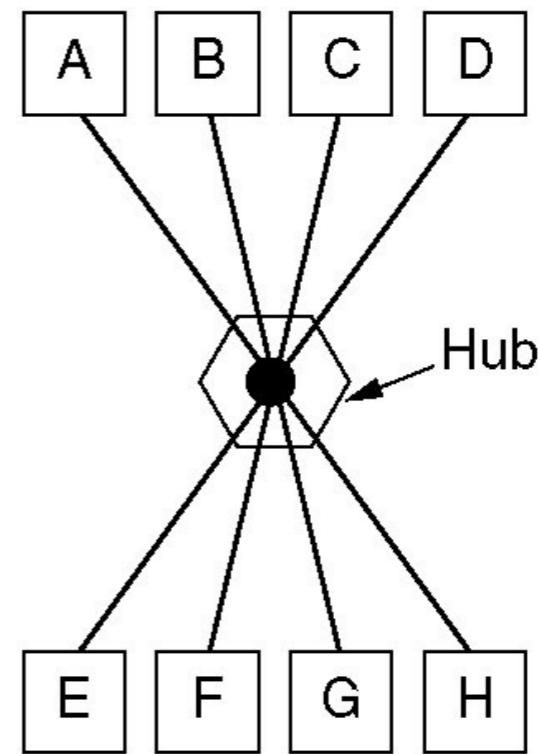


# Repeater

- Signalregenerator
  - Empfängt Signal und bereitet es auf
  - Nur das elektrische und optische Singal wird aufbereitet
  - Information bleibt unbeeinflusst
- Bitübertragungsschicht
- Repeater teilen das Netz in physische Segmente
  - logische Topologien bleiben erhalten

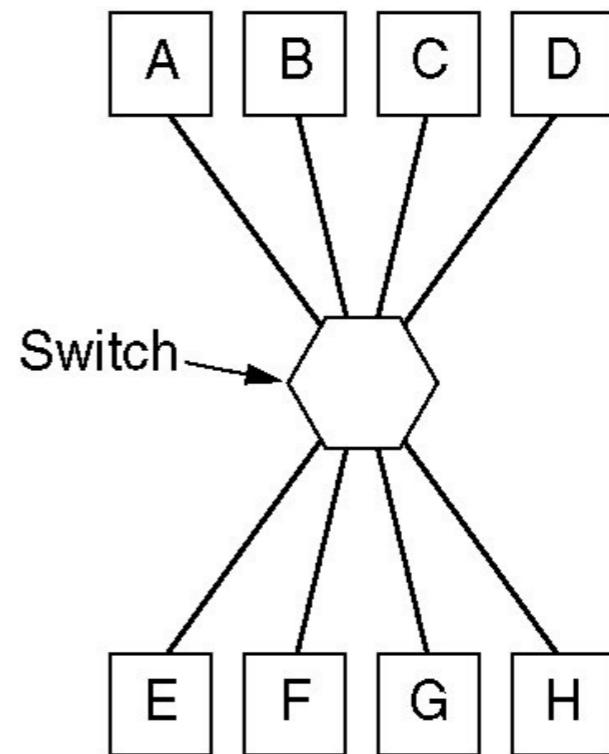
# Hub

- Verbindet sternförmig Netzsegmente
  - im Prinzip wie ein Repeater
  - Signale werden auf alle angebundenen Leitungen verteilt
  
- Bitübertragungsschicht
  - Information und Logik der Daten bleibt unberücksichtigt
  - Insbesondere für Kollisionen



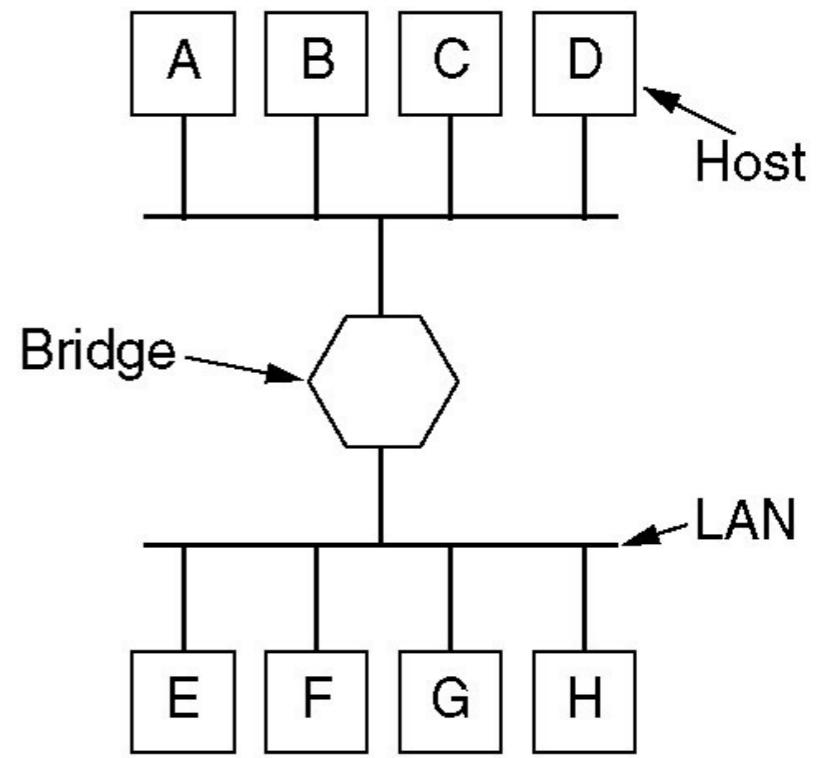
# Switch

- Verbindet sternförmig Netzsegmente
  - Leitet die Daten nur in die betreffende Verbindung weiter
  - Gibt keine Kollisionen weiter
  
- Sicherungsschicht
  - Signale werden neu erzeugt
  - Kollisionen abgeschirmt und reduziert
  - Frames aber nicht verwendet
  - Rudimentäre Routingtabelle durch Beobachtung, wo Nachrichten herkommen



# Bridge

- Verbindet zwei lokale Netzwerke
  - im Gegensatz zum Switch (dort nur Terminals)
  - trennt Kollisionen
- Sicherungsschicht
  - Weitergabe an die andere Seite, falls die Ziel-Adresse aus dem anderen Netzwerk bekannt ist oder auf beiden Seiten noch nicht gehört wurde
  - Nur korrekte Frames werden weitergereicht
  - Übergang zwischen Bridge und Switch ist fließend



# Beispiel: Internet über Telefon

- Analog
  - typisch 3-4 kBit/s
  - maximal bis 56 kBit/s
- ISDN (Integrated Services Digital Network)
  - 128 kBit/s (Nutzdaten)
    - Hin/Rückrichtung jeweils 64 kBit/s
  - Pulse-Code Modulation (Amplitudenmodulation)
- DSL
  - maximal
    - bis 25 Mbit/s Downstream
    - bis 3,5 Mbit/s Upstream
  - typisch (DSL 6000)
    - 6 Mbit/s Downstream
    - 0,5 Mbit/s Upstream

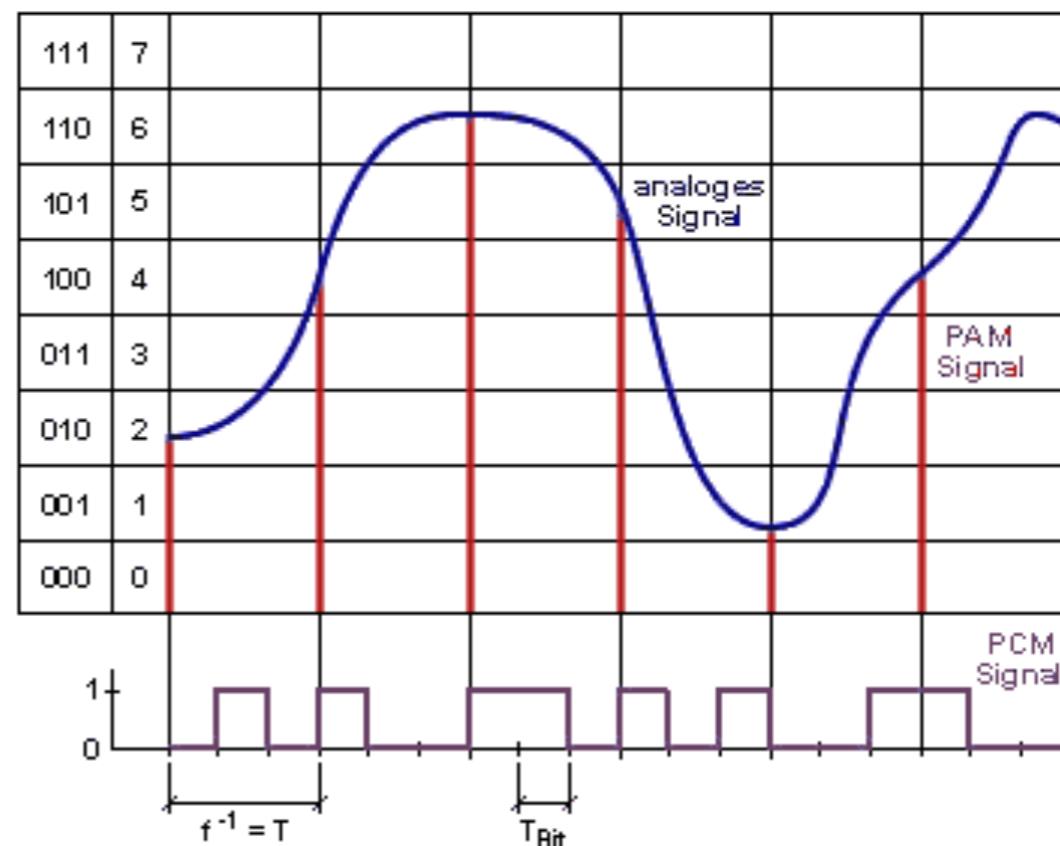
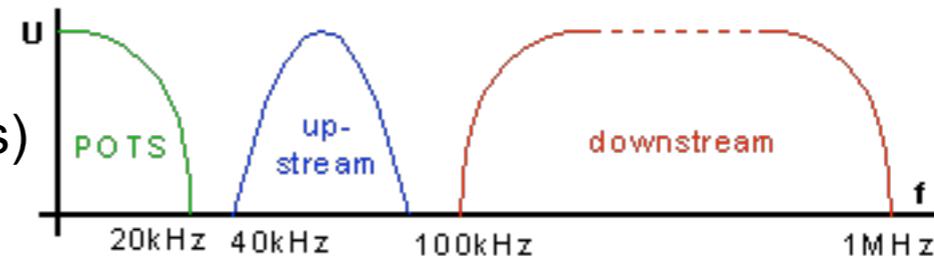


Abb. aus <http://de.wikipedia.org/wiki/Puls-Code-Modulation>

# Beispiel DSL

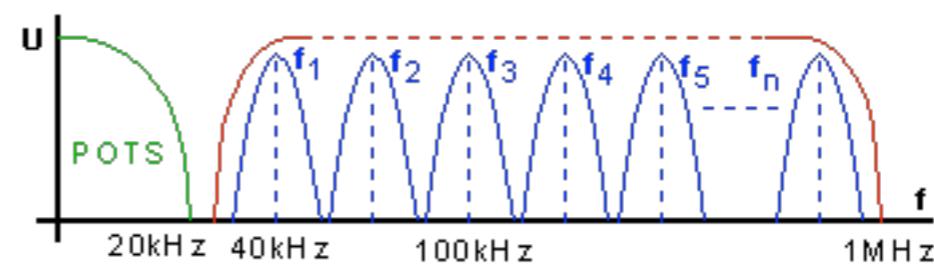
## ■ Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL)

- momentan der Standard zur Anbindung von Endverbrauchern zu ISP (Internet Service Providers)
- verwendet herkömmliche Kupferkabel



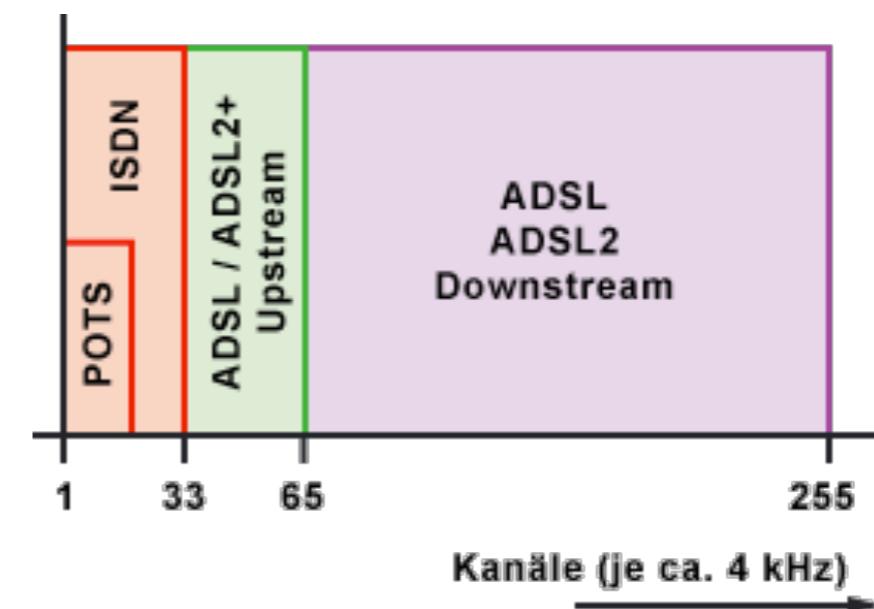
## ■ Übertragungsverfahren:

- Carrier-less Amplitude/Phase Modulation CAP (wie QAM)
  - Eine Modulation für Upstream/Downstream
- Discrete Multitone Modulation (DMT)
  - 256 Kanäle mit je 4 kHz Bandbreite



## ■ DMT: 3 Kanälstränge:

- POTS/ISDN (public switched telephone network/ Integrated Services Digital Network)
  - bleibt im Frequenzbereich 1-20 kHz von ADSL unberührt
- Upstream
  - 32 Trägerkanäle für Verbindung zum ISP
- Downstream
  - 190 Trägerkanäle für Verbindung vom ISP



# Das elektromagnetische Spektrum

leitungsgebundene Übertragungstechniken

verdrillte Drähte Koaxialkabel

Hohlleiter

optische Glasfaser

Hz

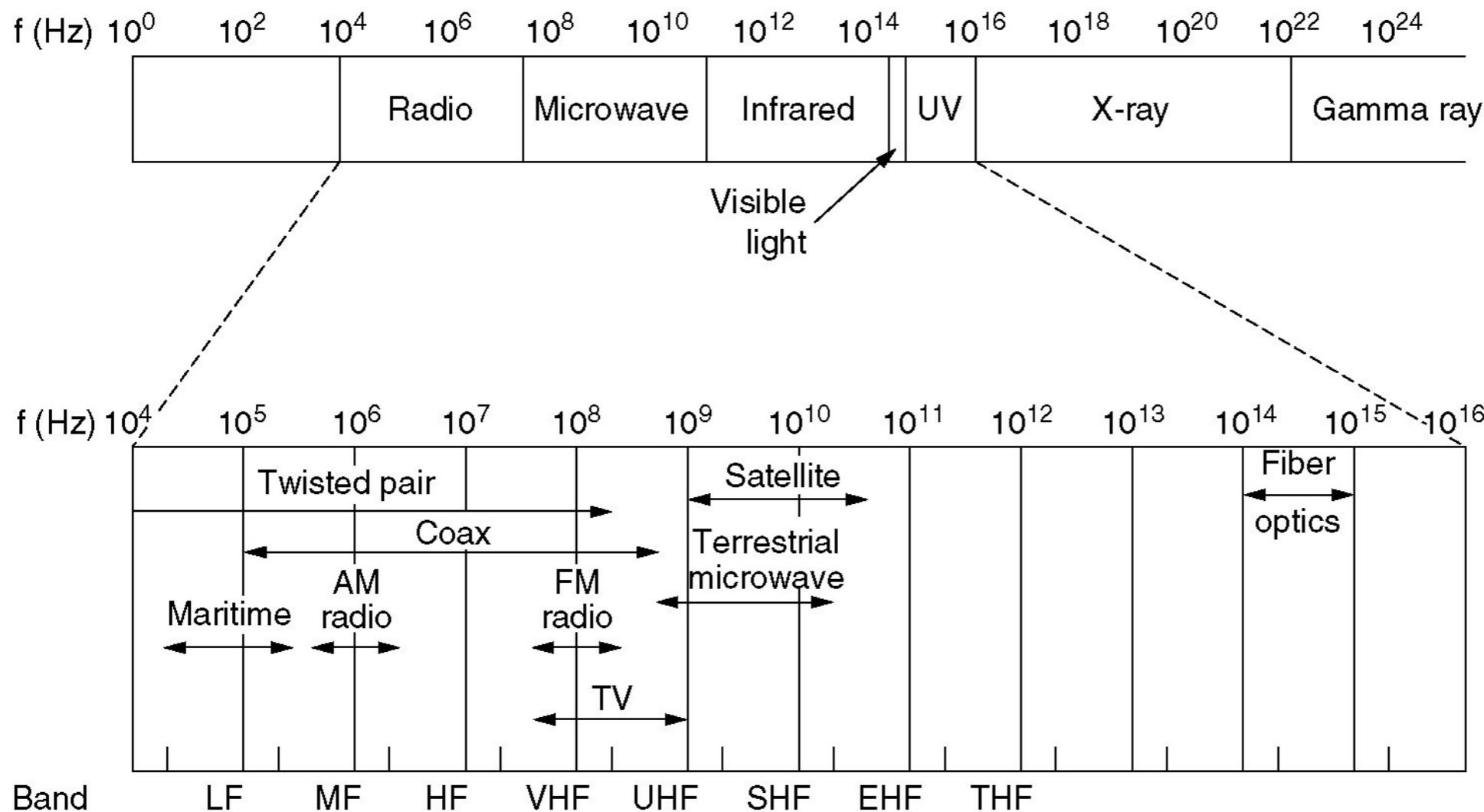
$10^3$        $10^5$        $10^7$        $10^9$        $10^{11}$        $10^{13}$        $10^{15}$

Langwellen-  
Radio      Mittelwellen-  
Radio      Kurzwelle      Fernsehen      Mikrowellen      Infrarot      sichtbares  
-Radio

nicht-leitungsgebundene Übertragungstechniken

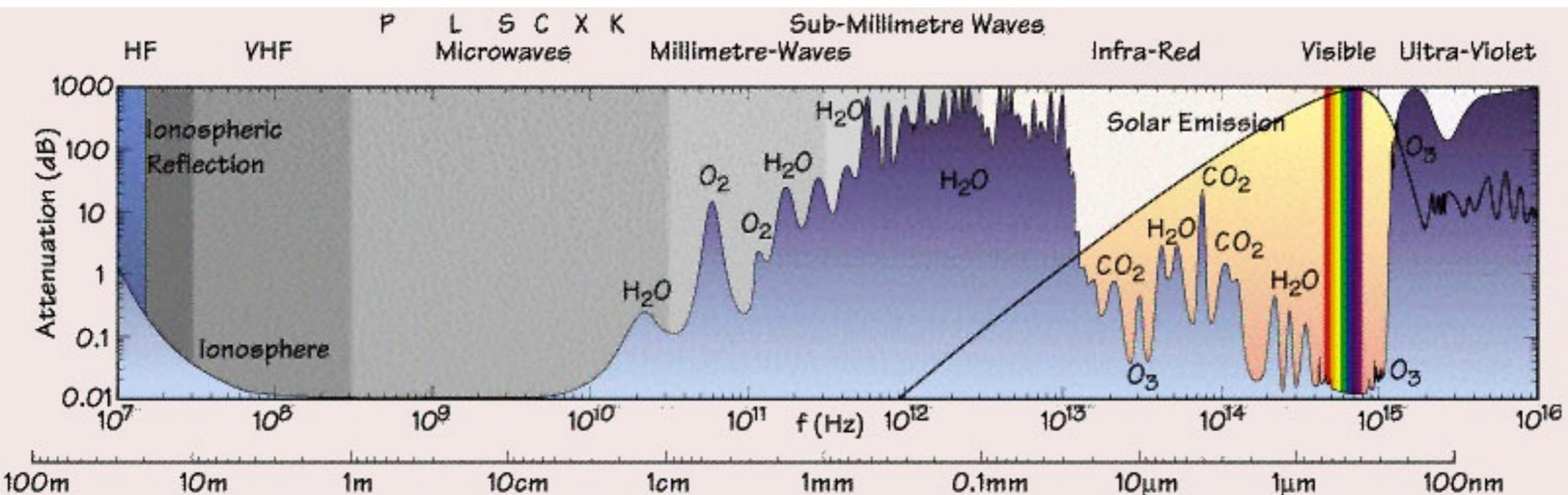
# Frequenzbereiche

- LF Low Frequency =
  - LW Langwelle
- MF Medium Frequency =
  - MW Mittelwelle
- HF High Frequency =
  - KW Kurzwelle
- VHF Very High Frequency =
  - UKW Ultrakurzwelle
- UHF Ultra High Frequency
- SHF Super High Frequency
- EHF Extra High Frequency
- UV Ultraviolettes Licht
- X-ray Röntgenstrahlung



# Dämpfung in verschiedenen Frequenzbereichen

- Frequenzabhängige Dämpfung elektromagnetischer Wellen in der Atmosphäre



[http://www.geographie.uni-muenchen.de/igf/Multimedia/Klimatologie/physik\\_arbeit.htm](http://www.geographie.uni-muenchen.de/igf/Multimedia/Klimatologie/physik_arbeit.htm)

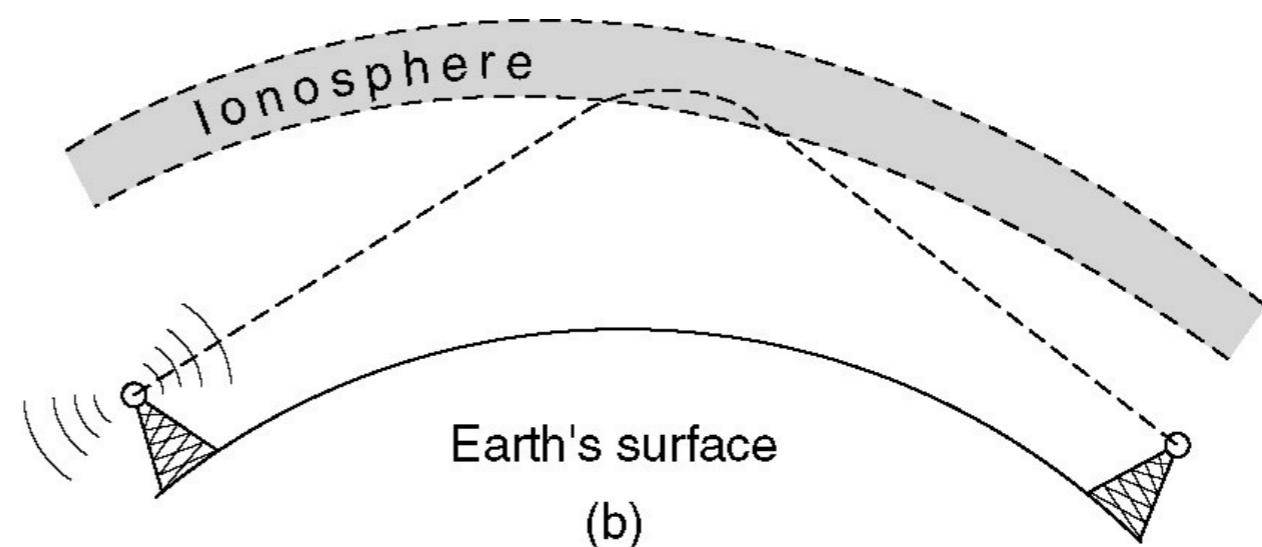
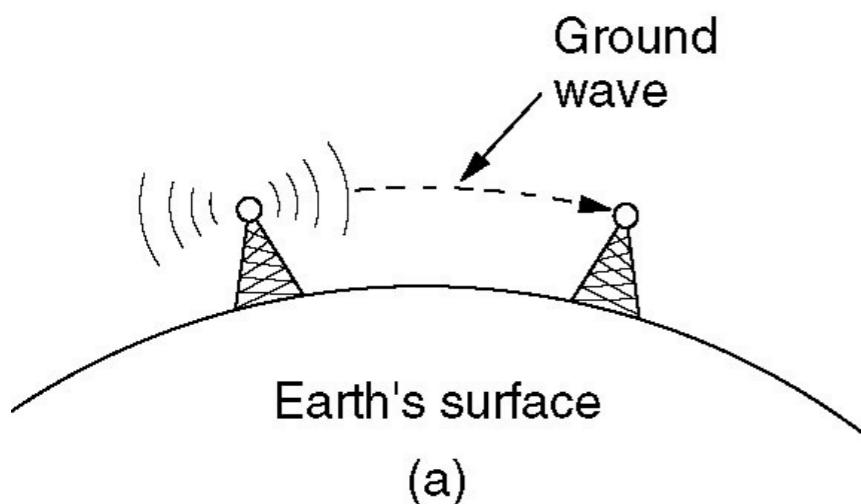
- VHF/UHF für Mobilfunk
  - Antennenlänge
- SHF für Richtfunkstrecken, Satellitenkommunikation
- Drahtloses (Wireless) LAN: UHF bis SHF
  - Geplant: EHF
- Sichtbares Licht
  - Kommunikation durch Laser
- Infrarot
  - Fernsteuerungen
  - Lokales LAN in geschlossenen Räumen

# Ausbreitungsverhalten (I)

- Geradlinige Ausbreitung im Vakuum
- Empfangsleistung nimmt mit  $1/d^2$  ab
  - Theoretisch, praktisch mit höheren Exponenten bis zu 4 oder 5
- Einschränkung durch
  - Dämpfung in der Luft (insbesondere HV, VHF)
  - Abschattung
  - Reflektion
  - Streuung an kleinen Hindernissen
  - Beugung an scharfen Kanten

# Ausbreitungsverhalten (II)

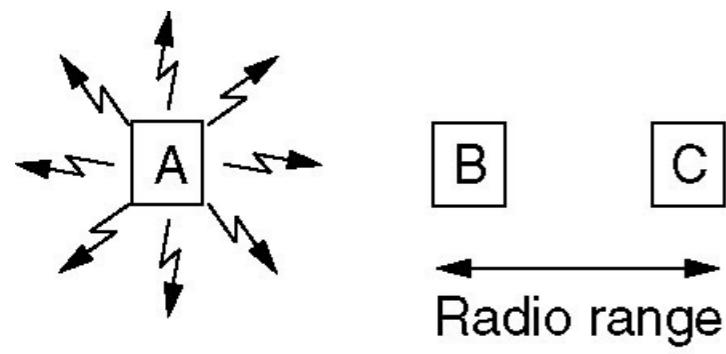
- VLF, LF, MF-Wellen
  - folgen der Erdkrümmung (bis zu 1000 km in VLF)
  - Durchdringen Gebäude
- HF, VHF-Wellen
  - Werden am Boden absorbiert
  - Werden von der Ionosphäre in 100-500 km Höhe reflektiert
- Ab 100 MHz
  - Wellenausbreitung geradlinig
  - Kaum Gebäudedurchdringung
  - Gute Fokussierung
- Ab 8 GHz Absorption durch Regen



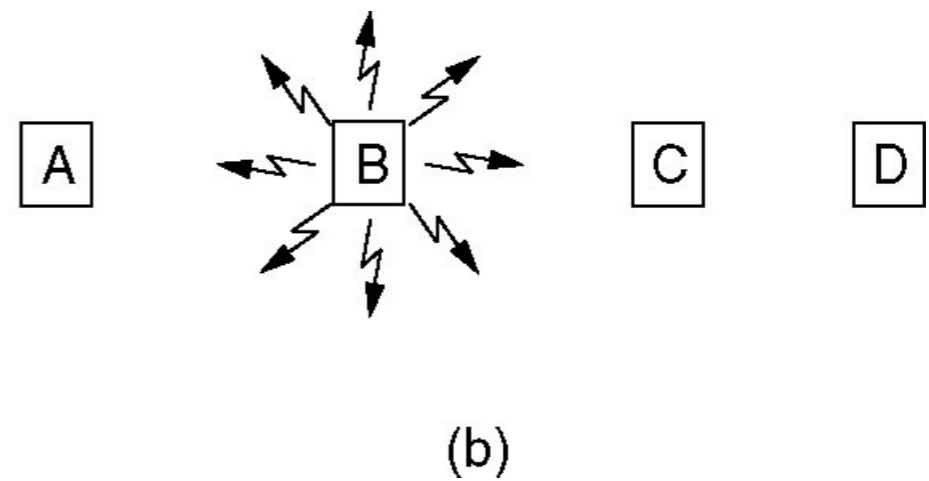
# Ausbreitungsverhalten (III)

- Mehrwegeausbreitung (Multiple Path Fading)
  - Signal kommt aufgrund von Reflektion, Streuung und Beugung auf mehreren Wegen beim Empfänger an
  - Zeitliche Streuung führt zu Interferenzen
    - Fehlerhafter Dekodierung
    - Abschwächung
- Probleme durch Mobilität
  - Kurzzeitige Einbrüche (schnelles Fading)
    - Andere Übertragungswege
    - Unterschiedliche Phasenlage
  - Langsame Veränderung der Empfangsleistung (langsam Fading)
    - Durch Verkürzen, Verlängern der Entfernung Sender-Empfänger

# Spezielle Probleme in drahtlosen Netzwerken



(a)

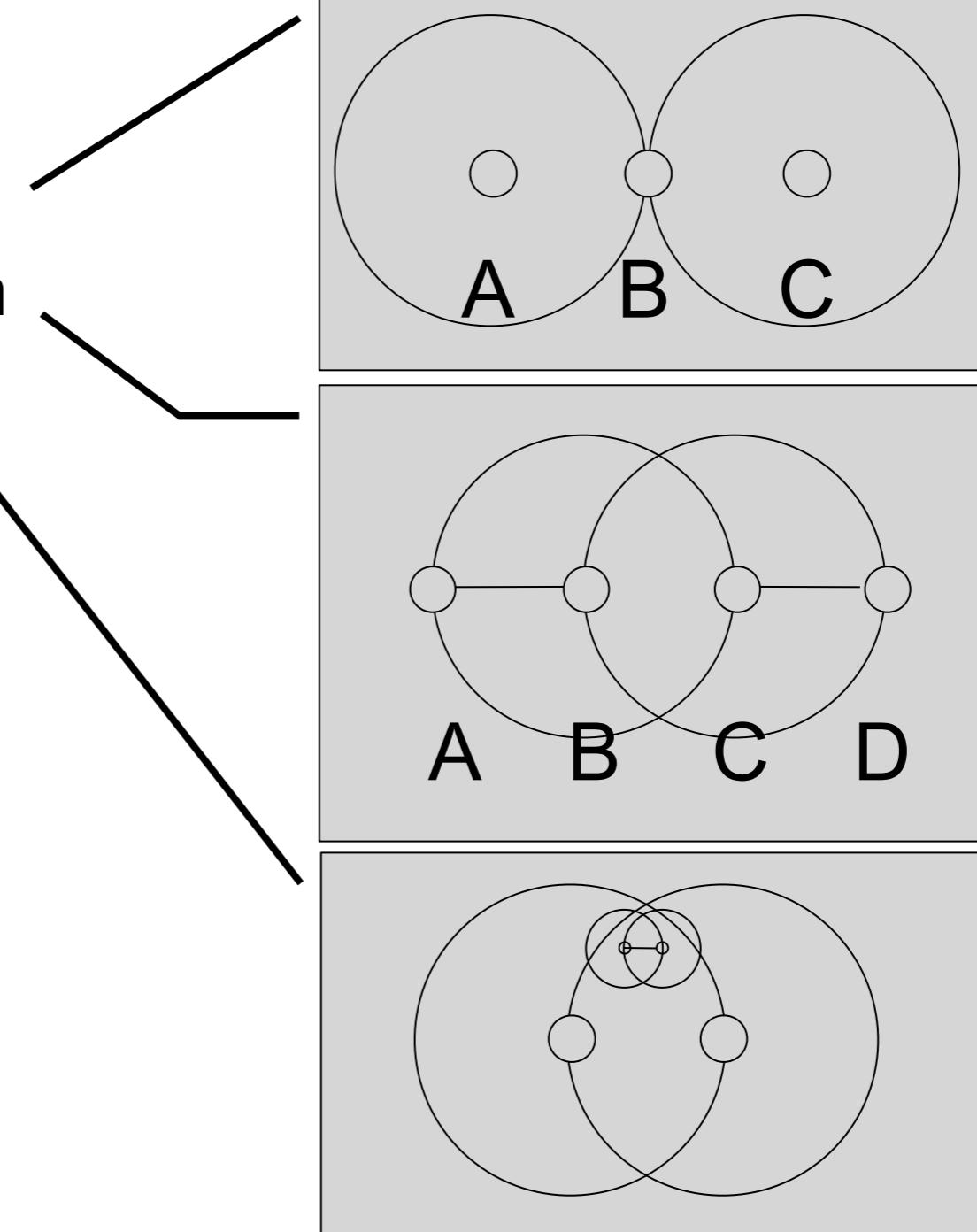


(b)

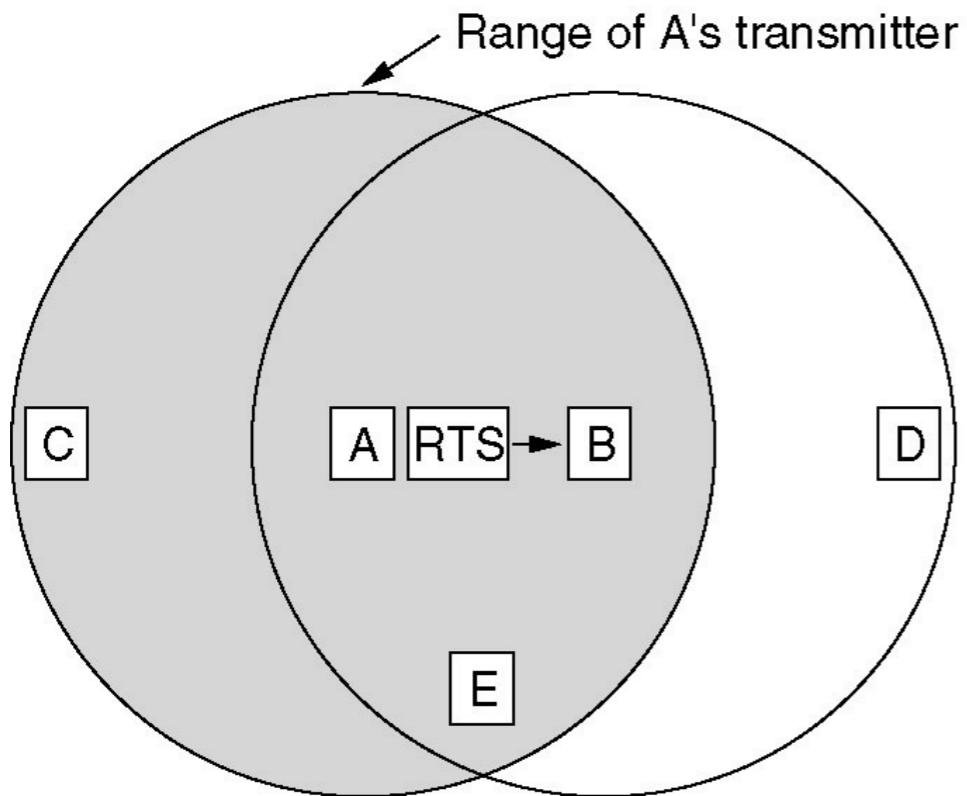
# Probleme im W-LAN

- Interferenzen

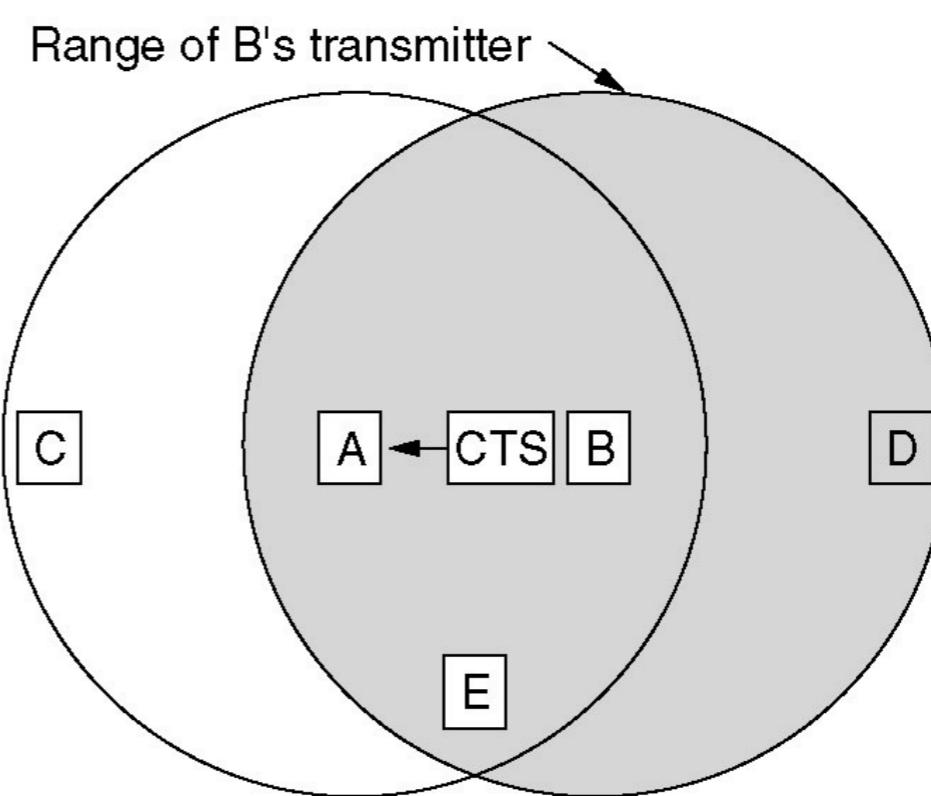
- Hidden Terminal Problem
- Exposed Terminal Problem
- Asymmetrie (var. Reichweite)



# Multiple Access with Collision Avoidance



(a)

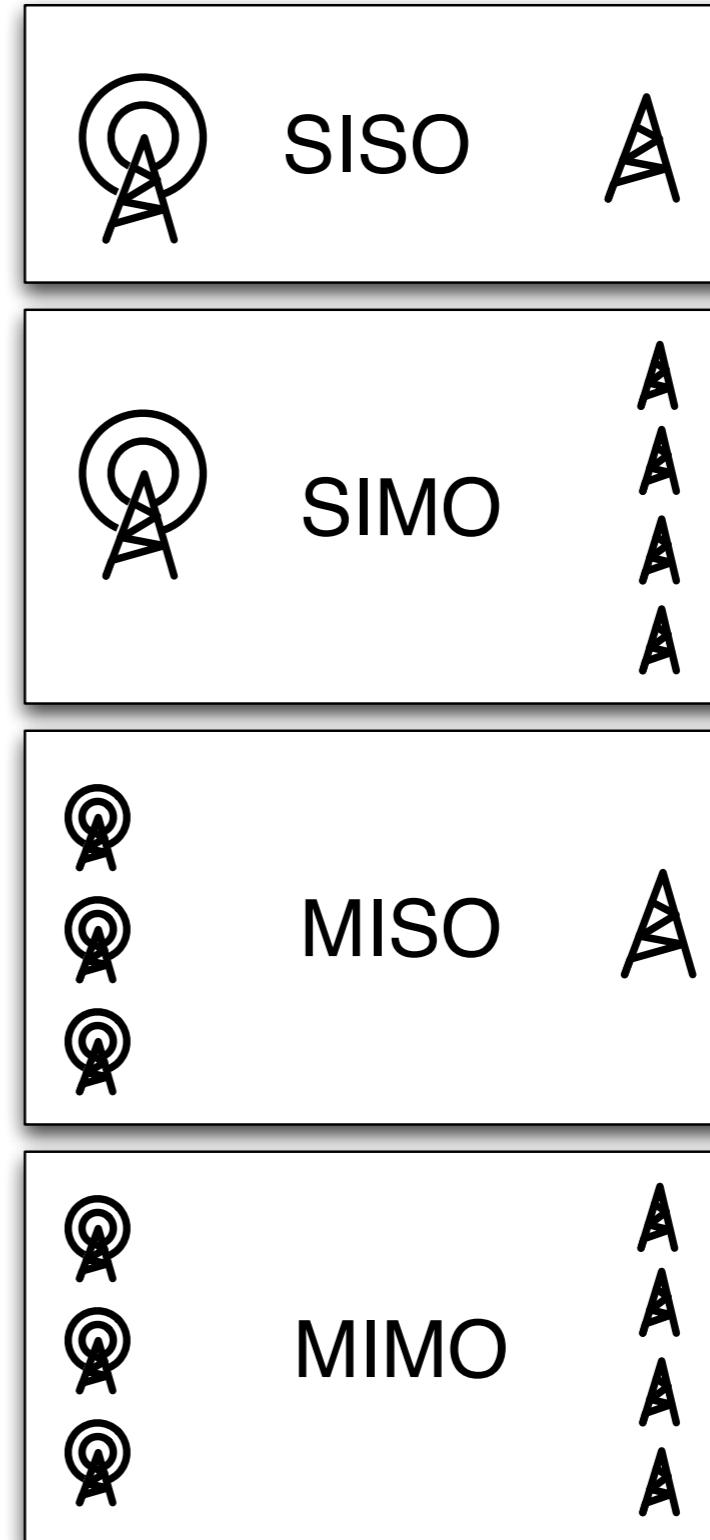


(b)

- (a) A sendet Request to Send (RTS) an B.
- (b) B antwortet mit Clear to Send (CTS) an A.

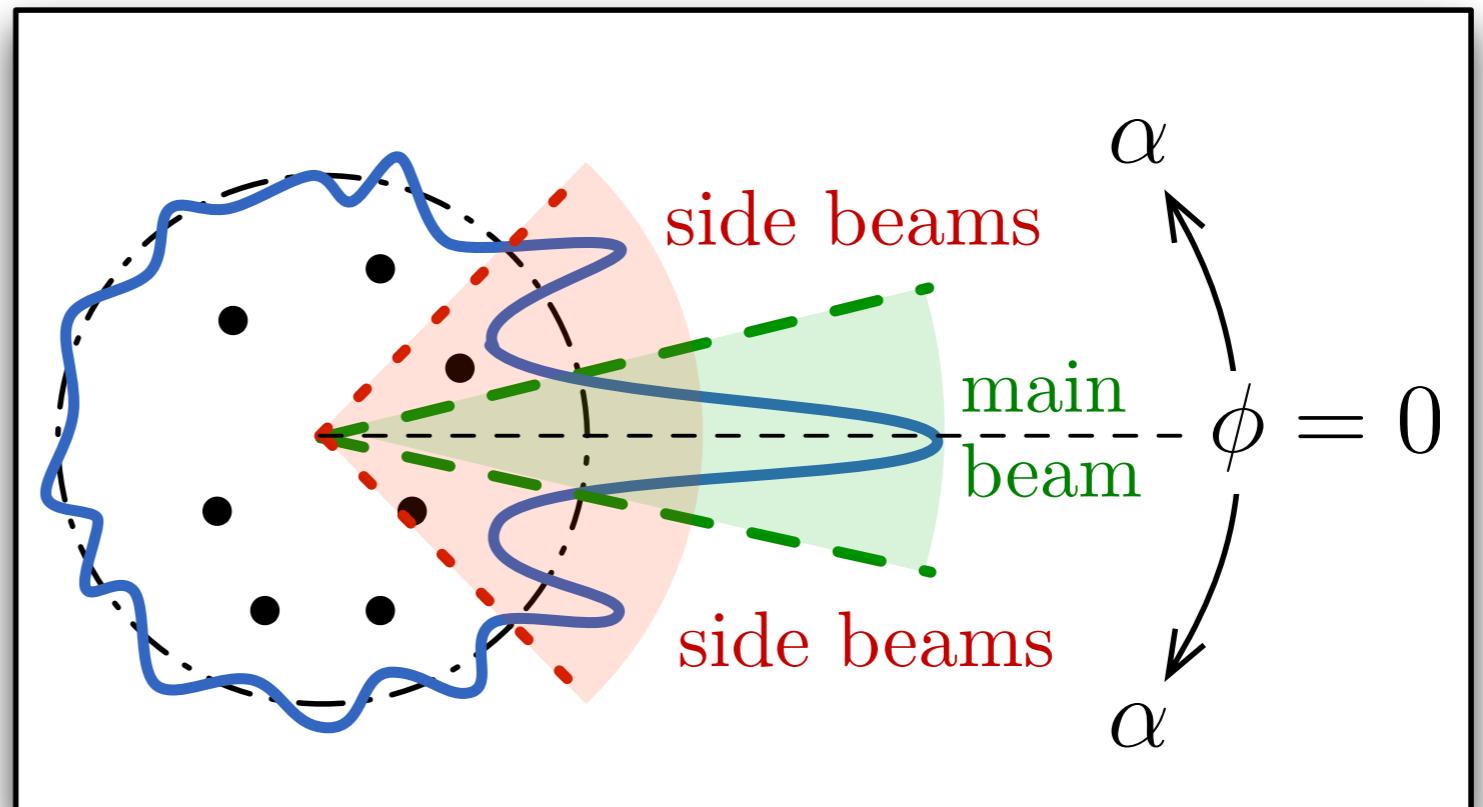
# Smart Antennas, MIMO, SIMO, MISO

- Smart antennas
  - MIMO (multiple input/multiple output)
  - SIMO (single input/multiple output)
  - MISO, SISO
  - sind mehrere Antennen, welche koordiniert Signale übertragen und empfangen
- Vorteile
  - Beam forming
  - Power gain
  - Diversity gain
- Anwendungen
  - IEEE-802.11n-WLAN



# Beamforming

- Durch geschickte Phasenverschiebung kann ein gerichteter Sendestrahl gesendet werden
  - oder symmetrisch auch empfangen werden

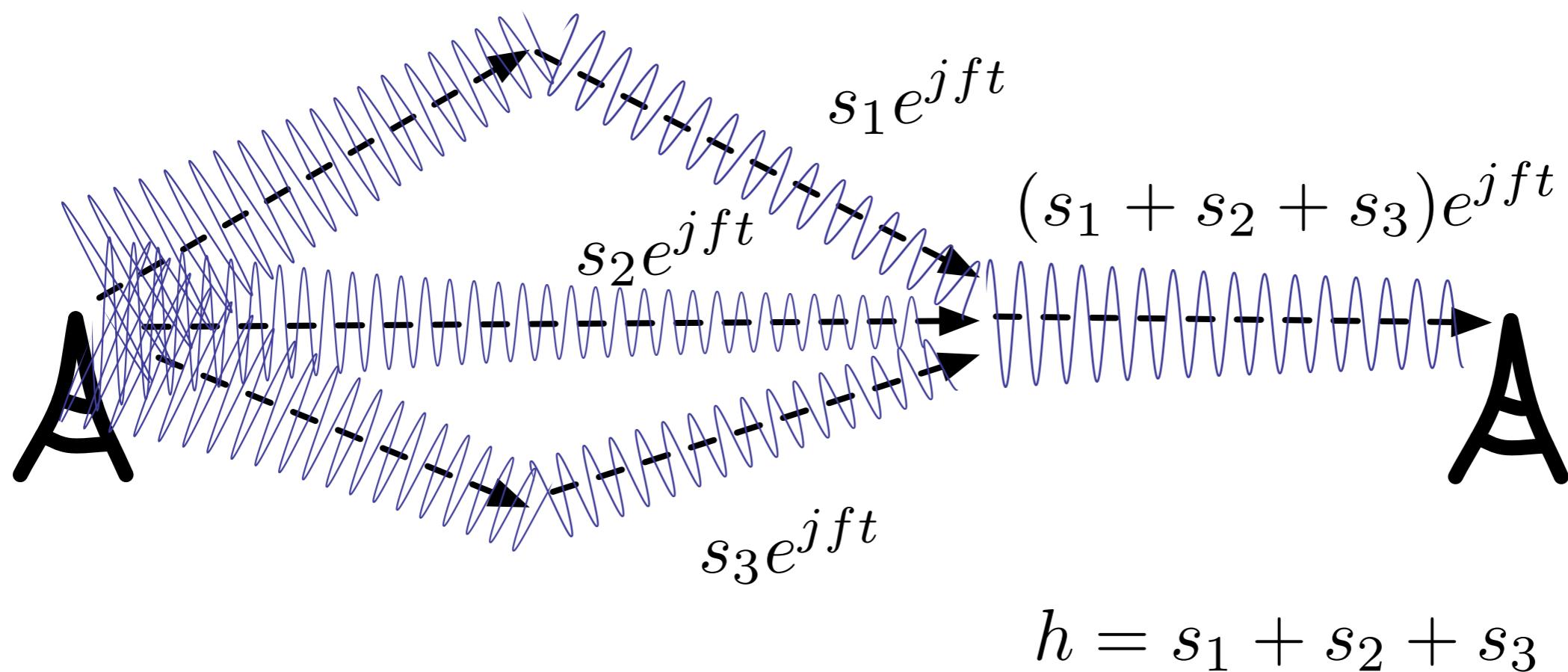


# Power Gain

- Wieso können n Sender oder n Empfänger weiterreichen als 1 Sender und Empfänger?
  - mit gleichen Antennen
  - mit gleicher Energie
- Superposition:
  - Die elektrischen Felder überlagern sich (nicht die Energie)
  - Energy =  $P \sim E^2 = (\text{el. Feld})^2$
  - El. Feldstärke =  $D \sim 1/d$
- 1 Sender
  - Energie:  $P$
  - Energie im Abstand  $d$ :  $P/d^2$
- n Sender
  - Energie von n Sendern:  $P$
  - Feldstärke eines von n Sendern:  $\sqrt{\frac{P}{n}}$
  - Feldstärke im Abstand  $d$  von n Sendern:  $\frac{n}{d} \sqrt{\frac{P}{n}} = \frac{\sqrt{Pn}}{d}$
  - Gesamtenergie im Abstand  $d$ :  $n \cdot \frac{P}{d^2}$
- Der selbe Effekt funktioniert auch beim Empfänger
  - führt zu einem Power Gain von Faktor  $n$  für n Sender und n Empfänger

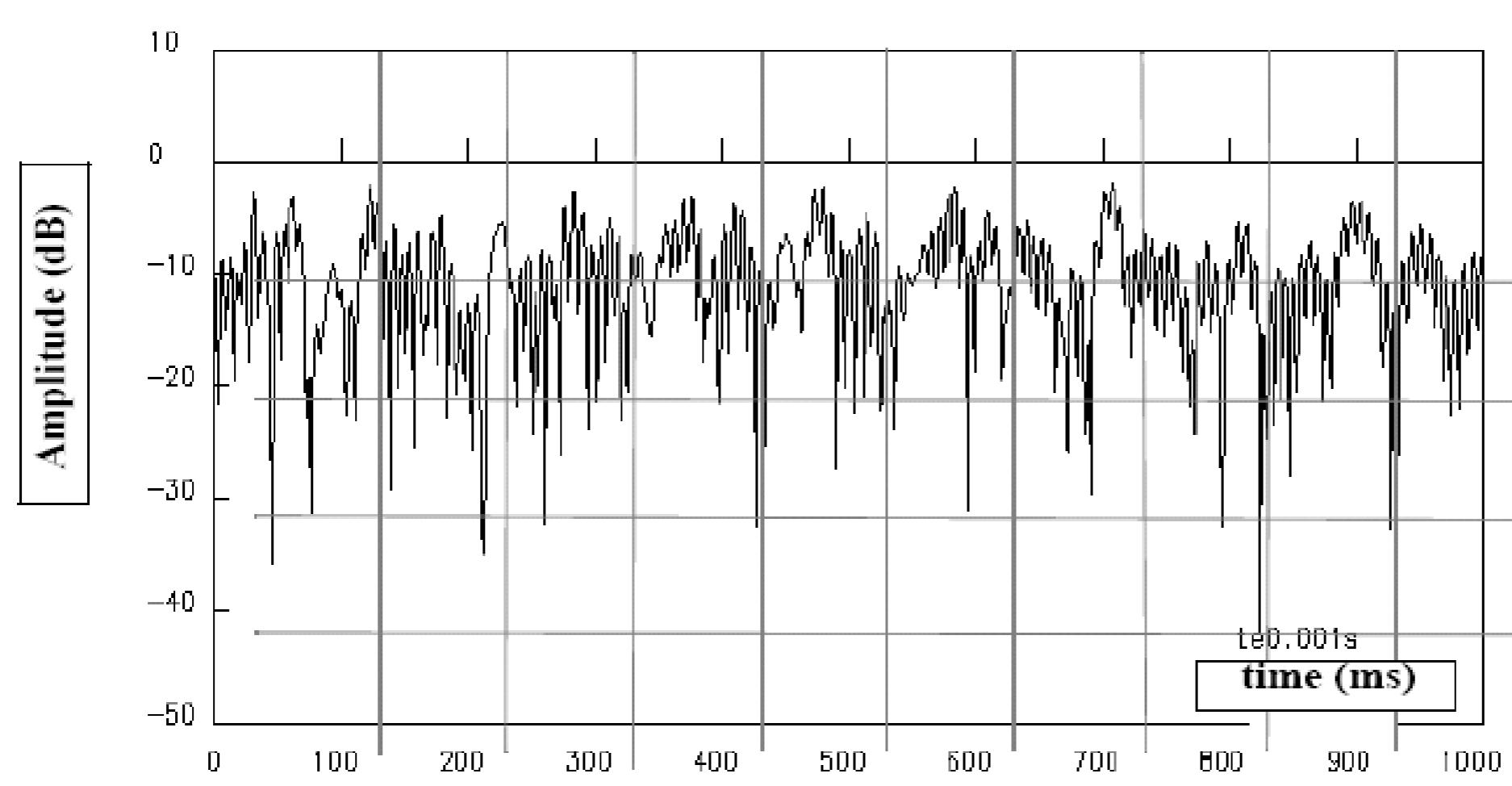
# Multipath Channel

- Superposition von Reflektionen



# Rayleigh fading

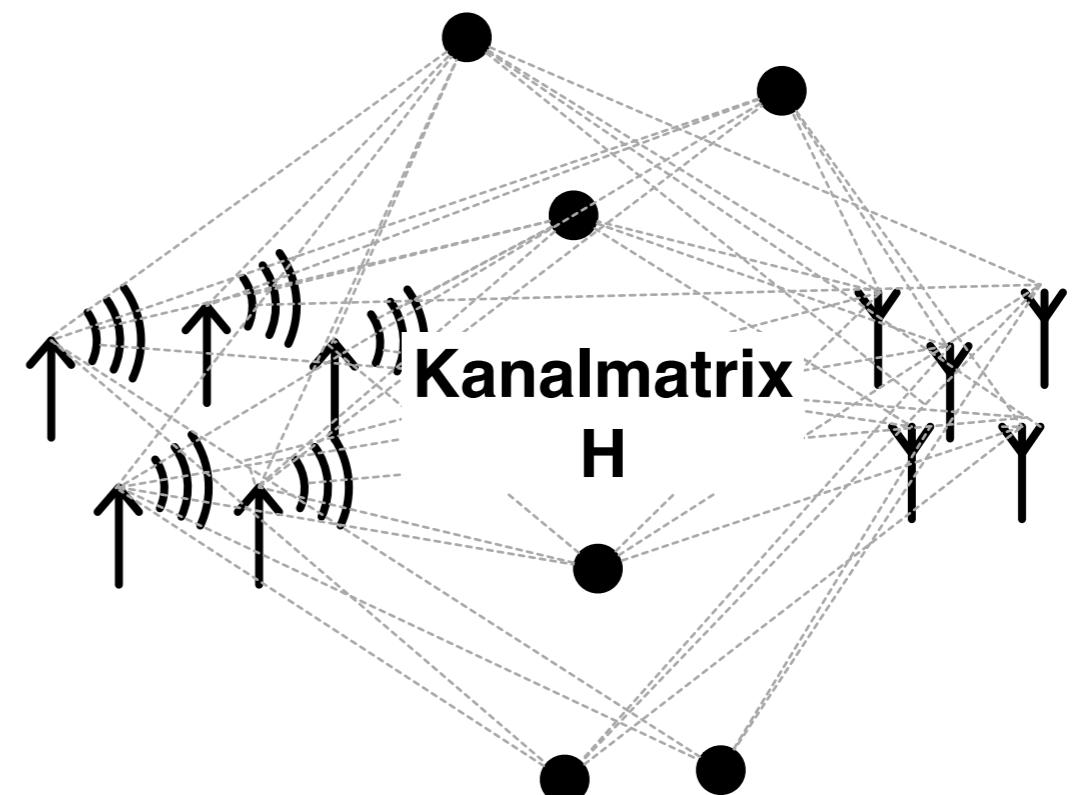
- Superposition führt zu drastischen Einbrüchen



Introduction to Wireless MIMO – Theory and Applications  
Jacob Sharony IEEE LI 2006

# Diversity Gain

- Wenn in der Umgebung viele Reflektoren (scatterers) vorhanden sind,
  - dann ergibt sich für die Beschreibung der Sender-/Empfänger-Beziehung eine Kanalmatrix  $H$
- $H_{i,j} =$ 
  - resultierende Dämpfung und Phasenverschiebung zwischen Sender  $i$  und Empfänger  $j$
- Für geeignete Kanalmatrizen
  - mit „guter“ Singulärwertzerlegung
  - können bis zu  $\max\{\#\text{Sender}, \#\text{Empfänger}\}$  parallele Kommunikationskanäle verwendet werden
- Dadurch können mehr Daten übertragen werden, als Shannons Theorem für SISO zulässt



# Systeme II

## 2. Die physikalische Schicht

Christian Schindelhauer

Technische Fakultät

Rechnernetze und Telematik

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Version 26.04.2017