

# Systeme II

## 2. Die physikalische Schicht

Christian Schindelhauer

Technische Fakultät

Rechnernetze und Telematik

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Version 29.04.2013

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

- 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

# Twisted Pair



(a)

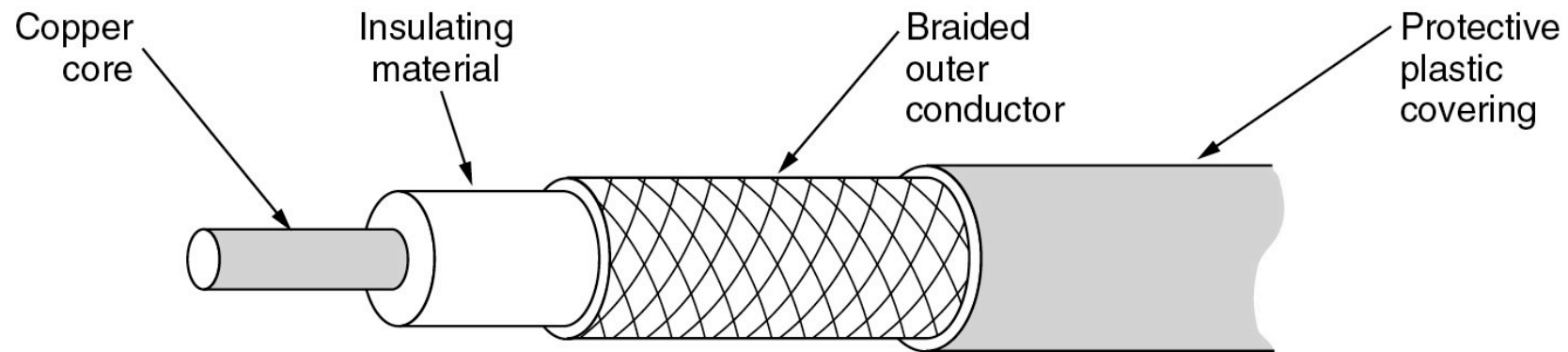


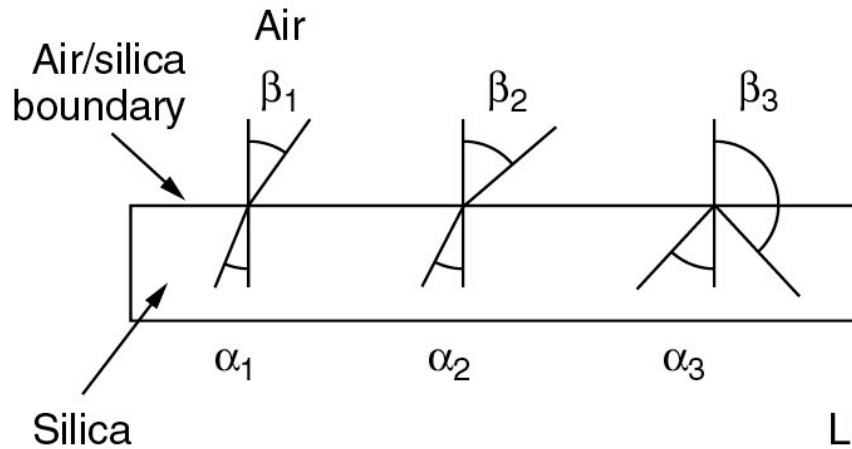
(b)

(a) Category 3 UTP.

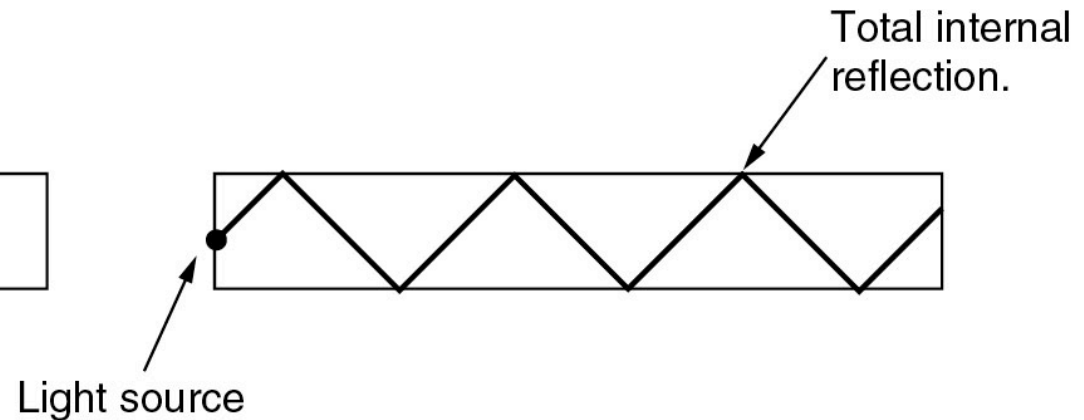
(b) Category 5 UTP.

# Koaxialkabel





(a)

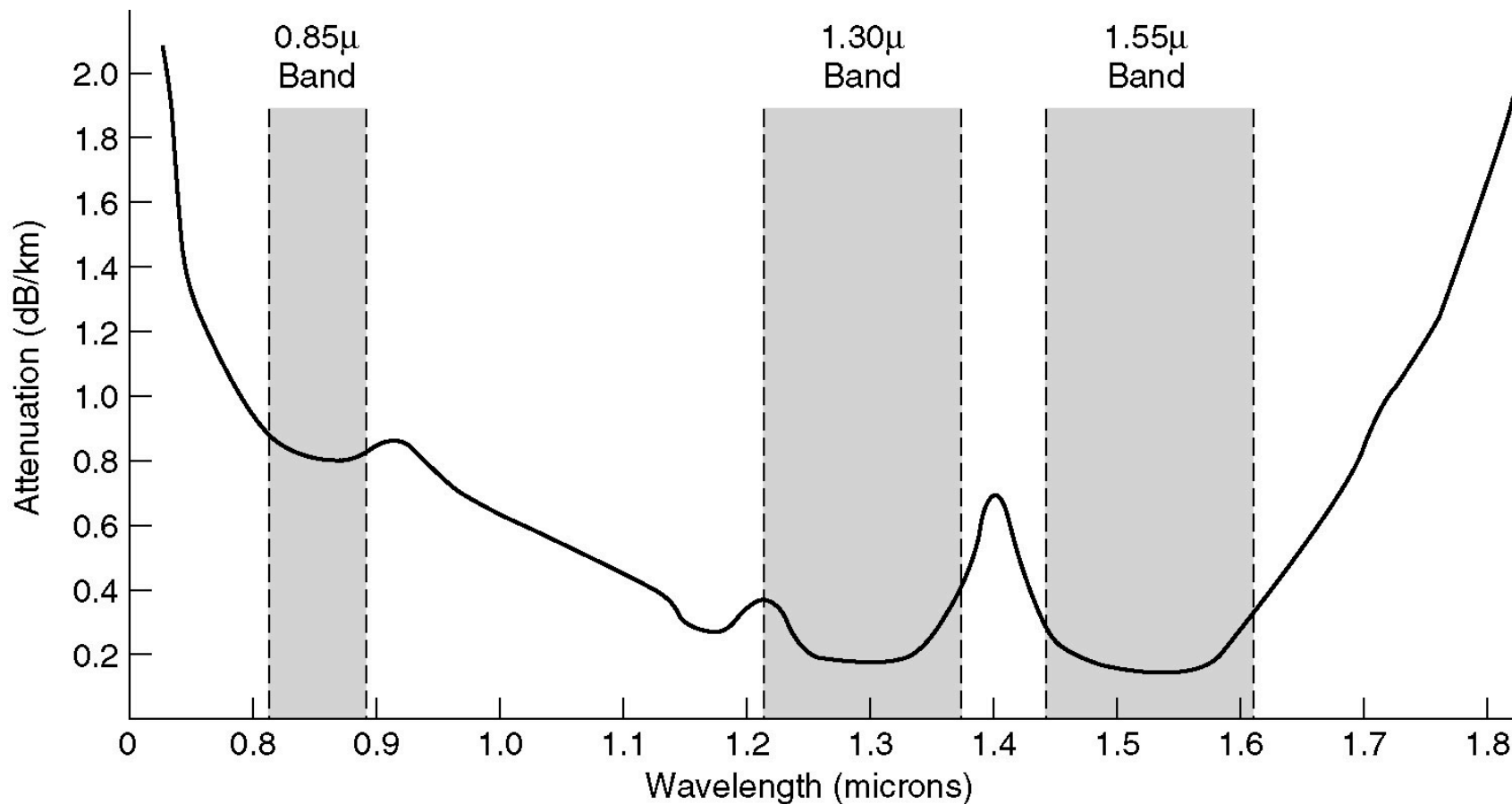


(b)

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

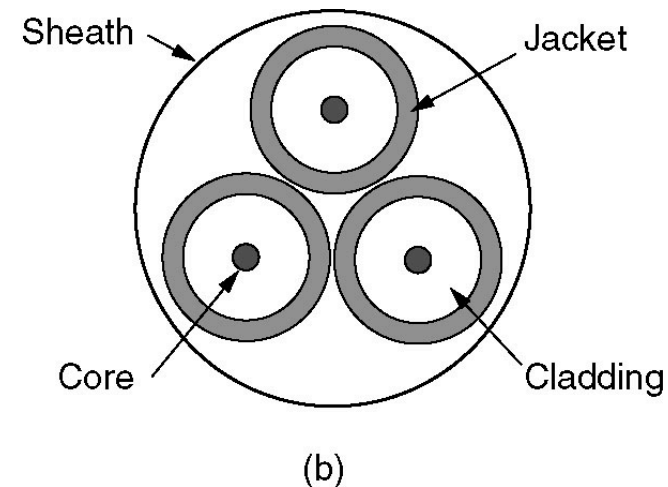
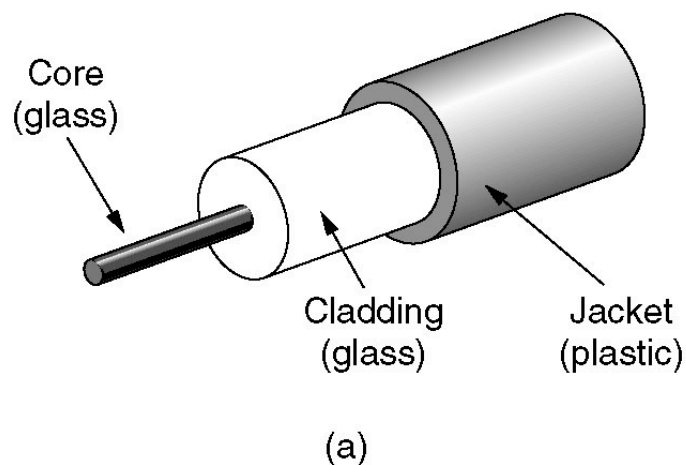
- (a) Beugung und Reflektion an der Luft/Silizium-Grenze bei unterschiedlichen Winkeln
- (b) Licht gefangen durch die Reflektion

- Dämpfung von Infrarotlicht in Glasfaser

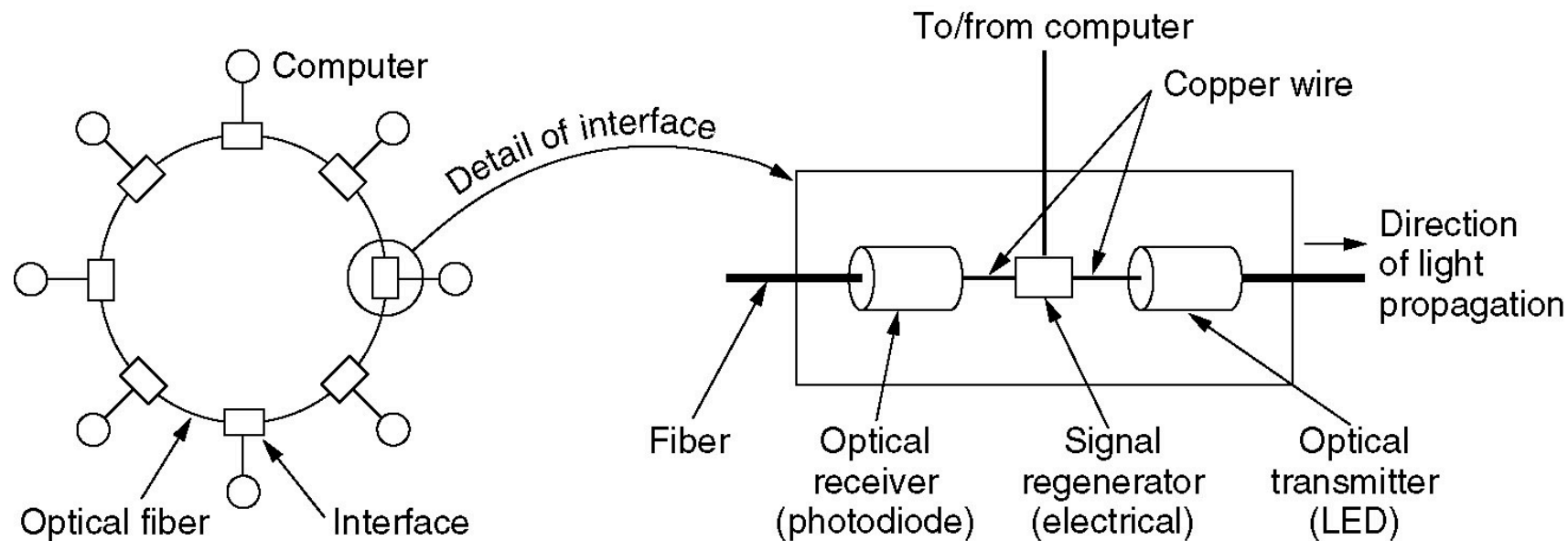




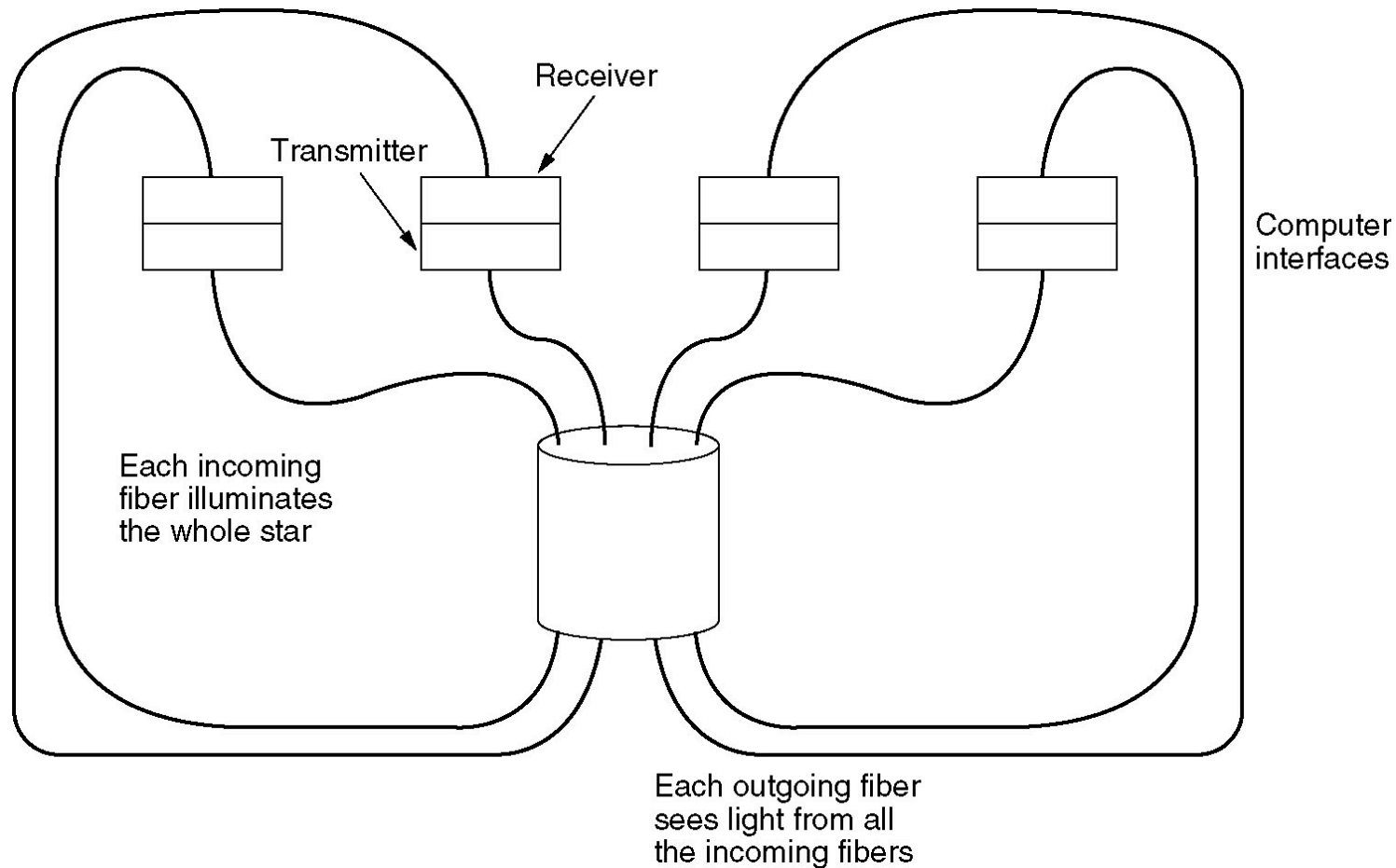
- (a) Seitenansicht einer einfachen Faser
- (b) Schnittansicht eines Dreier-Glasfaserbündels



## Glasfaserring mit aktiven Repeatern

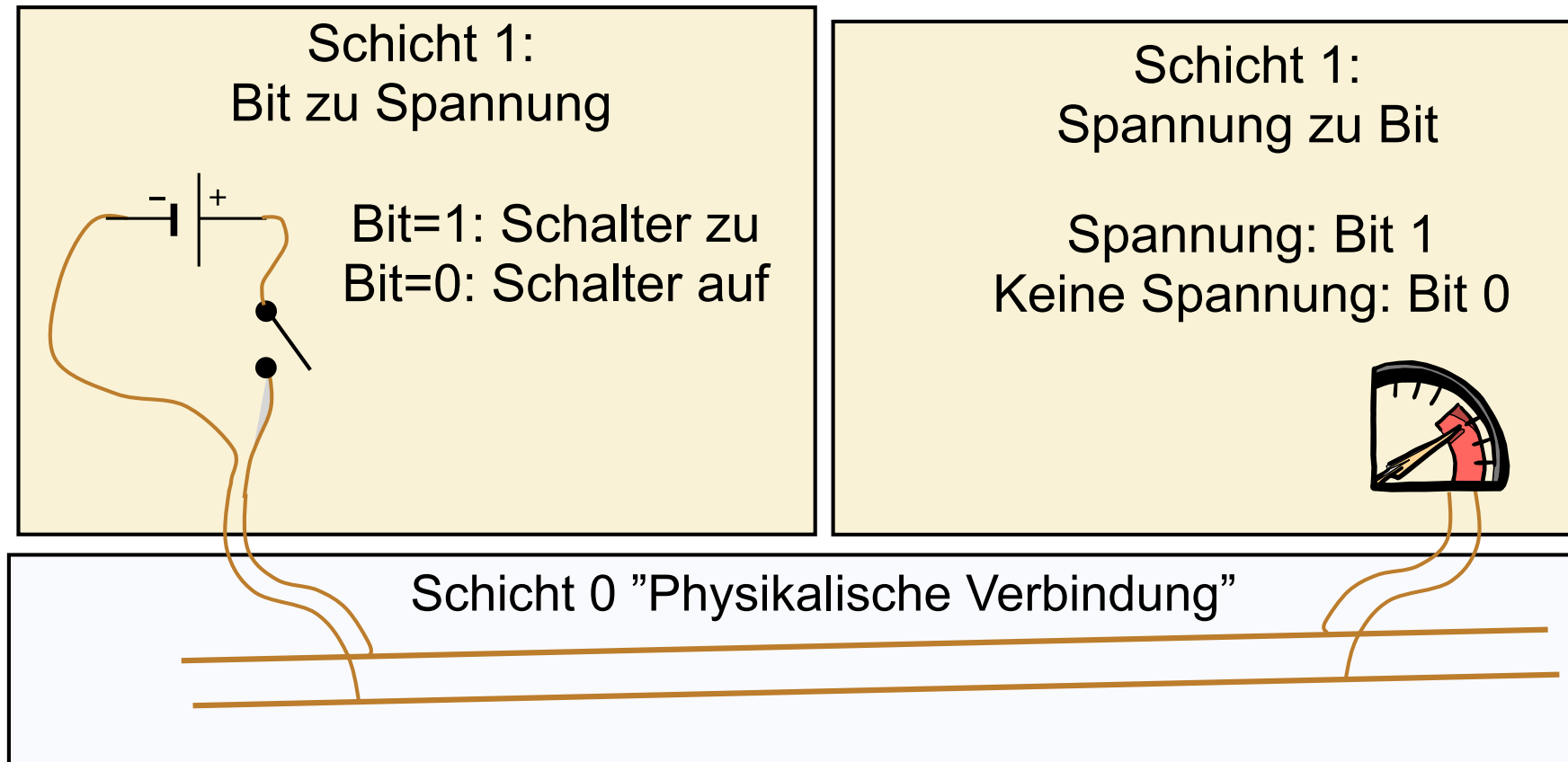


## Eine passive Sternverbindung in einem Glasfasernetz



# Die einfachste Bitübertragung

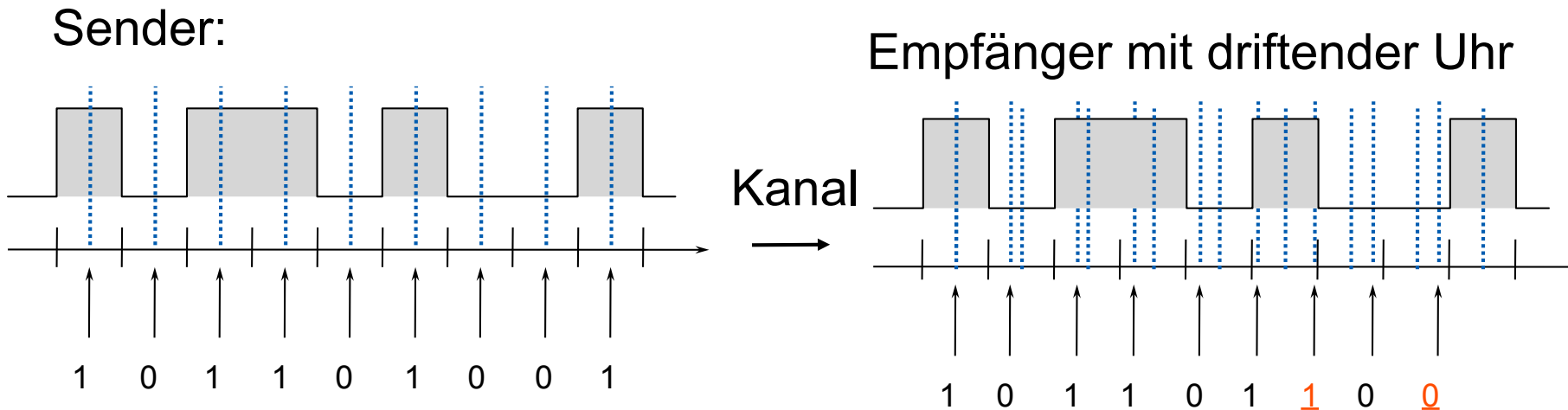
- Bit 1: Strom an
- Bit 0: Strom aus



(aus Vorlesung von Holger Karl)

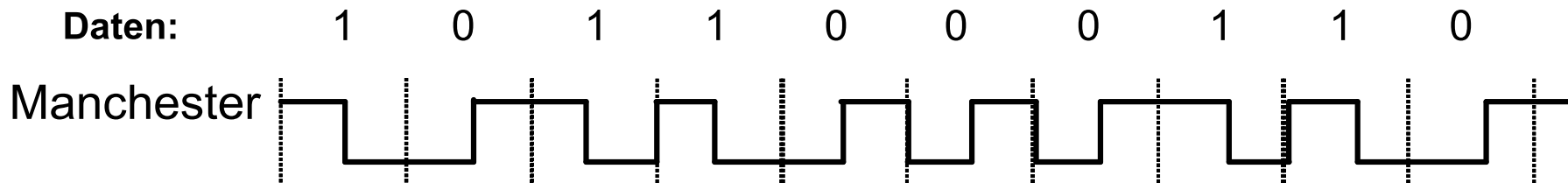
- Wann muss man die Signale messen
  - Typischerweise in der Mitte eines Symbols
  - Wann startet das Symbol?
    - Die Länge des Symbols ist üblicherweise vorher festgelegt.
- Der Empfänger muss auf der Bit-ebene mit dem Sender synchronisiert sein
  - z.B. durch *Frame Synchronization*

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



- Ohne Kontrolle keine Synchronisation
- Lösung: explizites Uhrensinal
  - 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
- Uhrensinal aus der Zeichenkodierung

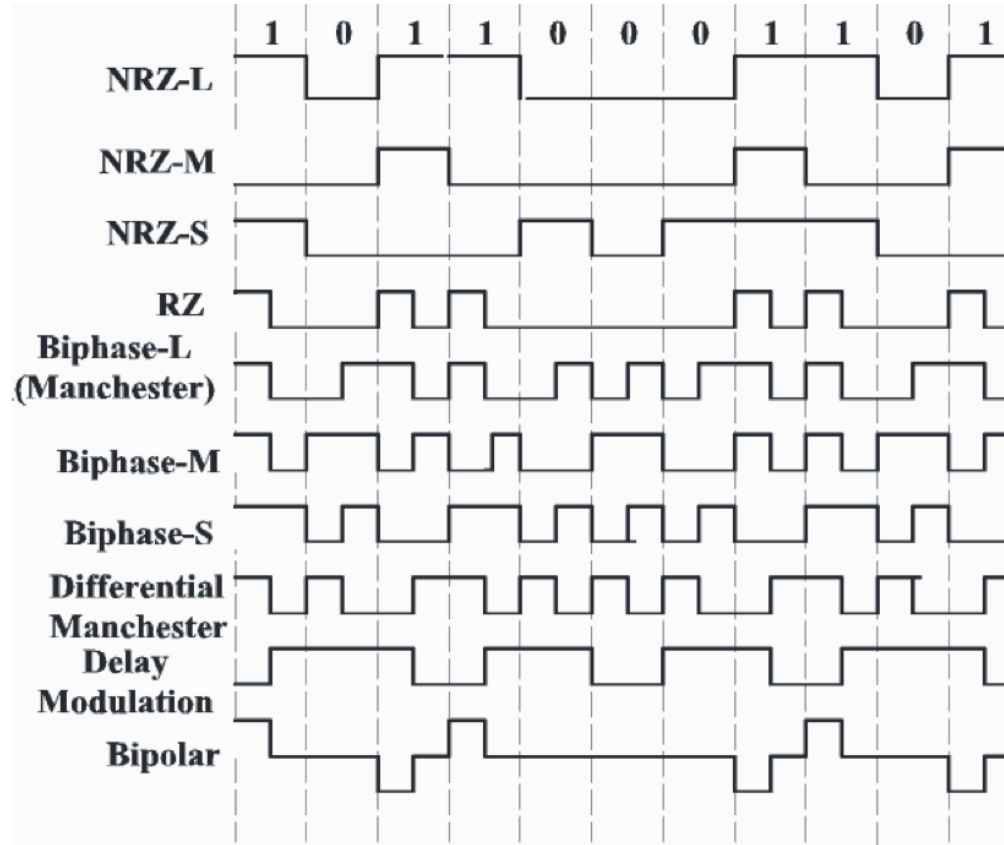
- z.B. Manchester Code (Biphase Level)
  - 1 = Wechsel von hoch zu niedrig in der Intervallmitte
  - 0 = Umgekehrter Wechsel



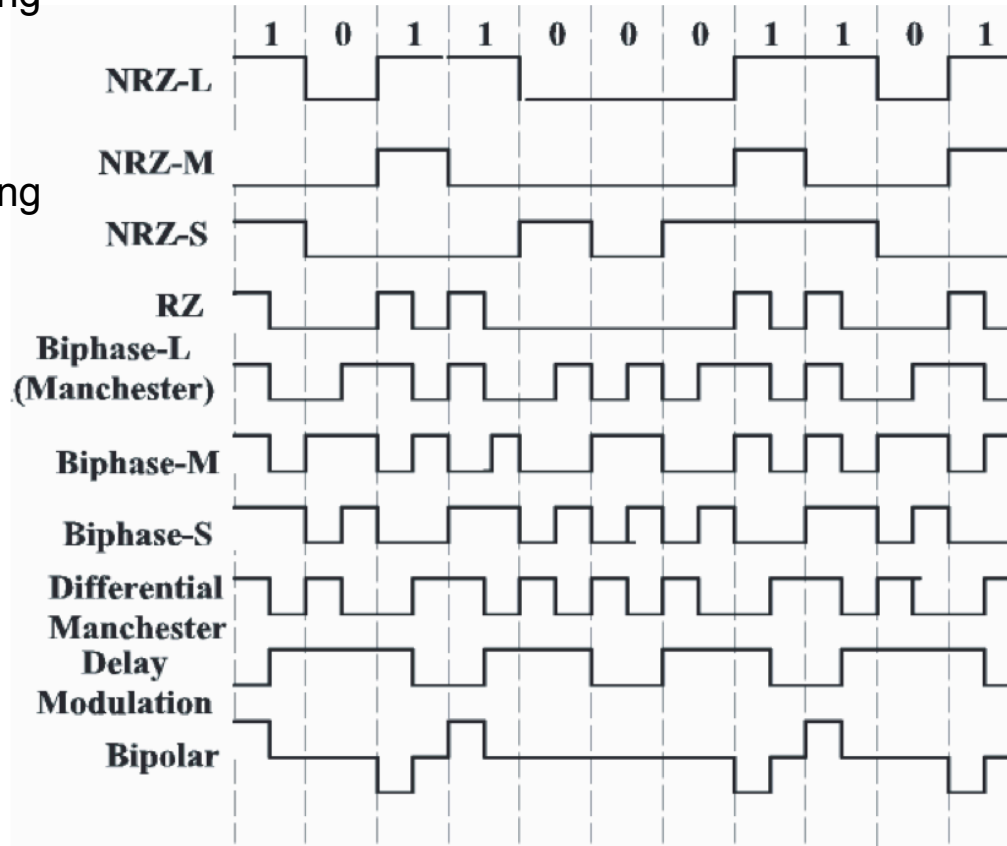
- Das Signal beinhaltet die notwendige Information zur Synchronisation



- 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

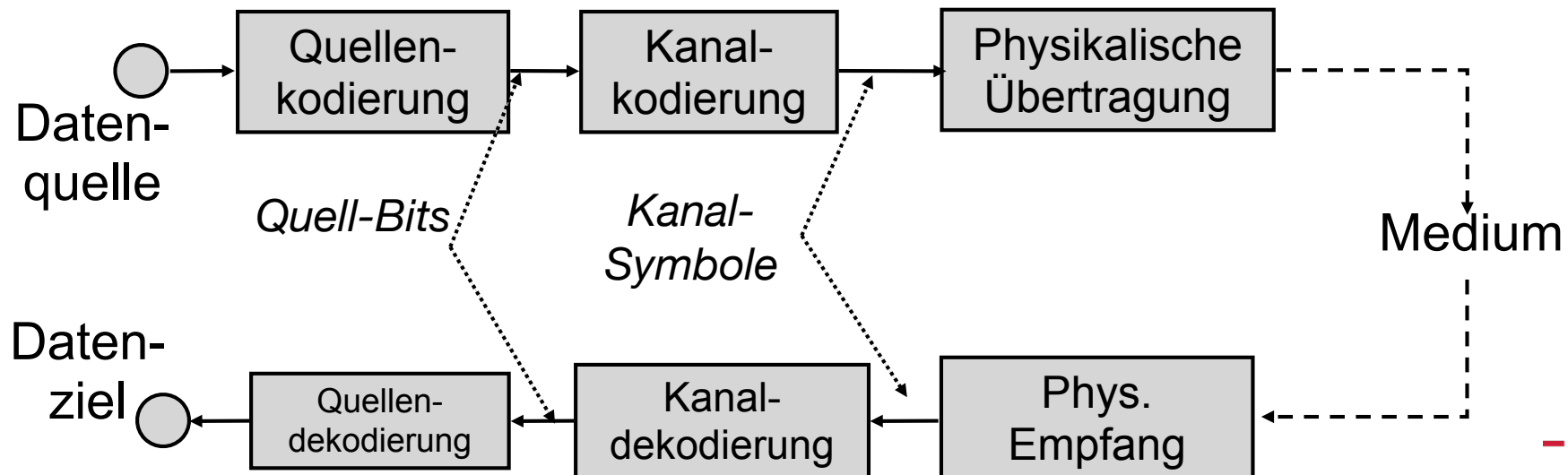


- Biphase-Mark
  - Immer: Übergang am Intervallanfang
  - 1 = zweiter Übergang in der Mitte
  - 0 = kein zweiter Übergang
- Biphase-Space
  - Immer: Übergang am Intervallanfang
  - 1/0 umgekehrt wie Biphase-Mark
- Differential Manchester-Code
  - Immer: Übergang in Intervallmitte
  - 1 = Kein Übergang 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



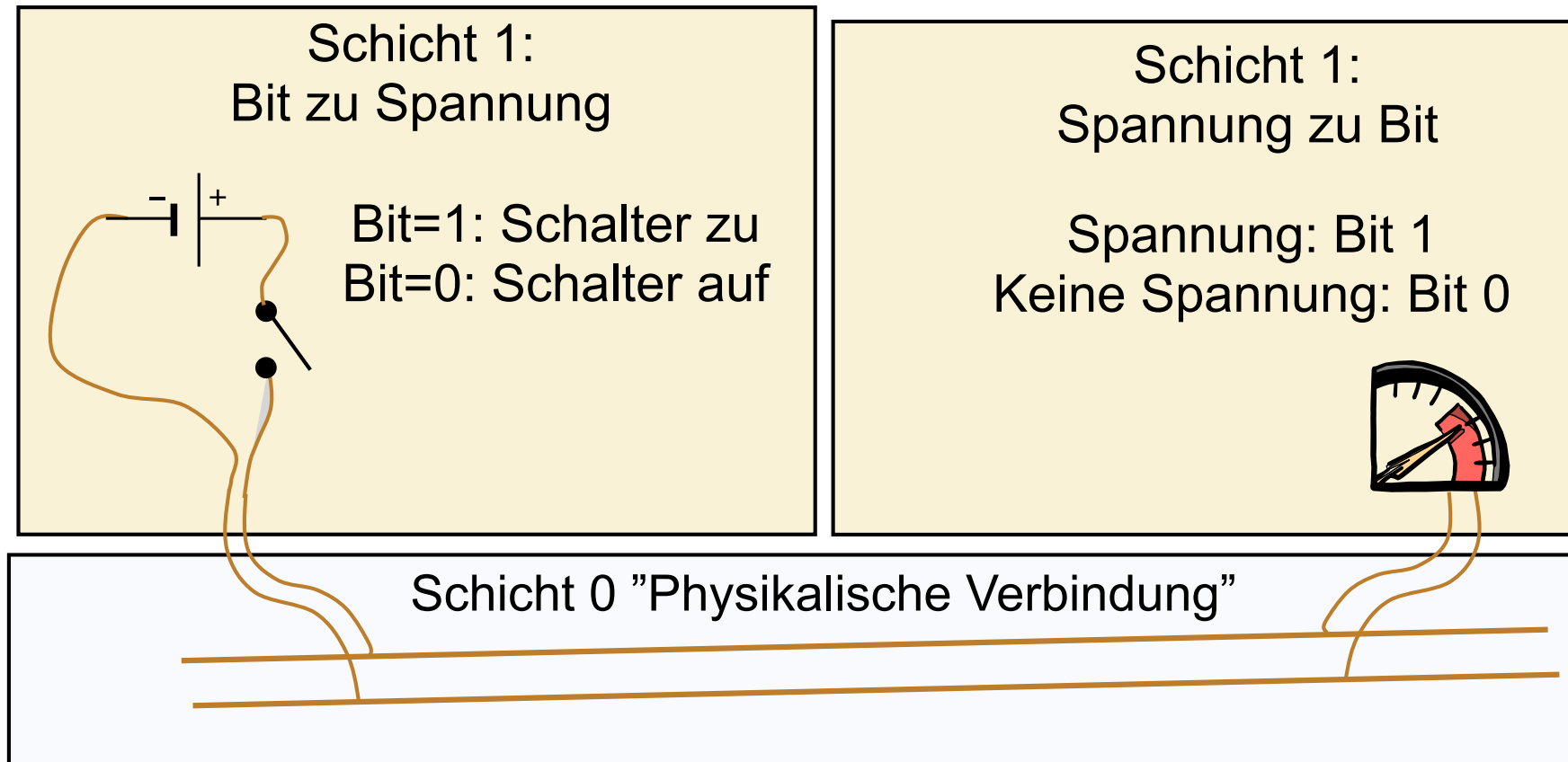
- Basisband (baseband)
  - Das digitale Signal wird direkt in Strom- oder Spannungsveränderungen umgesetzt
  - Das Signal wird mit allen Frequenzen übertragen
    - z.B. Durch NRZ (Spannung hoch = 1, Spannung niedrig = 0)
  - Problem: Übertragungseinschränkungen
- Breitband (broadband)
  - Die Daten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

- 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



# Die einfachste Bitübertragung

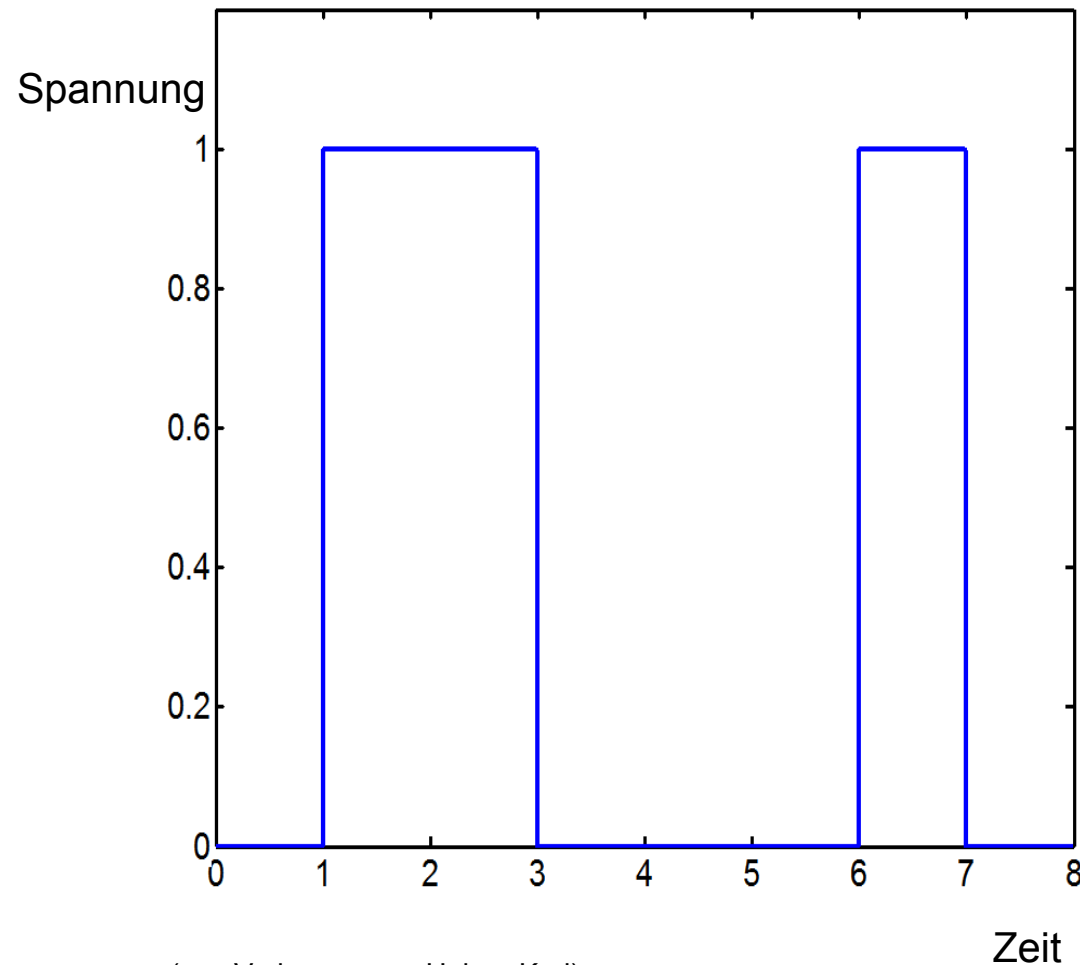
- Bit 1: Strom an
- Bit 0: Strom aus



(aus Vorlesung von Holger Karl)

# Übertragung eines Buchstabens: “b”

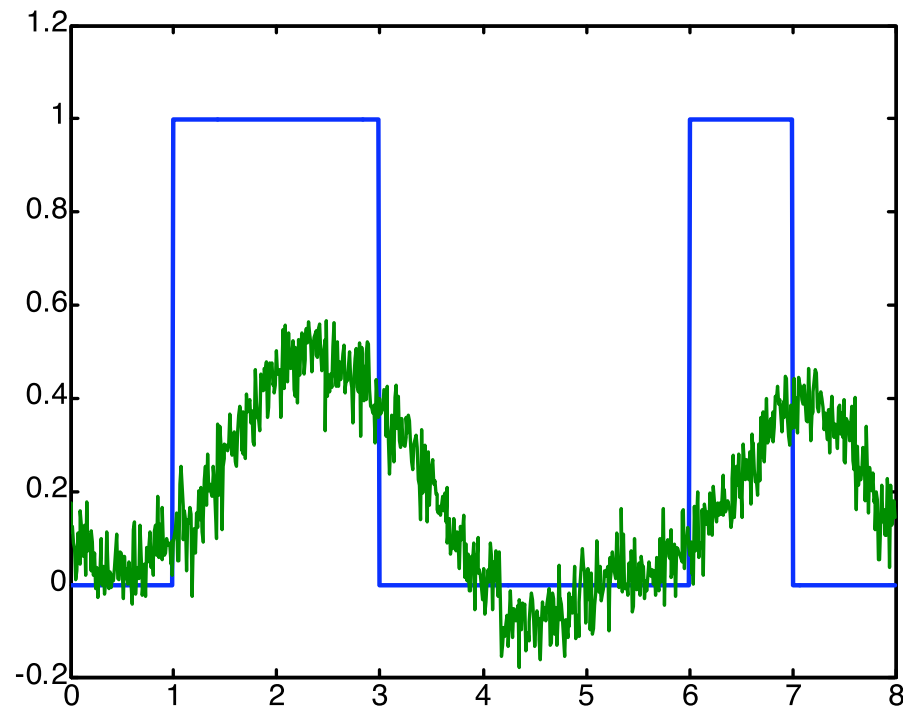
- Zeichen “b” benötigt mehrere Bits
  - z.B. ASCII code of “b” als Binärzahl  
01100010
- Spannungsverlauf:



(aus Vorlesung von Holger Karl)

# 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

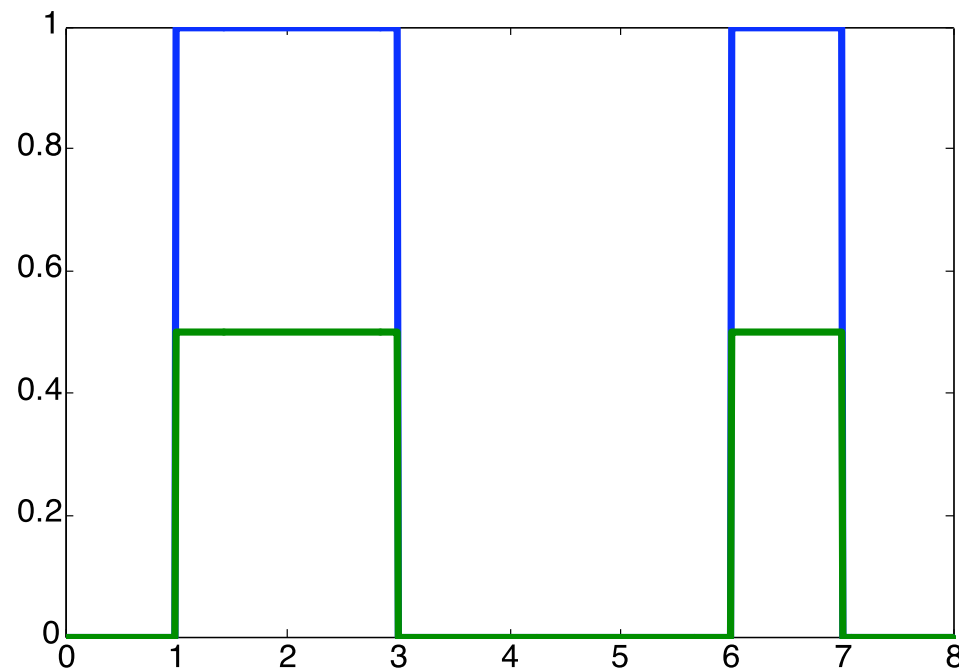


# 1. Signale werden gedämpft

- 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

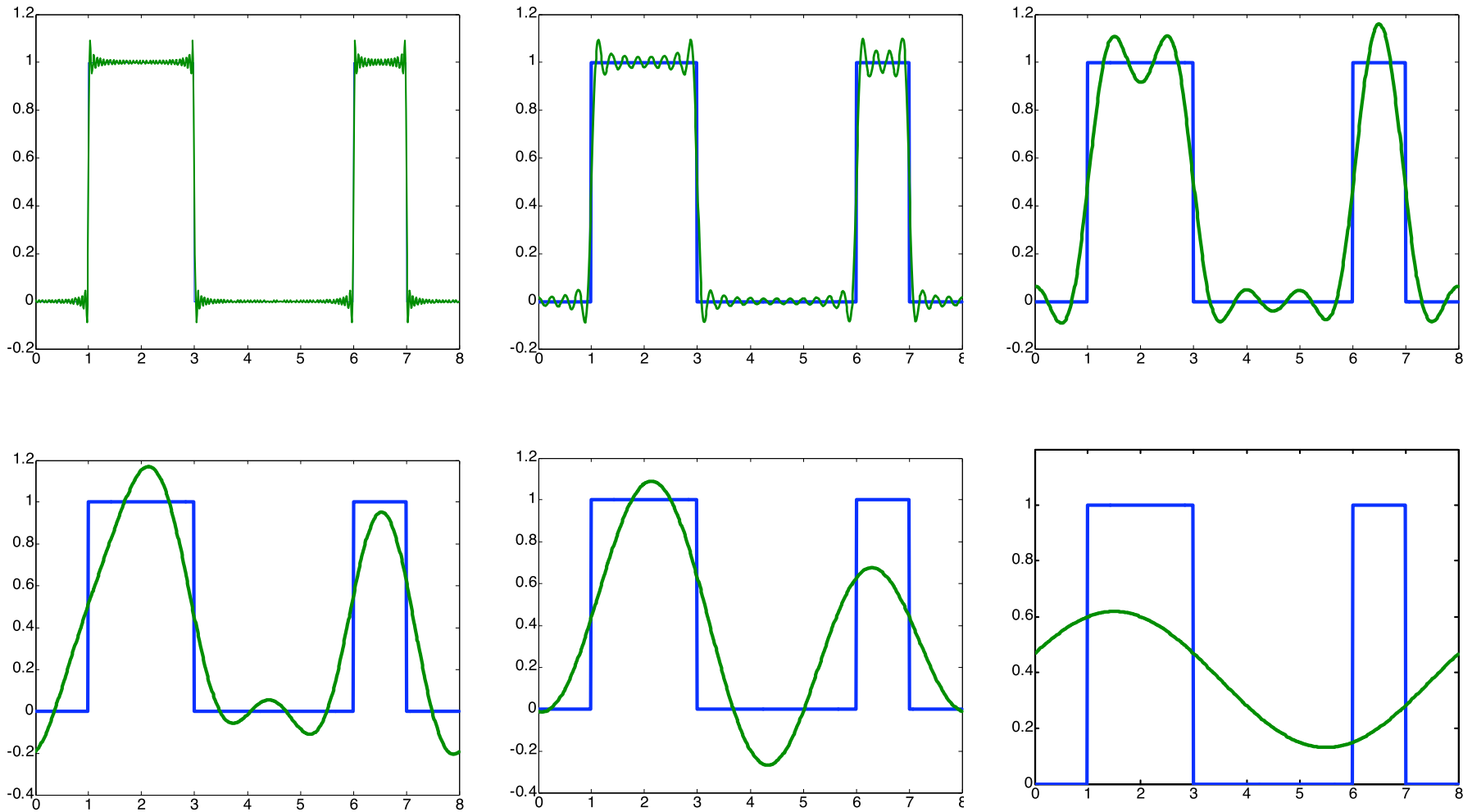
$$\log_{10} \frac{P_1}{P_0} \quad (\text{in Bel})$$
$$= 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_0} \quad (\text{in deziBel [dB]})$$

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



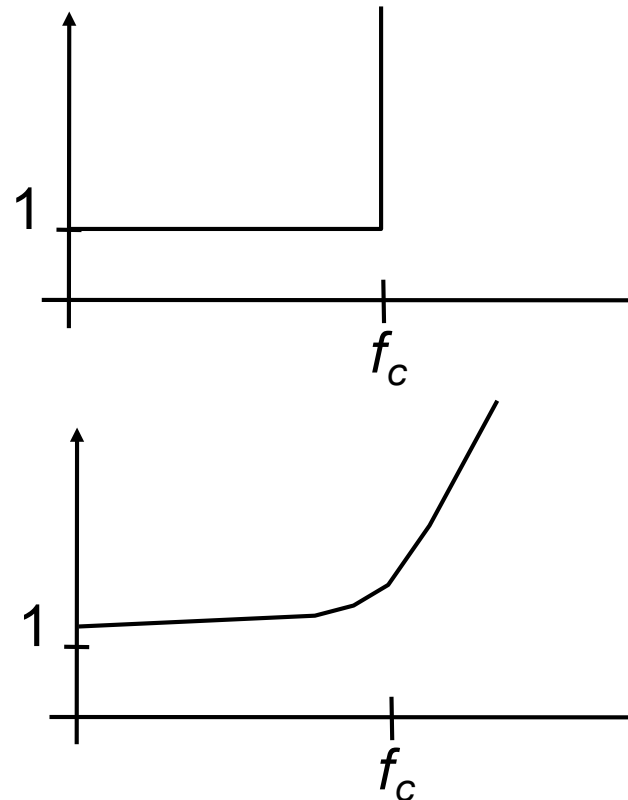
## 2. Nicht alle Frequenzen passieren das Medium

- Das Signal beim Verlust der hohen Frequenzen



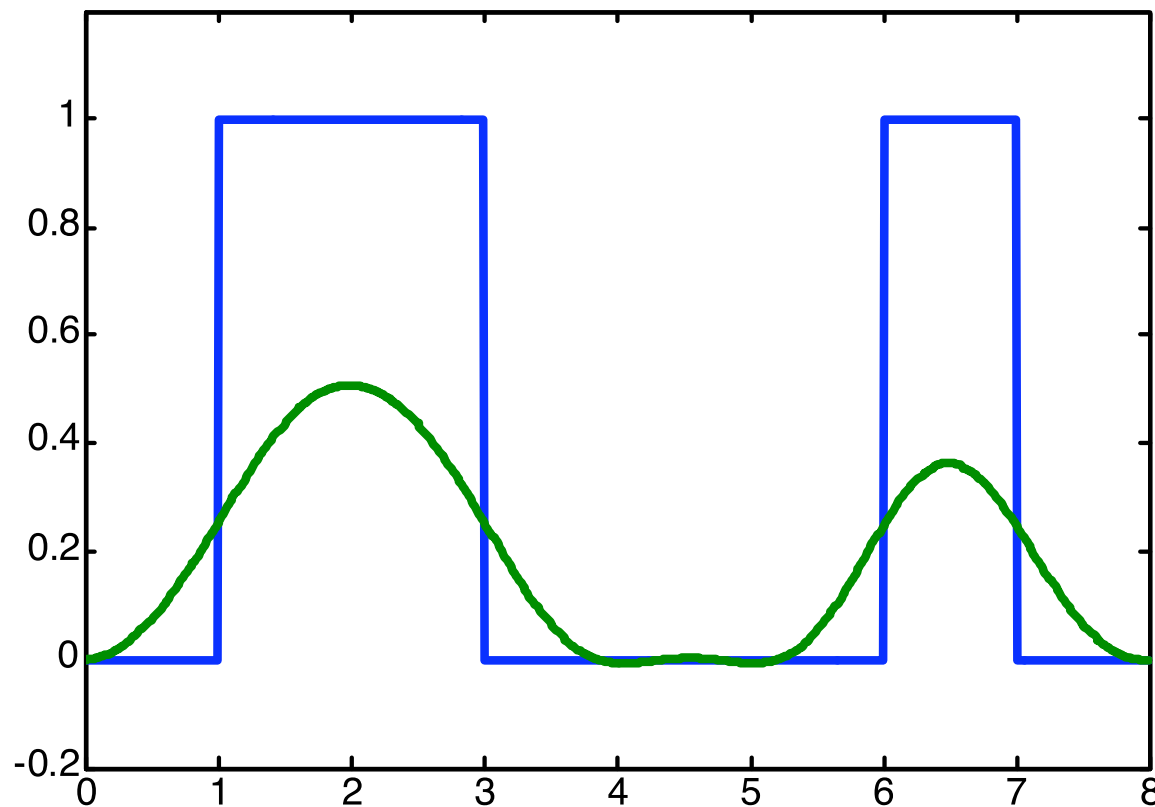
# 3. Frequenzabhängige Dämpfung

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

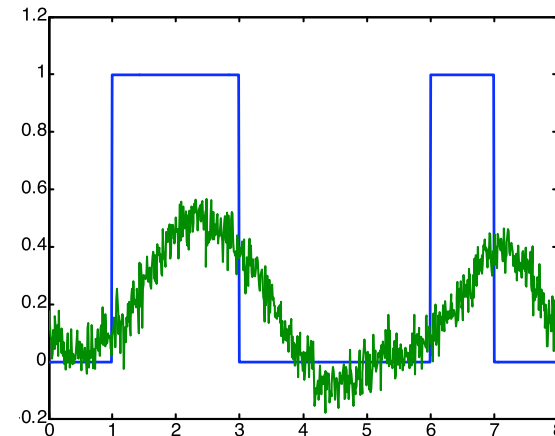


# Beispiel mit realistischerer Dämpfung

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



Warum passiert das?



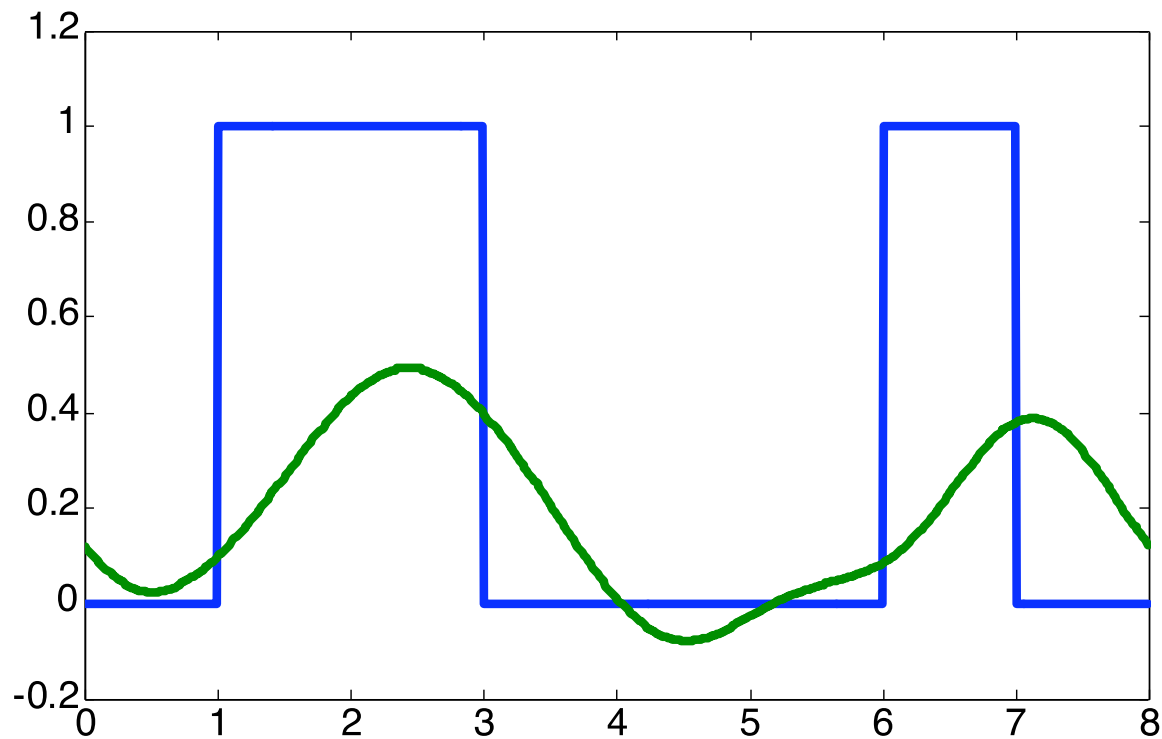
## 4. Das Medium stört und verzerrt

---

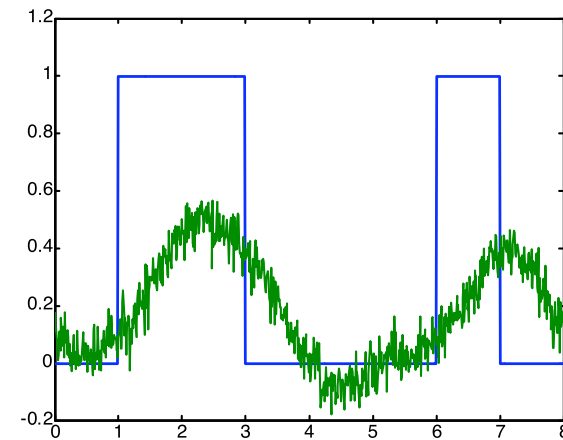
- In jedem Medium (außer dem Vakuum) haben verschiedene Frequenzen verschiedene Ausbreitungsgeschwindigkeit
  - Resultiert in Phasenverschiebung
  - Zu Erinnerung: Sinuskurve ist bestimmt durch Amplitude  $a$ , Frequenz  $f$ , and Phase  $\phi$

$$a \sin(2\pi f t + \phi)$$

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



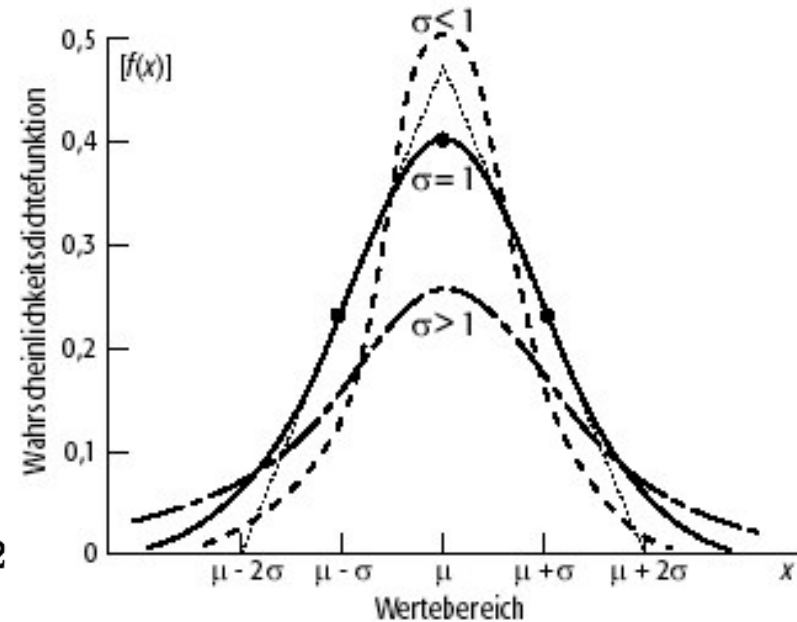
Warum passiert das:



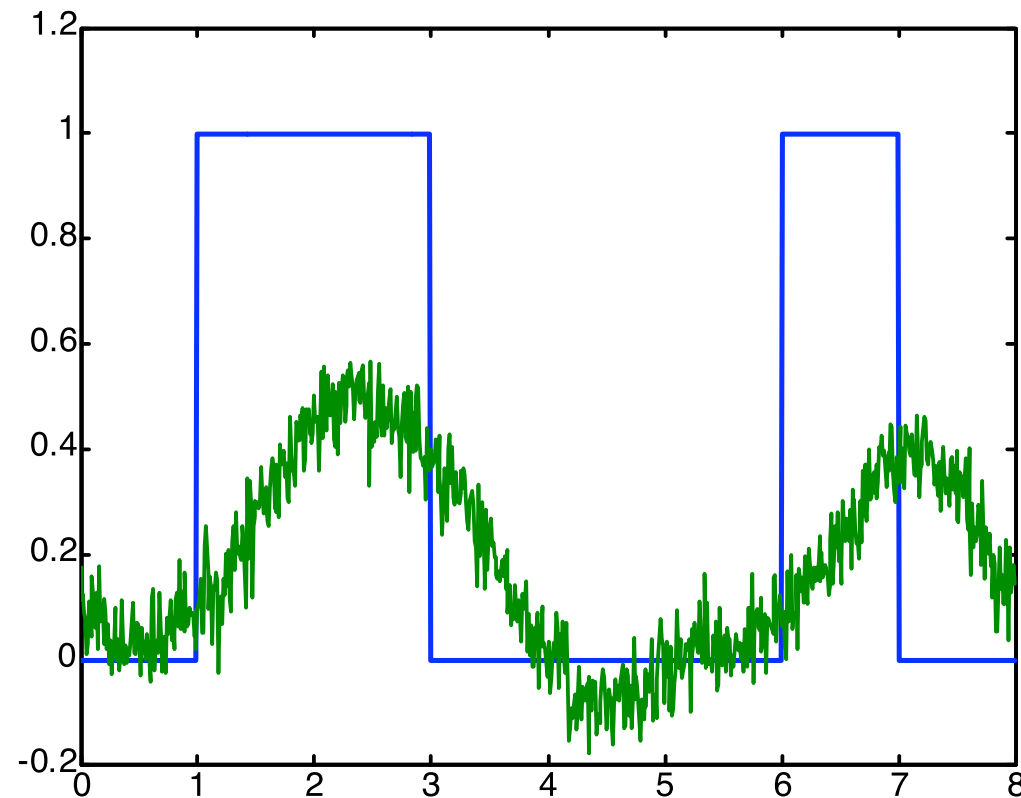
# 5. Echte Medien rauschen

- 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

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



- Dies alles kann das Eingangssignal erklären.



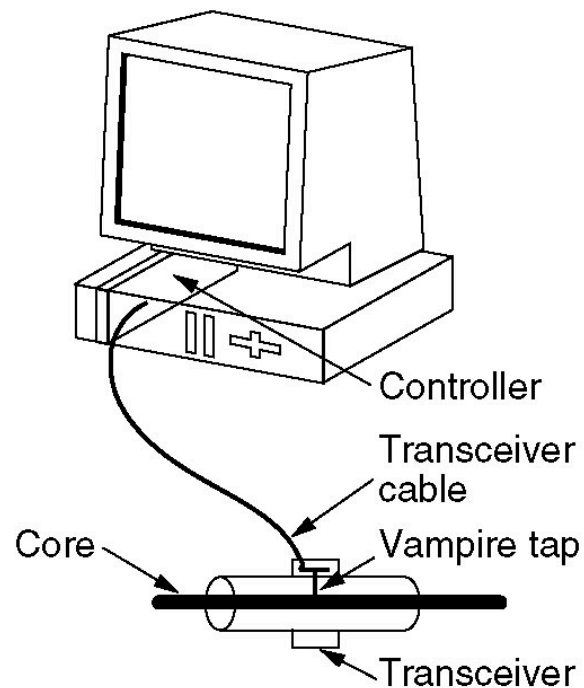
(aus Vorlesung von Holger Karl)



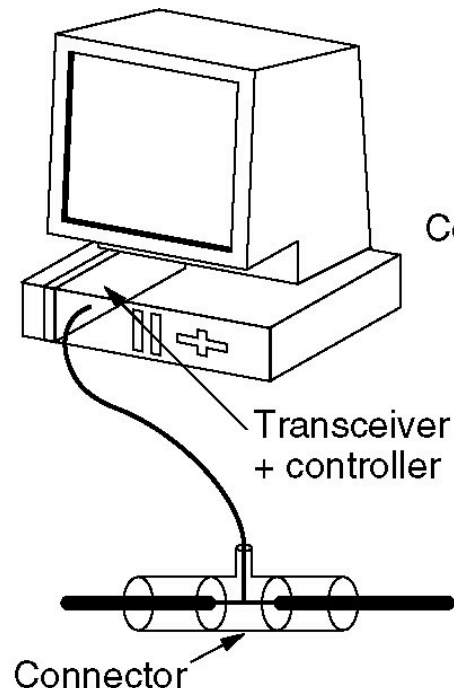
- Beispiel aus der Praxis mit Mediumzugriff: Ethernet
  - IEEE Standard 802.3
- Punkte im Standard
  - Verkabelung
  - Bitübertragungsschicht
  - Sicherungsschicht mit Mediumzugriff

# Ethernet cabling

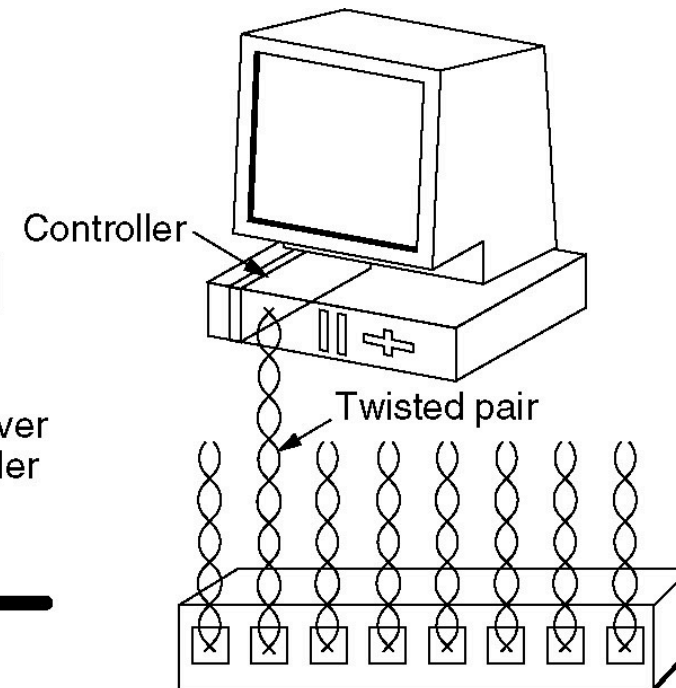
| Name     | Cable        | Max. seg. | Nodes/seg. | Advantages                   |
|----------|--------------|-----------|------------|------------------------------|
| 10Base5  | Thick coax   | 500 m     | 100        | Original cable; now obsolete |
| 10Base2  | Thin coax    | 185 m     | 30      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



10Base5



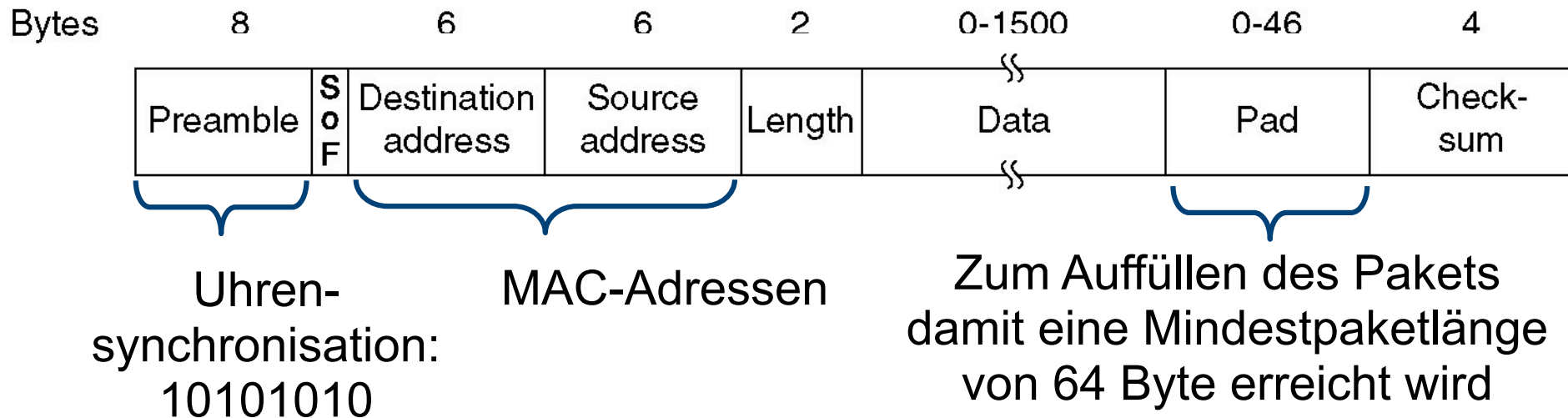
10Base2



10BaseT

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

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



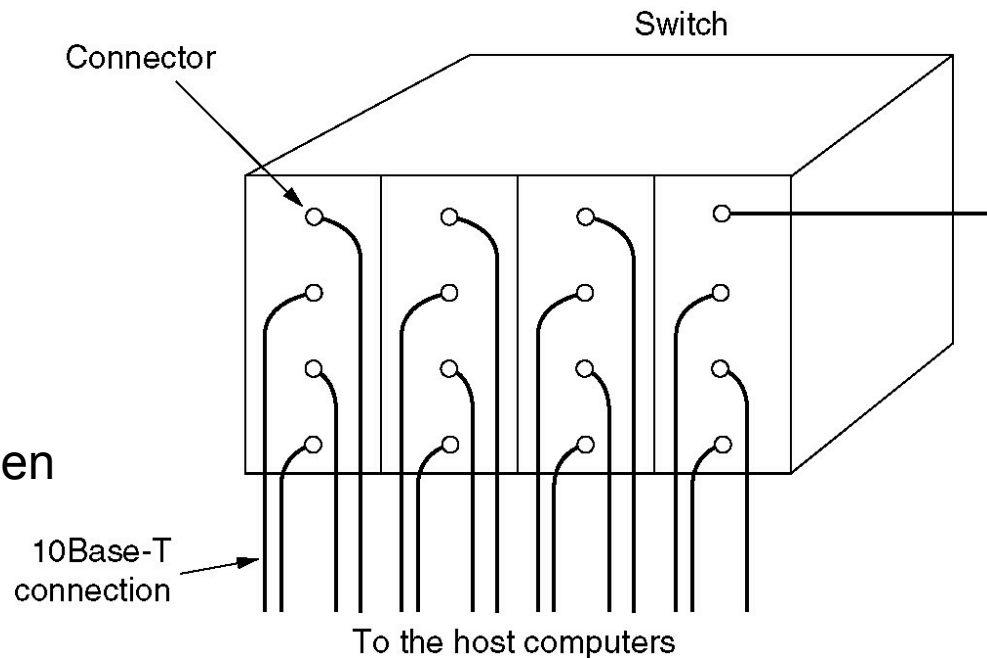
# Switch versus Hub

## ■ 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

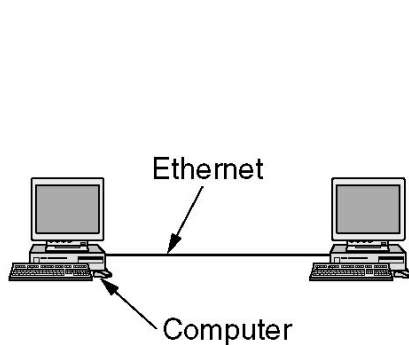


- Ursprünglich erreichte Ethernet 10 MBit/s
- 1992: Fast Ethernet
  - Ziele: Rückwärtskompatibilität
  - Resultat: 802.3u
- Fast Ethernet
  - Frame-Format ist gleichgeblieben
  - Bit-Zeit wurde von 100 ns auf 10 ns reduziert
  - Dadurch verkürzt sich die maximale Kabellänge (und die minimale Paket-Größe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

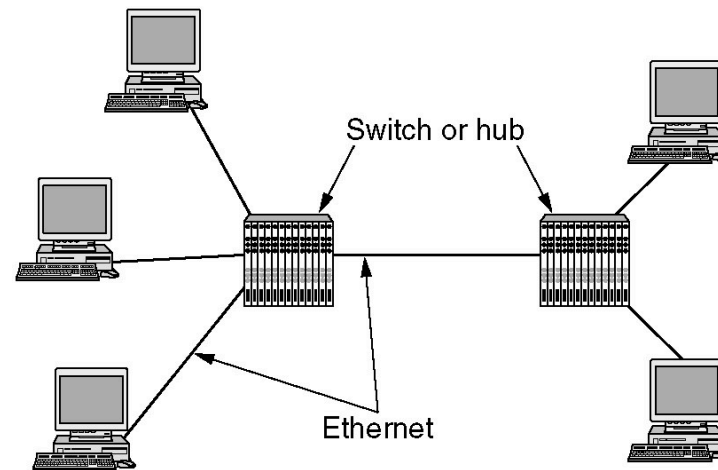
- Standard Cat-3 twisted pair unterstützt nicht 200 MBaud über 100 m
  - Lösung: Verwendung von 2 Kabelpaaren bei reduzierter Baudrate
- Wechseln von Manchester auf 4B/5B-Kodierung auf Cat-5-Kabeln

| 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: 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



(a)



(b)



- 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

| 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                           |

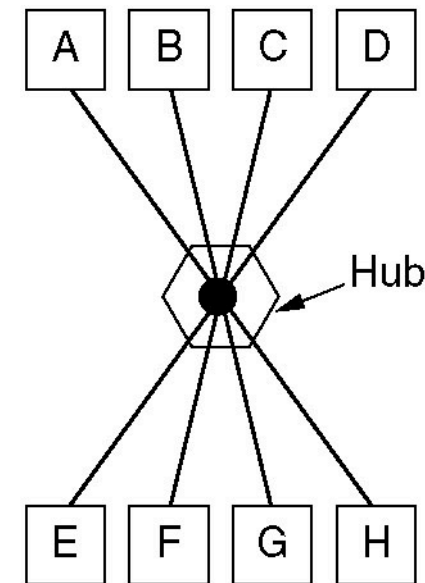
# Verbinden von LANs

---

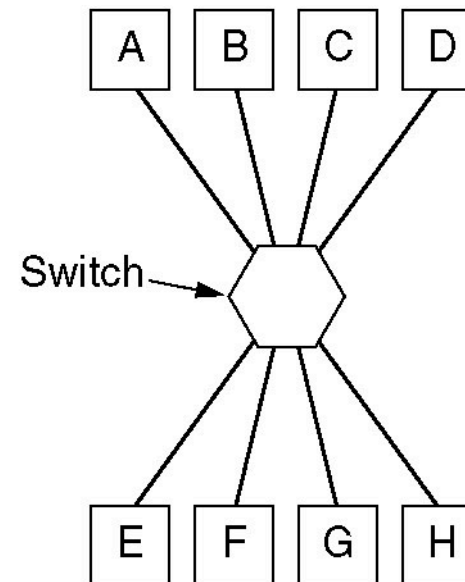
|                   |                     |
|-------------------|---------------------|
| Application layer | Application gateway |
| Transport layer   | Transport gateway   |
| Network layer     | Router              |
| Data link layer   | Bridge, switch      |
| Physical layer    | Repeater, hub       |

- 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

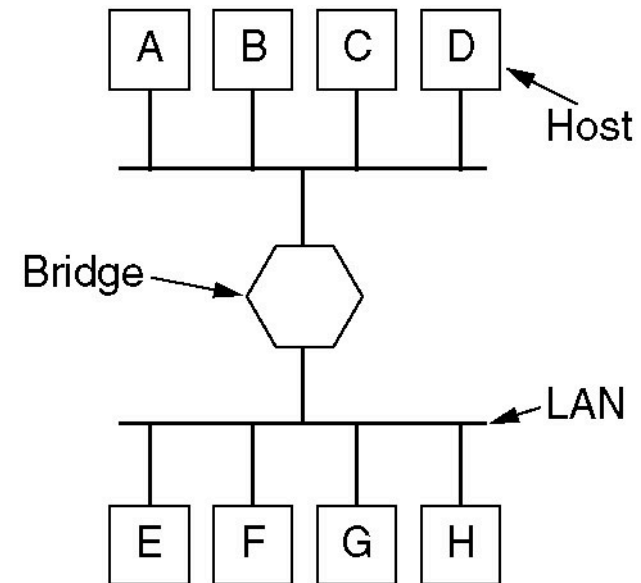
- Verbindet sternförmig Netzsegmente
  - im Prinzip wie ein Repeater
  - Signale werden auf alle angebundenen Leitungen verteilt
- Bitübertragungsschicht
  - Information und Logik der Daten bleibt unberücksichtigt
  - Insbesondere für Kollisionen



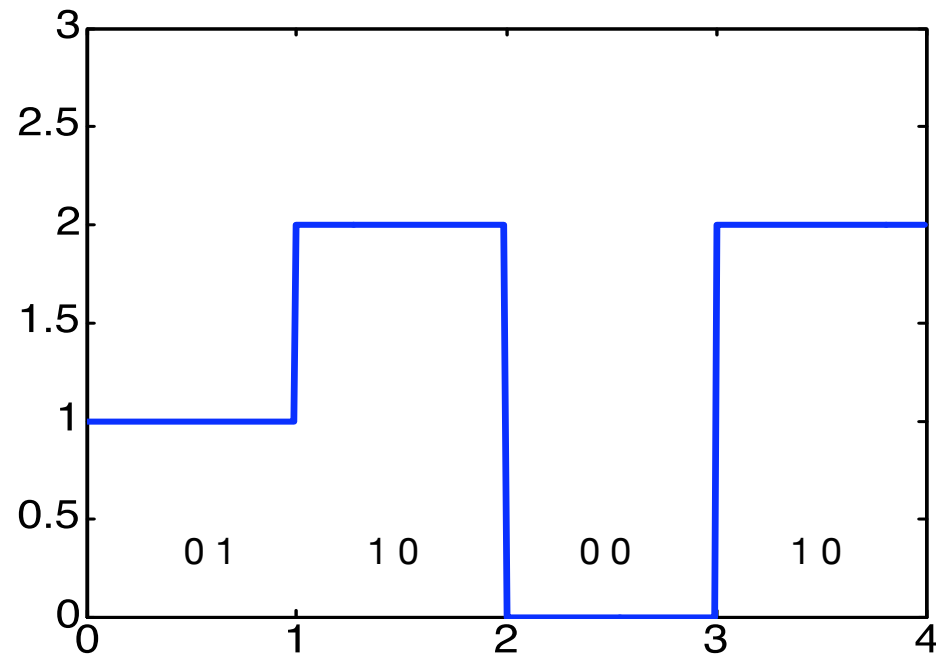
- Verbindet sternförmig Netzsegmente
  - Leitet die Daten nur in die betreffende Verbindung weiter
  - Gibt keine Kollisionen weiter
- Sicherungsschicht
  - Signale werden neu erzeugt
  - Kollisionen abgeschirmt und reduziert
  - Frames aber nicht verwendet
  - Rudimentäre Routingtabelle durch Beobachtung,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



- 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

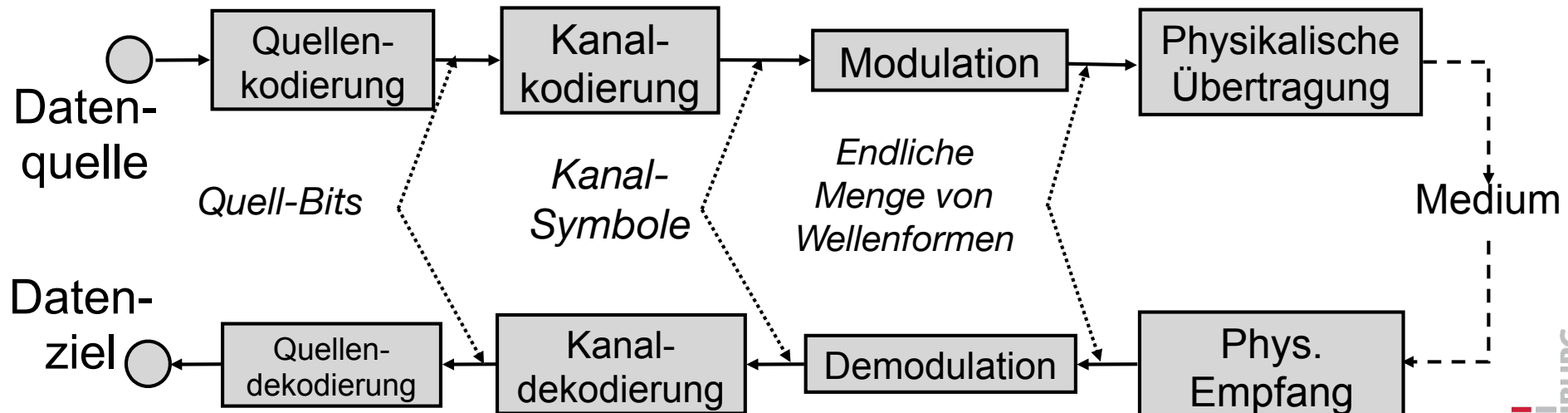


- Für die Datenübertragung können statt Bits auch Symbole verwendet werden
- Z.B. 4 Symbole: A,B,C,D mit
  - A=00, B=01, C=10, D=11
- Symbole
  - Gemessen in Baud
  - Anzahl der Symbole pro Sekunde
- Datenrate
  - Gemessen in Bits pro Sekunde (bit/s)
  - Anzahl der Bits pro Sekunde
- Beispiel
  - 2400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





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



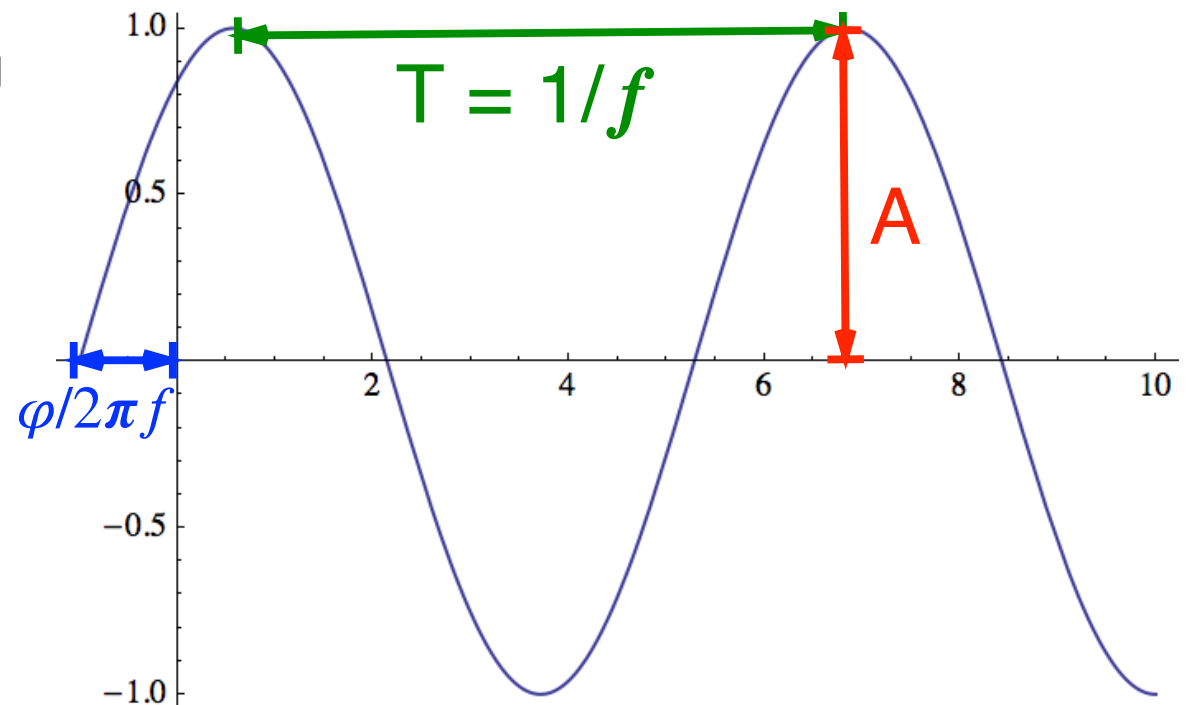
- Bewegte elektrisch geladene Teilchen verursachen elektromagnetische Wellen
  - **Frequenz**
    - $f$  : Anzahl der Oszillationen pro Sekunde
      - Maßeinheit: Hertz
  - **Wellenlänge**
    - $\lambda$ : Distanz (in Metern) zwischen zwei Wellenmaxima
  - Durch Antennen können elektro-magnetische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

$$\lambda \cdot f = c$$

- Amplitudendarstellung einer Sinusschwingung

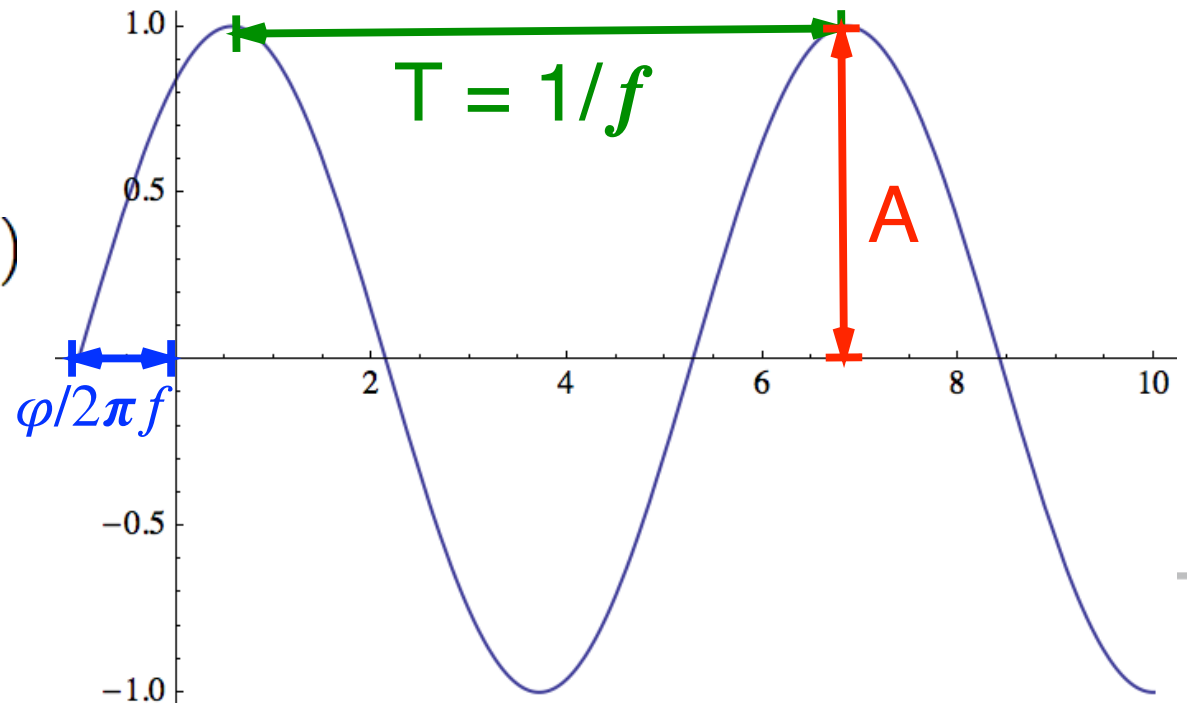
$$s(t) = A \sin(2\pi f t + \phi)$$

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



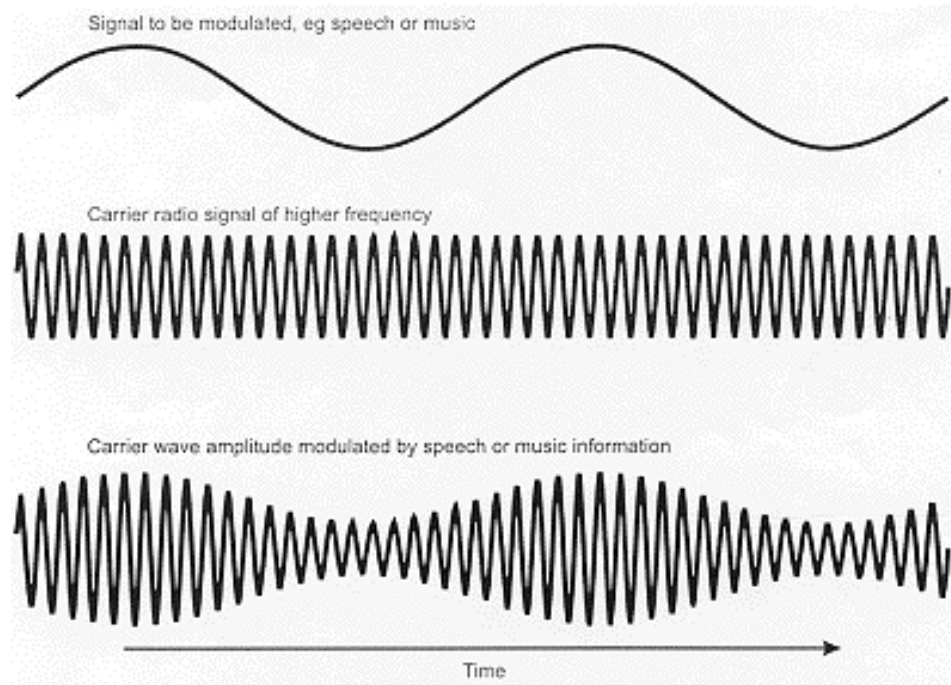
- Idee:
  - Konzentration auf die idealen Frequenzen des Mediums
  - Benutzung einer Sinuskurve als Trägerwelle der Signale
- Eine Sinuskurve hat keine Information
- Zur Datenübertragung muss die Sinuskurve fortdauernd verändert werden (moduliert)
  - Dadurch Spektralweitung (mehr Frequenzen in der Fourier-Analyse)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

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

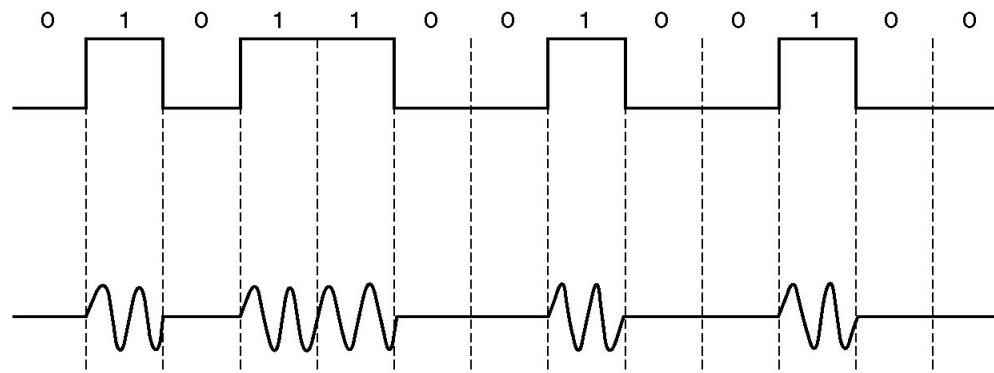


- Das zeitvariable Signal  $s(t)$  wird als Amplitude einer Sinuskurve kodiert:

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



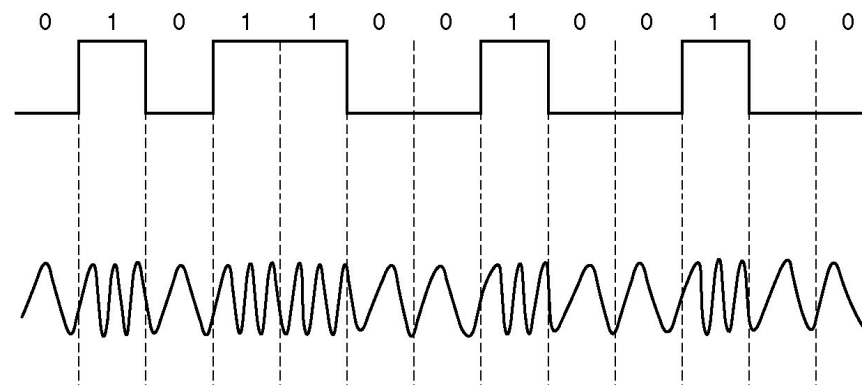
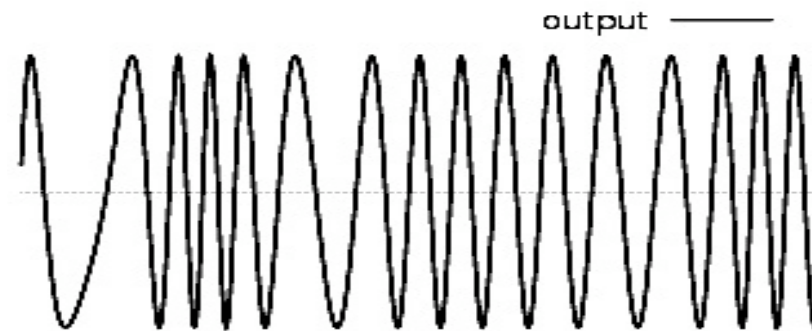
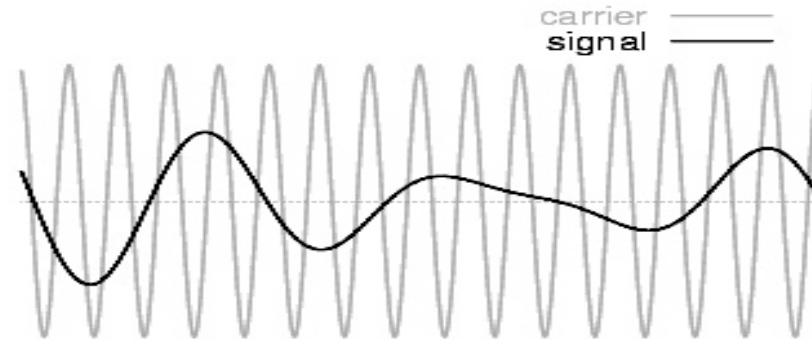
- Analoges Signal
  - Amplitude Modulation
  - Kontinuierliche Funktion in der Zeit
    - z.B. zweites längeres Wellensignal (Schallwellen)
- Digitales Signal
  - Amplitude Keying
  - Z.B. durch Symbole gegeben als Symbolstärken
  - Spezialfall: Symbole 0 oder 1
    - on/off keying



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

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

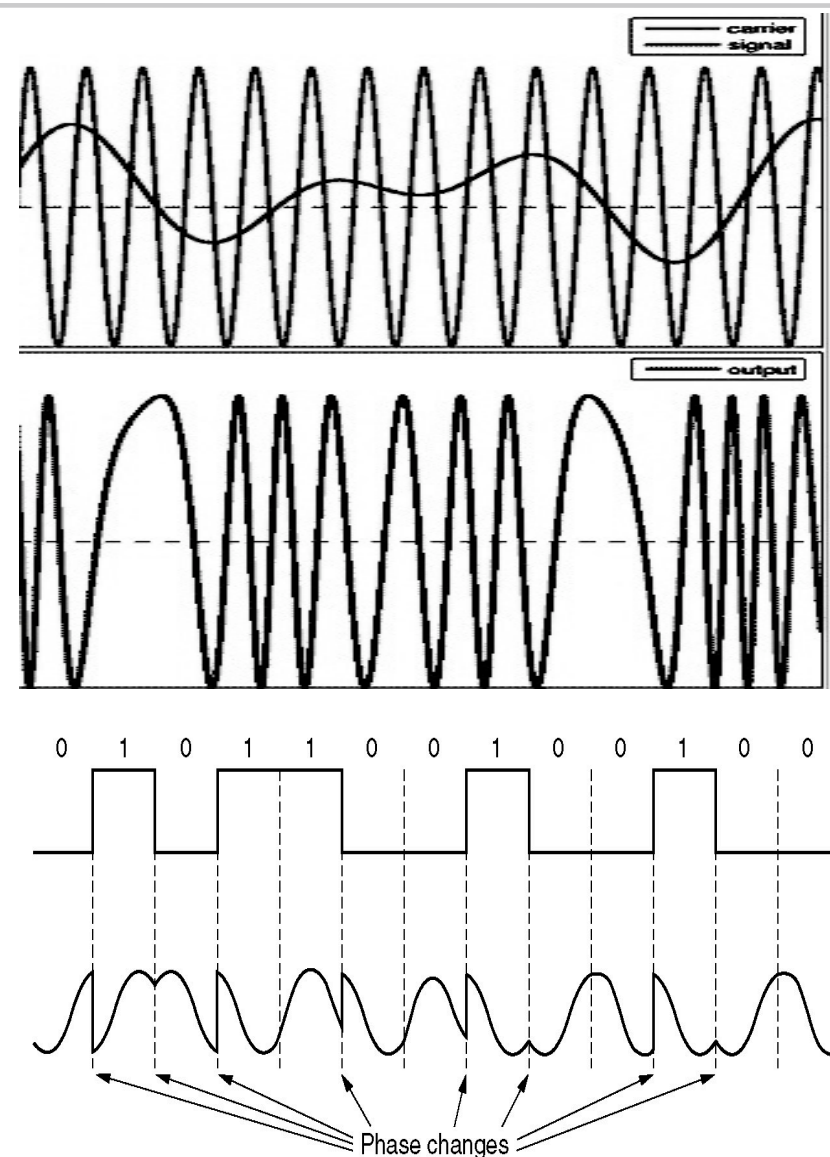
- Analoges Signal
  - Frequency Modulation (FM)
  - Kontinuierliche Funktion in der Zeit
- Digitales Signal
  - Frequency Shift Keying (FSK)
  - Z.B. durch Symbole gegeben als Frequenzen



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

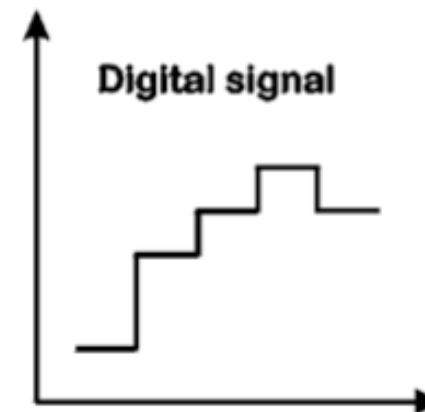
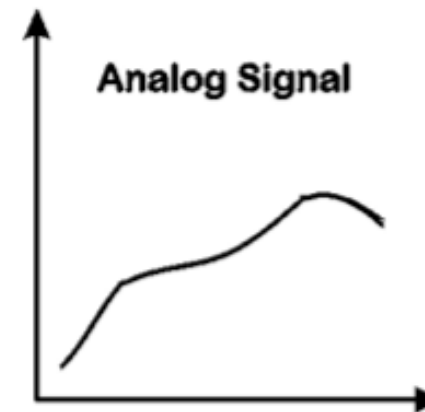
$$f_P(t) = a \sin(2\pi f t + s(t))$$

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



# 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 Empfangungenauigkeiten zu reparieren und das ursprüngliche Signal zu rekonstruieren
  - Auftretende Fehler in der analogen Übertragung können sich weiter verstärken





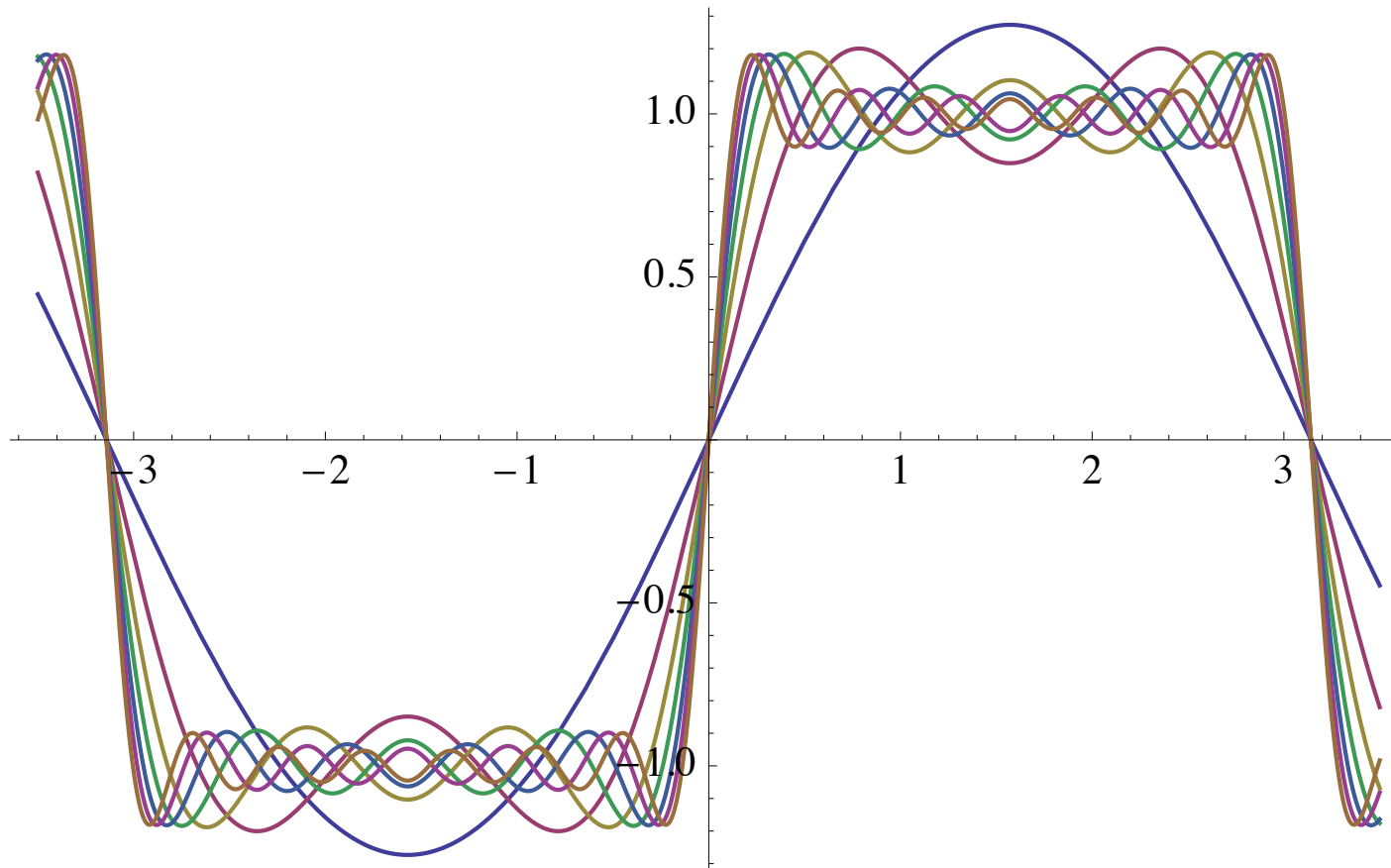
- Fouriertransformation einer periodischen Funktion:
  - Zerlegung in verschiedene
  - Sinus/Cosinus-Funktionen
- Dirichletsche Bedingungen einer periodischen Funktion  $f$ :
  - $f(x) = f(x+2\pi)$
  - $f(x)$  ist in  $(-\pi, \pi)$  in endlich vielen Intervallen stetig und monoton
  - Falls  $f$  nicht 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 Fourierkoeffizienten  $a_0, a_1, a_2, \dots, b_1, b_2, \dots$  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 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  $k = 0, 1, 2, \dots$

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

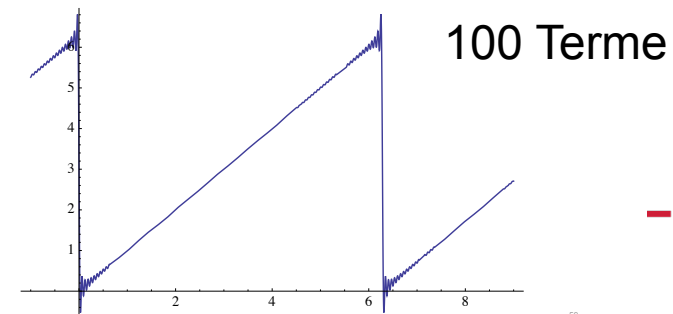
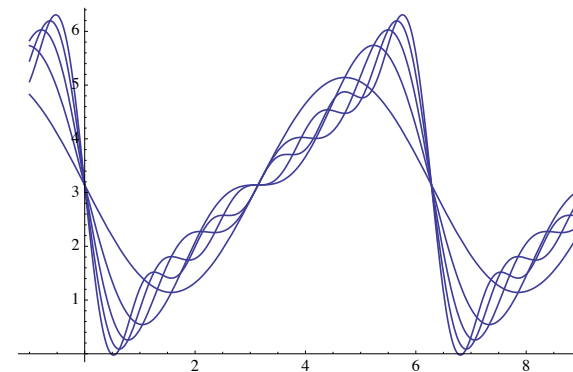
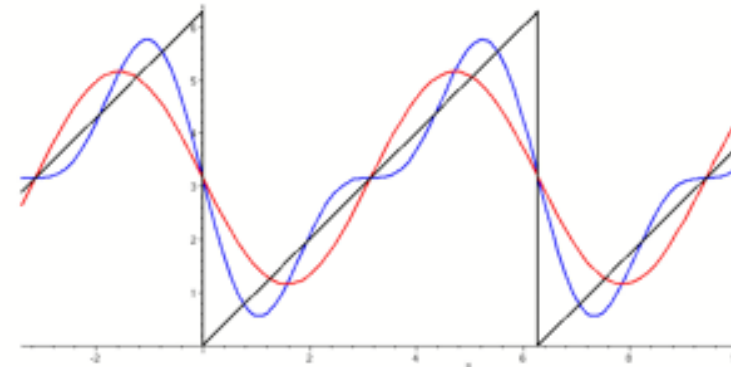
- Für  $k = 1, 2, 3, \dots$

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

- Beispiel: Sägezahnkurve

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

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



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

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

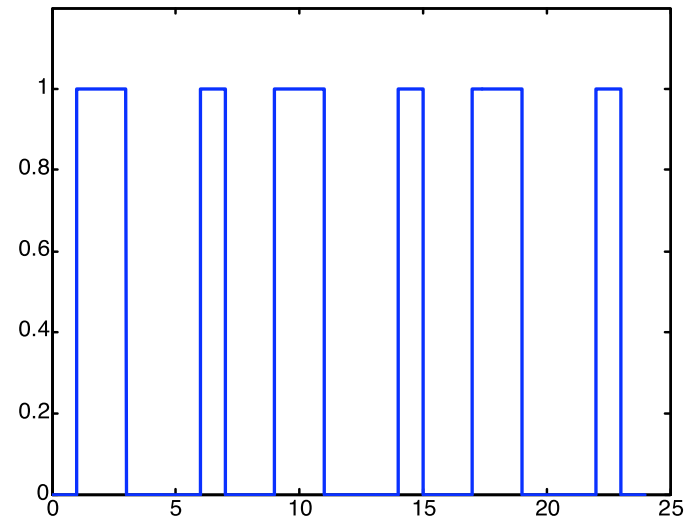
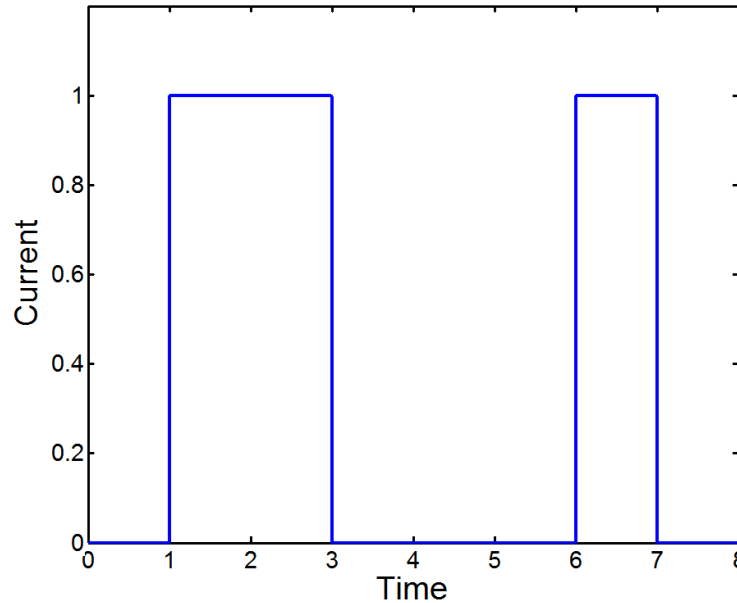
$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \cos(2\pi n f t) dt$$

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

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

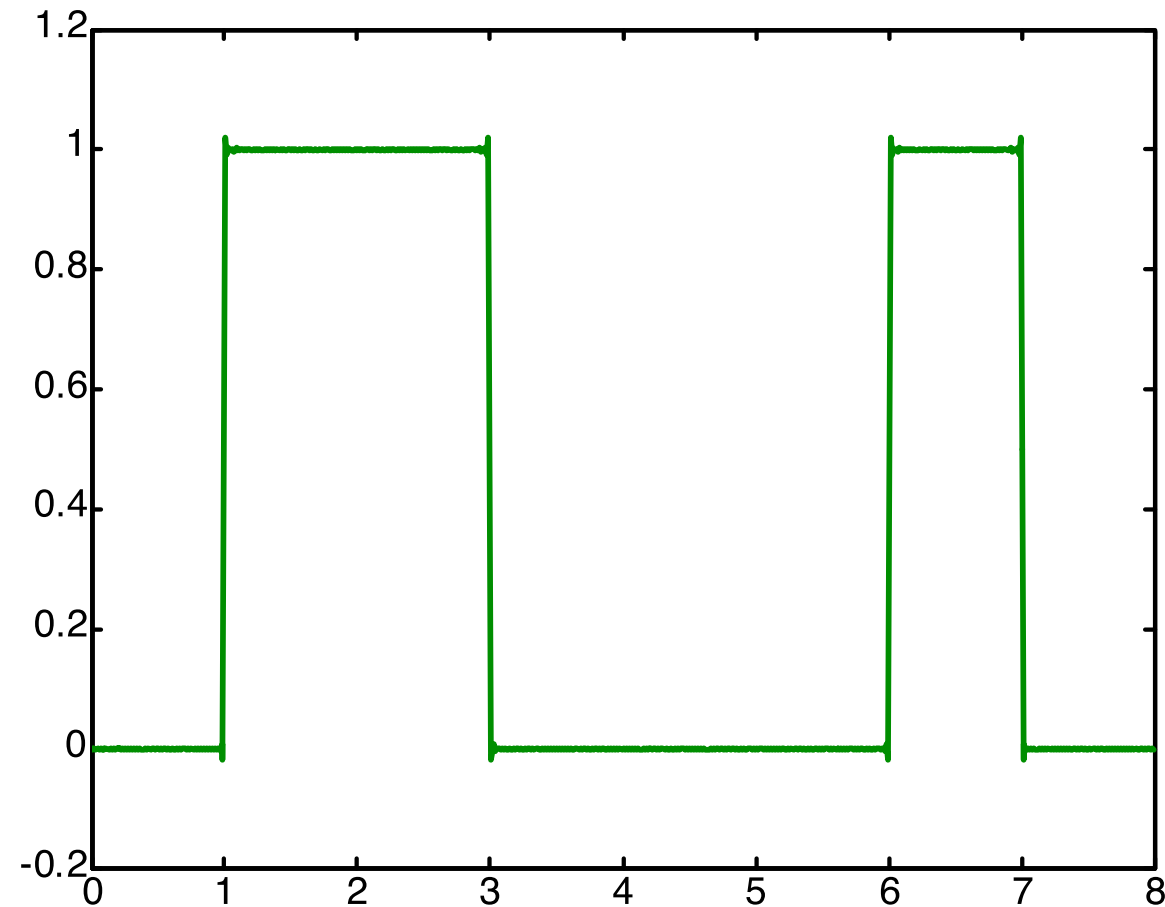
$$(a_k)^2 + (b_k)^2$$

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



(aus Vorlesung von Holger Karl)

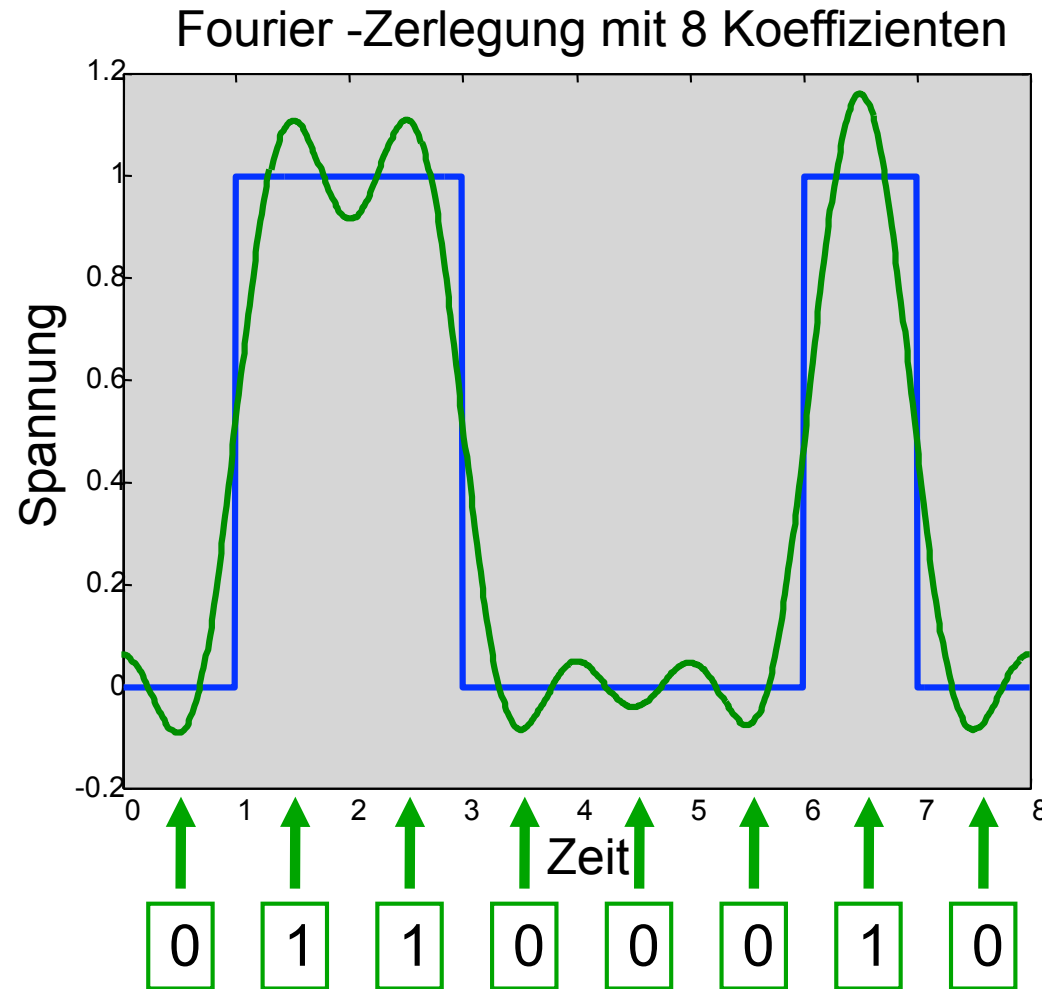
- Fourier-Analyse mit 512 Termen:



(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  $2 f_{\max}$ .



- 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.



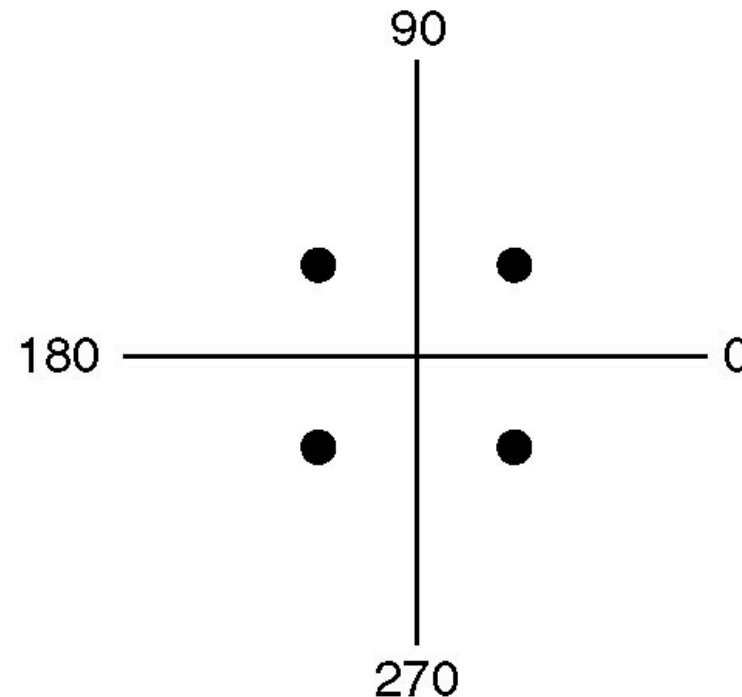
# Helfen mehr Symbole?

---

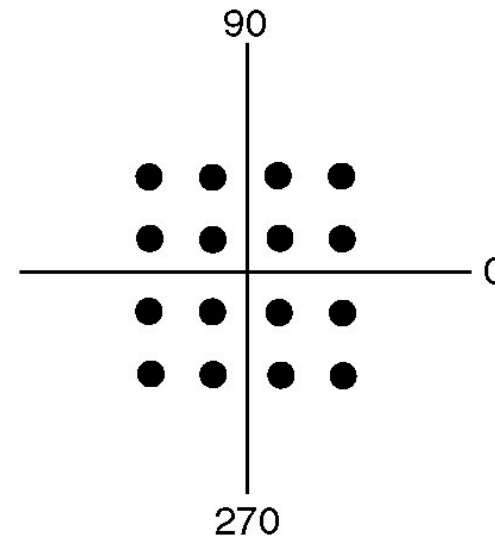
- Nyquists Theorem besagt, dass rein theoretisch die Datenrate mit der Anzahl der verwendeten Symbole vergrößert werden könnten
  
- Diskussion:
  - Nyquists Theorem liefert nur eine theoretische obere Schranke und kein Verfahren zur Übertragung
  - In der Praxis gibt es Schranken in der Messgenauigkeit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



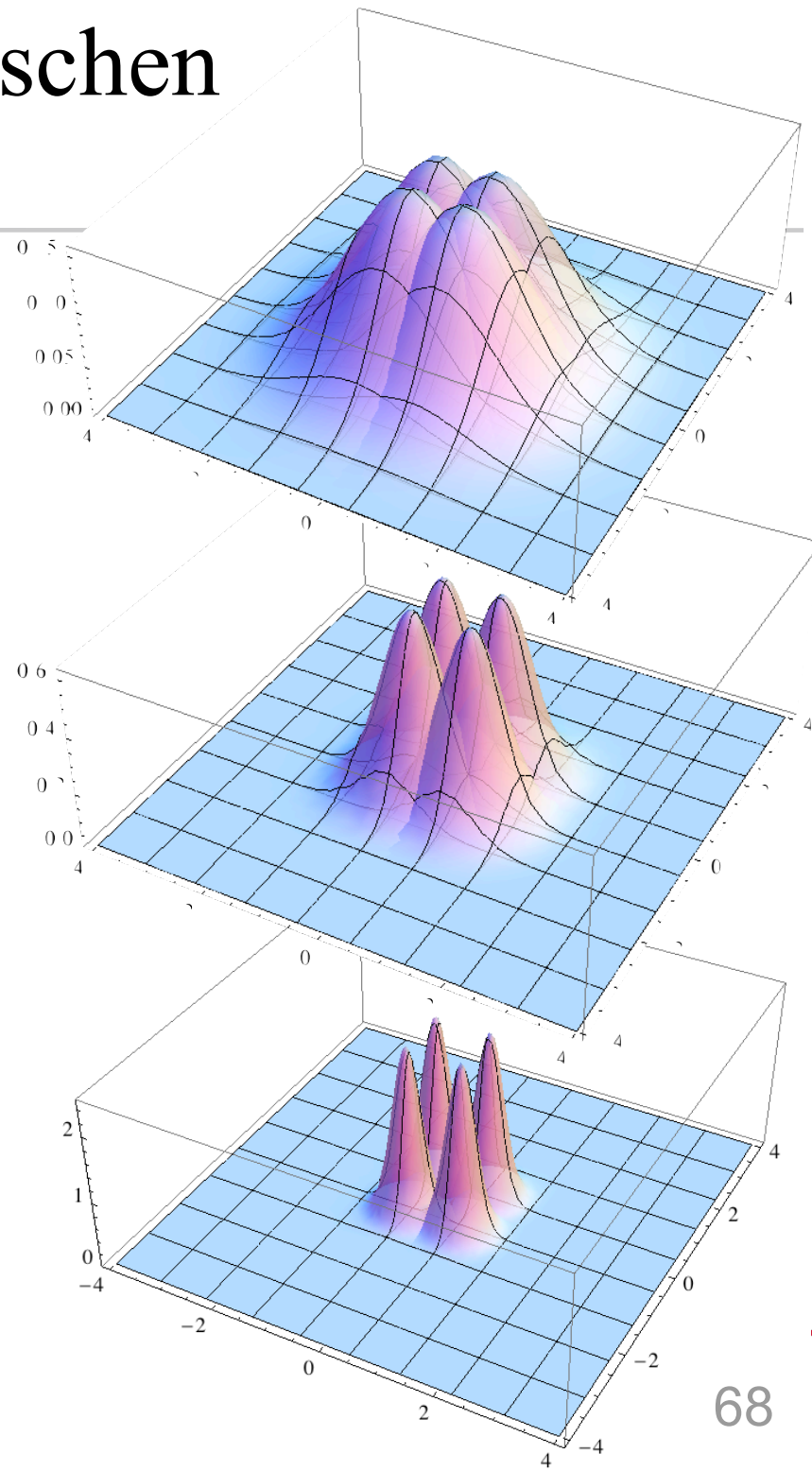
- Amplituden- und Phasenmodulation können erfolgreich kombiniert werden
- Beispiel: 16-QAM (Quadrature Amplitude Modulation)
  - Man verwendet 16 verschiedene Kombinationen von Phasen und Amplituden für jedes Symbol
  - Jedes Symbol kodiert vier Bits ( $2^4 = 16$ )
  - Die Datenrate ist also viermal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



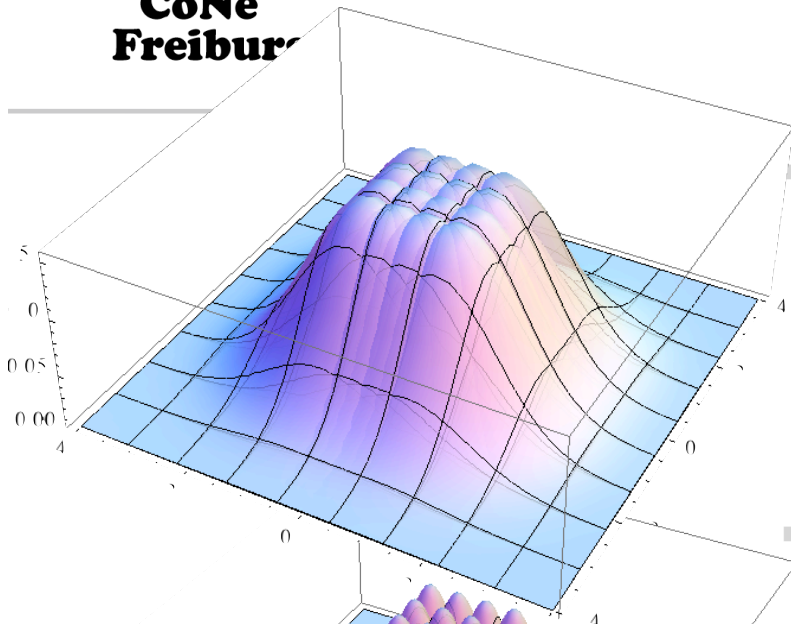
- Rauschen wird mit der Normalverteilung beschrieben

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

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

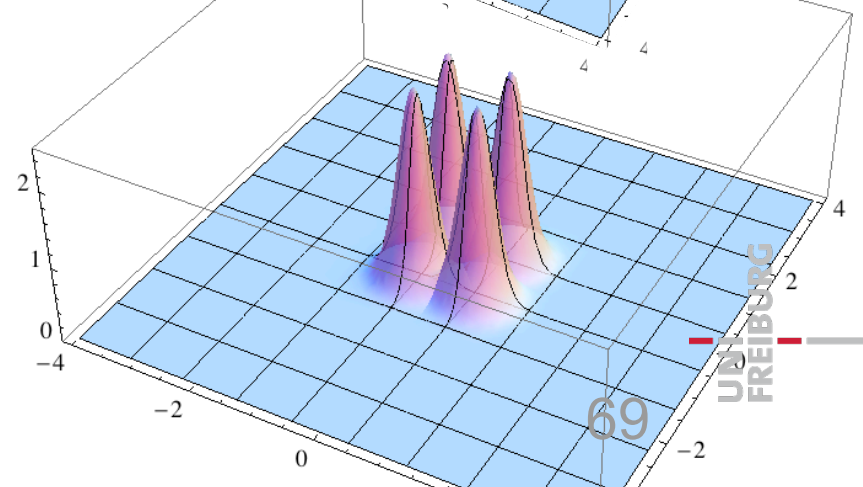
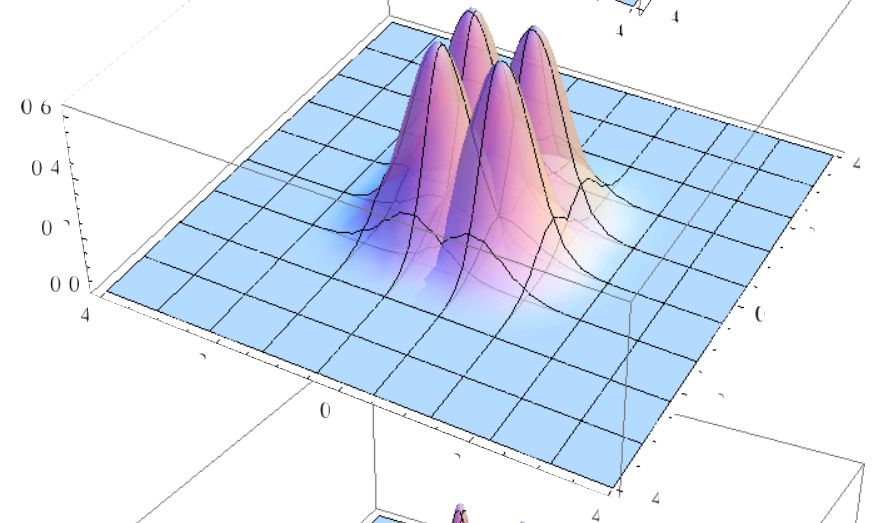
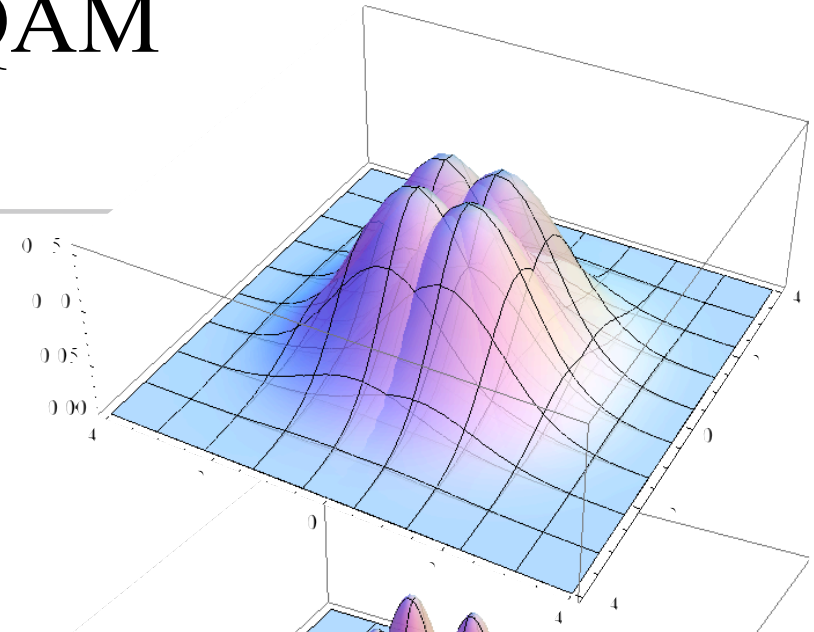
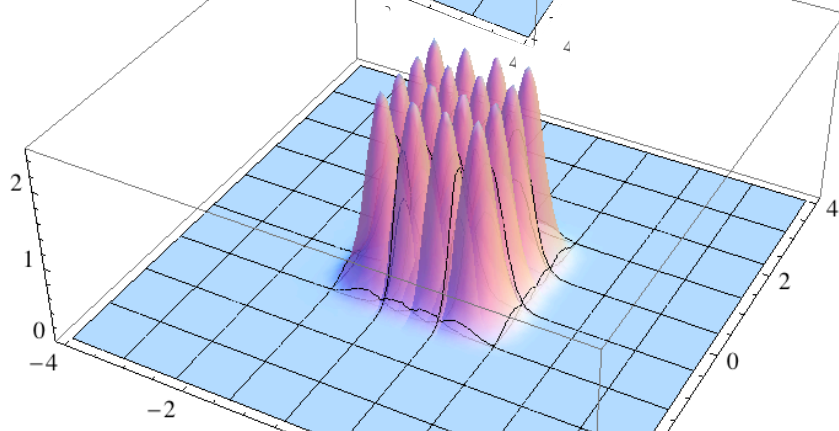
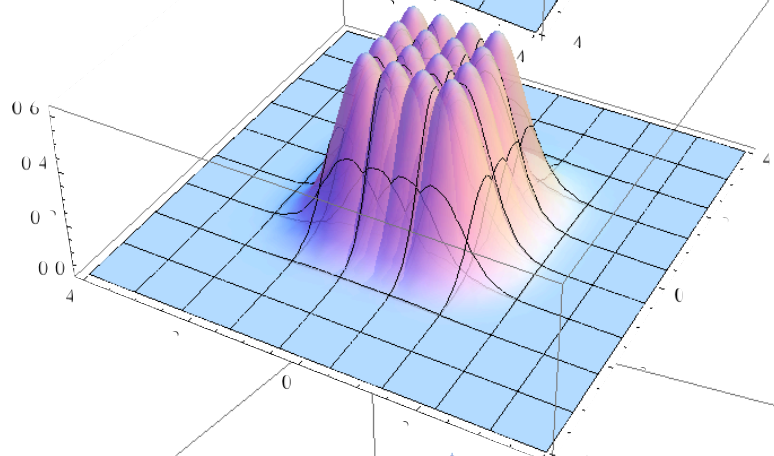


# QAM versus 16QAM



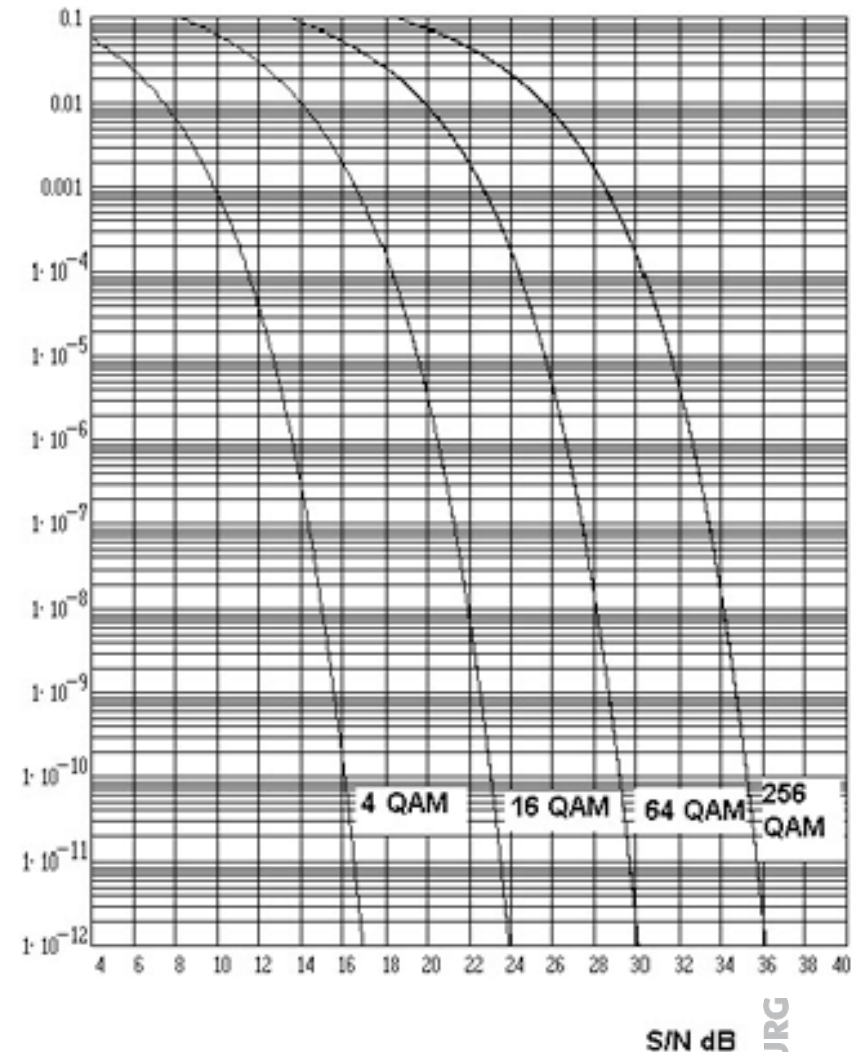
■ Dichtere  
Codes  
erzeugen bei  
gleichem  
Rauschen  
mehr Fehler

■ 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



- 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

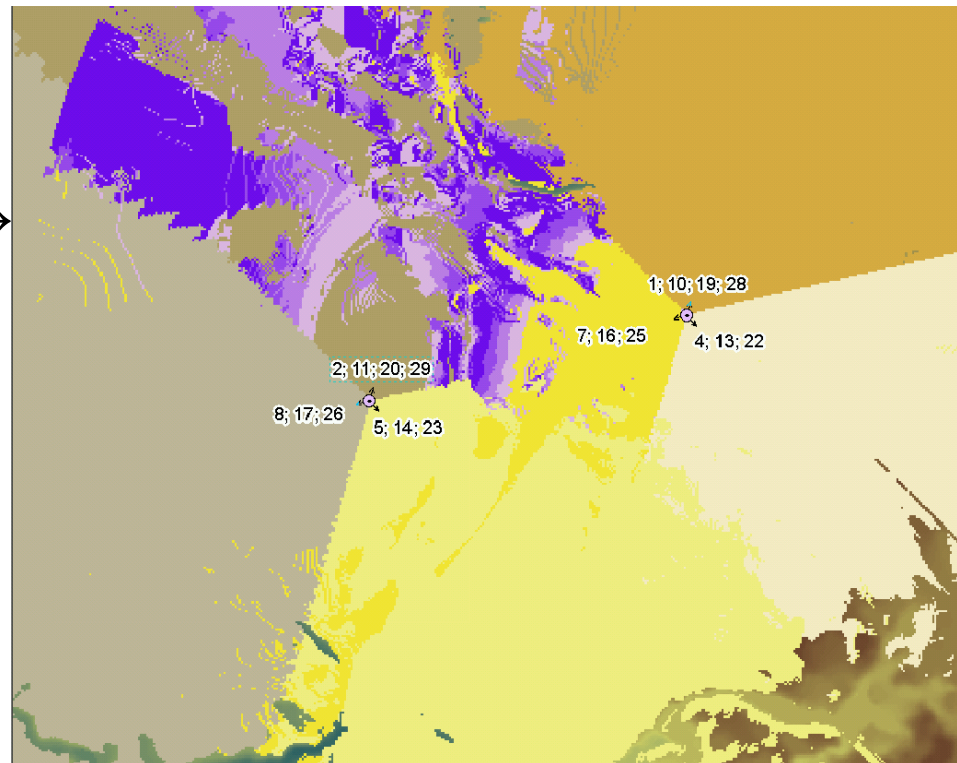


- Raummultiplexverfahren
  - Parallele und exklusive Nutzung von Übertragungskanäle
    - z.B. Extraleitungen/Zellen/Richtantenne
- Frequenzmultiplexverfahren
  - Mehrere zu übertragende Signale in einem Frequenzbereich gebündelt;
  - Bei Funkübertragung werden unterschiedlichen Sendern unterschiedliche 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



## ■ Raumaufteilung (Space-Multiplexing)

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



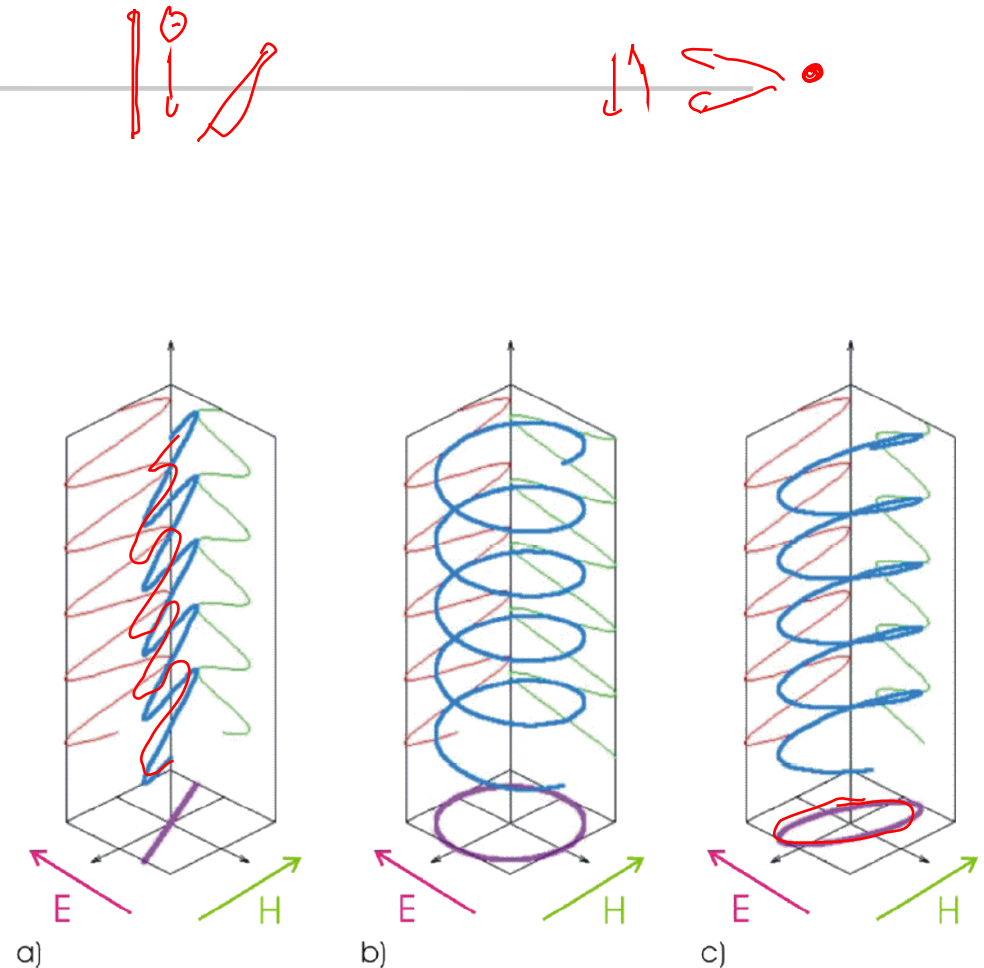
## ■ Frequenzmultiplex

- 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

- 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>

# 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

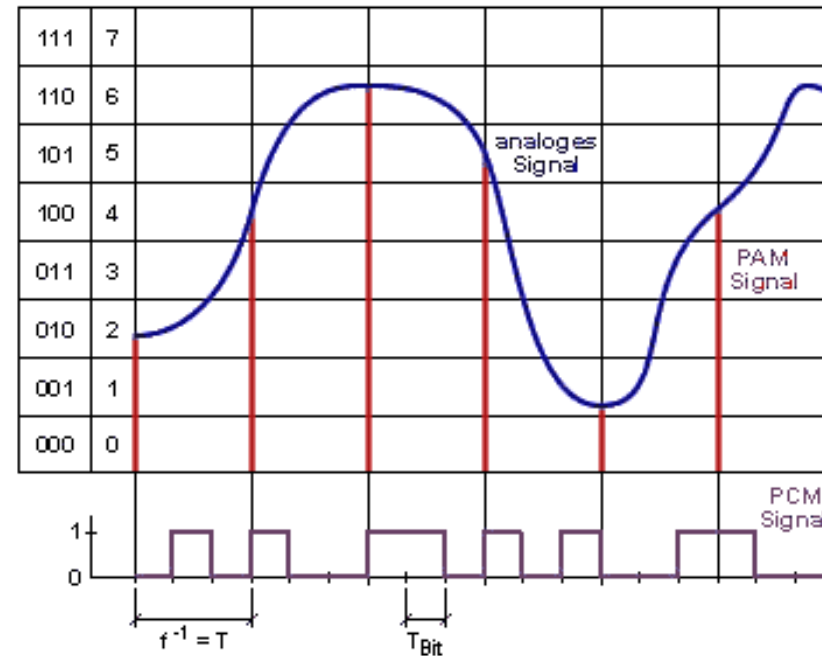
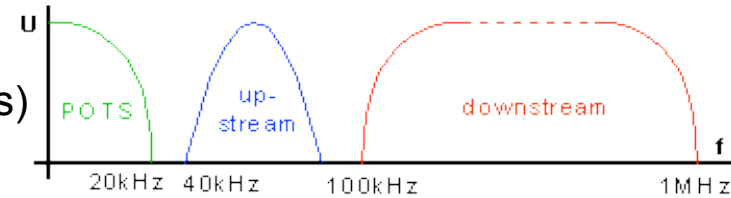
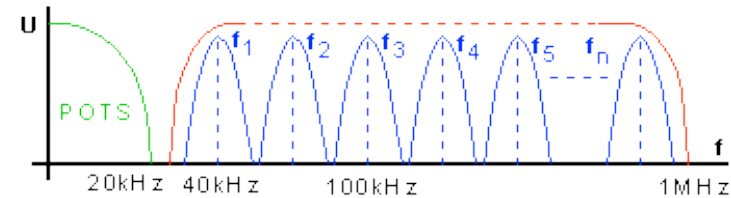


Abb. aus <http://de.wikipedia.org/wiki/Puls-Code-Modulation>

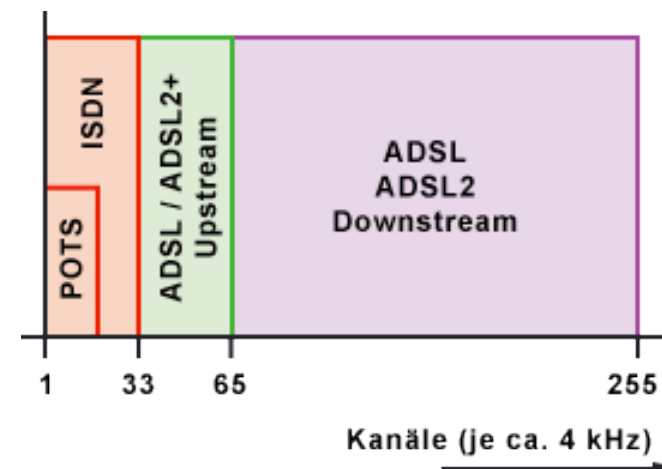
- Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL)
  - momentan der Standard zur Anbindung von Endverbrauchern zu ISP (Internet Service Providers)
  - verwendet herkömmliche Kupferkabel



- 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

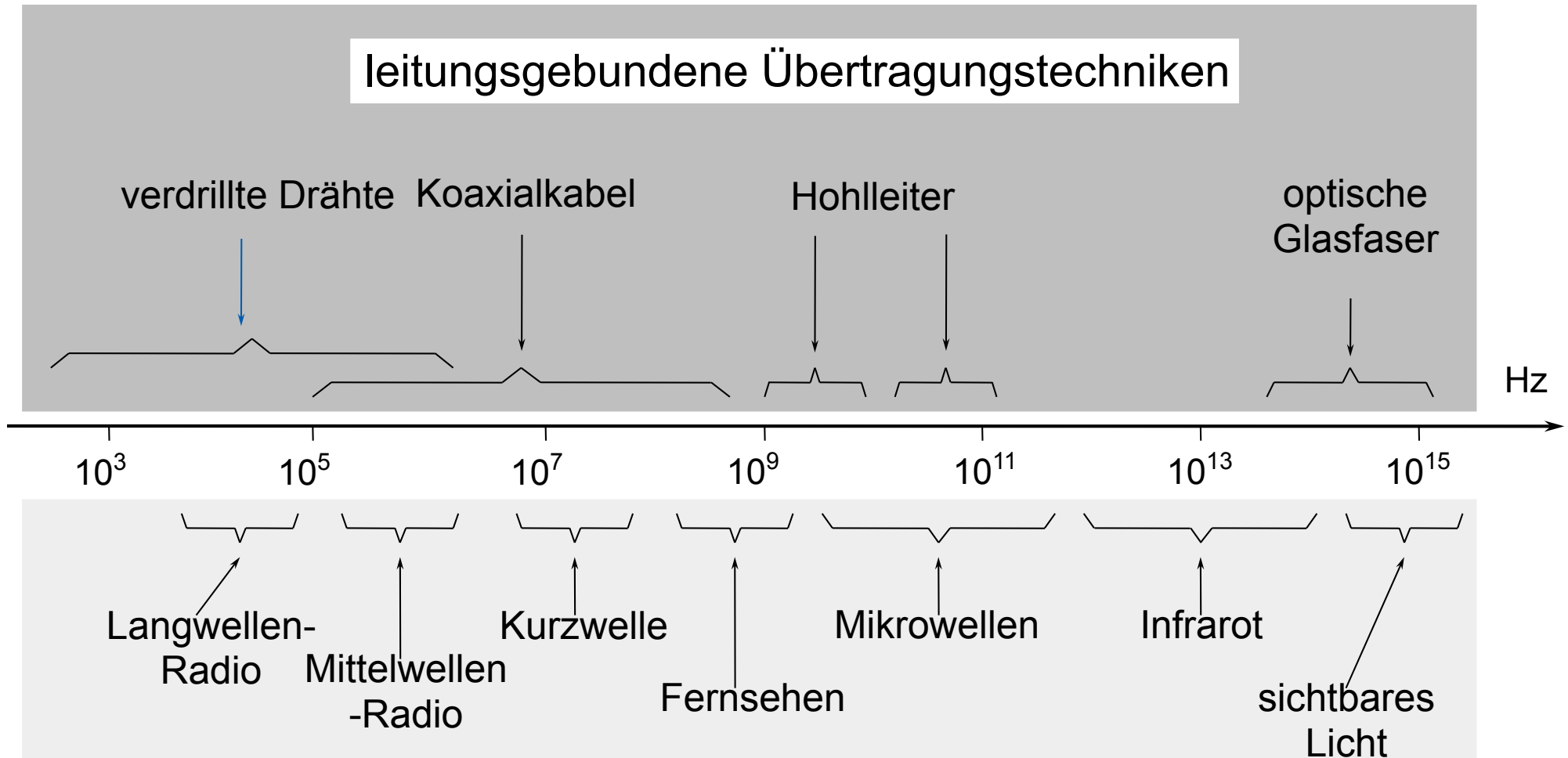


- DMT: 3 Kanalstränge:
  - POTS/ISDN (public switched telephone network/ Integrated Services Digital Network)
    - bleibt im Frequenzbereich 1-20 kHz von ADSL unberührt
  - Upstream
    - 32 Trägerkanäle für Verbindung zum ISP
  - Downstream
    - 190 Trägerkanäle für Verbindung vom ISP



# Das elektromagnetische Spektrum

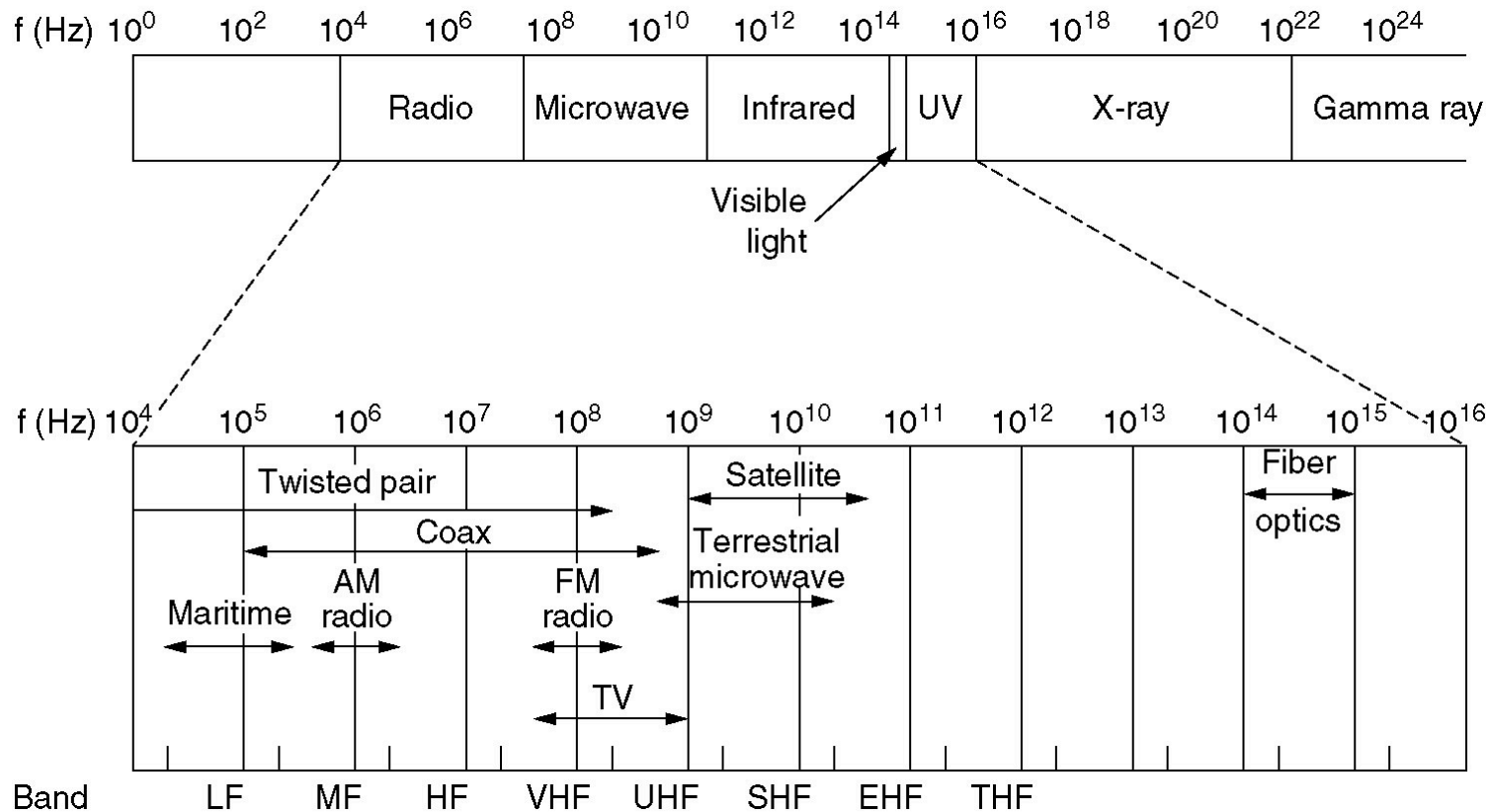
## leitungsggebundene Übertragungstechniken



## nicht-leitungsggebundene Übertragungstechniken

# Frequenzbereiche

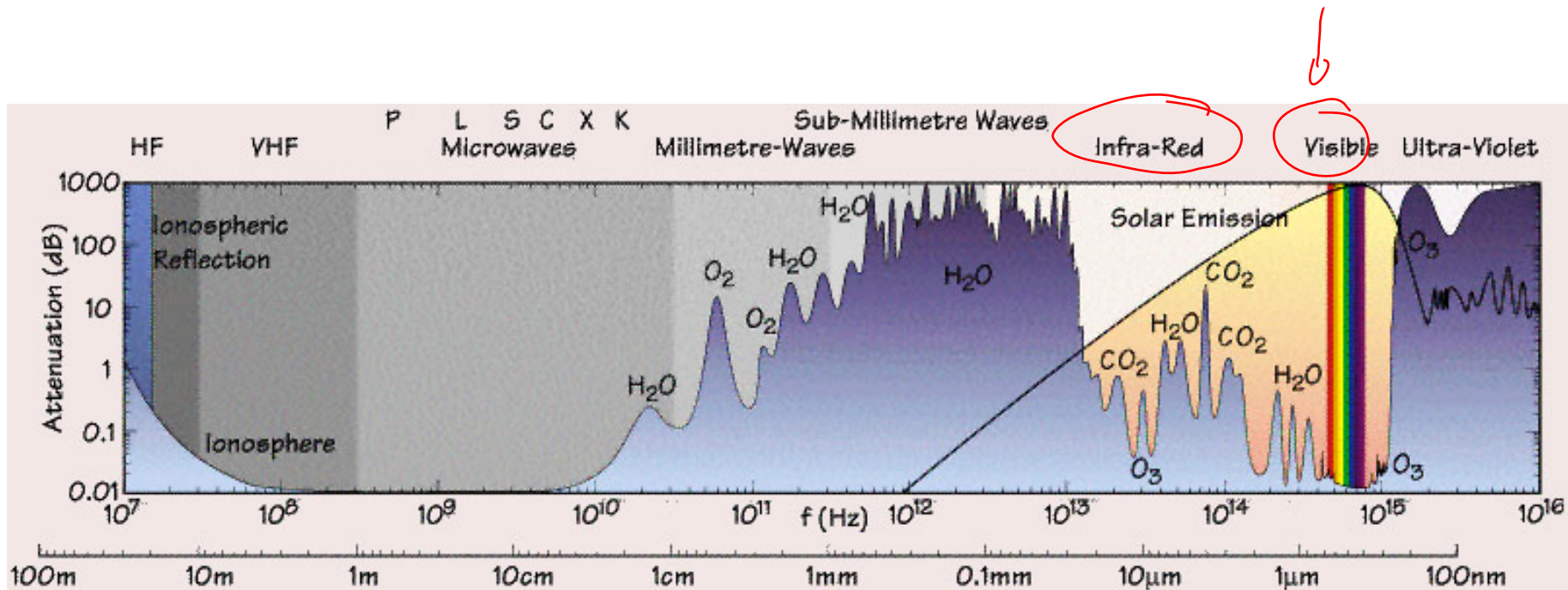
- LF Low Frequency =
  - LW Langwelle
- MF Medium Frequency =
  - MW Mittelwelle
- HF High Frequency =
  - KW Kurzwelle
- VHF Very High Frequency =
  - UKW Ultrakurzwelle
- UHF Ultra High Frequency
- SHF Super High Frequency
- EHF Extra High Frequency
- UV Ultraviolettes Licht
- X-ray Röntgenstrahlung





# Dämpfung in verschiedenen Frequenzbereichen

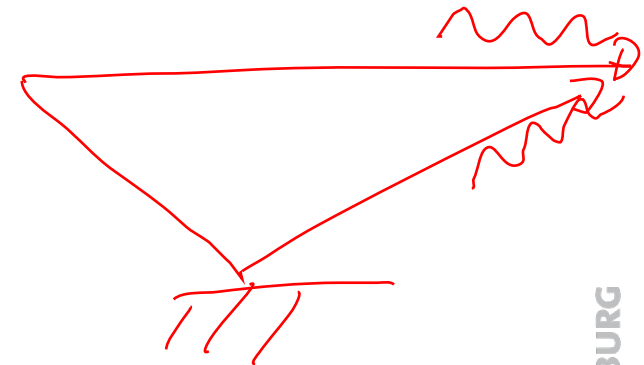
- Frequenzabhängige Dämpfung elektromagnetischer Wellen in der Atmosphäre



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

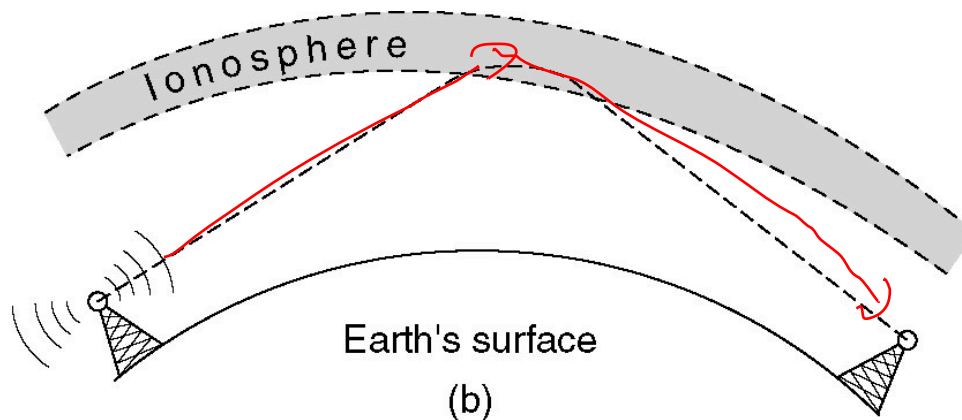
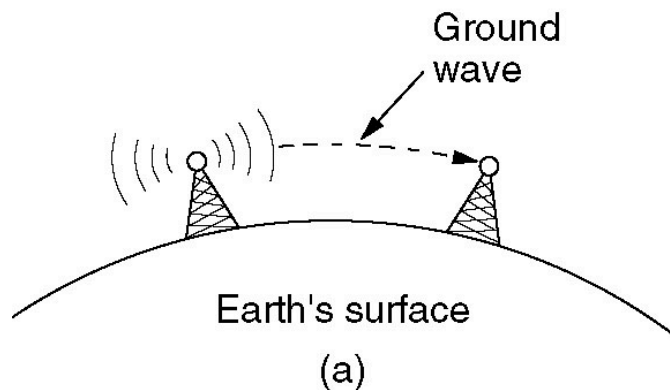
- VHF/UHF für Mobilfunk
  - Antennenlänge
- SHF für Richtfunkstrecken, Satellitenkommunikation
- Drahtloses (Wireless) LAN: UHF bis SHF
  - Geplant: EHF
- Sichtbares Licht
  - Kommunikation durch Laser
- Infrarot
  - Fernsteuerungen
  - Lokales LAN in geschlossenen Räumen

- 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
  - Reflexion
  - Streuung an kleinen Hindernissen
  - Beugung an scharfen Kanten



# Ausbreitungsverhalten (II)

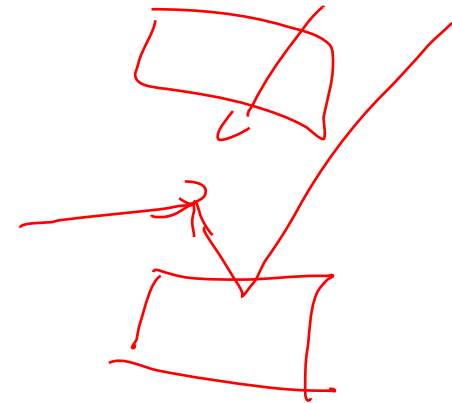
- VLF, LF, MF-Wellen
  - folgen der Erdkrümmung (bis zu 1000 km in VLF)
  - Durchdringen Gebäude
- HF, VHF-Wellen
  - Werden am Boden absorbiert
  - Werden von der Ionosphäre in 100-500 km Höhe reflektiert
- Ab 100 MHz
  - Wellenausbreitung geradlinig
  - Kaum Gebäudedurchdringung
  - Gute Fokussierung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





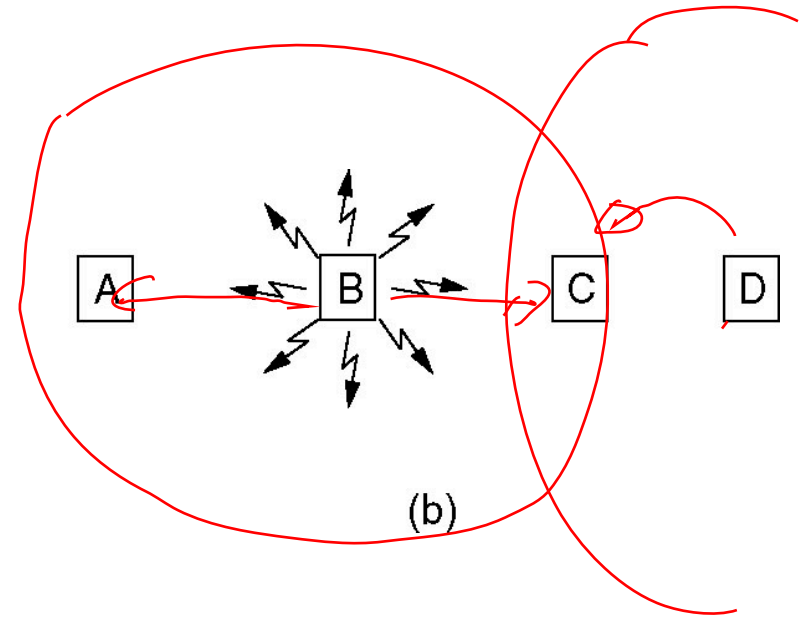
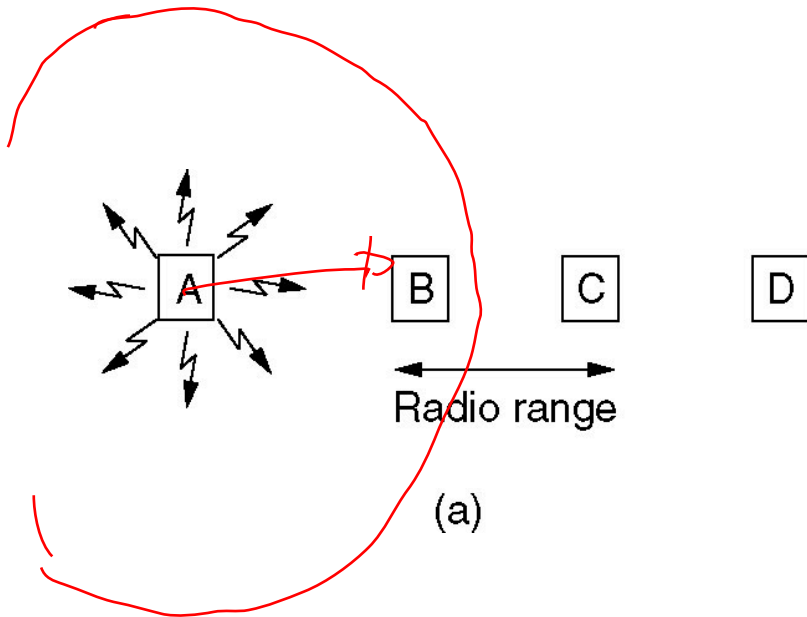
## ① Mehrwegeausbreitung (Multiple Path Fading)

- Signal kommt aufgrund von Reflektion, Streuung und Beugung auf mehreren Wegen beim Empfänger an
- Zeitliche Streuung führt zu Interferenzen
  - ① Fehlerhafter Dekodierung
  - ① Abschwächung



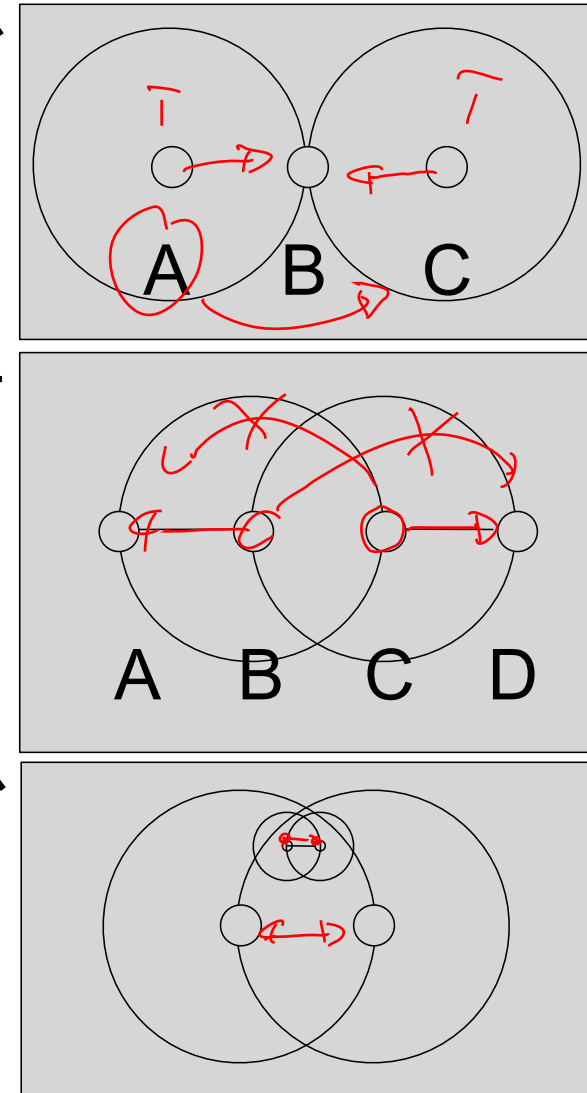
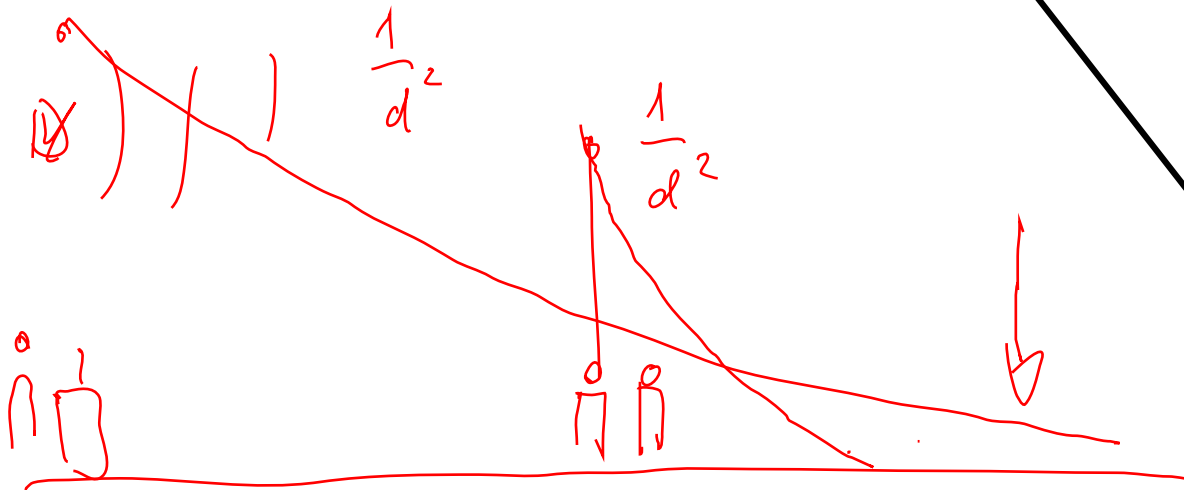
## ① Probleme durch Mobilität

- ① Kurzzeitige Einbrüche (schnelles Fading)
  - ① Andere Übertragungswege
  - ① Unterschiedliche Phasenlage
- ① Langsame Veränderung der Empfangsleistung (langsames Fading)
  - Durch Verkürzen, Verlängern der Entfernung Sender-Empfänger

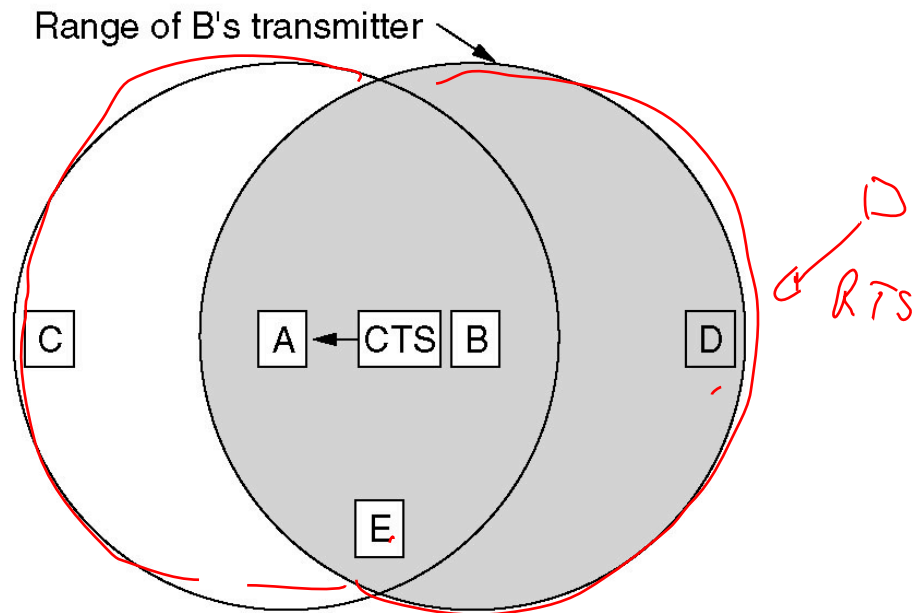
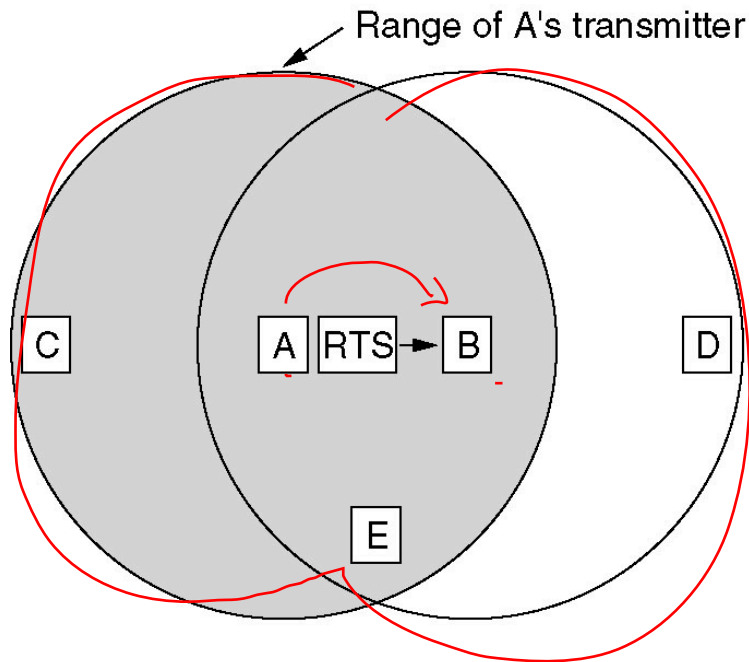


## ■ Interferenzen

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

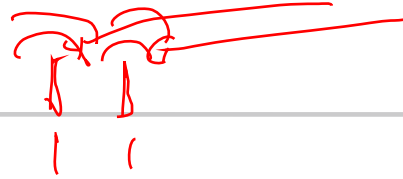


# Multiple Access with Collision Avoidance



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





## ■ Smart antennas

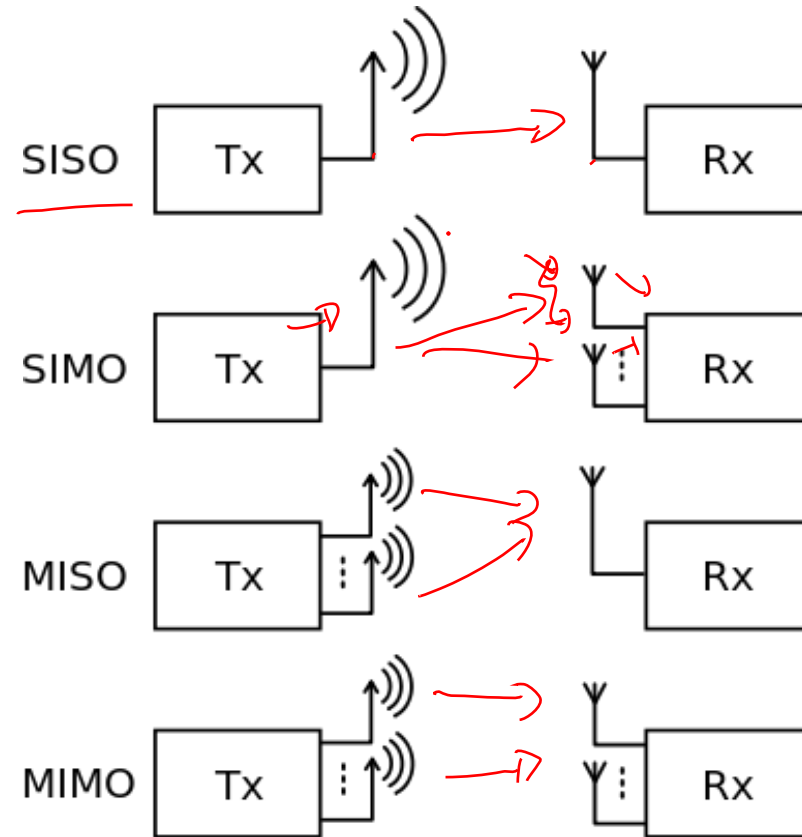
- MIMO (multiple input/multiple output)
- SIMO (single input/multiple output)
- MISO, SISO
- sind mehrere Antennen, welche koordiniert Signale übertragen und empfangen

## ■ Vorteile

- Beam forming
- Power gain
- Diversity gain

## ■ Anwendungen

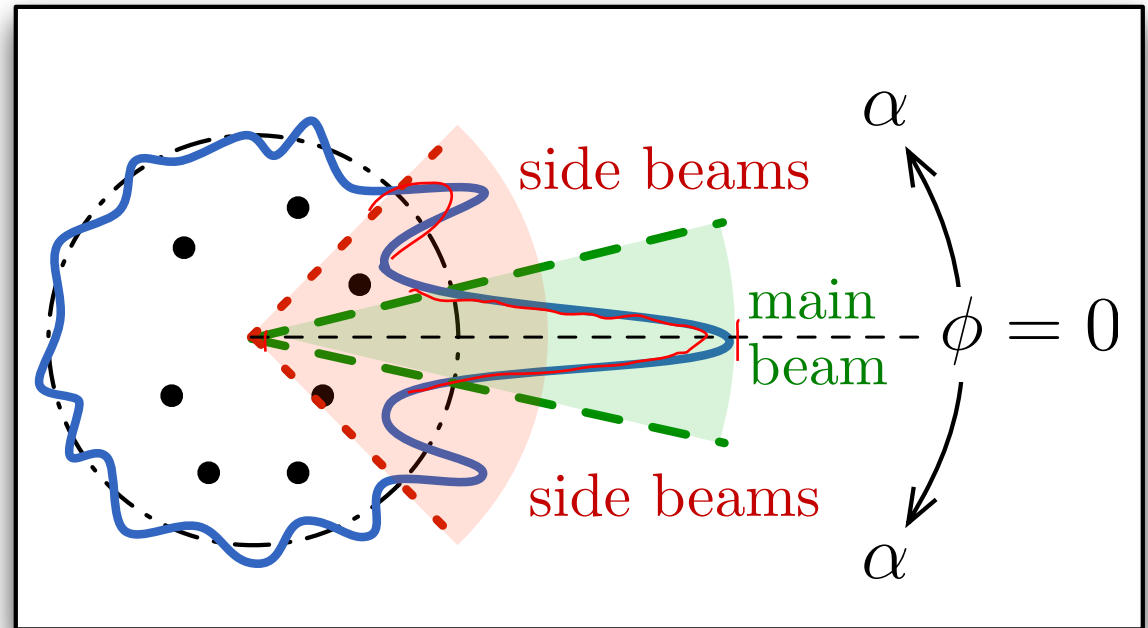
- IEEE-802.11n-WLAN



Deutsche Wikipedia: MIMO

# Beamforming

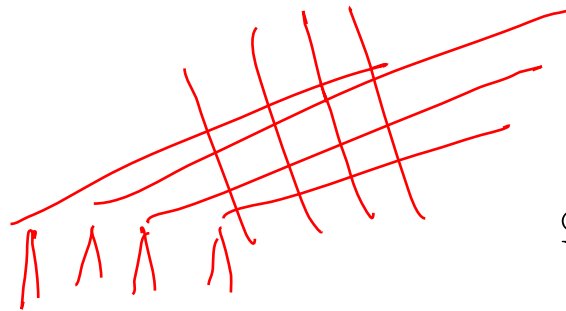
- Durch geschickte Phasenverschiebung kann ein gerichteter Sendestrahl gesendet werden
  - oder symmetrisch auch empfangen werden



$h(\phi)$

$h(\phi)$

Phase Angle Range:



$\Im(z)$  for all  $\mathbf{u}[i]$

$\Im(z)$   
 $\mathbf{u}[1]$   $\mathbf{u}[2]$   $\mathbf{u}[3]$   $\mathbf{u}[5]$   
 $-\tau$   $90$   
 UNI  
 FREIBURG

Handwritten notes:

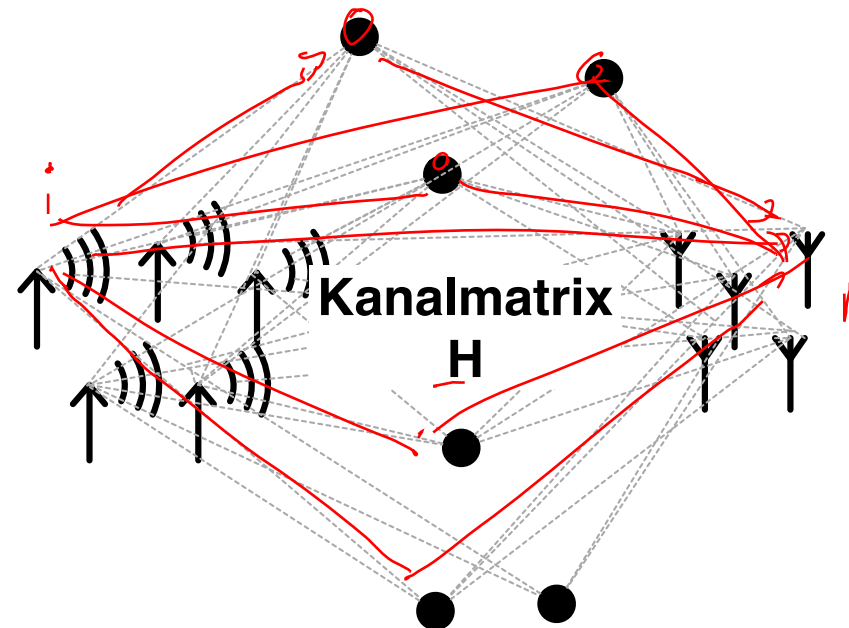
Top:  $A \xrightarrow{P} A \frac{P}{d^2} \cdot \frac{\sqrt{P}}{d}$

Bottom:  $A \xrightarrow{E = \sqrt{P}} A \cdot n \cdot \frac{P}{d^2}$

- 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

- 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 29.04.2013