



# Systeme II

**3. Vorlesungswoche  
05.05. – 09.05.2008**

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Institut für Informatik  
Rechnernetze und Telematik  
Christian Schindelhauer  
Sommer 2008

Systeme II

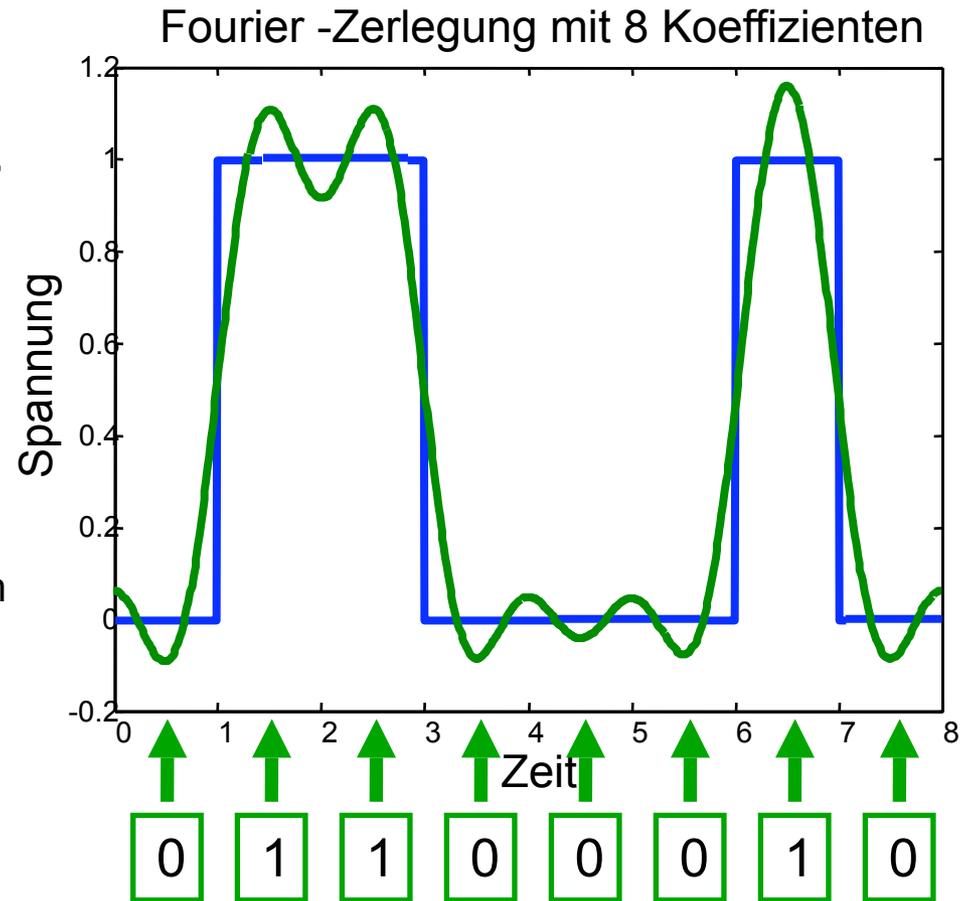
# Bitübertragungs- schicht

# 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

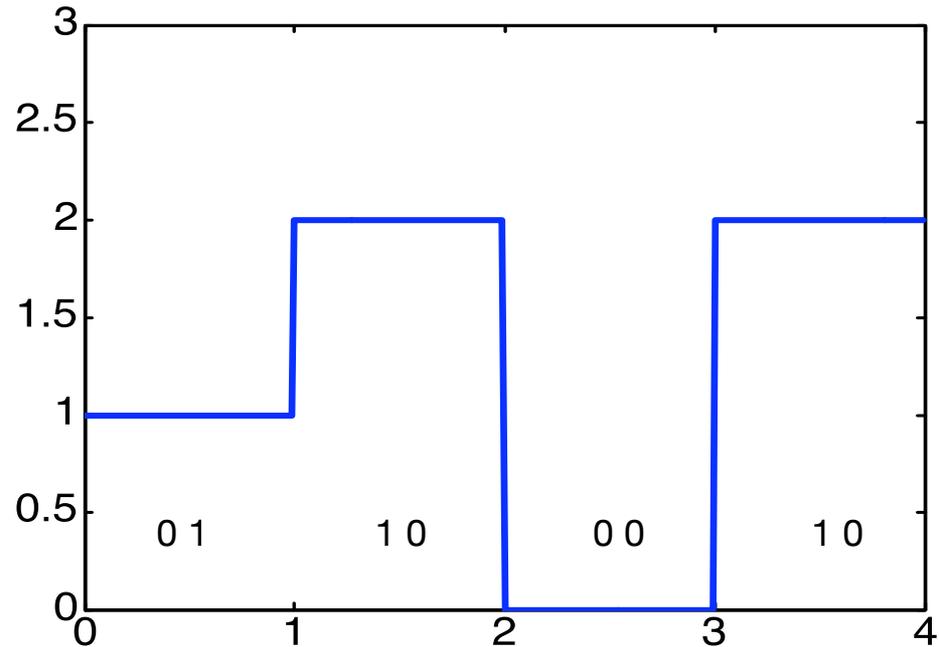
# Wie oft muss man messen?

- ▶ **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  $2 f_{\max}$ .



# 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)



# 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

# 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

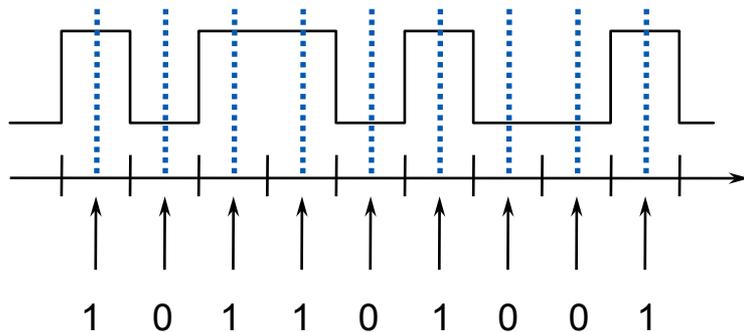
# Selbsttaktende Kodierungen

- ▶ **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

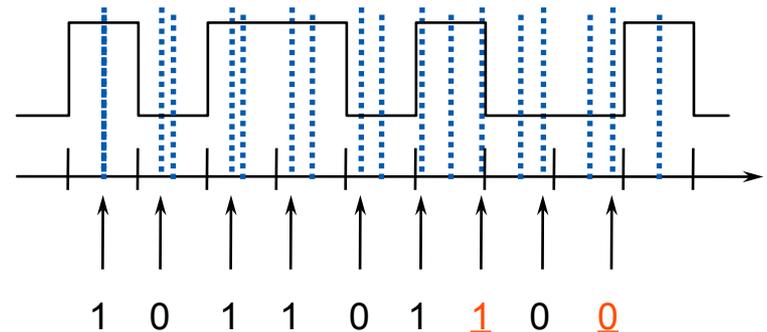
- ▶ **Was passiert wenn man einfach Uhren benutzt**
- ▶ **Problem**
  - Die Uhren driften auseinander
  - Keine zwei (bezahlbare Uhren) bleiben perfekt synchron
- ▶ **Fehler by Synchronisationsverlust (NRZ):**

Sender:



Kanal

Empfänger mit driftender Uhr

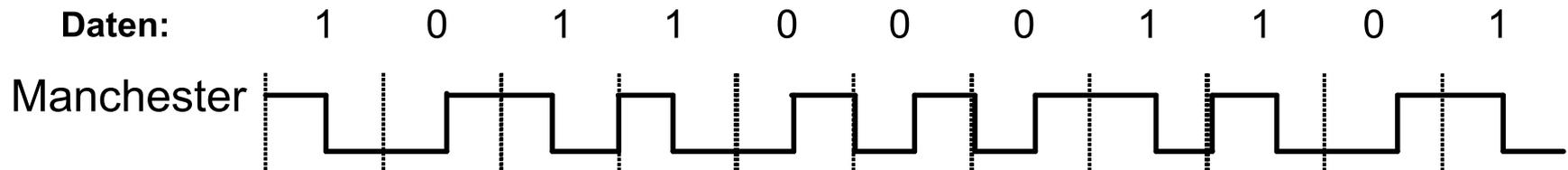


# Lösung der Synchronisation

- ▶ **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**

# Selbsttaktende Codes

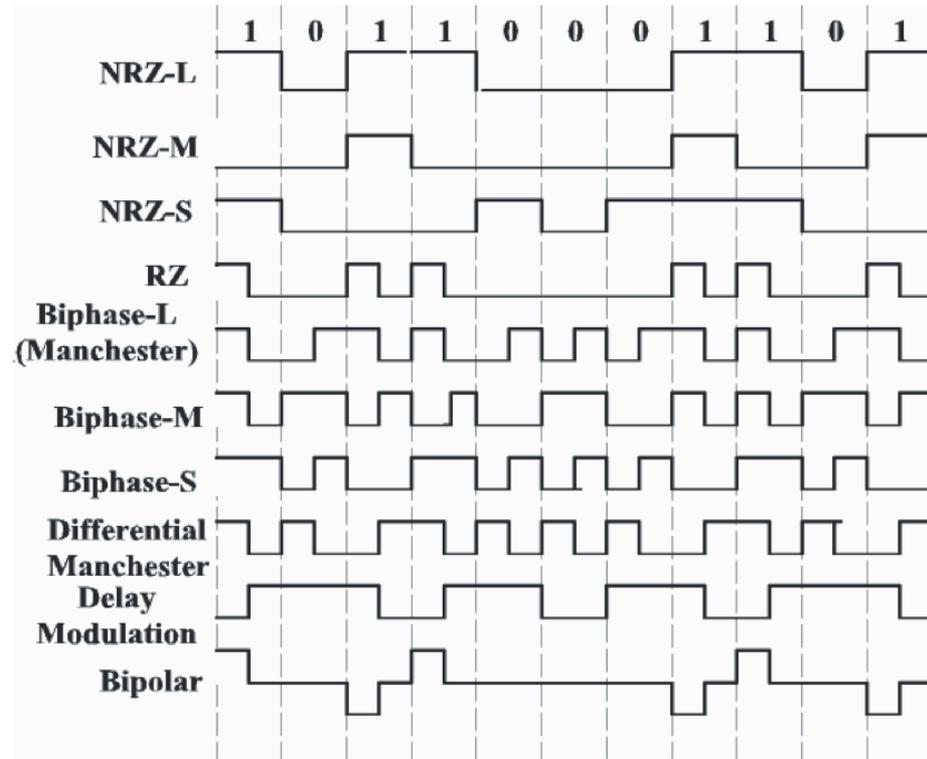
- ▶ **z.B. Manchester Code (Biphase Level)**
  - 1 = Wechsel von hoch zu niedrig in der Intervallmitte
  - 0 = Umgekehrter Wechsel



- ▶ **Das Signal beinhaltet die notwendige Information zur Synchronisation**

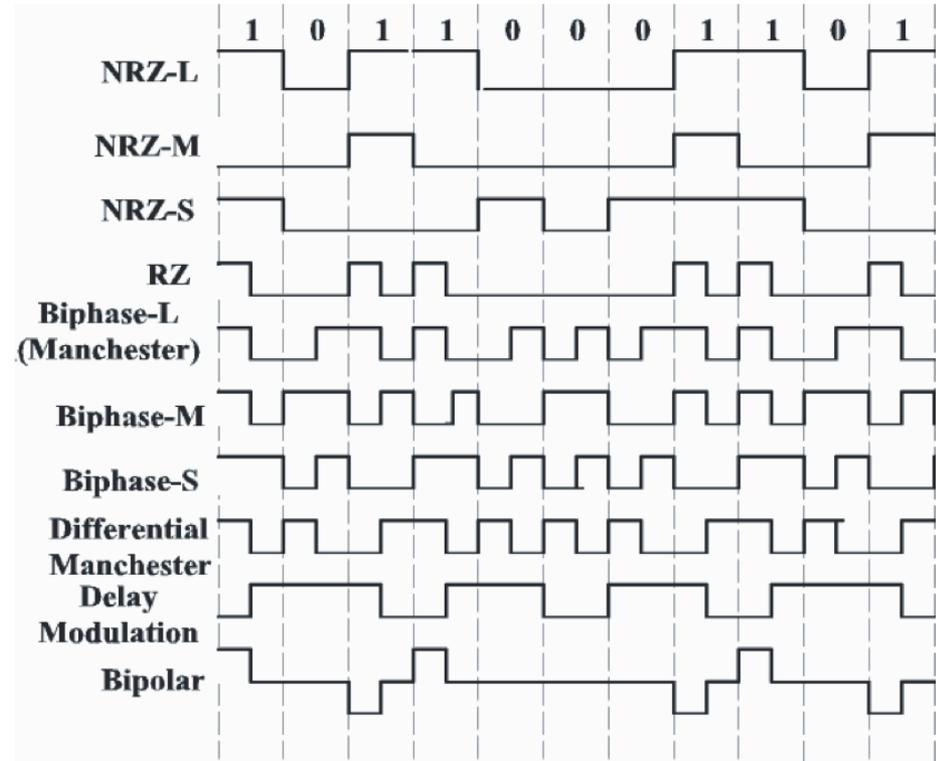
# Digitale Kodierungen (I)

- ▶ **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



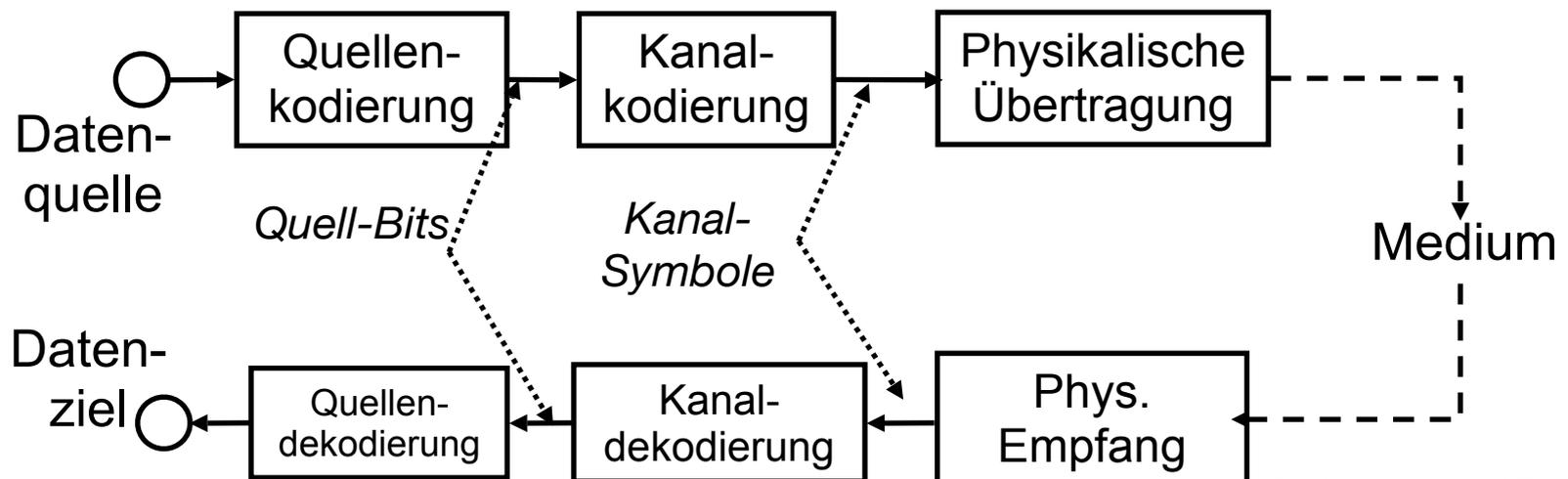
# Digitale Kodierungen (II)

- ▶ **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



# Struktur einer digitalen Basisband-Übertragung

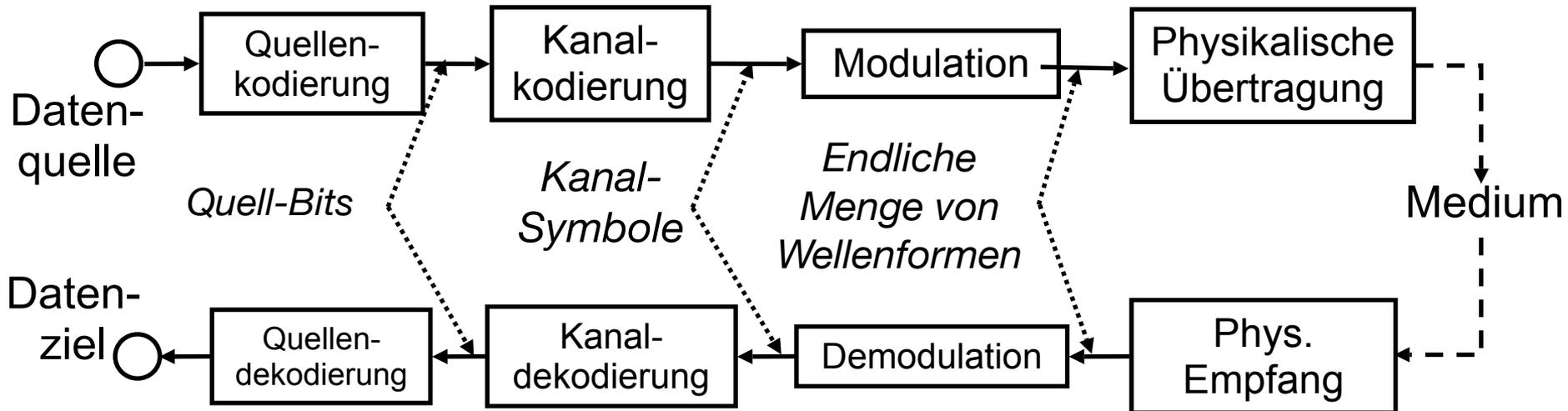
- ▶ **Quellkodierung**
  - Entfernen redundanter oder irrelevanter Information
  - Z.B. mit verlustbehafteter Komprimierung (MP3, MPEG 4)
  - oder mit verlustloser Komprimierung (Huffman-Code)
- ▶ **Kanalkodierung**
  - Abbildung der Quellbits auf Kanal-Symbole
  - Möglicherweise Hinzufügen von Redundanz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



# Struktur einer digitalen Breitband-Übertragung

## ► MOdulation/DEModulation

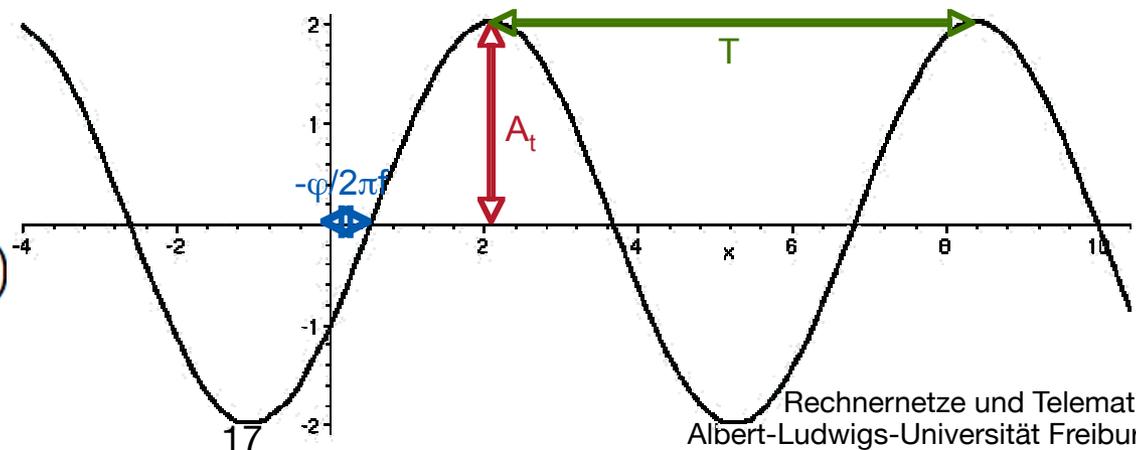
- Übersetzung der Kanalsymbole durch
  - Amplitudenmodulation
  - Phasenmodulation
  - Frequenzmodulation
  - oder einer Kombination davon



# 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 fortdauernd verändert werden (moduliert)**
  - Dadurch Spektralweitung (mehr Frequenzen in der Fourier-Analyse)
- ▶ **Folgende Parameter können verändert werden:**
  - Amplitude  $A$
  - Frequenz  $f=1/T$
  - Phase  $\varphi$

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



# Amplitudenmodulation

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

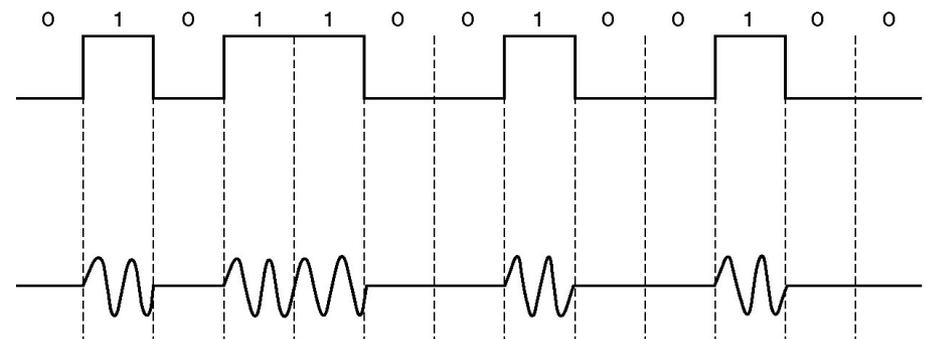
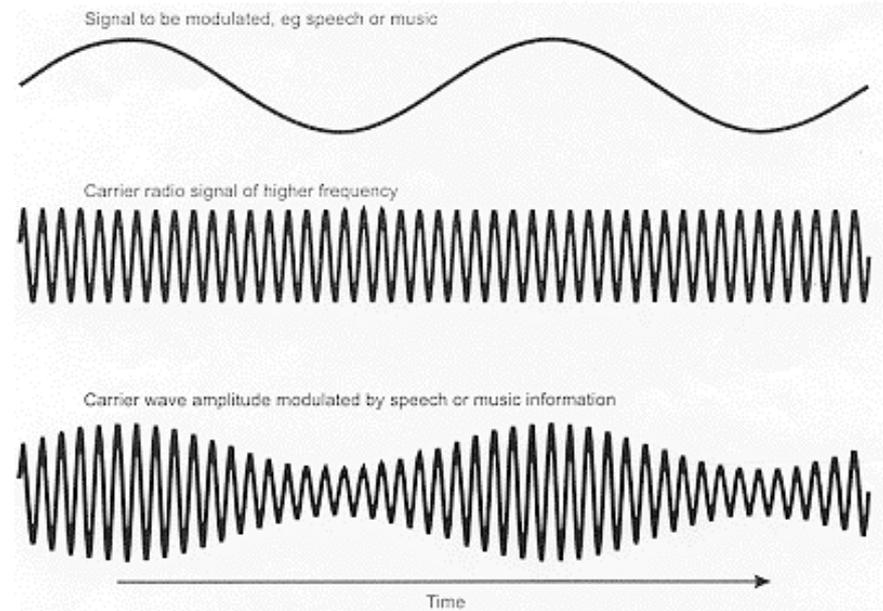
$$f_A(t) = s(t) \sin(2\pi ft + \phi)$$

- ▶ **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



# Frequenzmodulation

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

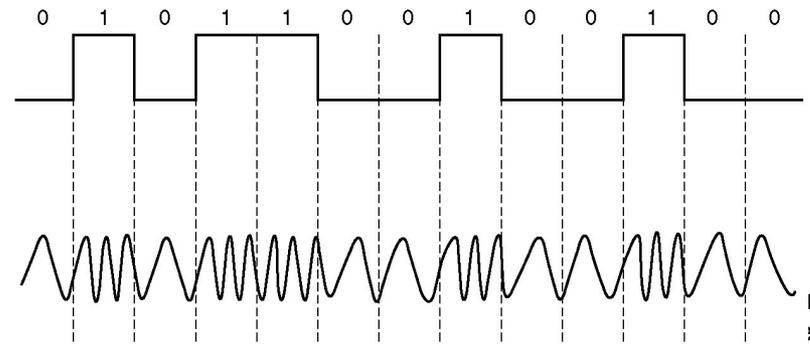
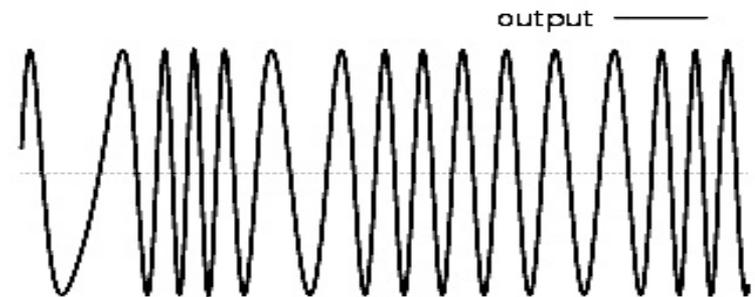
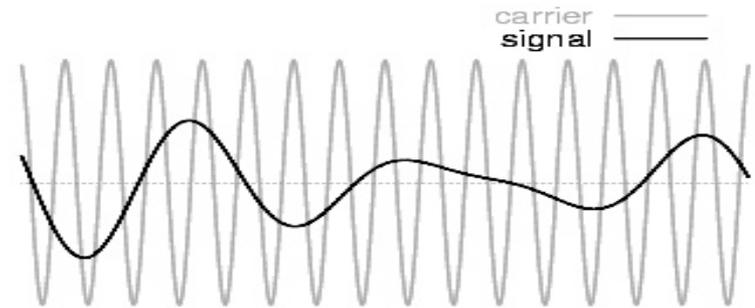
$$f_F(t) = a \sin(2\pi s(t)t + \phi)$$

- ▶ **Analoges Signal**

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

- ▶ **Digitales Signal**

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



# Phasenmodulation

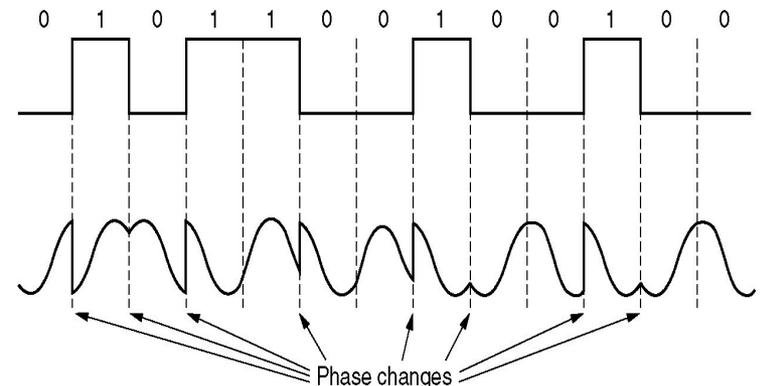
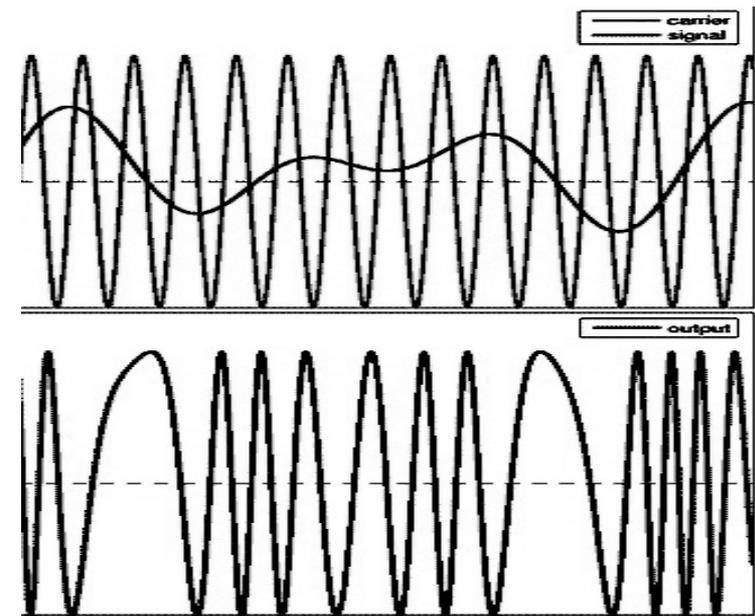
- Das zeitvariable Signal  $s(t)$  wird in der Phase der Sinuskurve kodiert:  
$$f_P(t) = a \sin(2\pi ft + s(t))$$

- **Analoges Signal**

- **Phase Modulation (PM)**
- Sehr ungünstige Eigenschaften
- Wird nicht eingesetzt

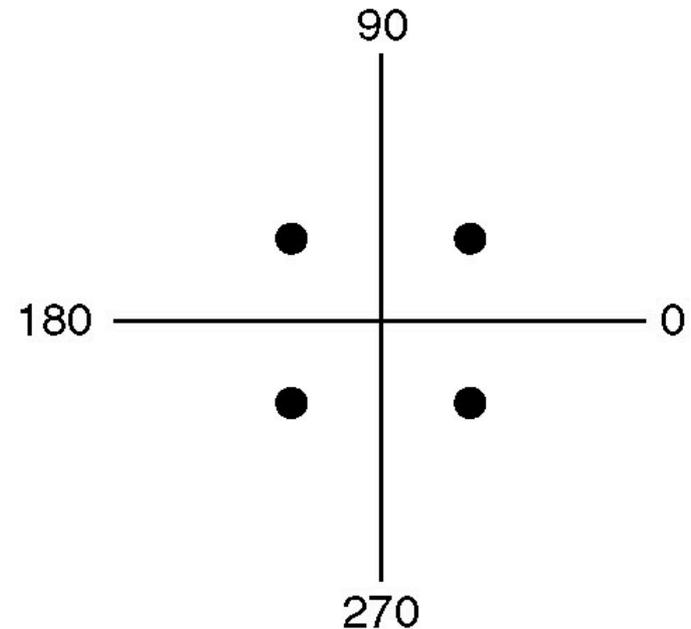
- **Digitales Signal**

- **Phase-Shift Keying (PSK)**
- Z.B. durch Symbole gegeben als Phasen



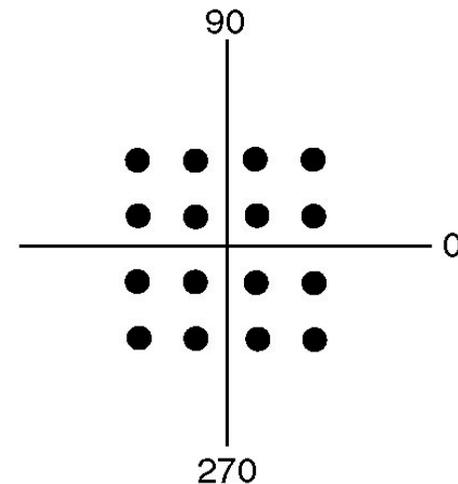
# PSK mit verschiedenen Symbolen

- ▶ **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



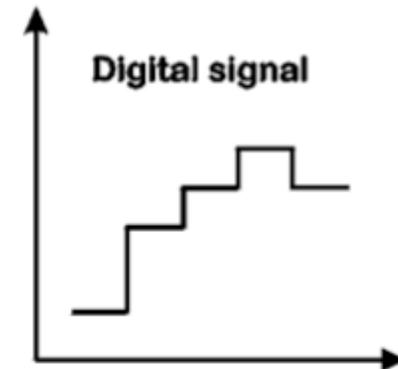
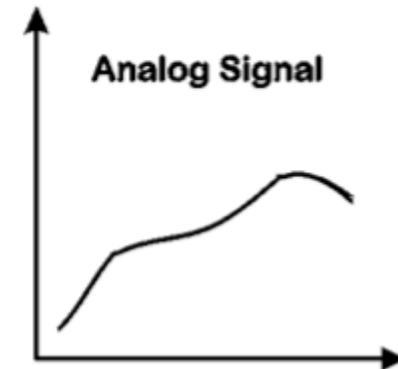
# Digitale und analoge Signale im Vergleich

## ► 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

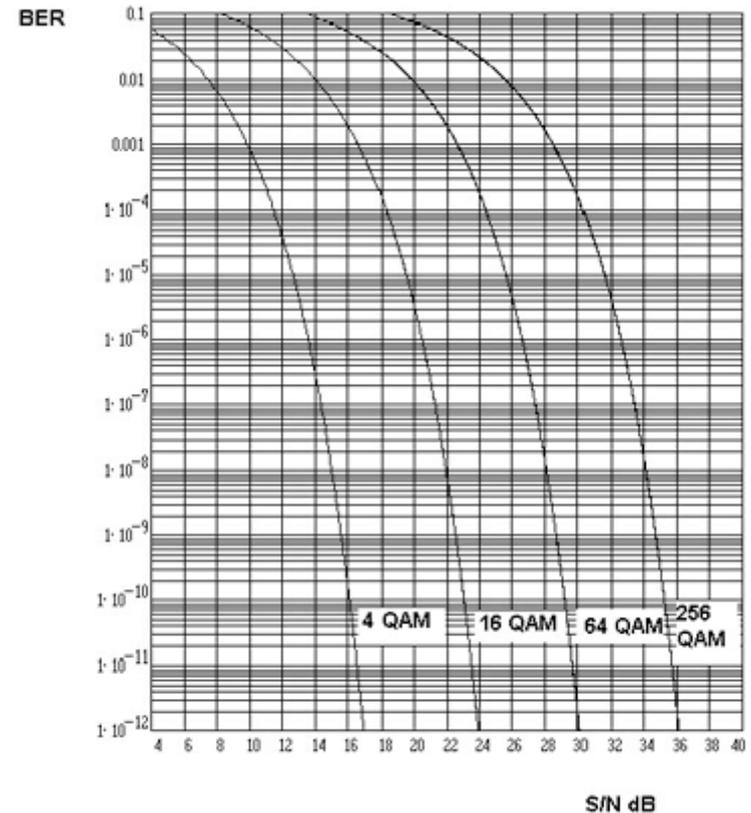
## ► Vorteil der digitalen Signale:

- Es gibt die Möglichkeit Empfangsungenauigkeiten zu reparieren und das ursprüngliche Signal zu rekonstruieren
- Auftretende Fehler in der analogen Übertragung können sich weiter verstärken



# 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



# Physikalische Medien

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

# Twisted Pair



(a)

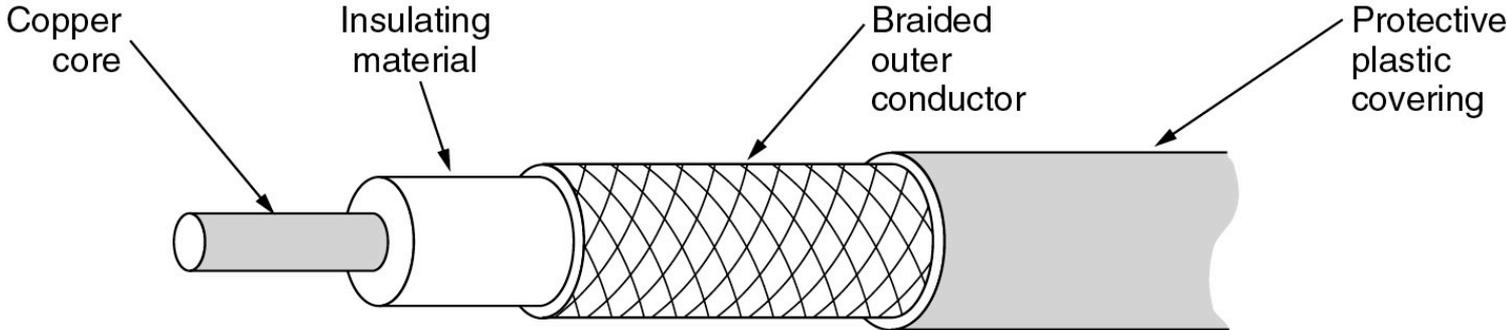


(b)

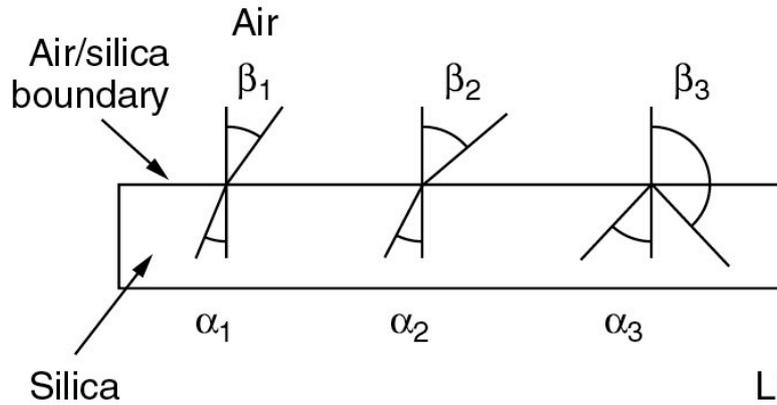
**(a) Category 3 UTP.**

**(b) Category 5 UTP.**

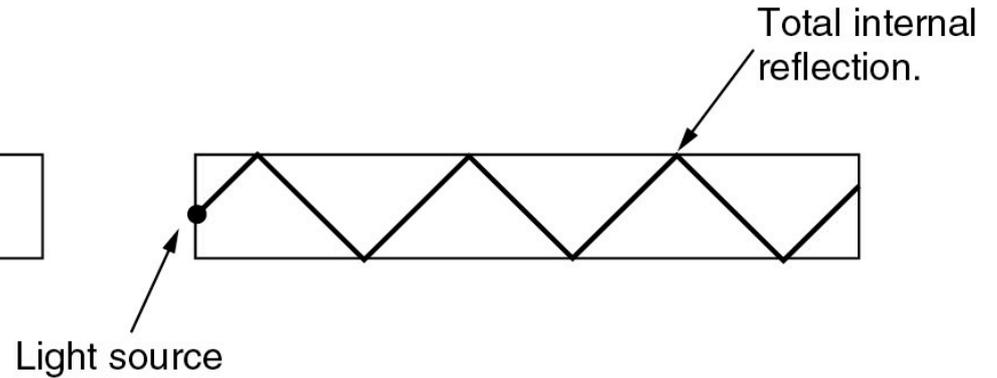
# Koaxialkabel



# Glasfaser



(a)

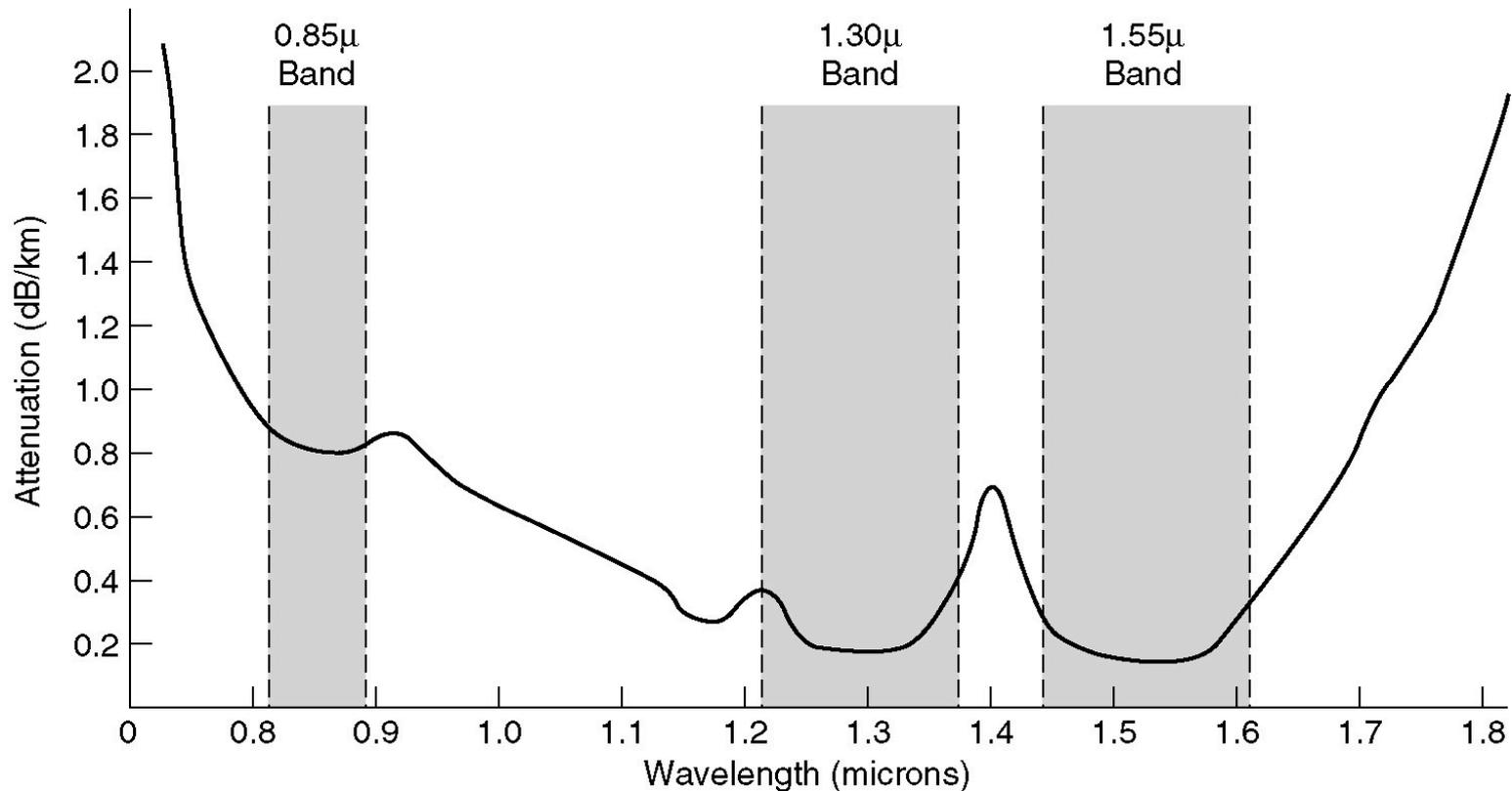


(b)

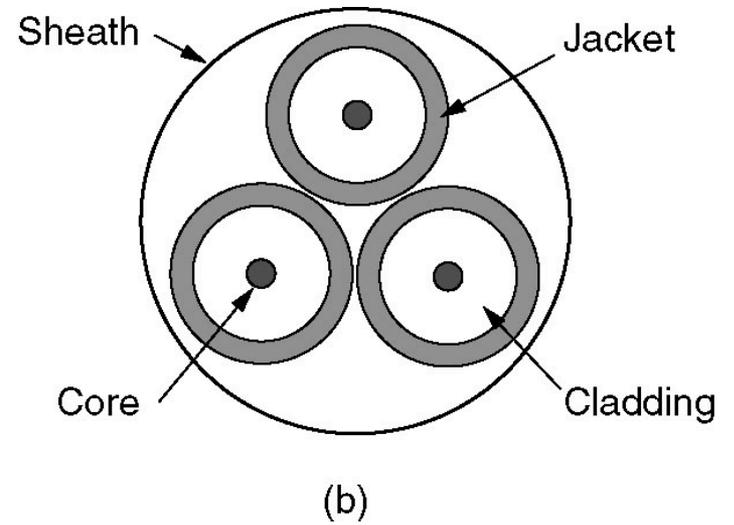
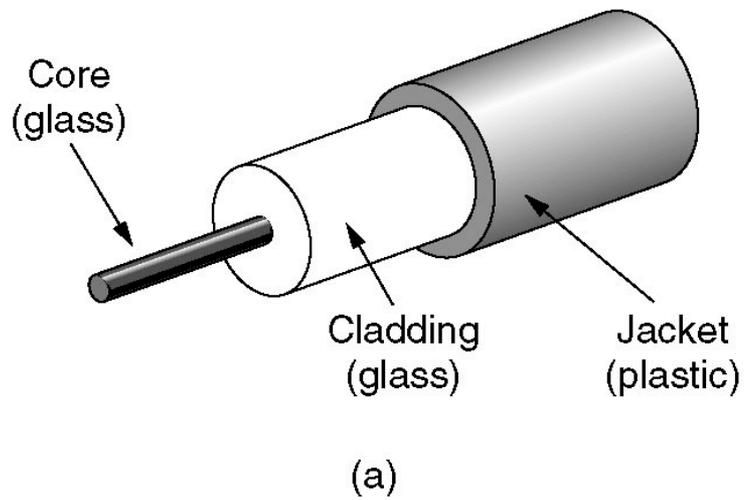
**Gesetz von Snellius:**

$$\frac{\sin \alpha}{\cos \beta} = \frac{c_{\text{Glas}}}{c_{\text{Luft}}}$$

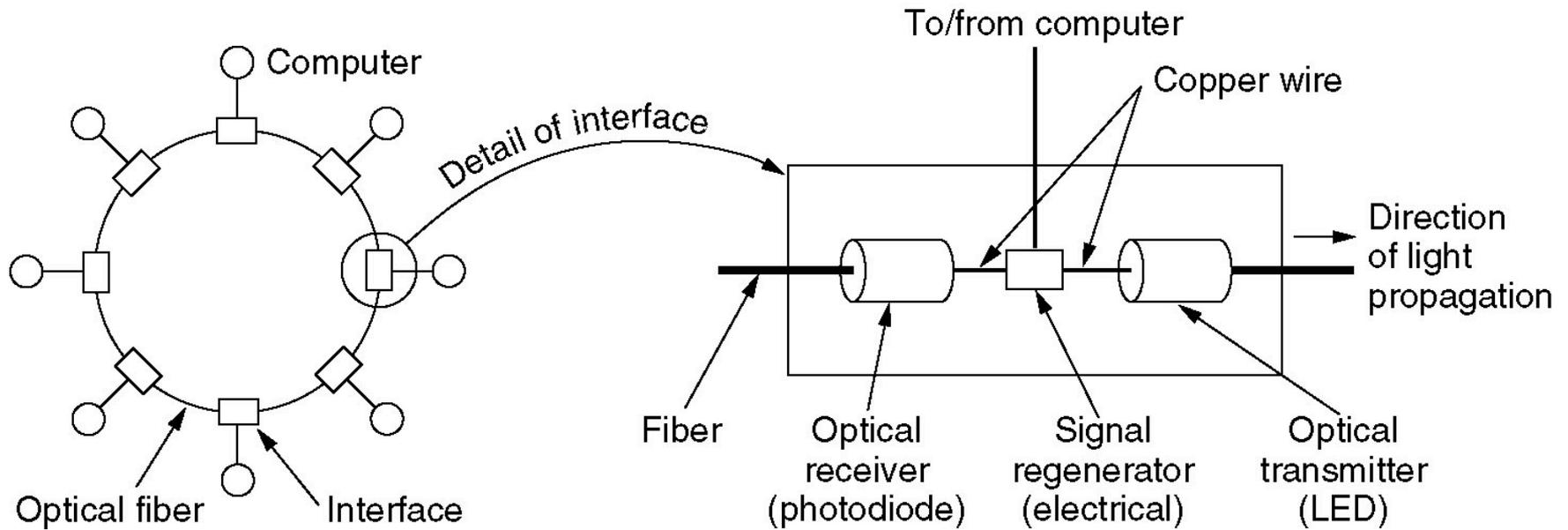
# Übertragung von Licht durch Glasfaser



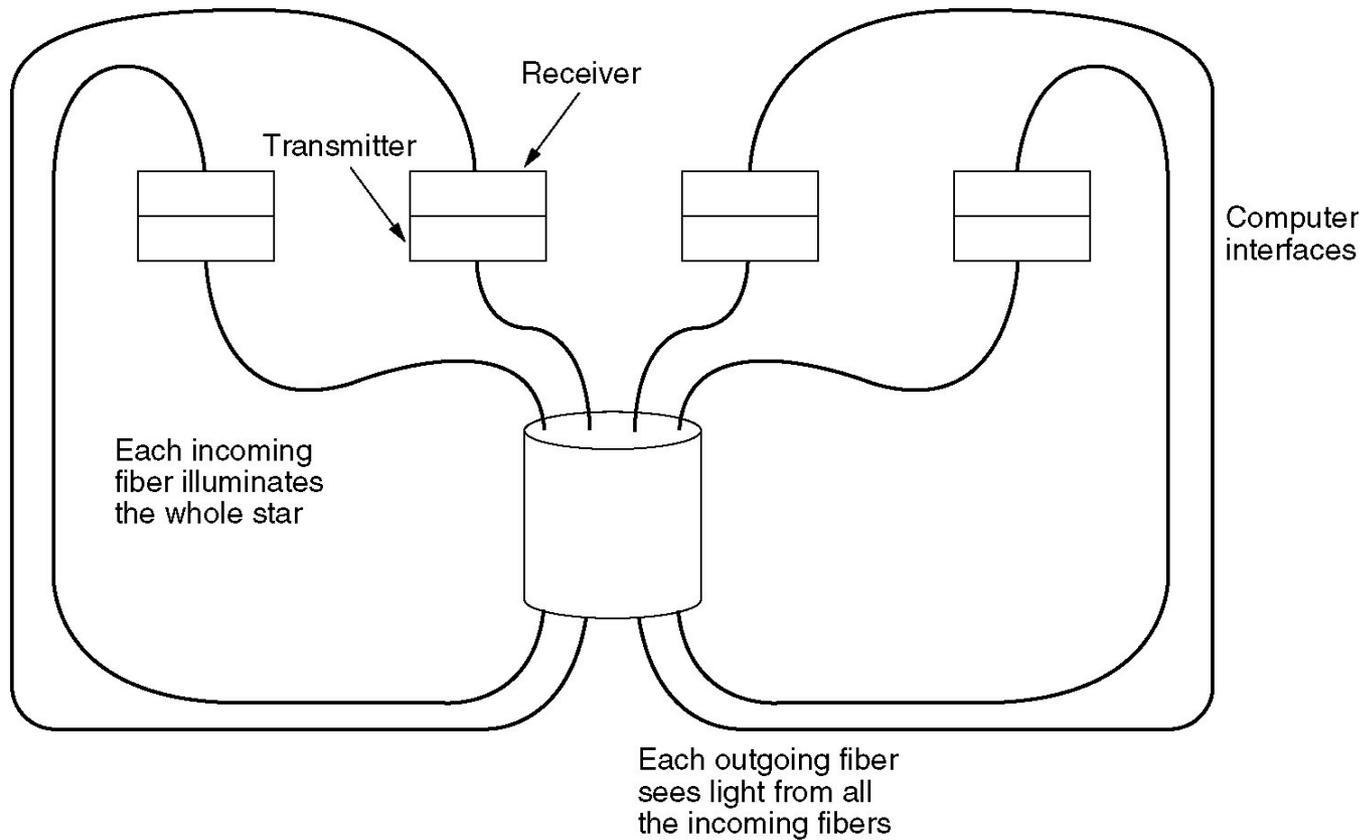
# Glasfaser



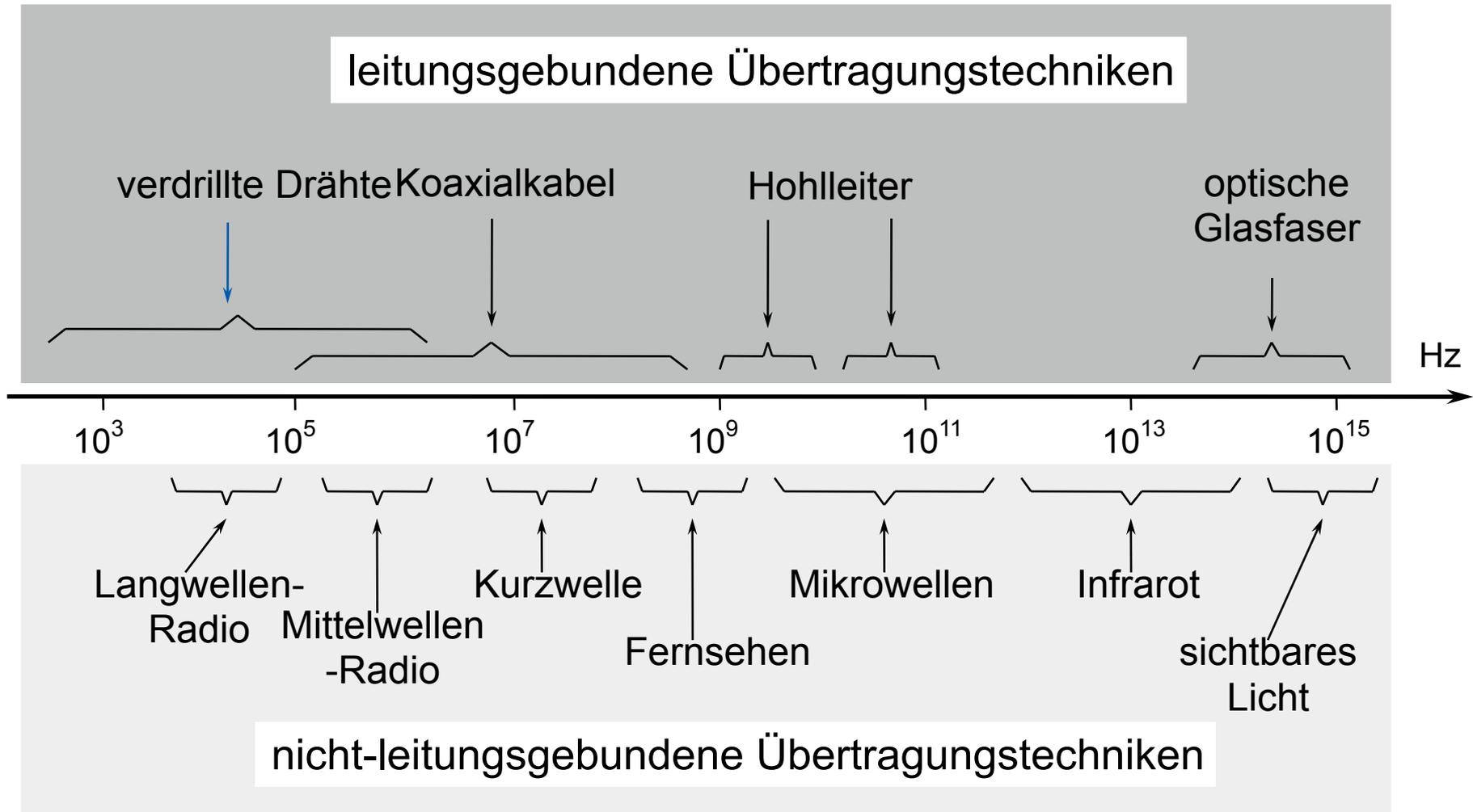
# Glasfaser-Netzwerke



# Glasfaser-Netzwerke

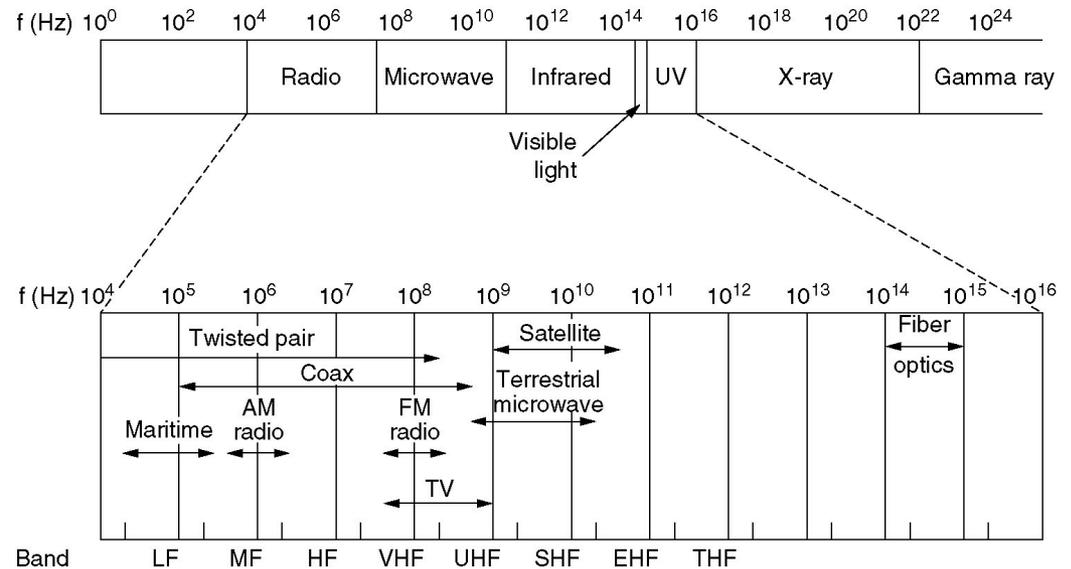


# Das elektromagnetische Spektrum



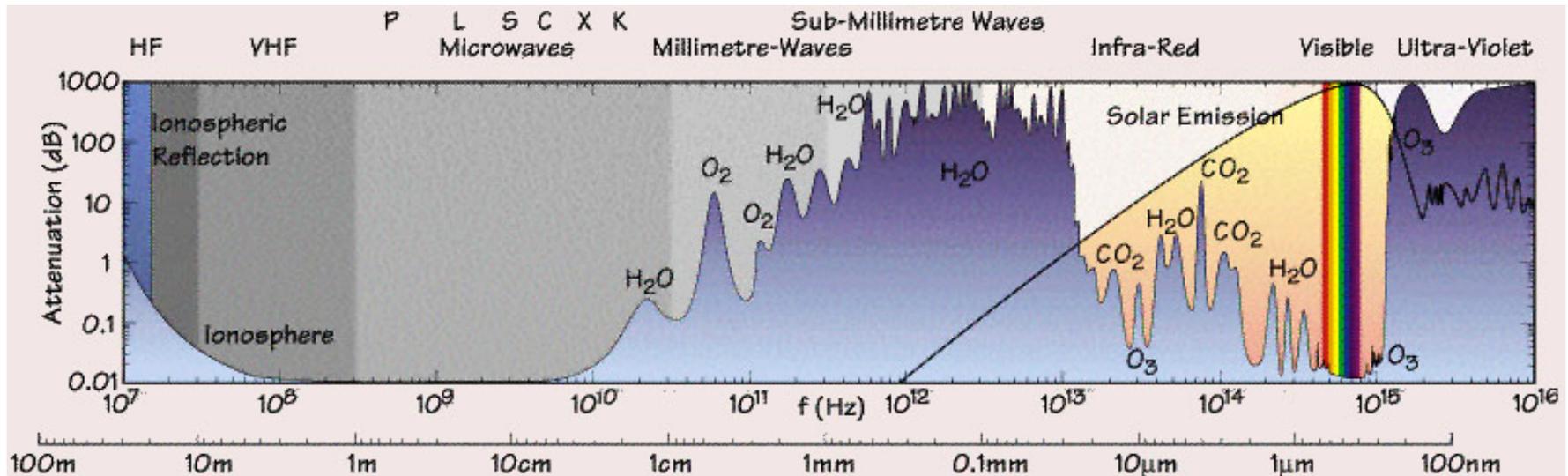
# Frequenzbereiche

- ▶ **LF Low Frequency** =
  - LW Langwelle
- ▶ **MF Medium Frequency** =
  - MW Mittelwelle
- ▶ **HF High Frequency** =
  - KW Kurzwelle
- ▶ **VHF Very High Frequency** =
  - UK 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)

# Frequenzbänder für Funknetzwerke

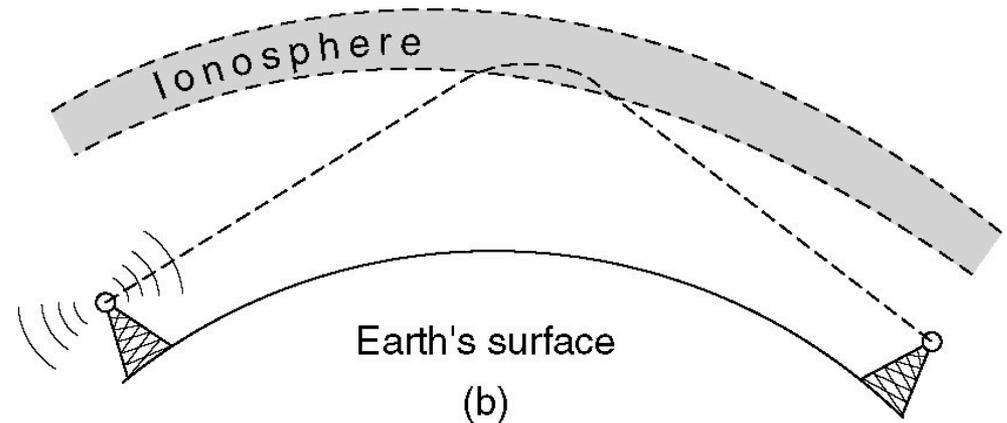
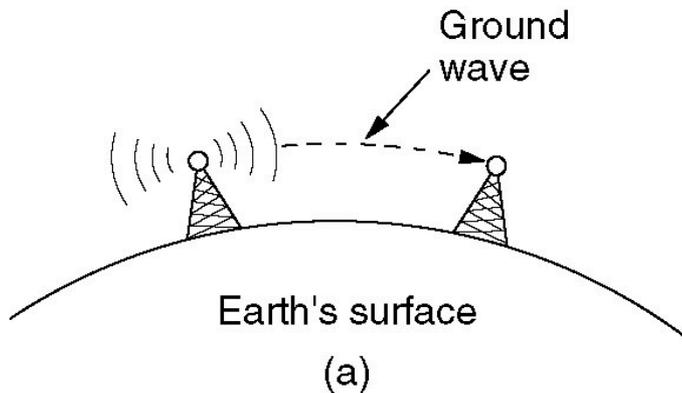
- ▶ **VHF/UHF für Mobilfunk**
  - Antennenlänge
- ▶ **SHF für Richtfunkstrecken, Satellitenkommunikation**
- ▶ **Drahtloses (Wireless) LAN: UHF bis SHF**
  - Geplant: EHF
- ▶ **Sichtbares Licht**
  - Kommunikation durch Laser
- ▶ **Infrarot**
  - Fernsteuerungen
  - Lokales LAN in geschlossenen Räumen

# 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 (langsames Fading)
    - Durch Verkürzen, Verlängern der Entfernung Sender-Empfänger

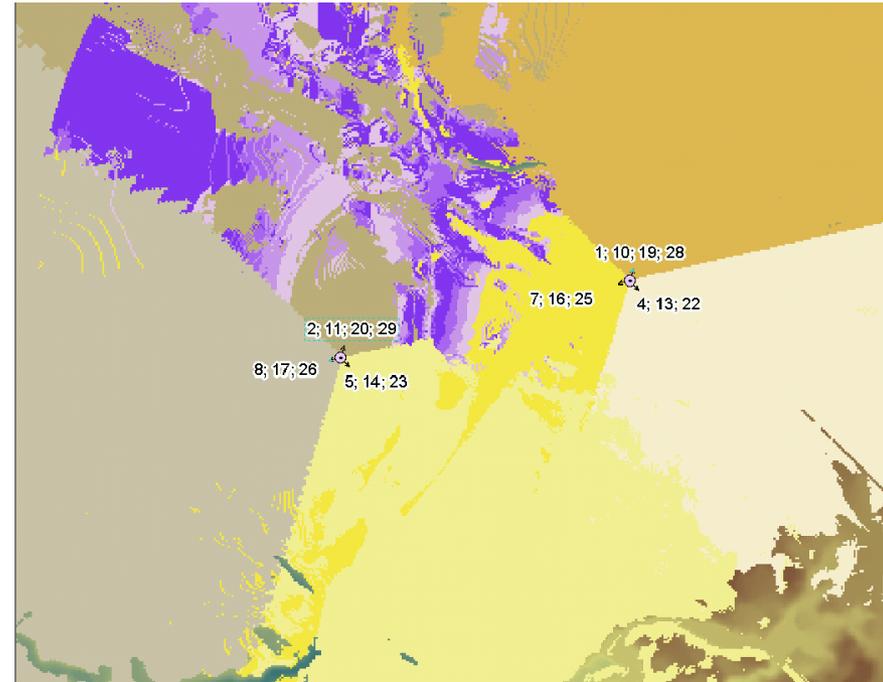
# Mehrfachnutzung des Mediums

- ▶ **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 Kommunikation
  - 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

# Zeit

- ▶ **Zeitaufteilung (Time-Multiplexing)**
  - Zeitliche Aufteilung des Sende-/Empfangskanals
  - Verschiedene Teilnehmer erhalten exklusive Zeiträume (Slots) auf dem Medium
  - Genaue Synchronisation notwendig
  - Koordination notwendig, oder starre Einteilung

# 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)

# 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

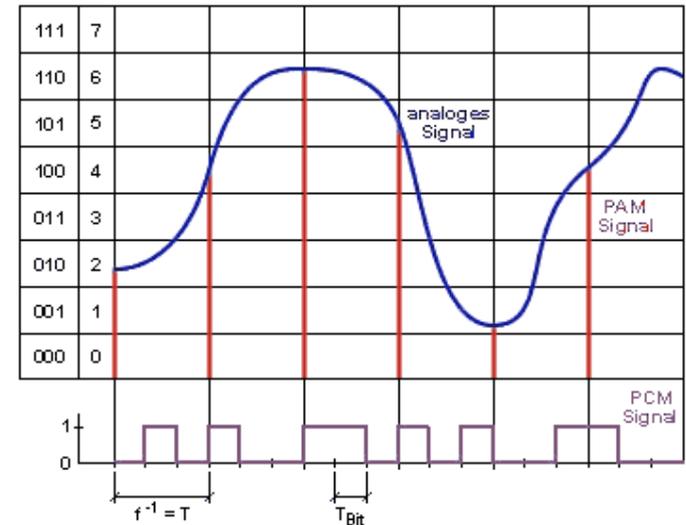
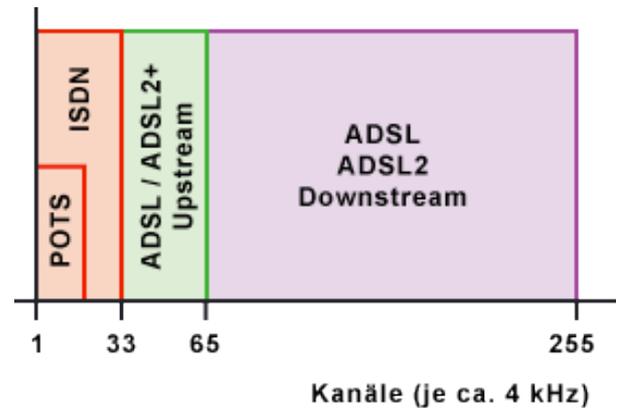
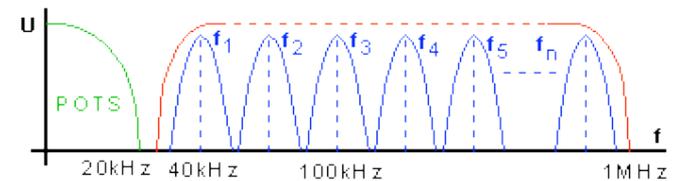
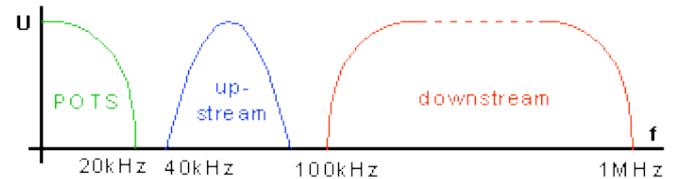


Abb. aus <http://de.wikipedia.org/wiki/Puls-Code-Modulation>

# 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 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





# Systeme II

**Ende der 3. Vorlesungswoche**

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Institut für Informatik  
Rechnernetze und Telematik  
Christian Schindelhauer  
Sommer 2008