

Rechnernetze & Verteilte Systeme

Ludwig-Maximilians-Universität München
Sommersemester 2019

Prof. Dr. D. Kranzlmüller,
M.Sc. P. Jungblut, M.Sc. R. Kowalewski



Kapitel 7:

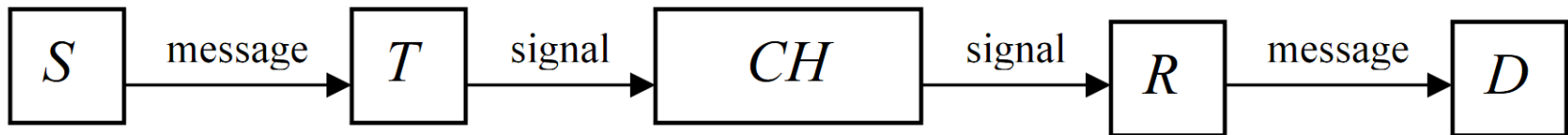
Bitübertragungssicht

(Engl. Physical Layer)



Systemsicht

Kommunikationssystem nach Shannon (1948):

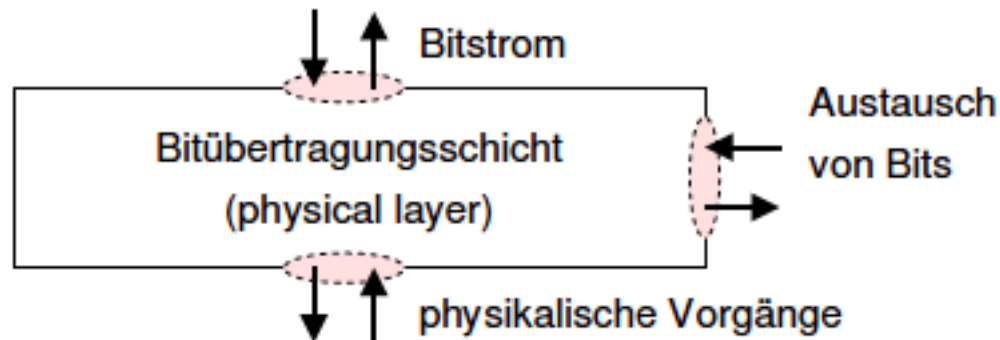


<i>S</i>	Source
<i>T</i>	Transmitter
<i>CH</i>	Channel
<i>R</i>	Receiver
<i>D</i>	Destination

Überblick:

Bitübertragungsschicht (1/2)

- Transparente Übertragung von Bits via *Data Circuits*
 - SDU = 1 Bit (seriell), n Bits (parallel)
 - Kodierung von Bits in physikalische Signale



Überblick:

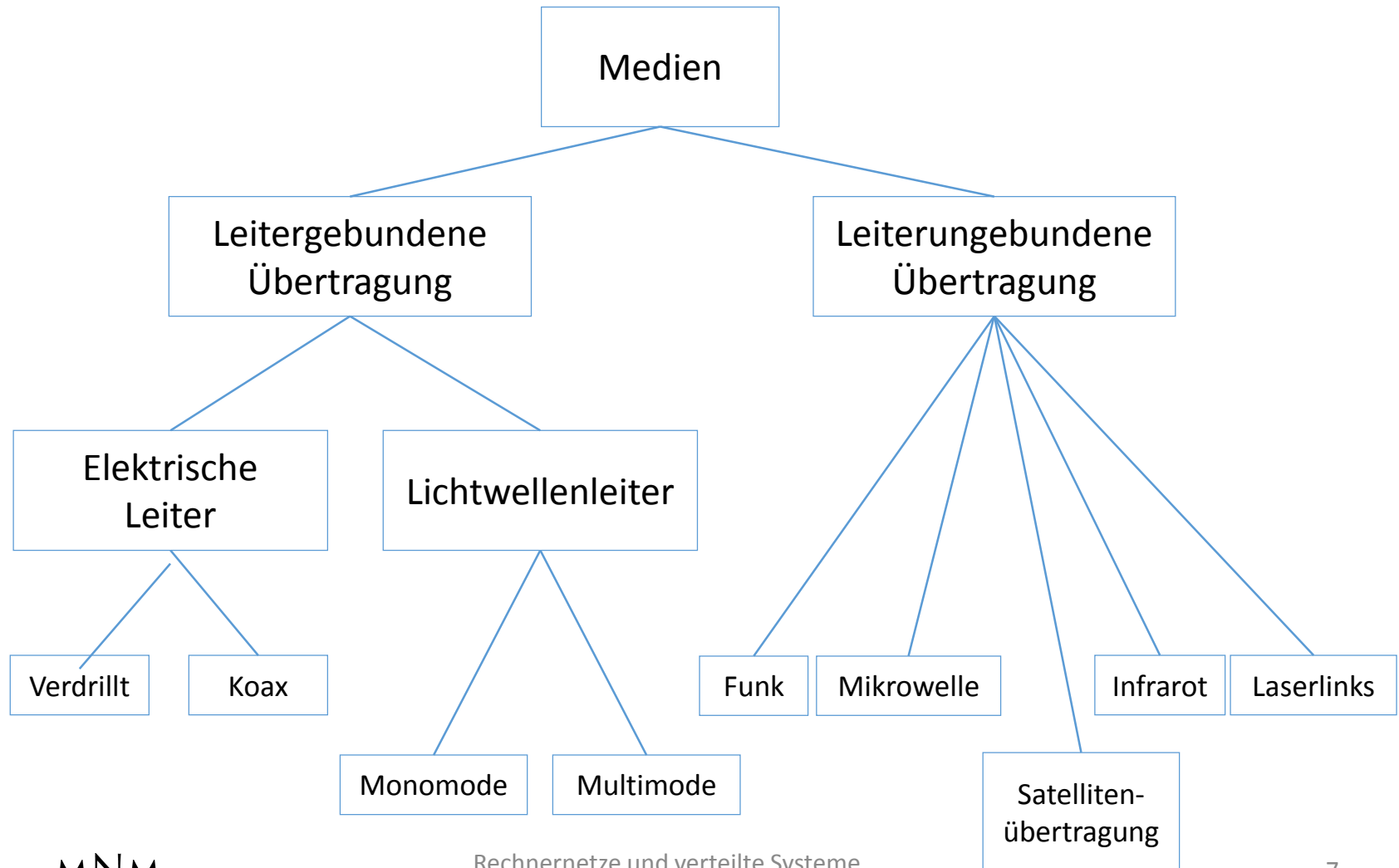
Bitübertragungsschicht (2/2)

- Protokoll legt Eigenschaften fest
 - physikalisch: Medien, Signale
 - mechanisch: PIN-Gestaltung, Steckerkonfiguration
 - funktional: PIN-Belegung, Takt
 - prozedural: Ablauf der Elementarereignisse, Bedeutung
- Merkmale der Schicht 1
 - Übertragungsrate: Funktion von
 - Spektrum: Frequenzbereich des Senders
 - Bandbreite: Frequenzbereich des Mediums
 - Codierung
 - Fehlerrate: Bitfehlerrate aufgrund von Dämpfung, Rauschen, Dispersion
 - Ausbreitungsverzögerung: abhängig von Material und Länge

Übertragungsmedien

Elektrische Leiter, Lichtwellenleiter,
leiterungebundene Übertragung

Klassifizierung der Übertragungsmedien



Wichtige Aspekte und Grundbegriffe zu Übertragungsmedien

- erzielbare maximale Übertragungsrate
- überbrückbare Entfernung
- Mediumspezifische Charakteristika:
 - Impedanz
 - Brechungsindex
- Mediumspezifische Störeinflüsse:
 - Dämpfung
 - Übersprechen
 - Skineffekt (Stromverdrängung)
 - Modendispersion
 - Wetter

Übertragungsmedien: Durchsatz und Bitfehlerrate

Leitergebunden		
Medium	typischer Durchsatz	typische Bitfehlerrate
Elektrisch (Verdrillt)	1 KBit/s – 10 GBit/s	10^{-8}
Elektrisch (Koax)	1 MBit/s – 100 MBit/s	10^{-10}
LWL (Monomode)	100 GBit/s – 1 PBit/s	10^{-13}
LWL (Multimode)	10 GBit/s – 100 TBit/s	10^{-12}
Leiterungebunden		
Funk	10 KBit/s – 100 KBit/s	10^{-6}
Mikrowelle	10 MBit/s – 1 GBit/s	10^{-8}
Infrarot	10 KBit/s – 1 TBit/s	10^{-8}

Eigenschaften von Medien

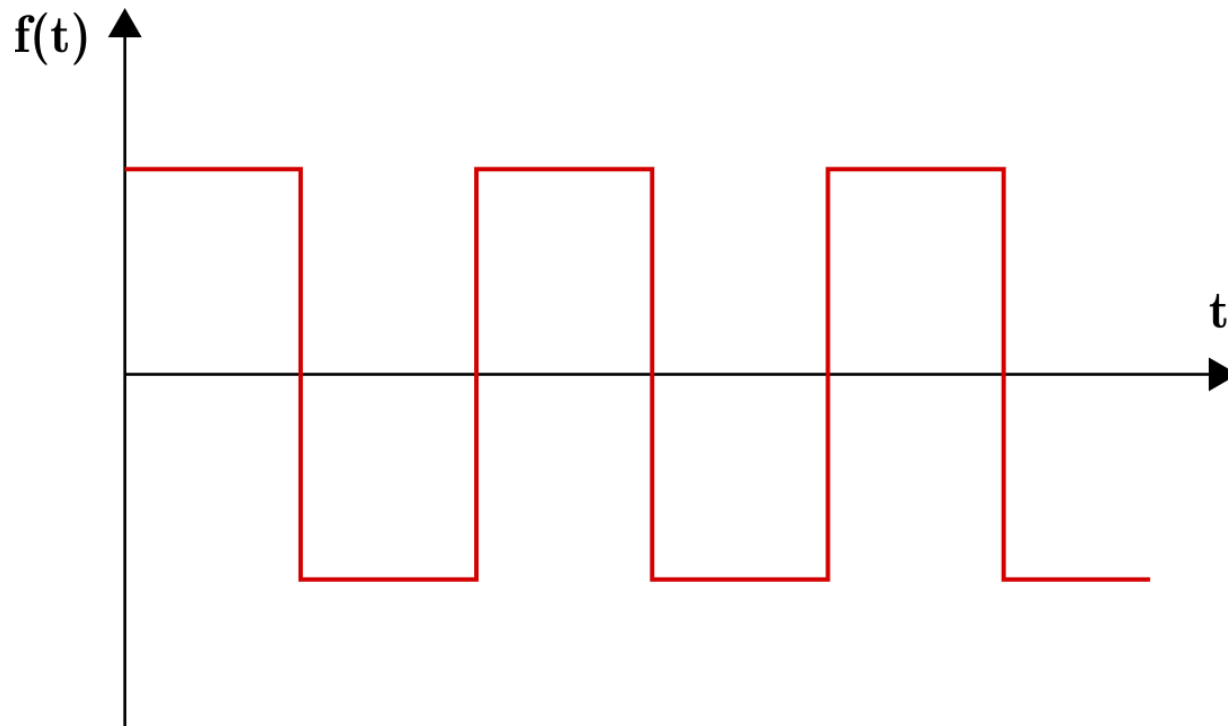
- **Dämpfung:** Verhältnis Ausgangsleistung zu Eingangsleistung
 - frequenzabhängig, wächst exponentiell mit Länge, d.h. linear in dB.
 - hängt stark vom Aufbau des Mediums (z.B. Querschnitt, Temperatur, spez. Widerstand, Material), Betriebsfrequenz, Temperatur ab
 - Kompensation: Verstärker
- **Verzerrung:** Wegen frequenzabhängiger Laufzeit und amplitudenabhängiger Dämpfung werden Impulse verzerrt und interferieren.
- **Laufzeit:** hängt ab vom Aufbau des Mediums, Frequenz, Länge
- **Störungen, Rauschen:** Rauschen unvermeidbar (Physik), Störungen durch Reflexionen, Einkoppeln fremder Signale (cross-talk, EM-Verträglichkeit), Wetter

Elektrische Leiter (1/2)

- Elektrische Ladung wird in metallischen Leitern übertragen (Kupferlegierungen, Gold, Silber, Platin) in Form von verdrehten Kabeln oder Koaxialkabeln
- Verhalten einer Leitung beschreibbar durch Grundeigenschaften
 - Widerstand R [Ohm]
 - Induktivität L [Henry]
 - Kapazität C [Farad]
- Grundgrößen abhängig von Abmessungen der Leitung, Hülle, Material, Betriebsfrequenz, Temperatur

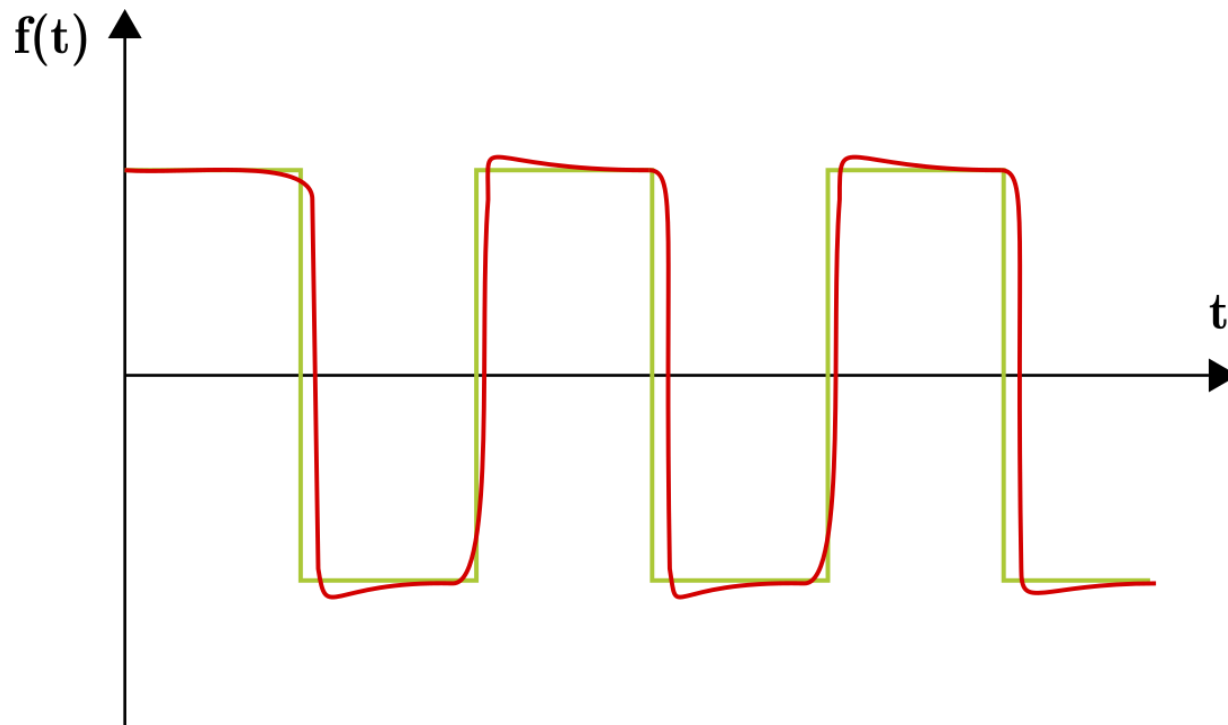
Eigenschaften von Medien

Signal ohne Einflüsse durch Medium



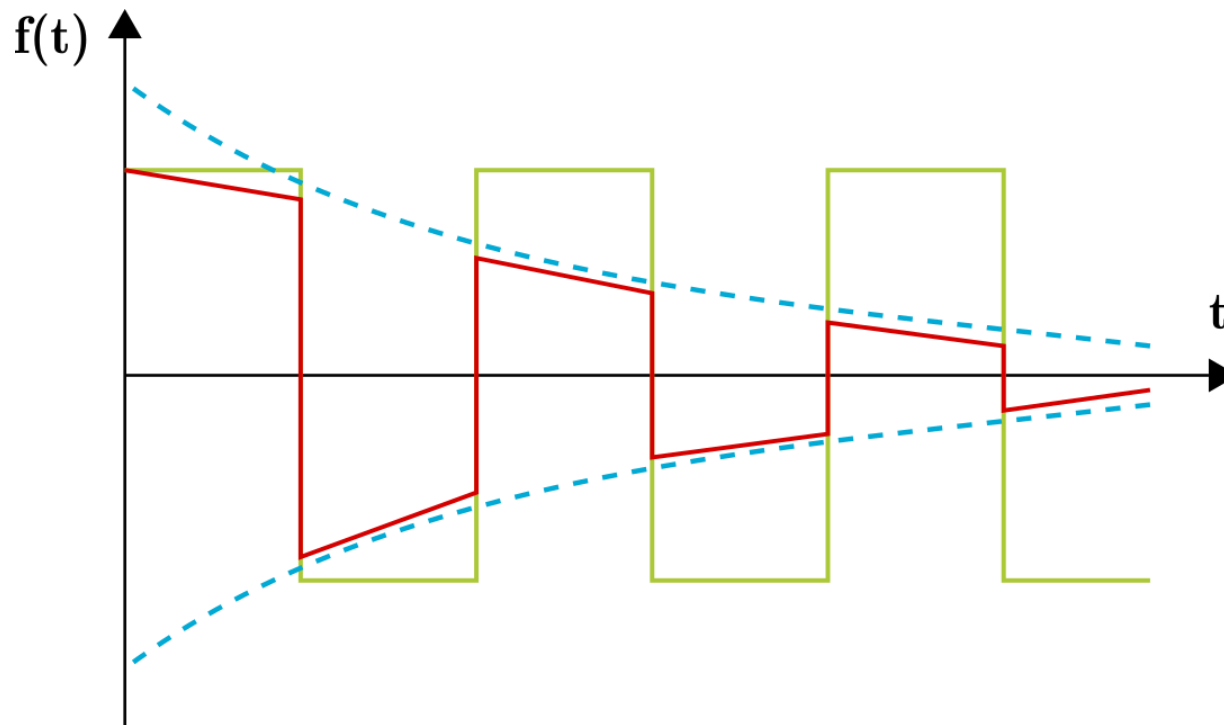
Eigenschaften von Medien

Impedanz, Bandbreitenbeschränkung



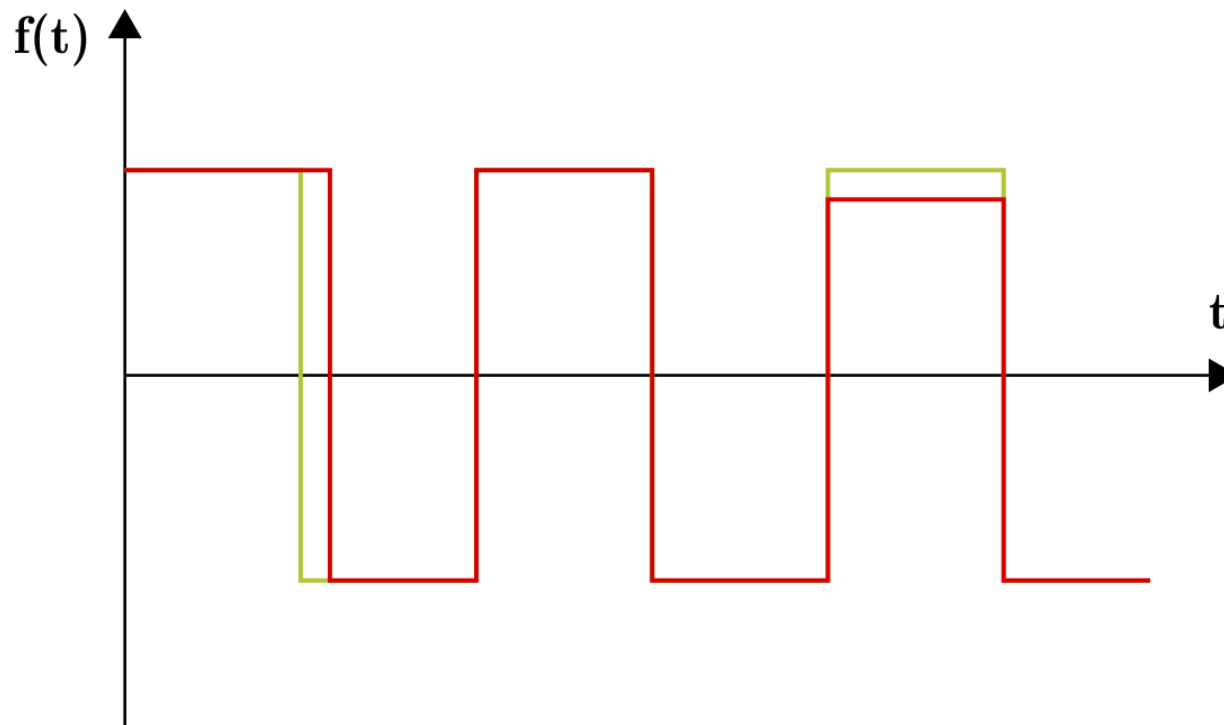
Eigenschaften von Medien

Dämpfung



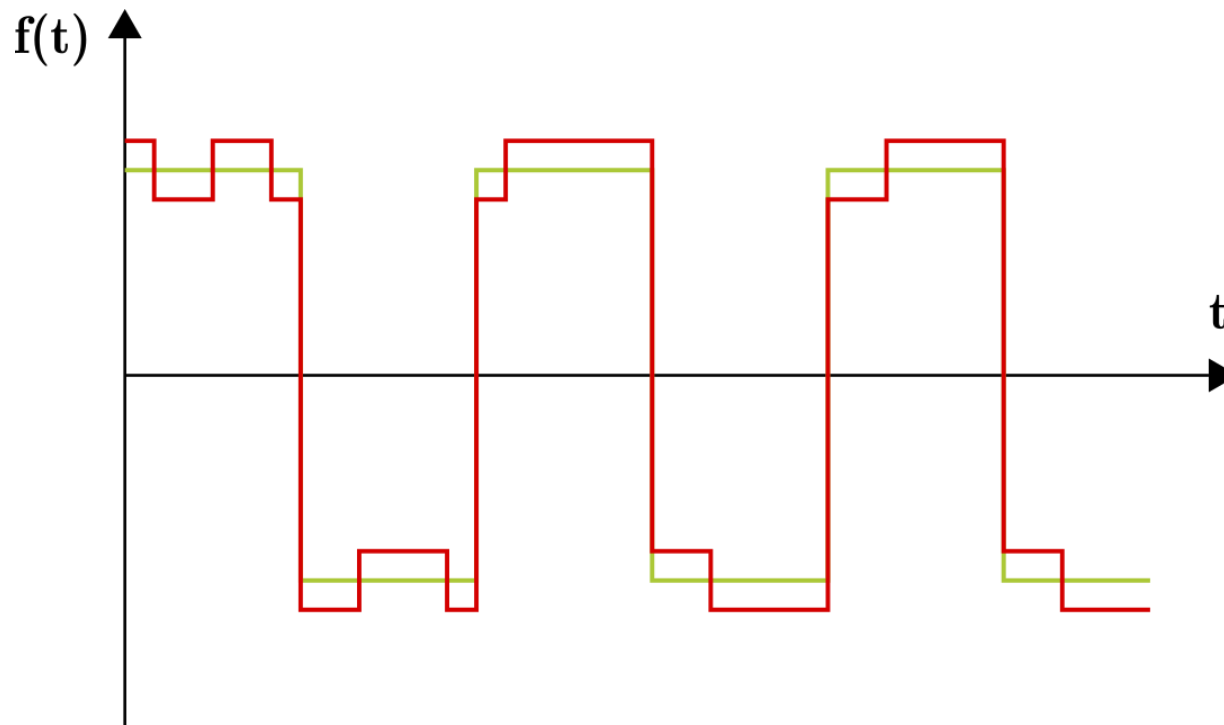
Eigenschaften von Medien

Verzerrung

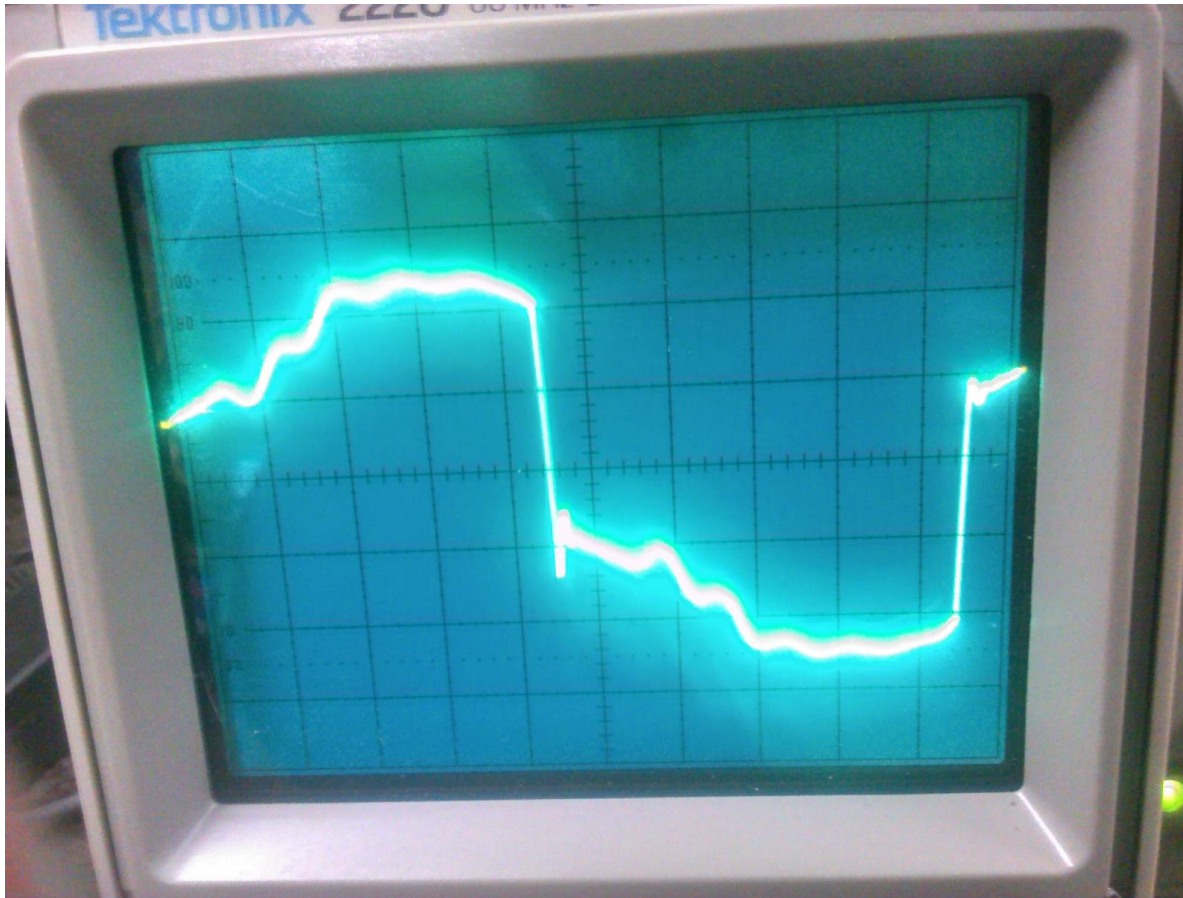


Eigenschaften von Medien

Übersprechen



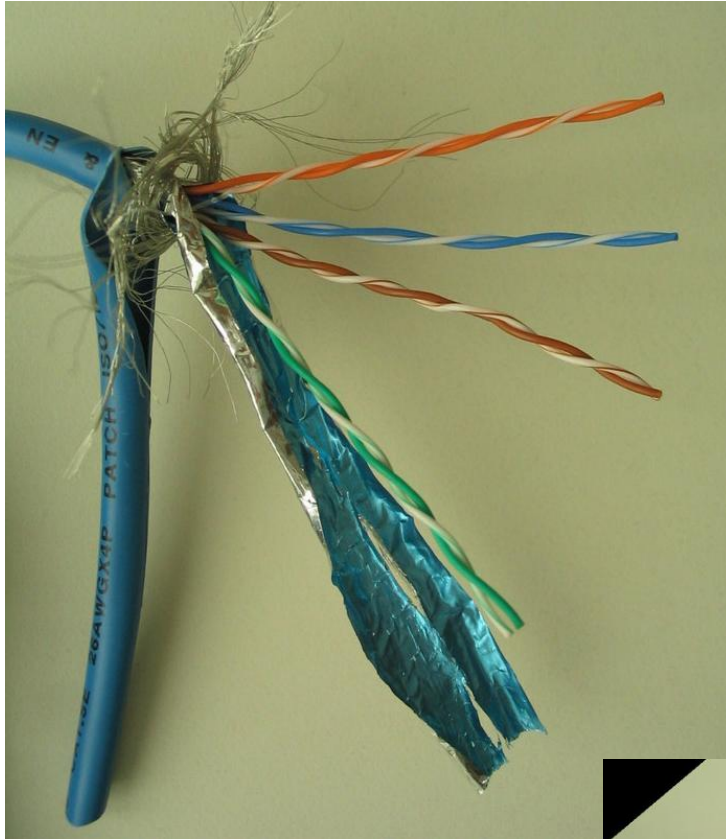
Eigenschaften von Medien



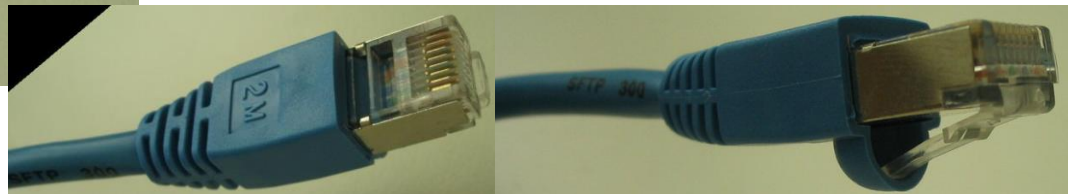
Elektrische Leiter: Störeinflüsse und Lösungsansätze

- Nebensprechen
→ Verdrillung, Abschirmung
- Ein-/Ausstrahlung
→ Abschirmung
- Reflexionen (Fehlanpassung, falscher Abschluss)
→ richtige Anpassung, Abschlüsse
- Erdschleifen (Potenzialdifferenz)
→ Erdung
- Skin-Effekt (ab 20 kHz)
→ beschichtete Oberflächen

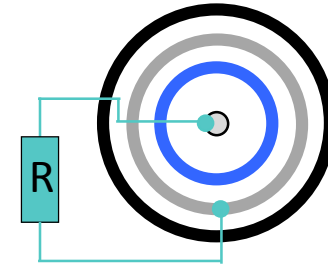
Elektrische Leiter: Verdrillte Kabel (Engl. Twisted Pair)



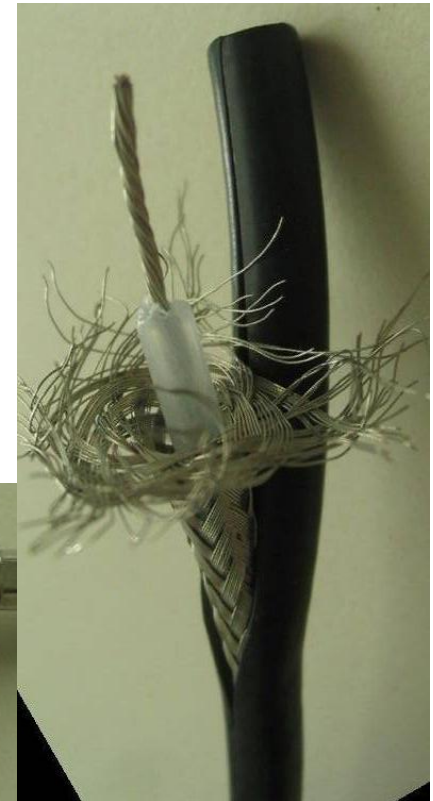
- Screened Foiled Twisted Pair
 - mehrere verdrillte Aderpaare
 - Schirmung (Folie + Geflecht)
 - "Patch-Kabel"
- Verdrillung
 - verhindert Ein- bzw. Abstrahlung
 - Art und Dichte der Verdrillung beeinflusst Schutzwirkung
- Bilder: S/FTP CAT5 (derzeit übliches Medium)



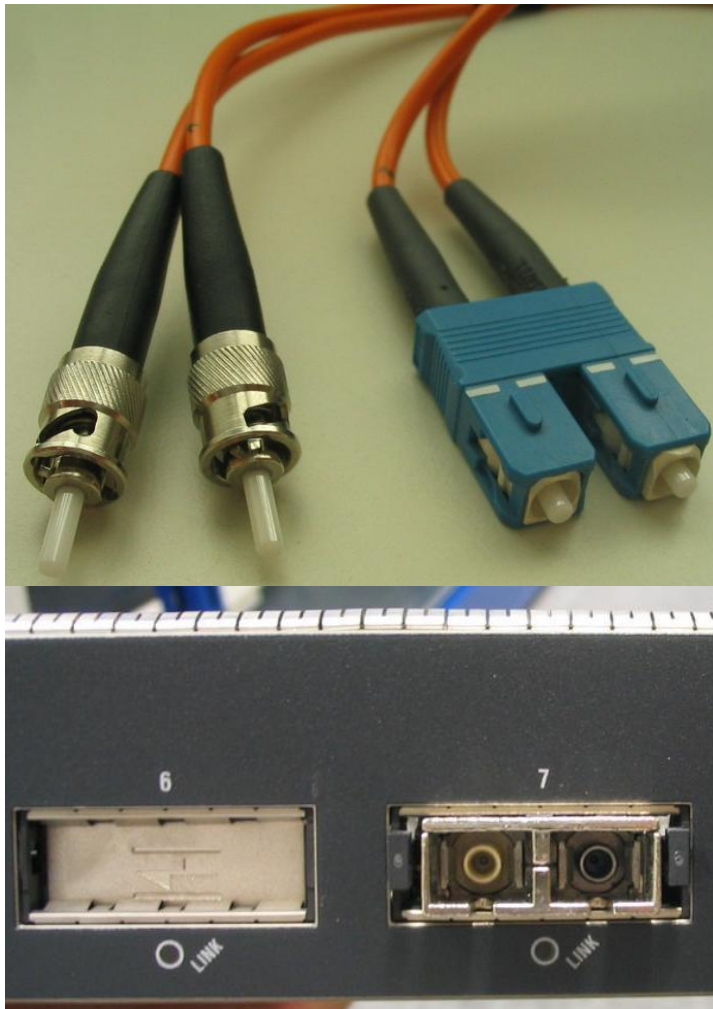
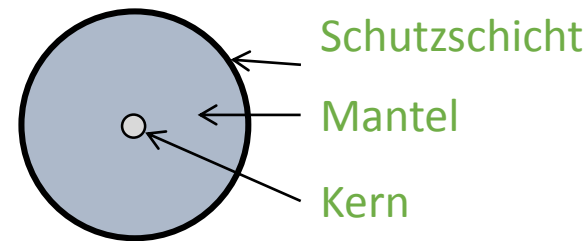
Elektrische Leiter: Koaxialkabel (Koax)



- Zweipolige Kabel, bestehend aus einem Innenleiter, der in konstantem Abstand von einem hohlzylindrischen Außenleiter umgeben ist.
- Der Außenleiter schirmt den Innenleiter vor Störstrahlung ab
→ unempfindlich gegen Interferenz
- Bilder: 10Base2 (z.B. bei Ethernet)



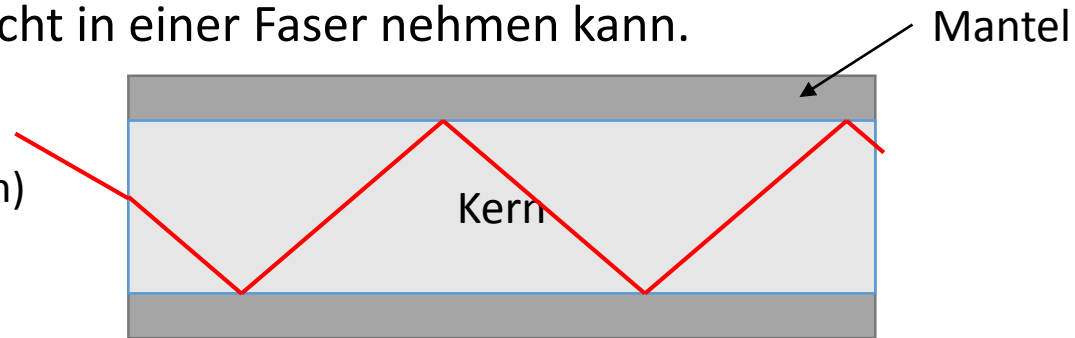
Lichtwellenleiter



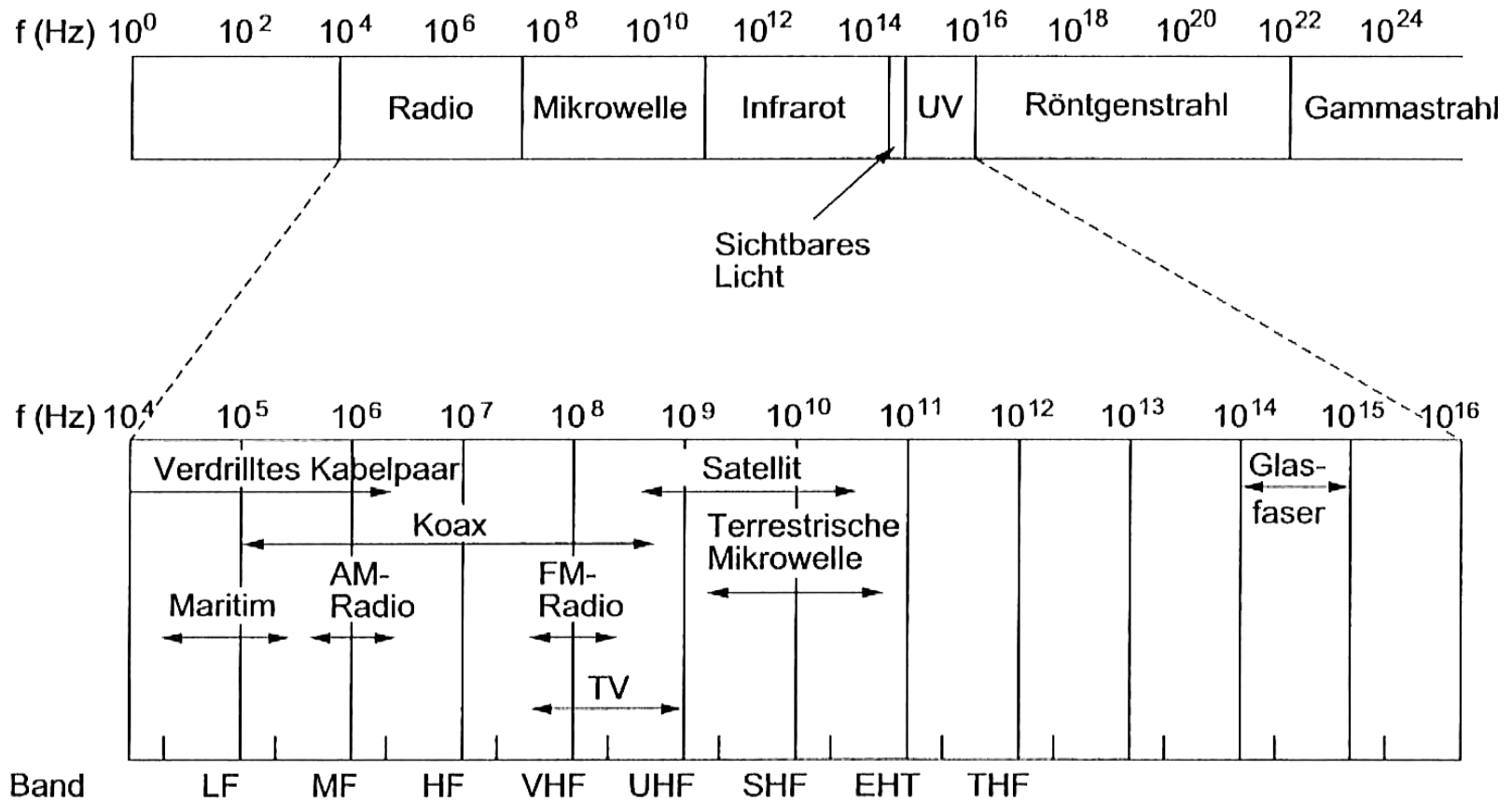
- Aufbau Lichtwellenleiter
 - Kern (hohe optische Dichte)
 - Mantel (geringere optische Dichte)
 - Schutzschicht (Kunststoff)
- Bilder
 - LWL-Paare (für Hin- und Rückweg)
 - ST-Stecker (links), SC-Stecker (r)
 - Beleuchtet mit Laser oder LED
- Resistent gegen elektromagnetische Interferenz
- Abhörsicher(er)

Lichtwellenleiter: Moden

- Moden sind Wege, die das Licht in einer Faser nehmen kann.
- Moden sind abhängig von
 - Lichtspektrum (Wellenlängen)
 - Einstrahlwinkel
 - Brechzahlprofil
- Monomodefasern: sehr kleiner Kern, verlangen präzise Lichtquellen (Laserdioden mit $\lambda = 1300$ oder 1550 nm)
- Multimodefasern: Stufenindex, Gradientenindex (häufiger)
- Störeinflüsse:
 - Modendispersion,
 - Materialdispersion



Das Elektromagnetische Spektrum und seine Verwendung



Quelle: Tanenbaum, Computernetzwerke

Codierung und Modulation

Daten und Signale, Bandbreite, Abtasttheorem, Nyquist und Shannon, Codierungsverfahren

Begriffsklärung: Daten und Signale

- **Daten:** Strukturen zur Ableitung (semantischer) Information.
 - sind bearbeitbar, speicherbar, transportierbar (als Nachrichten)
 - **Digitale/Diskrete Daten:** Strukturen (Folgen) von Zeichen (Elemente endlicher Mengen), z.B. Bit, Bytes, Zeichen, Zahlen.
 - **Analoge Daten:** kontinuierliche Funktionen (der Zeit, des Ortes), z.B. Sprache, Musik, Bewegtbild
- **Signale:** physikalische Darstellung von Daten
 - durch akustische, optische, elektrische, elektromagnetische Größen
 - analog Signale sind kontinuierliche Funktionen der Zeit
 - digital diskrete Signalfolgen, Impulse

Fourierdarstellung von Signalen

- Analoge Signale werden allgemein als Wellen übertragen:

$$s(t) = A_0 \cdot \sin(2\pi f t + \Theta)$$

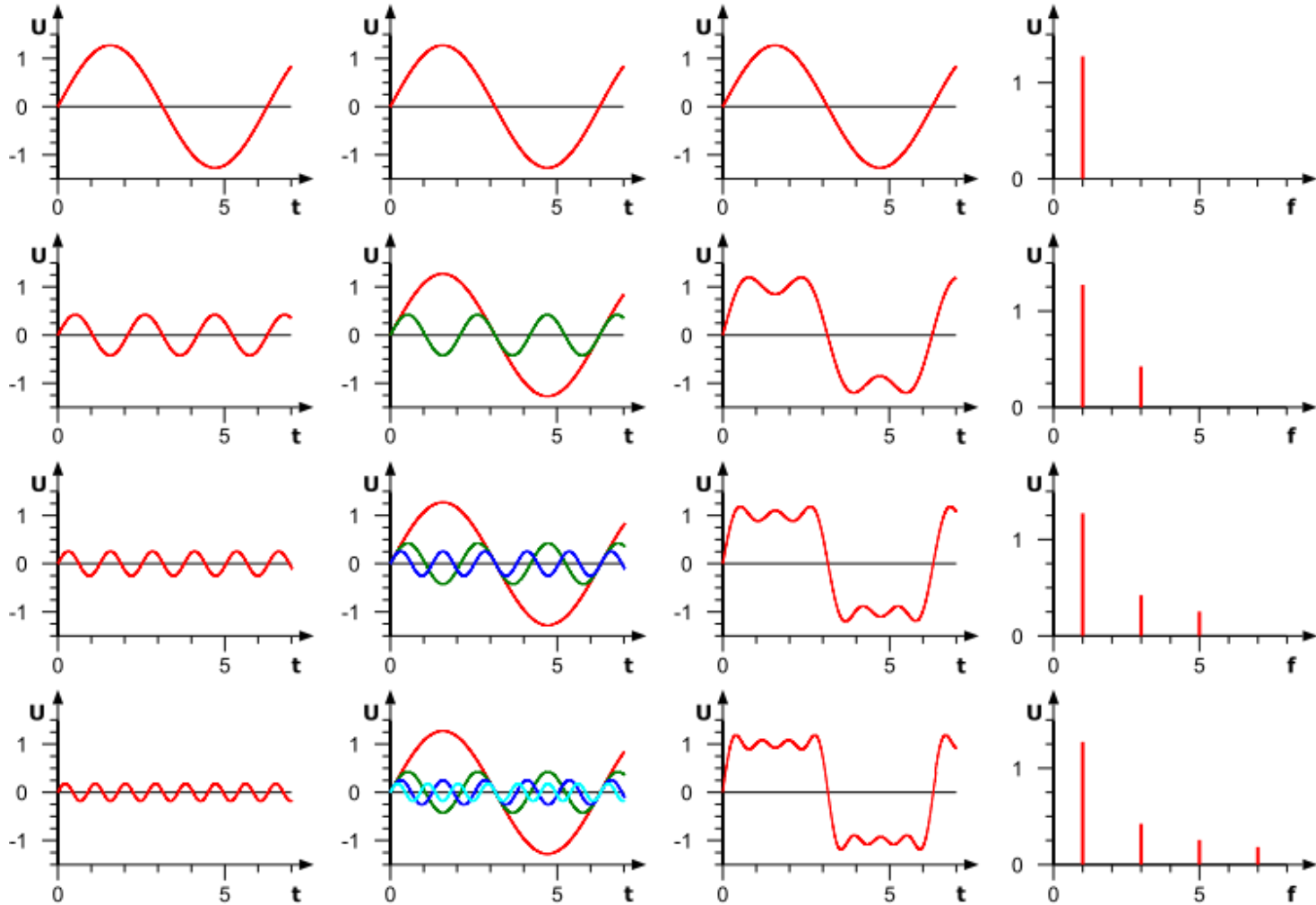
- Maximale Amplitude A_0 , Frequenz f , Phasenverschiebung Θ
- $s(t)$ ist periodische Funktion, $s(t) = s(t + T)$ mit Periode $T = 1/f$
- Periodische Funktionen können als Summe von Sinus- und Cosinustermen angenähert werden, man spricht von ihrer Fourierdarstellung:

$$s_n(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=0}^n a_k \cos(2\pi k f t) + \sum_{k=0}^n b_k \sin(2\pi k f t)$$

$$\int (s(t) - s_n(t))^2 dt \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$$

Fourierdarstellung von Signalen

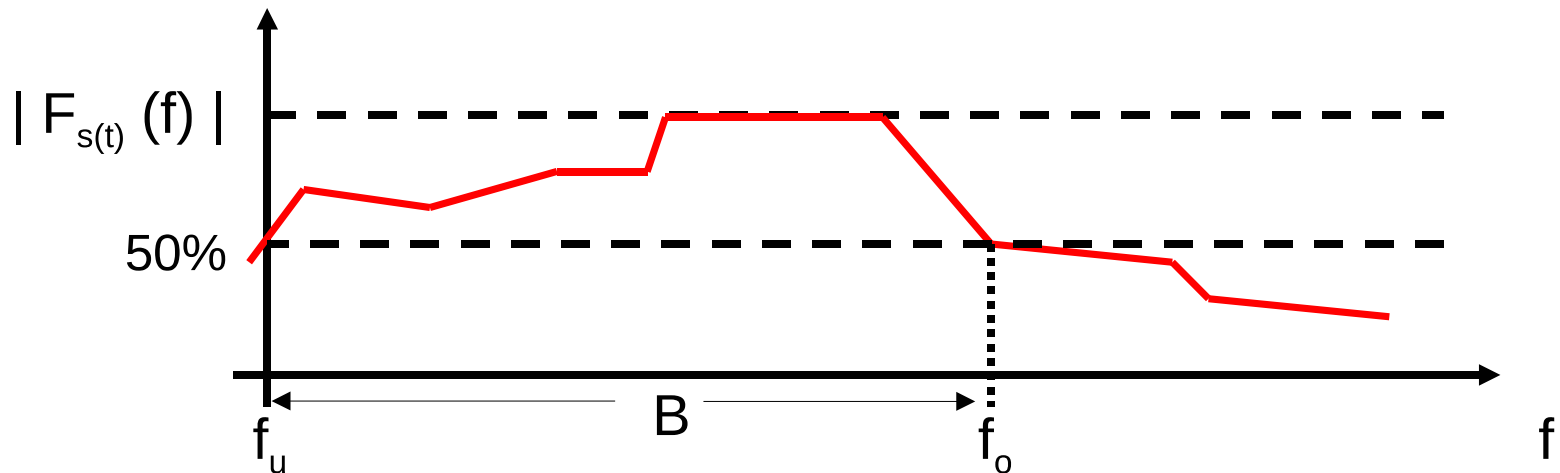
Quelle: Wikimedia Commons



Der Bandbreiten-Begriff

Bandbreite des Signals: Differenz zwischen max. und min. Frequenz im Signalverlauf

Bandbreite des Mediums: Frequenzbereich, der ohne wesentliche Verzerrung übertragen werden kann. Die oberen und unteren Grenzfrequenzen sind dadurch gegeben, dass die außen liegenden Frequenzen unter 50% der leistungstärksten Frequenzen liegen.



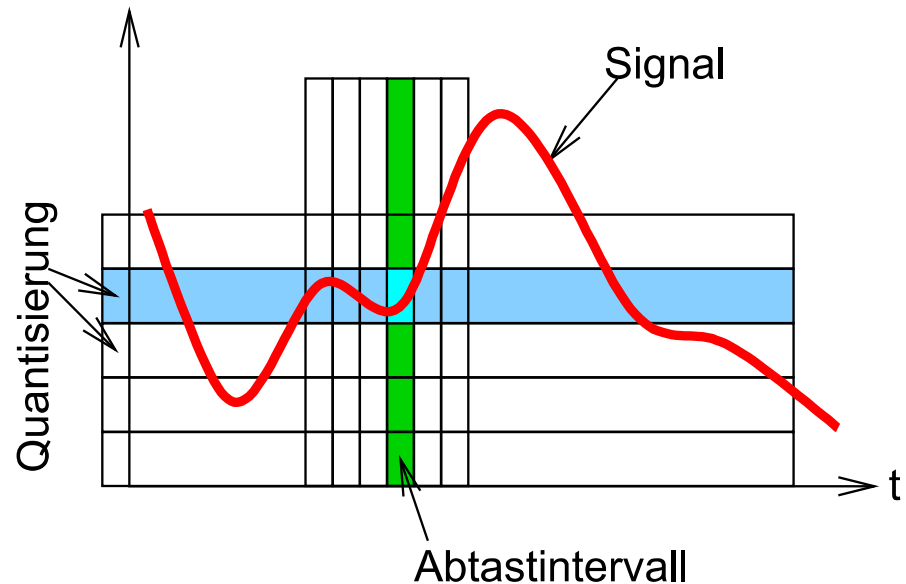
Abtasttheorem

Das Theorem (verlustfrei):

$$S \geq 2 \cdot F$$

S: Abtasthäufigkeit

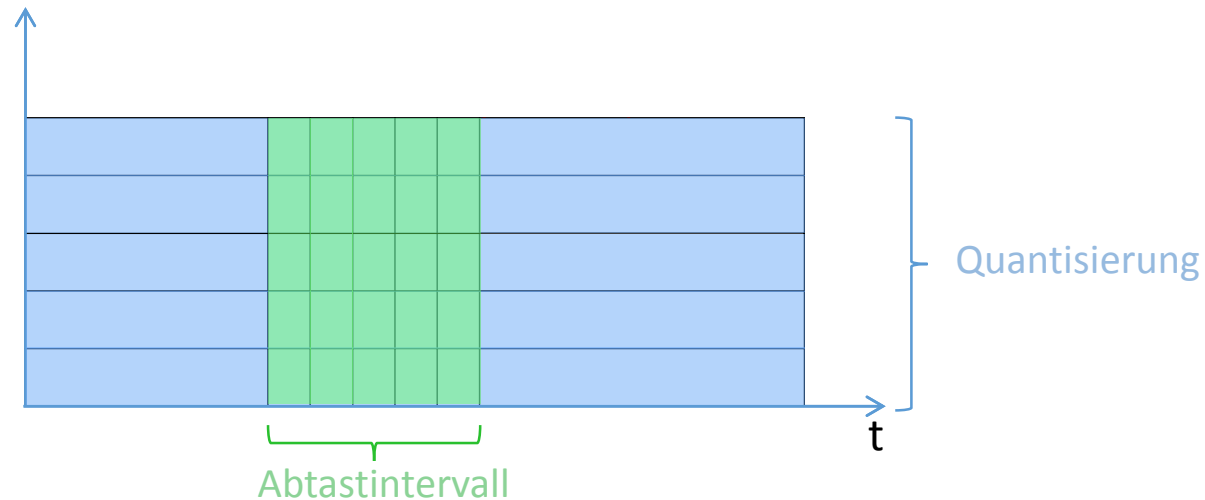
F: Höchste Frequenz der
analogen Information



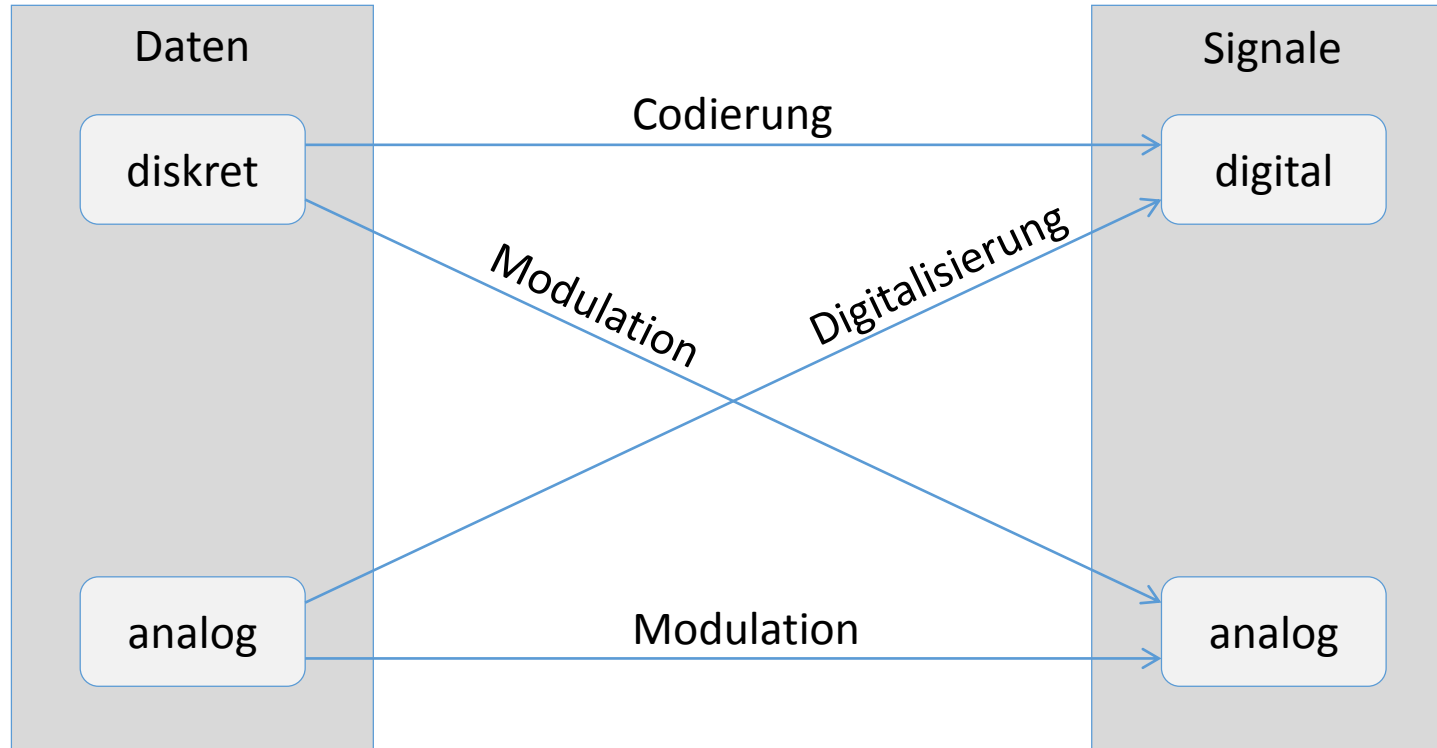
Beispiel: Digitale Übertragung analoger Sprache bei ISDN

- Verfahren: Pulscode-modulation (PCM)
- Telefon-Bandbreite: (300-3400 Hz), gerundet 4kHz;
→ somit Abtastrate 8kHz, d.h. alle 125 μ s
- Quantisierung: 256 Werte, Codierung 1 Byte
→ resultiert erforderliche Rate 64 kbit/s

Abtastung (Animation)



Übergänge zwischen Daten und Signalen

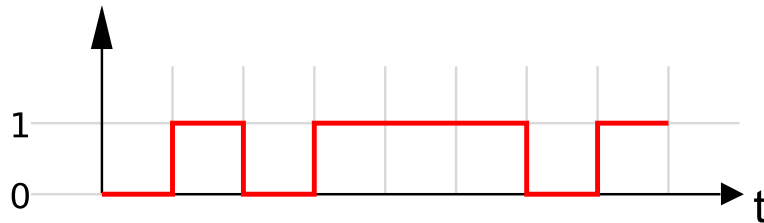


- Diskretisierung (Abtasttheorem betrifft Zeitachse)
- Quantisierung (betrifft Zerlegung der Werteachse)
- Codierung (Darstellung der Wertemenge)

Bitrate vs. Baudrate

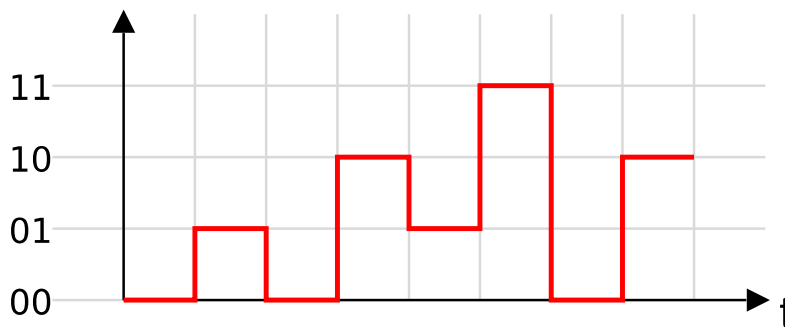
- Bitrate: Anzahl der übertragenen Bits pro Sekunde
- Baud: Anzahl der Signalschritte (Wechsel der Signalwerte) pro Sekunde

Bsp.: 2-Stufencodierung



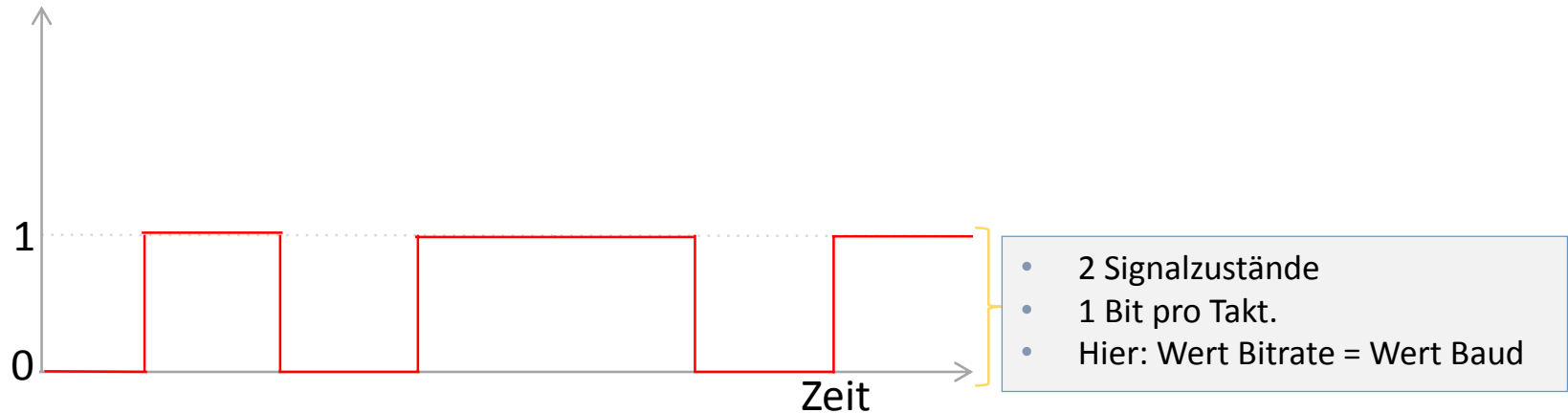
- 2 Signalzustände/Symbole
- 1 Bit pro Takt
- Bitrate = Baudrate

Bsp.: 4-Stufencodierung



- 4 Signalzustände/Symbole
- 2 Bit pro Takt
- Bitrate = 2 · Baudrate

Beispiel: 2-Stufencodierung

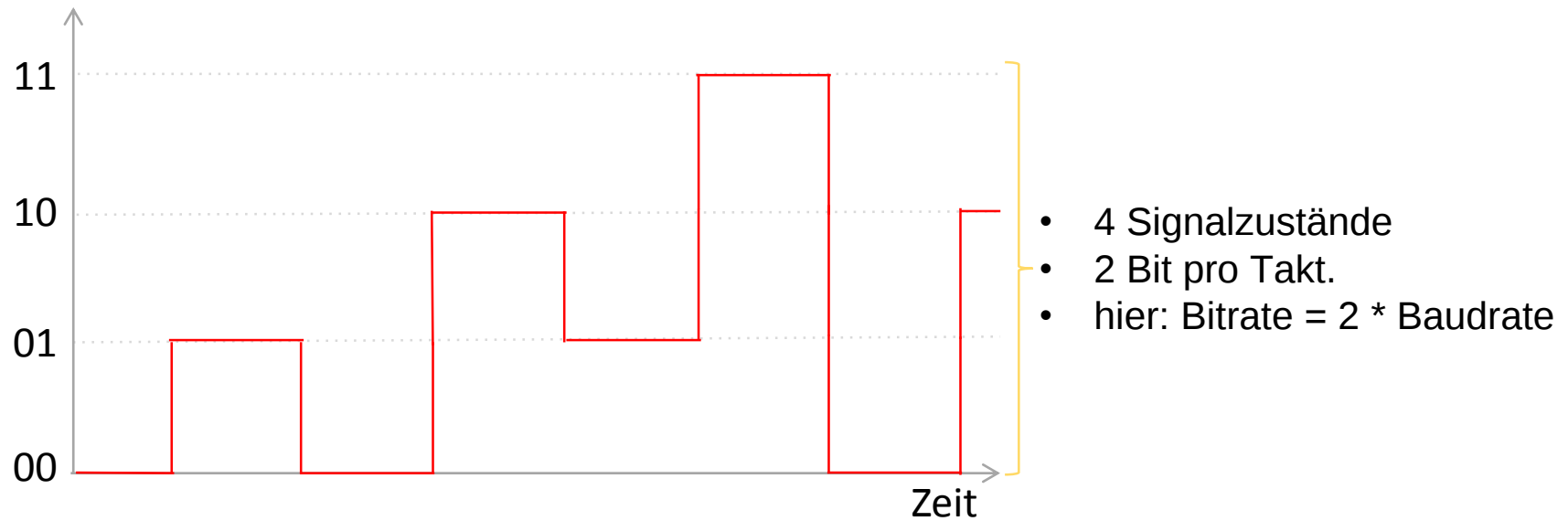


Übertragene Bits: 0 1 0 1 1 0 1

Anzahl der übertragenen Bits: 7

Anzahl der Signalwechsel: 4

Beispiel: 4-Stufencodierung



Übertragene Bits: 00 01 00 10 01 11 00 10

Anzahl der übertragenen Bits: 16

Anzahl der Signalwechsel: 7

Gesetz von Nyquist

- Das Gesetz von Nyquist gibt die maximale *Symbolrate* C für einen **rauschfreien** Kanal mit Bandbreite B :

$$C = 2 \cdot B \text{ [Baud]}$$

- *Datenrate* bei Symbolen mit M Zuständen

$$C = 2 \cdot B \cdot \log_2 M \text{ [Bit/s]}$$

- Beispiel: Telefon mit $B = 3100 \text{ Hz}$

- Binäres Signal:

$$C = 2 \cdot 3100 \text{ Hz} \cdot \log_2 2 = 6200 \text{ Bit/s}$$

- Codierung AM-PSK (8 Stufen):

$$C = 2 \cdot 3100 \text{ Hz} \cdot \log_2 8 = 18600 \text{ Bit/s}$$

Gesetz von Shannon

- Datenrate C_{sh} für einen Kanal **mit Rauschen** und Bandbreite B :

$$C_{sh} = B \cdot \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right) \text{ [Bit/s]}$$

- S Signalenergie, N Rauschenergie, S/N Rauschabstand
- Rauschabstand wird häufig in Dezibel [dB] angegeben:

$$SNR \text{ [dB]} = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{S}{N}\right) \quad \text{Signal-to-Noise-Ratio}$$

- Beispiele

- $S/N = 1000 \Rightarrow SNR = 30\text{dB}$
- $SNR = 20\text{dB} \Rightarrow S/N = 100$

- Beispiel: Telefon, $B = 3000\text{Hz}$

$$SNR = 20\text{dB} \Rightarrow C_{sh} \approx 3000\text{Hz} \cdot \log_2(1 + 100) \approx 19963 \text{ Bit/s}$$

Weitere Gesetzmäßigkeiten

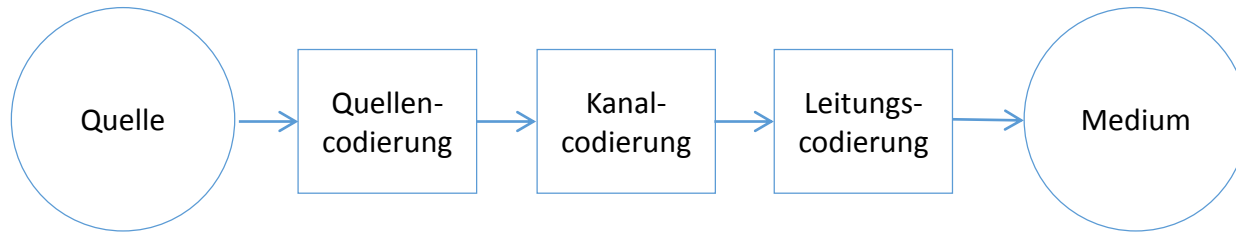
- Zeitgesetz: Für ein gegebenes Medium gelten Frequenz- und Längenrestriktionen

$$\text{Zeit} \cdot \text{Bandbreite} = \text{Konstante}$$

$$\text{Länge} \cdot \text{Bandbreite} = \text{Konstante}$$

- Beispiel Gradientenfaser:
 - Auf gegebenem Medium können z.B.
400 MHz über 1 km oder 1 GHz über 400 m übertragen werden.
- Beispiel Gigabit-Ethernet:
 - Monomode 1300nm : 2km
 - Multimode 850nm : 500m
 - Koax : 25m
 - STP Kat 5 : 100m

Codierungsverfahren



Codierungsverfahren in einem Kommunikationssystem

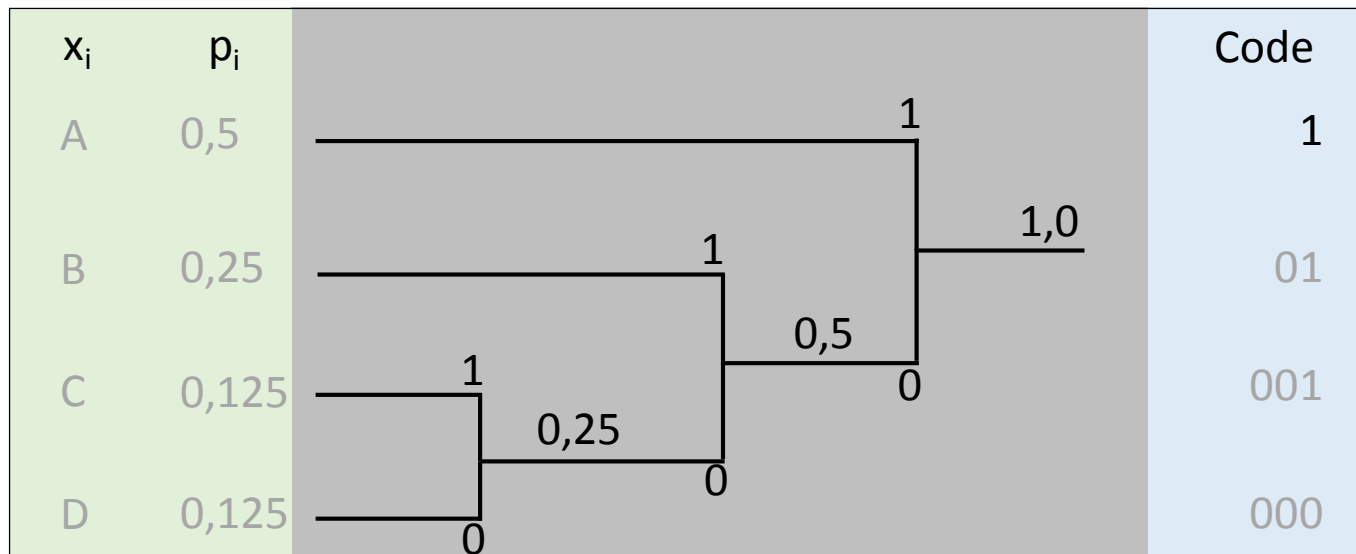
- **Quellencodierung:** Ziel Redundanzreduktion (verlustfrei, verlustbehaftet)
 - Entropiecodierung (Laufängen, Huffman, arithmetisch)
 - Quellencodierung (Prädiktion, Transformation z.B. FFT, DCT)
 - Hybrid (JPEG, MPEG, H.263)
- **Kanalkodierung:** Erkennung und Korrektur von Fehlern
- **Leitungscodierung:** Zuordnung Bits zu Signalelementen

Beispiel: Lauflängencodierung

- Run Length Encoding (RLE)
- ist verlustfrei!
- Beispiel 1: (vereinfacht)
 - AAAAAA → (6A)
 - d.h. aus 6 Byte werden 2 Byte
- Beispiel 2:
 - 00000000111010111111011101
 - → (8)(3)(1)(1)(1)(6)(1)(3)(1)(1)
 - wird z.B. bei BMP-/PCX-Grafik, JPEG, und FAX verwendet

Beispiel: Huffman-Codierung

- Zeichen eines Datenstroms werden Codes verschiedener Länge zugewiesen
- Häufigste Zeichen bekommen kürzesten Code (Prinzip Morsealphabet)



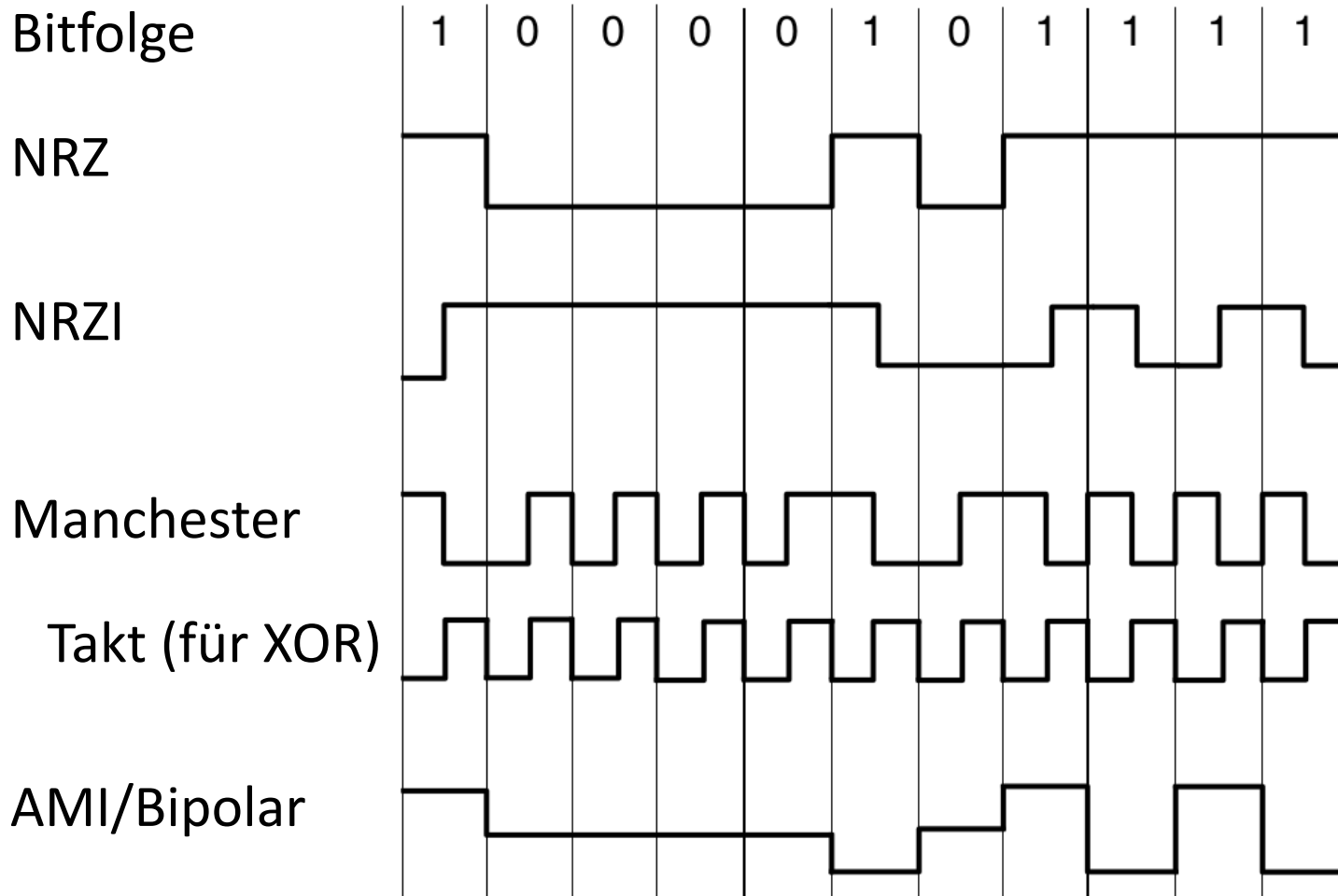
Quelle: Michael Heinz, Humboldt-Universität zu Berlin

Beispiel: **BACADABA** → **01100110001011**

Leitungscodierung

- Leitungscodierung: Darstellen von Bitfolgen durch medienspezifische physikalische Signalwerte
- Kriterien
 - benötigte Bandbreite des Signals
 - *Baseband* vs. *Passband*
 - Taktgenerierbarkeit aus Datenfolge (Selbsttaktung)
 - Gleichspannungsanteil. Viele Leitungen übertragen niederfrequenten Teil schlecht
- Unterschied zwischen Schrittbreite und Bitbreite, z.B.
 - Manchester: 1/2 Bit pro Schritt (z.B. bei klassischem Ethernet)
 - Non-Return-to-Zero (NRZ): 1 Bit pro Schritt
 - quaternär: 2 Bit pro Schritt

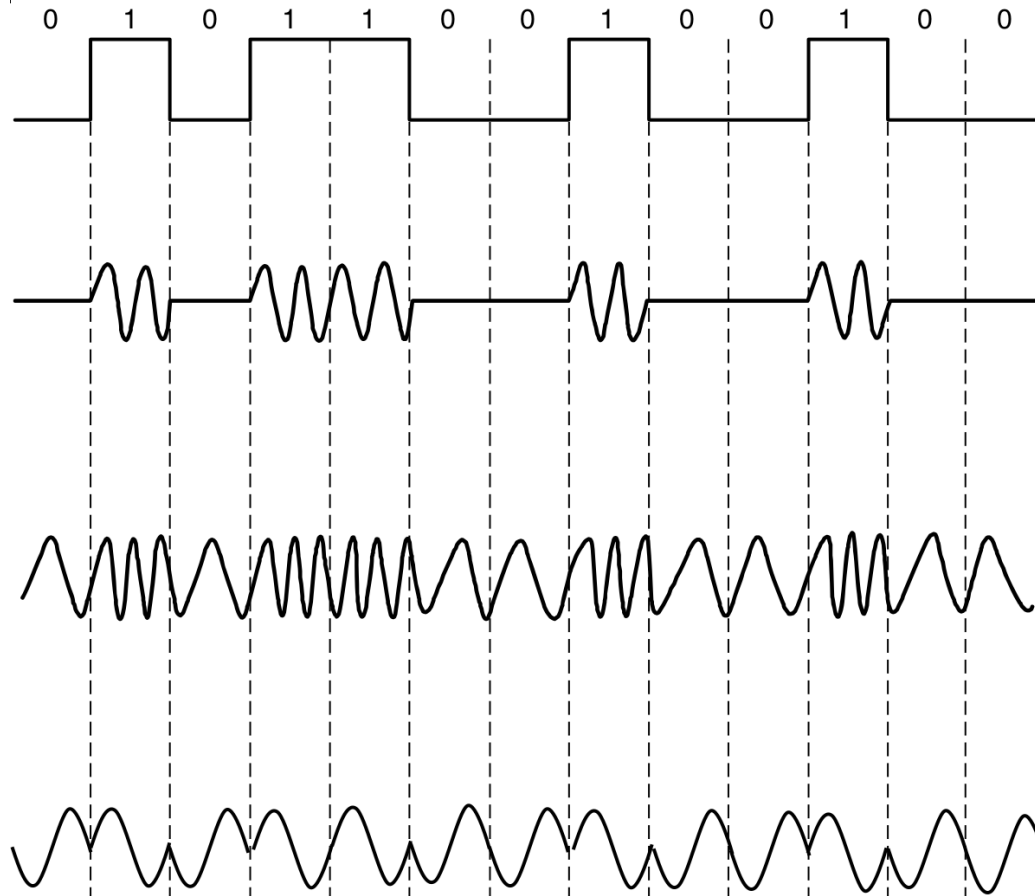
Leitungscodierung (Baseband)



Modulation: Prinzip

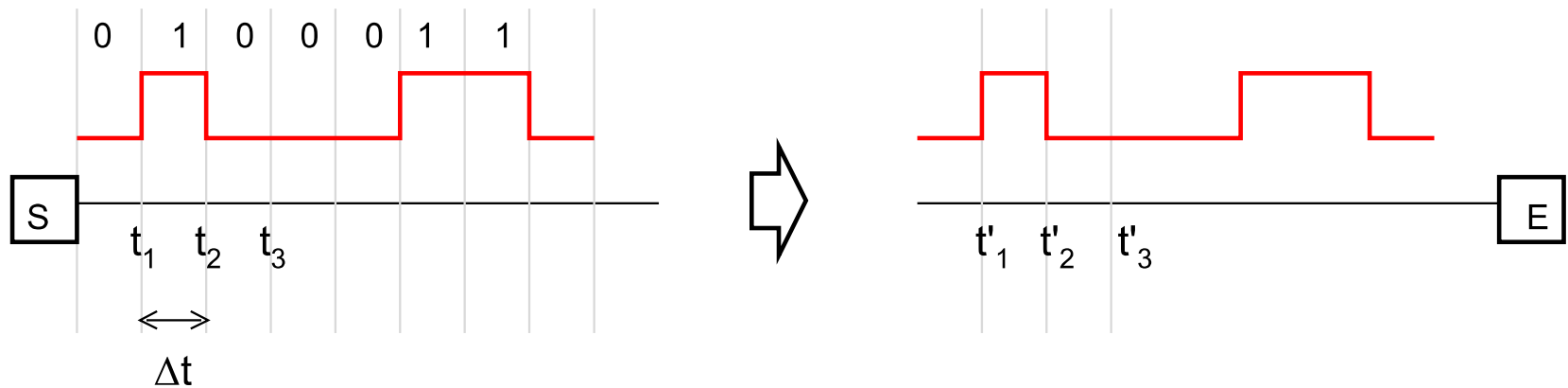
Der Träger ist eine sinusförmige Schwingung, somit können Amplitude, Frequenz, oder Phase durch das aufzuprägende Signal verändert (moduliert) werden.

Signal



Synchrone Übertragung

- Alle Binärzeichen liegen in einem festen Zeitraster, und zwischen Sender und Empfänger besteht dauernd Synchronismus (Schrittgleichlauf).



Asynchrone Übertragung

- Synchronität besteht nur für die Binärzeichen einer Übertragungszeichenfolge.
- Verschiedene Folgen müssen nicht im gleichen Zeitraster liegen.
- Beispiel Start-Stop-Übertragung bei symbolorientierten Prozeduren
- Für jedes Symbol (n Bits) wird
 - mittels Startbits ($1\frac{1}{2}$, 2 Bits) neu synchronisiert und
 - mittels Stopbits ($1, 1\frac{1}{2}$, 2 Bits) Ruhestellung erzeugt.

Schnittstellen

- Schnittstellen sind standardisierte Festlegungen
 - zur Verbindung von Geräten verschiedener Hersteller
 - zum Anschluss von Geräten an Übertragungseinrichtungen
 - zum Anschluss von Übertragungseinrichtungen an Netze bestimmter Technologien
- Schnittstellen legen fest
 - Steckerkonfigurationen (physische Ausprägung, PIN-Bedeutung)
 - Codierung, Modulation
 - Schritttakterzeugung, Synchronisation
 - Datenübertragung und Fehlersicherung
- Gremien: ITU-T, EIA / TIA, IEEE