

Inhalt der Vorlesung „Rechnerkommunikation“

- ✓ Einführung
- ✓ Anwendungsschicht
- ✓ Transportschicht
- ✓ Netzwerkschicht
- ✓ Sicherungsschicht
- **Physikalische Schicht**

Physikalische Schicht

■ Signale und Übertragungssysteme

■ Maximale Datenrate

■ Modulation

■ Übertragung über elektrische Leiter

■ Übertragung über Lichtwellenleiter

■ Strukturierte Verkabelung

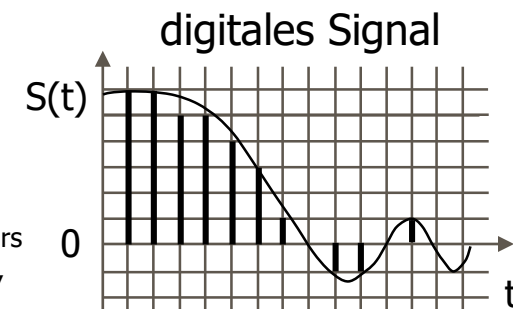
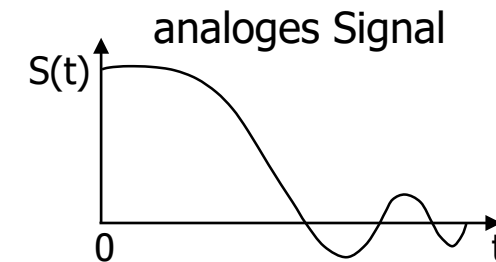
■ Funkübertragung

- zusätzliches Material aus Bernd Schürmann. Grundlagen der Rechnerkommunikation, Vieweg Verlag, 2004, Kapitel 1, „Physikalische Grundlagen“
- und aus J. Scherff: Grundkurs Computernetze, 2. Auflage, Vieweg Verlag, 2010, Kapitel 4, „Nachrichtenübertragung“

Signale und Übertragungssysteme

■ Signale

- **Signal** = Darstellung von Informationen durch physikalische Größen, z.B. **Strom, Spannung, Lichtwellen, elektromagnetische Feldstärke**
- Signalkategorien
 - Signalwerte sind kontinuierlich (beliebige Werte) oder diskret (endlich viele Werte, idealisiert)
 - Zeitverlauf ist kontinuierlich oder diskret
 - ergibt 4 mögliche Signalkategorien, besondere Bedeutung haben:
 - **analoge Signale** (wert- und zeitkontinuierlich)
 - **digitale Signale** (wert- und zeitdiskret)
 - **binäre Signale** (digital mit **zwei Werten**)



Quelle: J. Scherff: Grundkurs Computernetze, 2. Auflage, Vieweg Verlag, 2010.

Signale und Übertragungssysteme

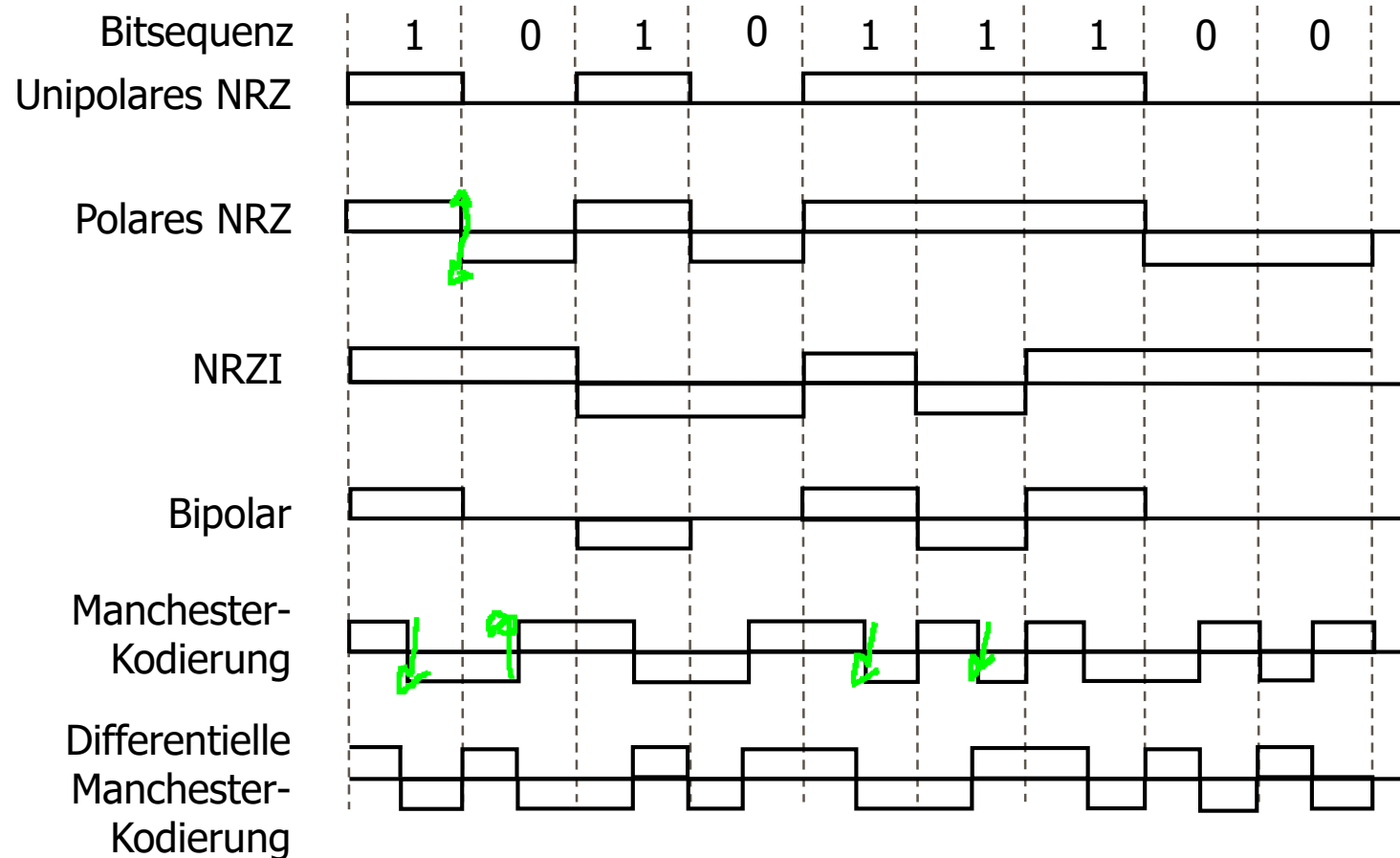
■ Leitungskodierung binärer Signale

- Zuordnung von **Signalwerten zu Nullen und Einsen** einer Bitsequenz bei der Übertragung im Basisband
breitband wäre modulierung über frequenzen, selten im Kabel gebundenen systemen
- **Basisbandübertragung**: Signale werden direkt auf das Medium gesendet
- mögliche Eigenschaften:
 - (1) **selbsttaktend**: Empfänger kann Sendertakt aus Signal gewinnen
 - (2) **gleichstromfrei**: kein Gleichanteil im elektrischen Signal
 - (3) **Bandbreitenbedarf**: Breite des Frequenzbands, um Signal zu übertragen
- im folgenden einige Verfahren zur Leitungskodierung
- anschließend erfolgt Betrachtung des Signals im **Frequenzbereich** und Analyse mittels Fourierreihe und Fouriertransformation

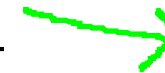
Signale und Übertragungssysteme

Kodierungsverfahren	Beschreibung	selbst-takt.	gleich-stromfrei	Bemerkungen
Non-Return-To-Zero (NRZ):	„1“ = High, „0“ = Low	¬	unipolar: ¬, polar: ✓	polar heißt positives signal für eins und negatives für 0unpolar
NRZ-inverted (NRZI)	„1“ = Wechsel, „0“ = kein Wechsel	¬	¬	
Bipolar	„0“ = Nullpegel, „1“ = alternierend Low und High	¬	✓	
Manchester-Kodierung	Pegelwechsel in Taktmitte, „1“ = High→Low, „0“ = Low→High	✓	¬	benötigt doppelte Bandbreite, Verwendung bei Ethernet also dem Ur-Ethernet
Differentielle Manchester-Kodierung	Pegelwechsel in Taktmitte, zusätzliche Taktwechsel am Flankenanfang	✓	✓	nochmal höhere Bandbreite, Verwendung bei Token Ring
4B/5B-Kodierung	4-Bit-Blöcke werden durch 5 Bit-Wörter kodiert, diese durch NRZI	✓	¬	benötigt 1,25-fache Bandbreite, Verwendung bei FDDI, 8B/10B bei Gigabit Ethernet, 64B/66B bei 10 Gigabit Ethernet

Signale und Übertragungssysteme



Quelle: W. Stallings.
Data and Computer Communications,
10th Ed., Pearson
Education, 2014.



Kein Gleichstrom bei keiner

Signale und Übertragungssysteme

■ Fourierreihe

- die **Fourierreihe** beschreibt ein periodisches Signal $s(t)$ mit **Periodendauer T** als Summe von Sinus- und Kosinusschwingungen verschiedener Frequenzen:

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

- Koeffizienten a_n, b_n sind Sinus- und Kosinus-Amplituden der **n -ten harmonischen Schwingung**
- Koeffizient c ist der konstante Anteil des Signals
- $f=1/T$ ist die Frequenz der 1. harmonischen Schwingung
- Bestimmung der Koeffizienten aus Signal $s(t)$ ist möglich durch**

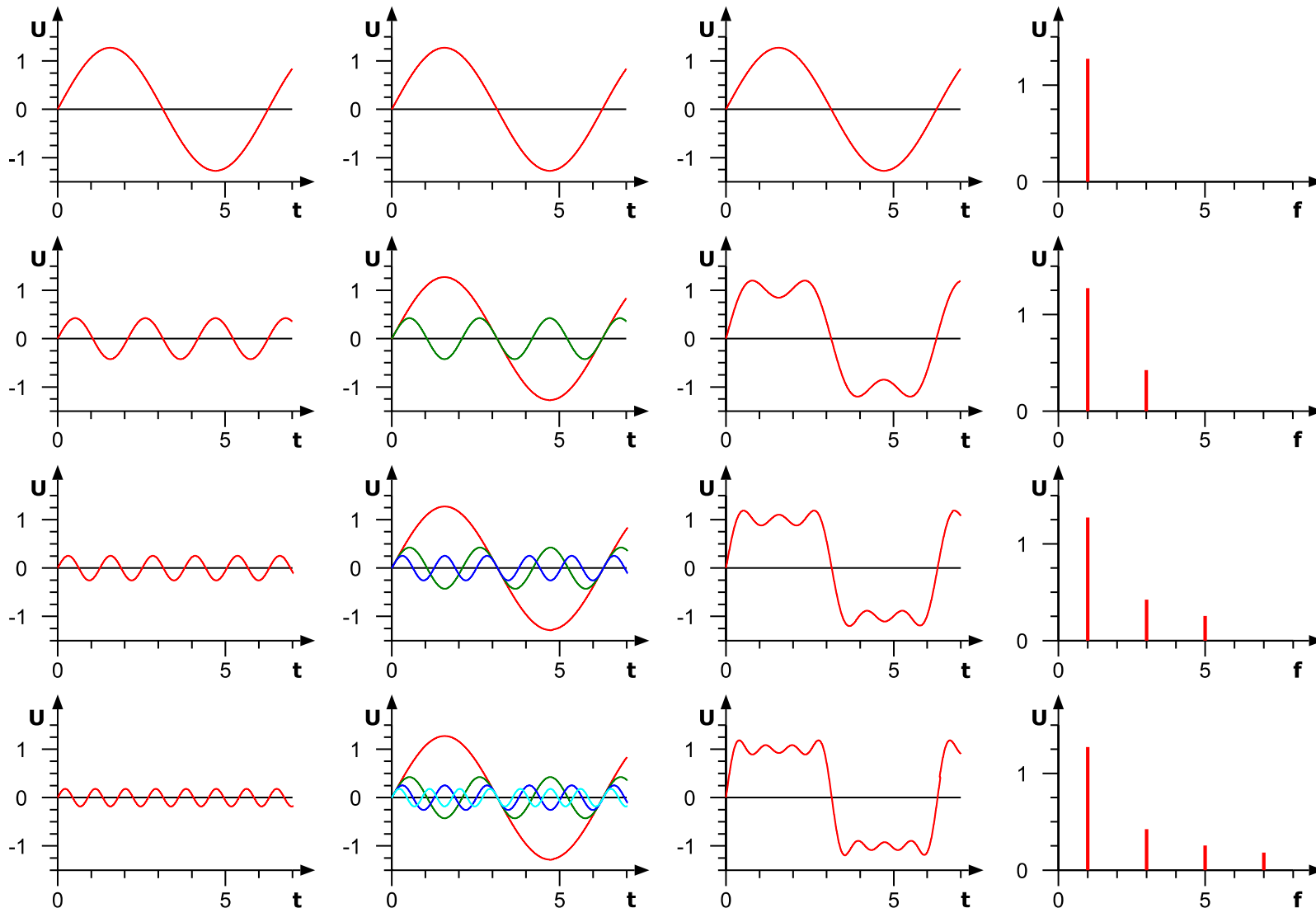
$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \sin(2\pi nft) dt, \quad b_n = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \cos(2\pi nft) dt, \quad c = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) dt$$

- äquivalente Darstellung durch **Amplituden-** und **Phasenkoeffizienten**:

$$d_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad \varphi_n = \arctan(b_n / a_n)$$

sprich statt in karthesischen in polarkoordinaten

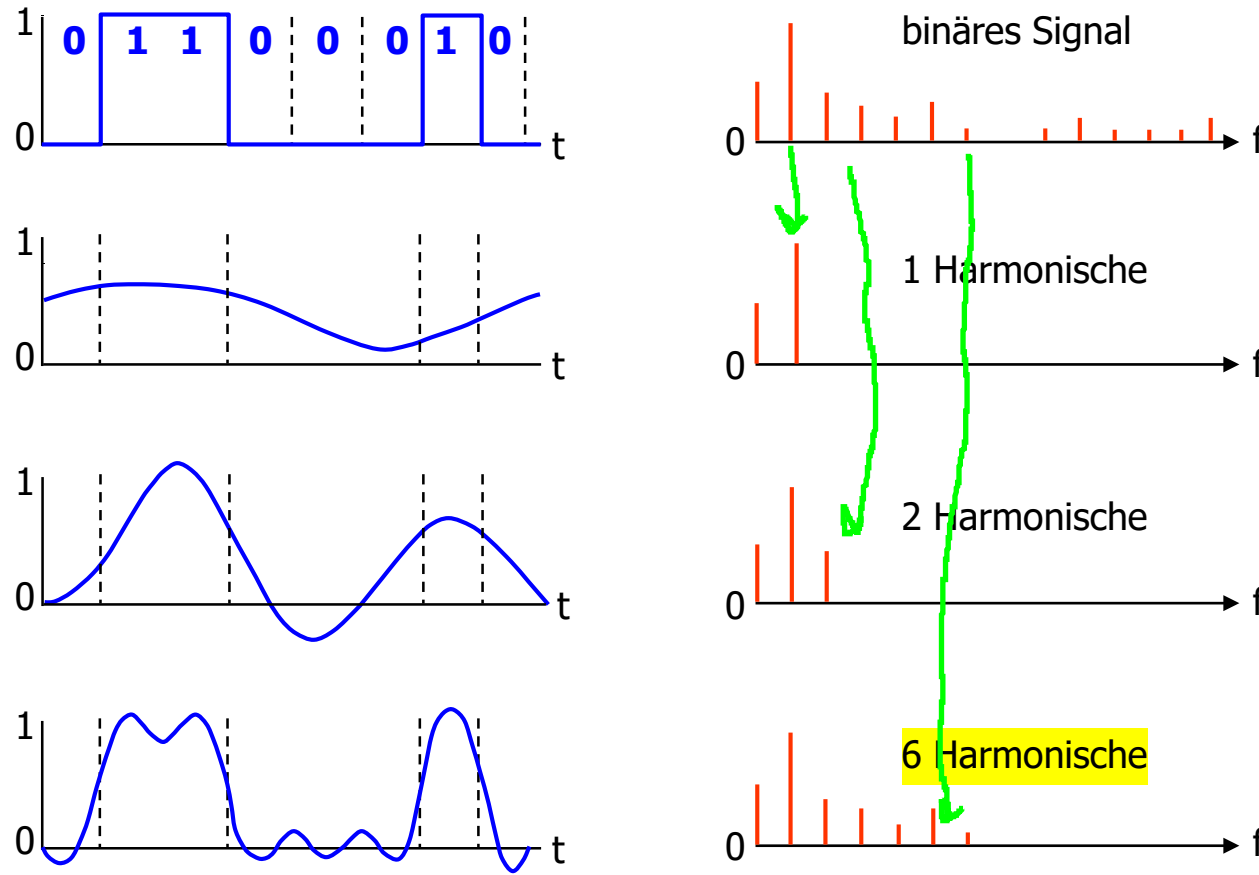
Signale und Übertragungssysteme



Quelle: Bernd Schürmann.
Grundlagen der
Rechnerkommunikation,
Vieweg Verlag, 2004.

Signale und Übertragungssysteme

■ Bsp.: Näherung einer Bitfolge durch Sinussignale



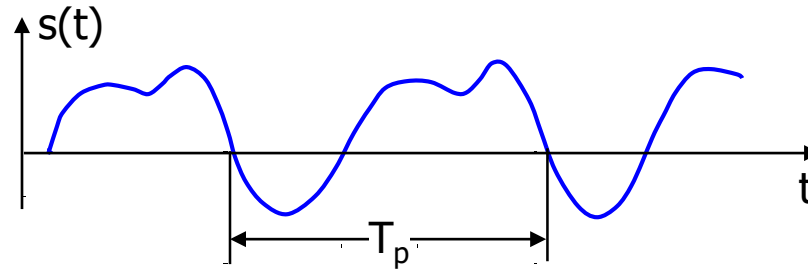
Quelle: Bernd Schürmann.
Grundlagen der
Rechnerkommunikation,
Vieweg Verlag, 2004.

Signale und Übertragungssysteme

■ Spektrum

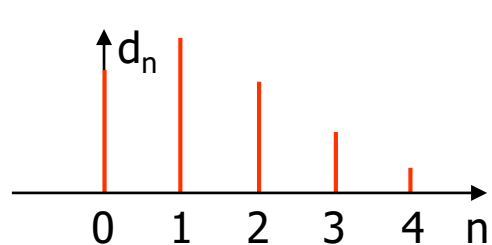
- ein periodisches Signal $s(t)$ wird eindeutig durch ein diskretes **Amplitudenspektrum** d_n und **Phasenspektrum** ϕ_n beschrieben:

Zeitbereich

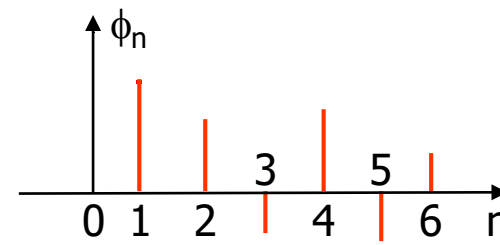


Quelle: Bernd Schürmann.
Grundlagen der
Rechnerkommunikation,
Vieweg Verlag, 2004.

Frequenzbereich



Amplitudenspektrum



Phasenspektrum

Signale und Übertragungssysteme

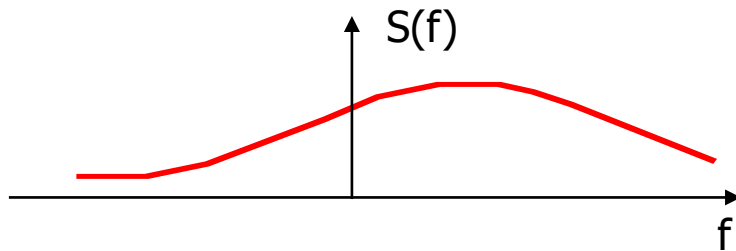
■ Fourierreihe

- zur Darstellung periodischer Signale
- Signale der Informationstechnik sind jedoch i.a. aperiodisch, endlich und beginnen zu einem bestimmten Zeitpunkt t_0

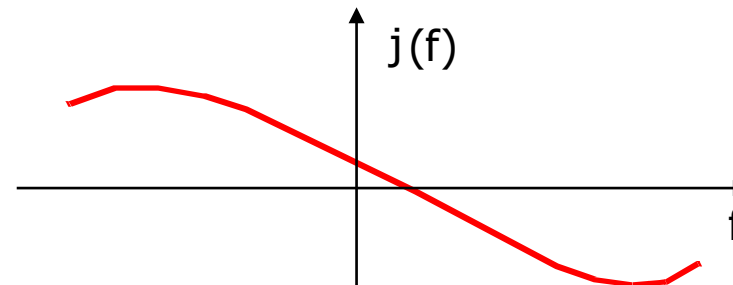
■ Fouriertransformation

- bei aperiodischen Signalen verwendet man die Fouriertransformation als Grenzfall der Fourierreihe mit $T \rightarrow \infty$
- für $T \rightarrow \infty$ gilt: aus dem Linienspektrum wird ein kontinuierliches Spektrum, Summation geht in eine Integration über

Amplitudenspektrum



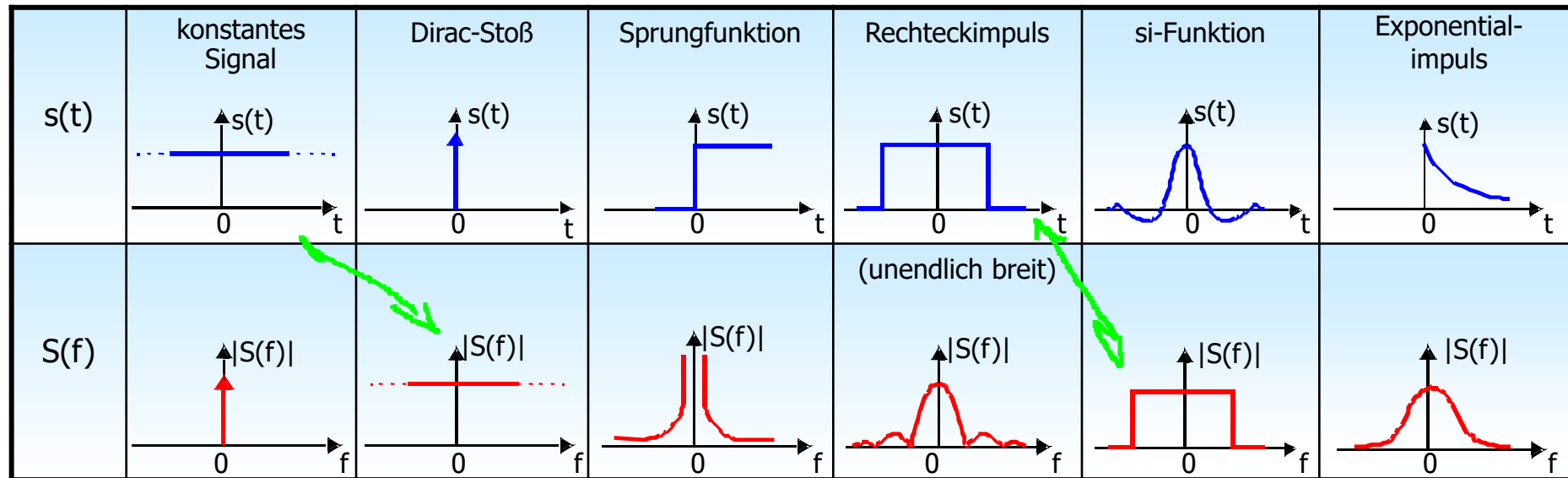
Phasenspektrum



Quelle: Bernd Schürmann.
Grundlagen der
Rechnerkommunikation,
Vieweg Verlag, 2004.

Signale und Übertragungssysteme

- einige Beispiele für Signale $s(t)$ im Zeitbereich und ihr Amplitudenspektrum $S(f)$ im Frequenzbereich



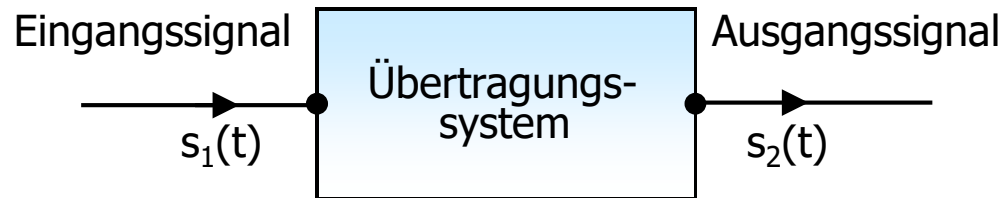
Quelle: Bernd Schürmann. Grundlagen der Rechnerkommunikation, Vieweg Verlag, 2004.

- Signale mit Impulsen und diskreten Sprüngen besitzen unendlich breites Spektrum!

Signale und Übertragungssysteme

■ Übertragungssystem

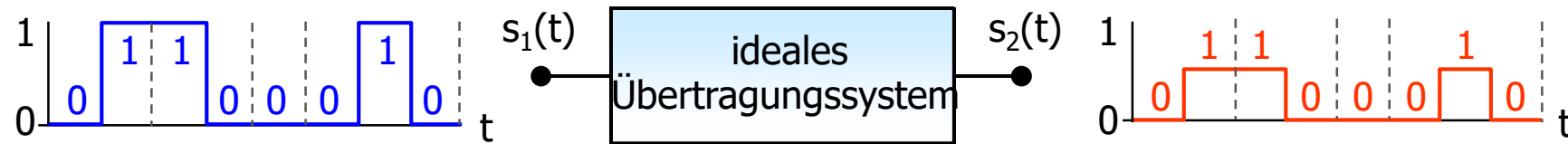
- Systemtheorie: mathematisches Modell zur Beschreibung des Übertragungsverhaltens einer komplexen Anordnung
- Transformation eines Eingangssignals $s_1(t)$ in ein Ausgangssignal $s_2(t)$



Signale und Übertragungssysteme

■ Bandbreitenbeschränkung

- jedes Übertragungssystem benötigt zur Signalübertragung Energie
- ideale Übertragungssysteme dämpfen alle Frequenzen gleichermaßen



Quelle: Bernd Schürmann.
Grundlagen der
Rechnerkommunikation,
Vieweg Verlag, 2004.

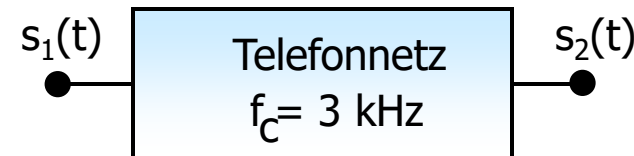
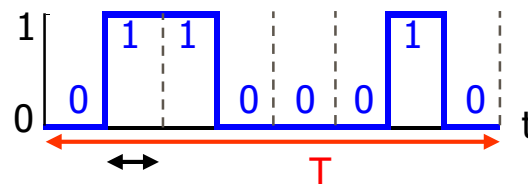
- reale Übertragungssysteme dämpfen Frequenzen unterschiedlich
- Verzerrung des Signals
- meist werden Frequenzen $0 \dots f_c$ (mehr oder weniger) unverändert übertragen und höhere Frequenzen stark abgeschwächt (\rightarrow Tiefpass)
- Gründe: Eigenschaften des Übertragungsmediums (z.B. Kupferleitung) oder Filter zur Bandbreitenbegrenzung bei Frequenzmultiplex

Signale und Übertragungssysteme

■ Beispiel: Telefonnetz

- Bandbreitenbeschränkung ca. $f_c = 3.000 \text{ Hz}$ (Frequenz der höchsten harmonischen Schwingung)
- Bitrate B in Bits/s warum heißt das hier nicht mehr R?
- Annahme: 1 Byte stellt periodisches Signal dar
- also ist $T = 8 \text{ Bits}/B$ die Zeit, um 1 Byte zu senden
- also ist $f = 1/T = B/8 \text{ Bits}$ die Frequenz der 1. harmonischen Schwingung in Hz
- alle harmonischen Schwingungen sind Vielfache von f , also ist die Anzahl der harmonischen Schwingungen wegen periodisch
 $\lfloor 3.000 \text{ Hz}/f \rfloor = \lfloor 3.000 \text{ Hz}/(B/8 \text{ Bits}) \rfloor = \lfloor 24.000 \text{ Bits}/B \rfloor$






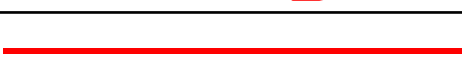
Übertragung eines Bytes



Quelle: Bernd Schürmann.
Grundlagen der
Rechnerkommunikation,
Vieweg Verlag, 2004.

Signale und Übertragungssysteme

■ Beziehung zwischen Datenrate und Anzahl der harmonischen Schwingungen:

bps	T [ms]	f [Hz] (1. Harmonische)	übertragene Harmonische	etwaiges Aussehen des Ausgangssignals
300	26,67	37,5	80	
2.400	3,33	300	10	
4.800	1,67	600	5	
9.600	0,83	1200	2	
19.200	0,42	2400	1	
38.400	0,21	4800	0	

höhere bitrate heißt

deswegen: heute breiteres Frequenzband

Quelle: Bernd Schürmann. Grundlagen der Rechnernetzwerke, Vieweg Verlag, 2004.

- je höher die Bitrate bei gegebener Bandbreite, desto weniger Frequenzen werden übertragen und desto größer ist die Verzerrung

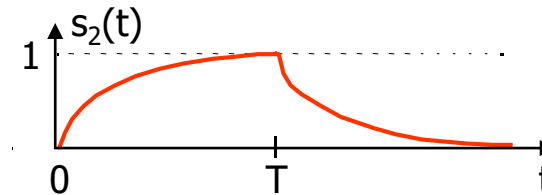
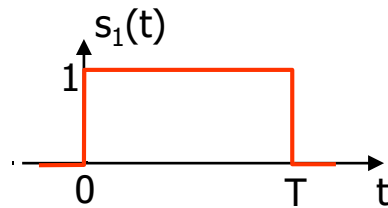
Übertragungssysteme

WENN WIR DAS NICHT MACHEN: WARUM IST DAS HIER?

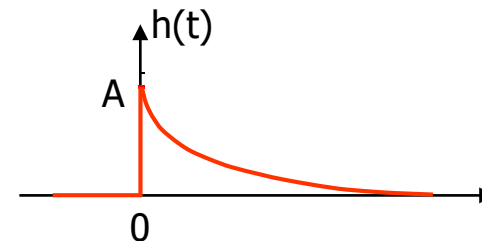
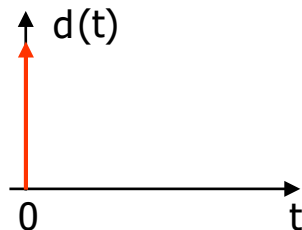
■ Faltungsintegral

- Ausgangssignal kann durch Überlagerung der Transformationen der Komponenten des Eingangssignals berechnet werden
- diese Operation entspricht im Zeitbereich dem **Faltungsintegral**:

$$s_2(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s_1(\tau) \cdot h(t - \tau) d\tau$$



- dabei ist $h(t)$ die **Impulsantwort**, die Form des Ausgangssignals für einen Impuls der Länge 0 (Dirac-Stoß):



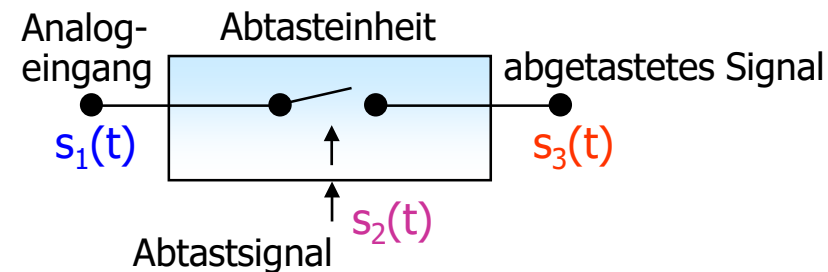
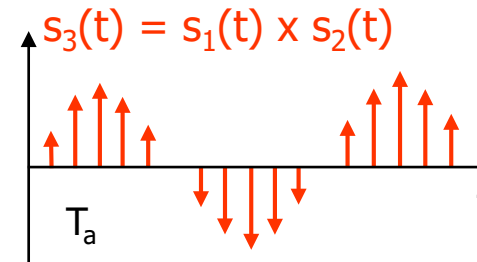
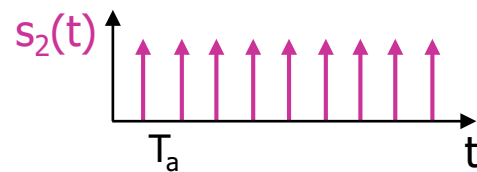
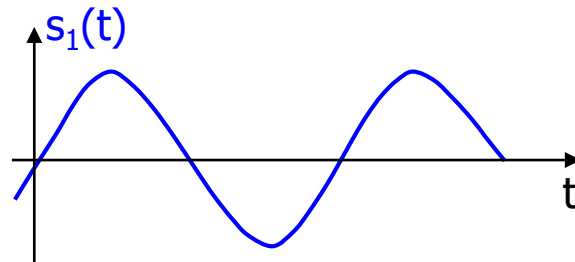
Physikalische Schicht

- ✓ Signale und Übertragungssysteme
- Maximale Datenrate
- Modulation
- Übertragung über elektrische Leiter
- Übertragung über Lichtwellenleiter
- Strukturierte Verkabelung
- Funkübertragung

Maximale Datenrate

■ Abtastung

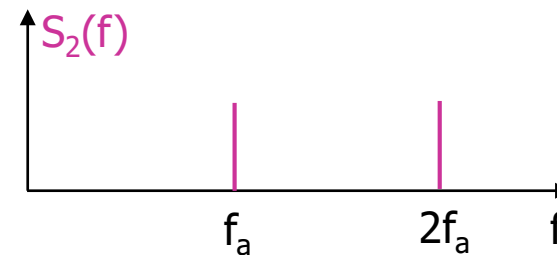
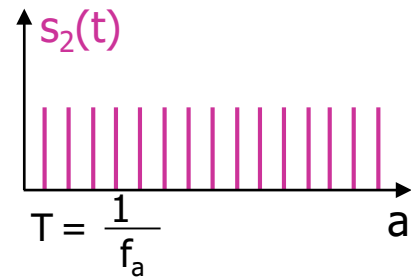
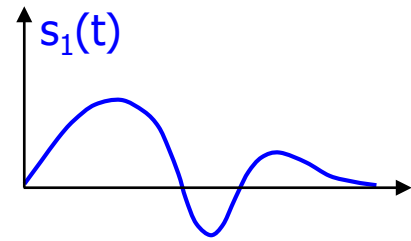
- gegeben sei ein analoges Signal $s_1(t)$, alle Schwingungen liegen innerhalb einer Frequenzbandbreite f
- dieses Signal wird mit Abtastfrequenz f_a periodisch abgetastet, entspricht Abtastsignal $s_2(t)$
- abgetastetes Signal ergibt sich aus Multiplikation $s_3(t) = s_1(t) \cdot s_2(t)$



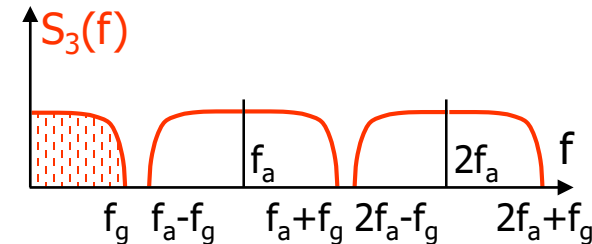
Quelle: Bernd Schürmann.
Grundlagen der
Rechnerkommunikation,
Vieweg Verlag, 2004.

Maximale Datenrate

■ Signale im Zeit- und Frequenzbereich



shannon-Nyquist



Quelle: Bernd Schürmann.
Grundlagen der
Rechnerkommunikation,
Vieweg Verlag, 2004.

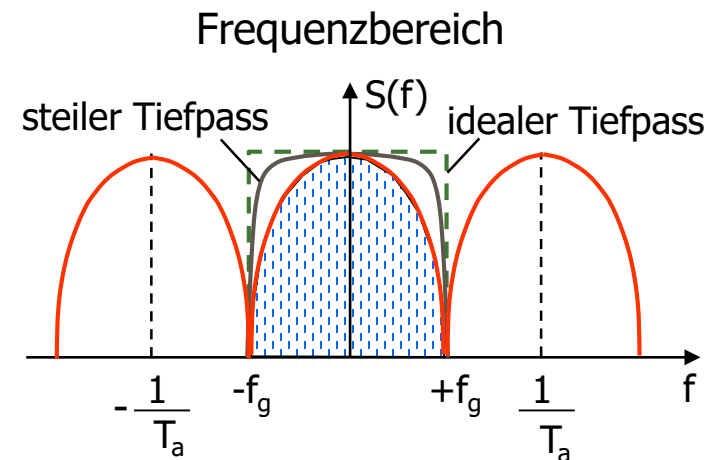
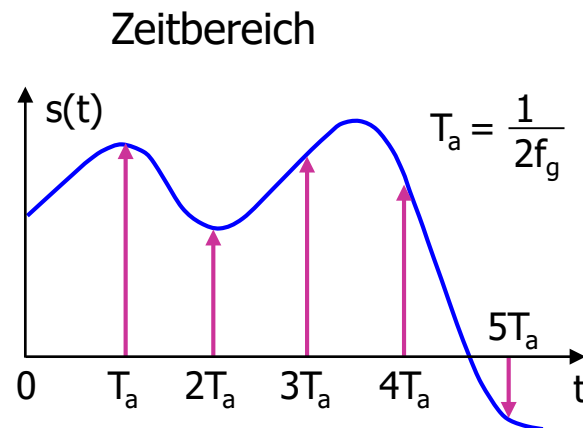
- aus dem kontinuierlichen, bandbegrenzten Signal $s(t)$ wird im Frequenzbereich durch Abtastung ein unendlich breites, in f_a periodisches Spektrum!

Maximale Datenrate

■ Abtasttheorem

- Frage: Wie groß muss die Abtastfrequenz sein, damit das (kontinuierliche) Originalsignal eindeutig (rück-)konstruiert werden kann?
- **Abtasttheorem**: Das analoge Signal $s_1(t)$ mit einem Spektrum von 0 bis f_g wird durch abgetastetes Signal $s_2(t)$ vollständig beschrieben, wenn $f_a \geq 2 \cdot f_g$ ist
- also: Abtastfrequenz f_a muss mindestens doppelte Signalfrequenz f_g sein
- Bsp.: Abtasttheorem wird genau eingehalten

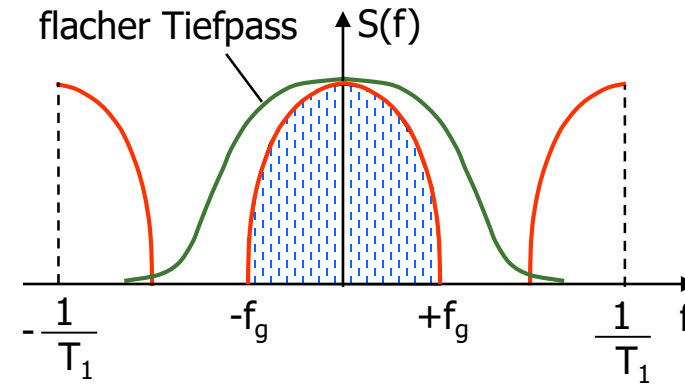
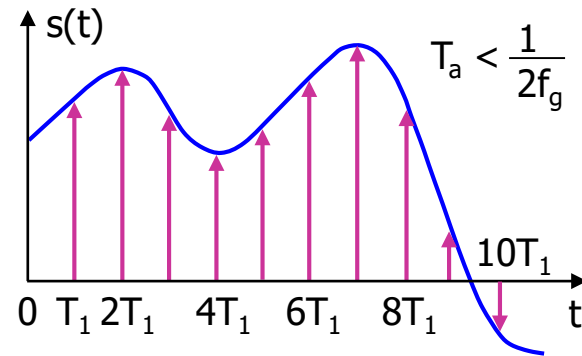
hier geht nur der ideale tiefpass, weil wir bei genau $f_a = 2f_g$ sind



Quelle: Bernd Schürmann.
Grundlagen der
Rechnerkommunikation,
Vieweg Verlag, 2004.

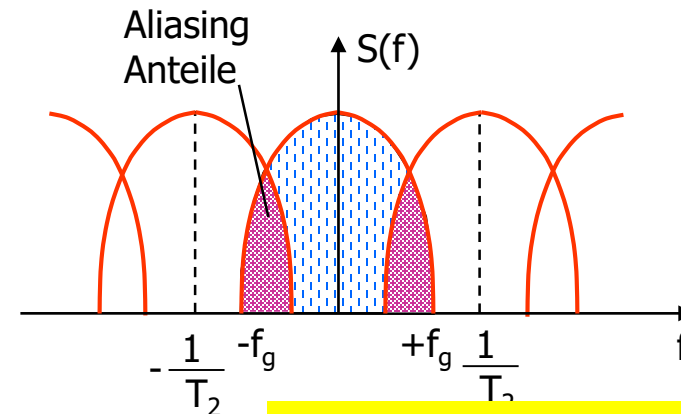
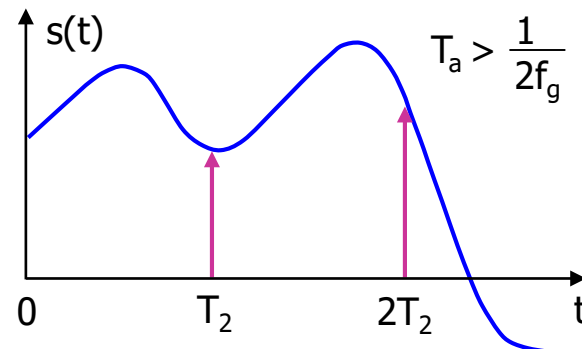
Maximale Datenrate

- je größer die Abtastfrequenz, desto größer die Abstände der Amplitudenspektren: wir haben mehr toleranz, müssen nicht



Quelle: Bernd Schürmann.
Grundlagen der
Rechnerkommunikation,
Vieweg Verlag, 2004.

- Abtastfrequenz zu niedrig \rightarrow Ausgangsspektren überlappen sich und sind nicht mehr zu trennen (Alias-Effekt)



hier überlagern sich teilsignale: nicht mehr lösbar

Maximale Datenrate

■ Maximale Datenrate eines Kanals

- Telefonbeispiel zeigt, dass Mindestbandbreite erforderlich ist, damit Empfänger das binäre Signal erkennen kann
- durch Umkehrung des Abtasttheorems kann theoretische Obergrenze für Datenrate eines Kanals abgeleitet werden

■ Nyquist-Theorem (1924)

- Abtasttheorem: Signal der Bandbreite B kann durch Abtastwerte der Frequenz $2B$ wiederhergestellt werden, mehr Abtastwerte sind unnötig (theoretisch)
- Umkehrung: Signal der Bandbreite B kann nur Abtastwerte der Frequenz $2B$ repräsentieren
- ein Signal mit V diskreten Werten repräsentiert $\log_2 V$ Bits
- also ergibt sich für einen Kanal mit Bandbreite B eine maximale Datenrate $= 2B \log_2 V$ [Bit/s]
- Bsp.: Telefon 3 kHz, 6.000 Abtastungen/s, $V = 2$, also 6 kbps $3\text{kHz} * 2 \log_2(2) = 2 * 3\text{kHz} \Rightarrow 6\text{kbps}$
- Bsp.: ISDN 4 kHz, 8.000 Abtastungen/s, $V = 256$, also 64 kbps

Maximale Datenrate

■ Shannon-Theorem (1948)

- in Wirklichkeit kann theoretische maximale Datenrate nicht erreicht werden, da durch Rauschen Störsignale entstehen
- **Rauschabstand**: Verhältnis von Signal- und Rauschleistung S/N (Signal-to-Noise-Ratio)
- übliche logarithmische Einheit: $10 \log_{10} S/N =$ Dezibel (dB)
- z.B. $S/N = 100 / 0,1 = 1000$ entspricht 30 dB
- Shannon erweiterte das Nyquist-Theorem für rauschbehaftete Kanäle: für einen Kanal mit Bandbreite B und Rauschabstand S/N ergibt sich

$$\text{maximale Datenrate} = B \log_2 (1 + S/N) \text{ [Bit/s]}$$

- Bsp.: $B = 3,4 \text{ kHz}$, $S/N = 40 \text{ dB}$, maximale Bitrate 45,2 kbps

Physikalische Schicht

- ✓ Signale und Übertragungssysteme
- ✓ Maximale Datenrate
- **Modulation**
- Übertragung über elektrische Leiter
- Übertragung über Lichtwellenleiter
- Strukturierte Verkabelung
- Funkübertragung

Modulation

■ Modulation

- Modulation: Änderung von Parametern (Amplitude, Frequenz, Phase, ...) eines Trägersignals durch ein modulierendes/aufgeprägtes Signal
- Demodulation: Rückgewinnung des modulierenden Signals aus dem modulierten Informationsträger
- Modem: Modulation und Demodulation in einer Einheit

■ Wichtige Modulationsarten

- **Analog-Analog-Wandlung**: analoges modulierendes, analoges Trägersignal, erlaubt Breitbandübertragung mit Frequenzmultiplex (z.B. analoges Fernsehsignal)
- **Digital-Analog-Wandlung**: digitales modulierendes, analoges Trägersignal (z.B. Daten über Funkkanal)
- **Analog-Digital-Wandlung**: analoges modulierendes über digitales Trägersignal (z.B. Sprache)

telefon macht aus sprache ip-pakets

Modulation

■ Verfahren zur Analog-Analog-Wandlung

● Amplitudenmodulation

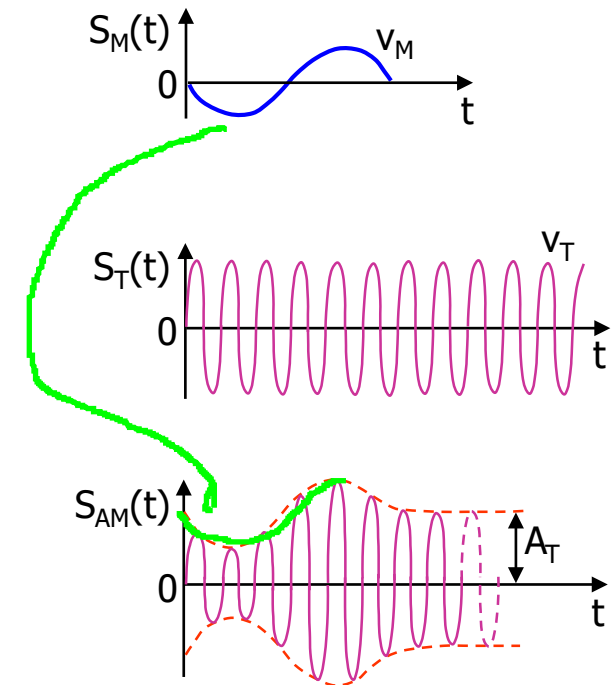
- Trägersignal $s_T(t)$ ist hochfrequente Sinusschwingung
- wird mit modulierendem Signal multipliziert: $s_{AM}(t) = s_M(t) \cdot s_T(t)$

● Frequenzmodulation

- Trägersignal wieder Sinusschwingung
- Frequenz wird moduliert

● Phasenmodulation

- Trägersignal wieder Sinusschwingung
- Phase wird moduliert



Quelle: Bernd Schürmann.
Grundlagen der
Rechnerkommunikation,
Vieweg Verlag, 2004.

Modulation

■ Verfahren zur Digital-Analog-Wandlung

- Amplitudentastung (Amplitude Shift Keying, ASK)

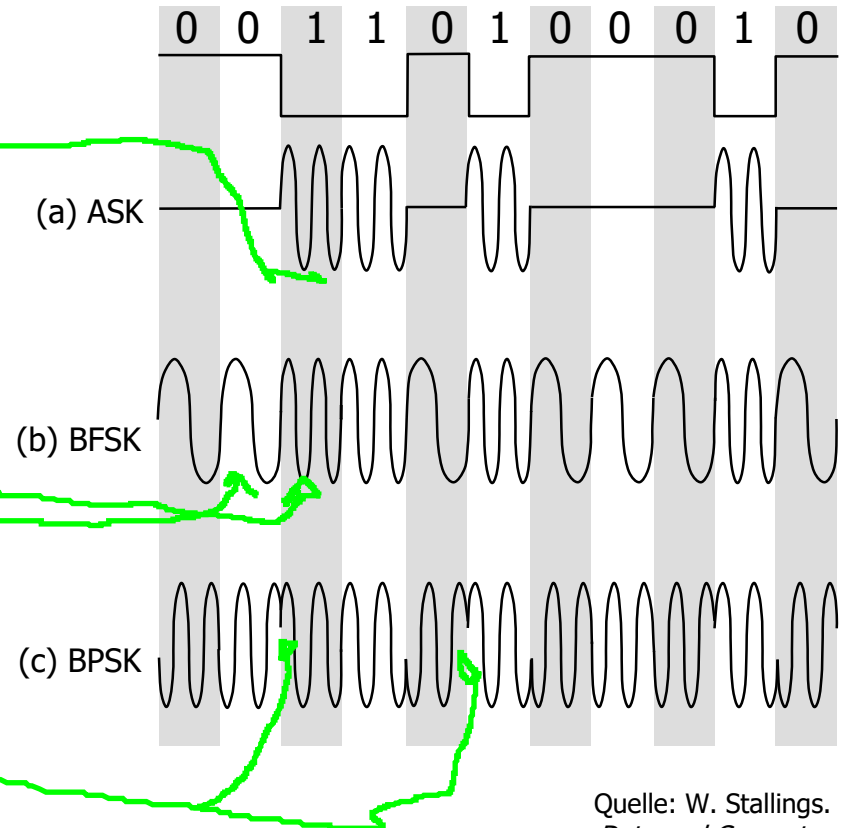
- „1“ = hohe Amplitude
- „0“ = niedrige Amplitude
- Verwendung für digitale Daten über Glasfaser

- Binäre Frequenzumtastung (Binary Frequency Shift Keying, BFSK):

- „1“ = hohe Frequenz
- „0“ = niedrige Frequenz
- geeignet für hohe Trägerfrequenzen

- Binäre Phasenumtastung (Binary Phase Shift Keying, PSK)

- „1“ = Phase 0° , „0“ = Phase 180°
- robust gegenüber Rauschen

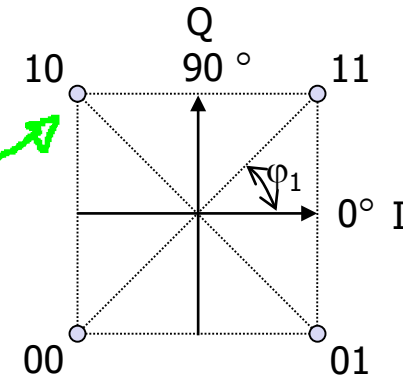


Quelle: W. Stallings.
*Data and Computer
Communications*,
10th Ed., Pearson
Education, 2014.

Modulation

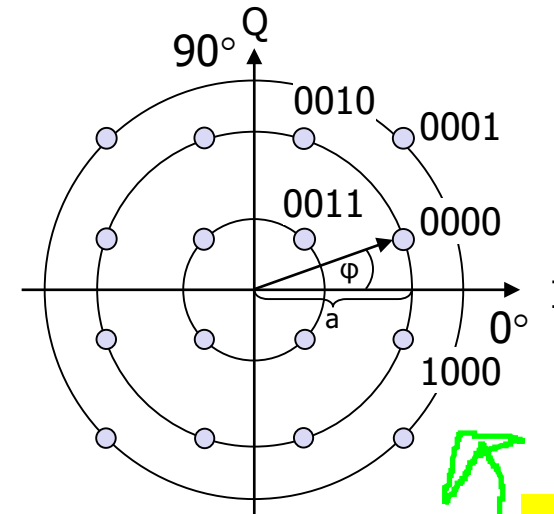
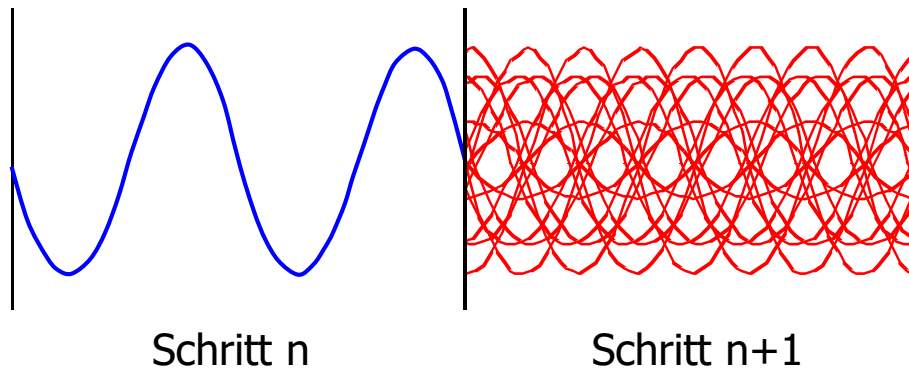
- Multiple FSK (MFSK): mehrere Frequenzen, Signalwert repräsentiert mehr als ein Bit
- Differential BPSK (DBPSK): „1“ = Phasenwechsel, „0“ = kein Wechsel, benötigt keine genaue Synchronisierung
- Quadrature PSK (QPSK)
 - Phasen $\varphi_1 = 45^\circ$, $\varphi_2 = 135^\circ$, $\varphi_3 = 225^\circ$, $\varphi_4 = 315^\circ$
 - Signalwert repräsentiert 2 Bits
 - im Phasenraum entspricht jeder Punkt einer Amplitude und Phase $\varphi_1 \dots \varphi_4$
- Multilevel PSK (MPSK)
 - Verallgemeinerung zu n Phasen
 - Signal enthält $\log_2 n$ Bits

sehr verbreitet



Modulation

- Quadraturamplitudenmodulation (Quadrature Amplitude Modulation, QAM)
 - Kombination von ASK und PSK sehr verbreitet
 - Signal kann zwischen verschiedenen Phasen und Amplituden wechseln:



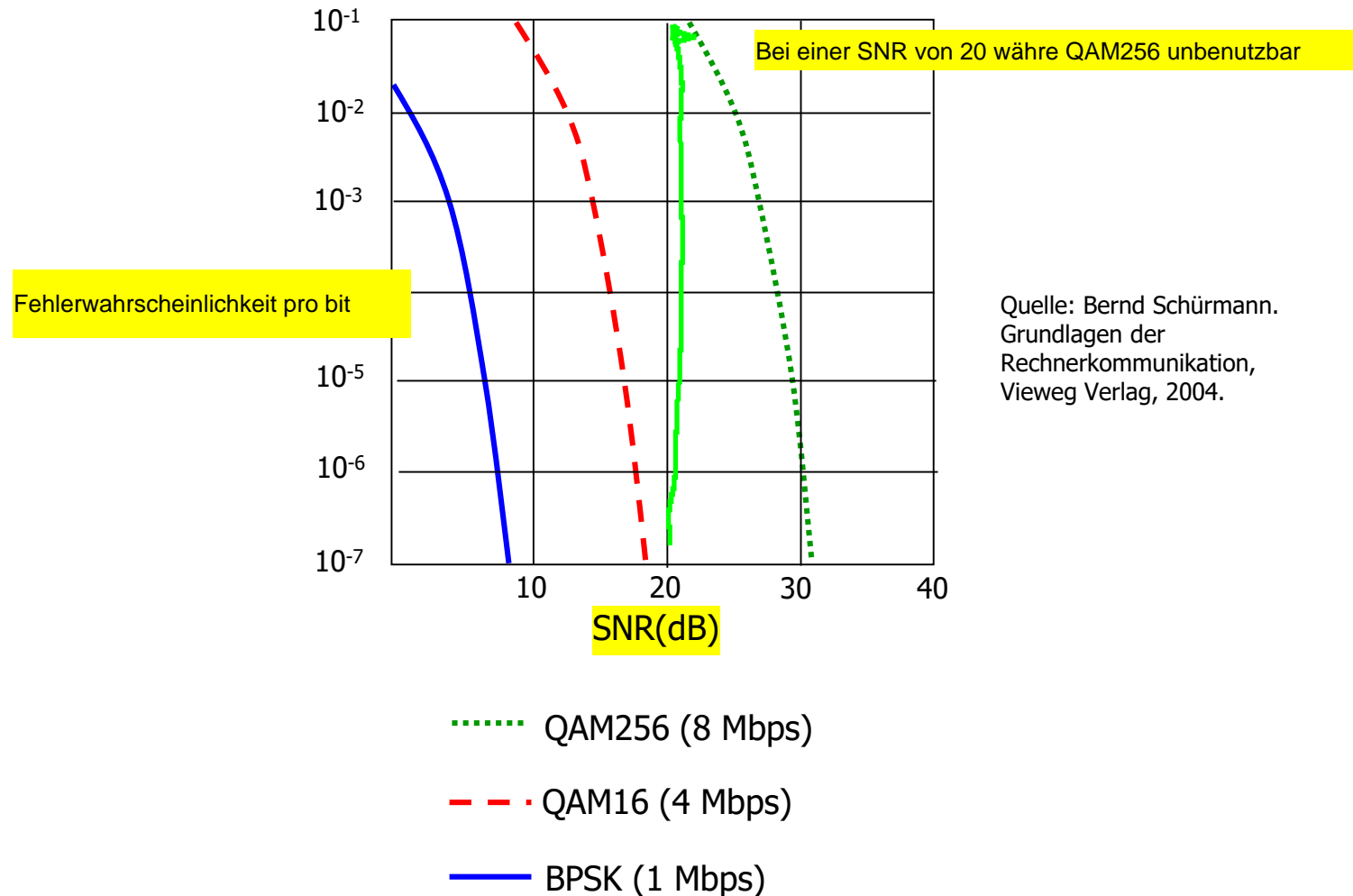
Quelle: Bernd Schürmann.
Grundlagen der
Rechnerkommunikation,
Vieweg Verlag, 2004.

- Punkte werden in gleichen Abständen im Phasenraum verteilt
- Konstellationen mit 16, 64, 256 Punkten
- verbreitete Verwendung

also rausgehen gibt mehr und im kreis laufe

Modulation

- mit Anzahl von Signalwerten steigt neben Bitrate auch die Fehlerwahrscheinlichkeit:

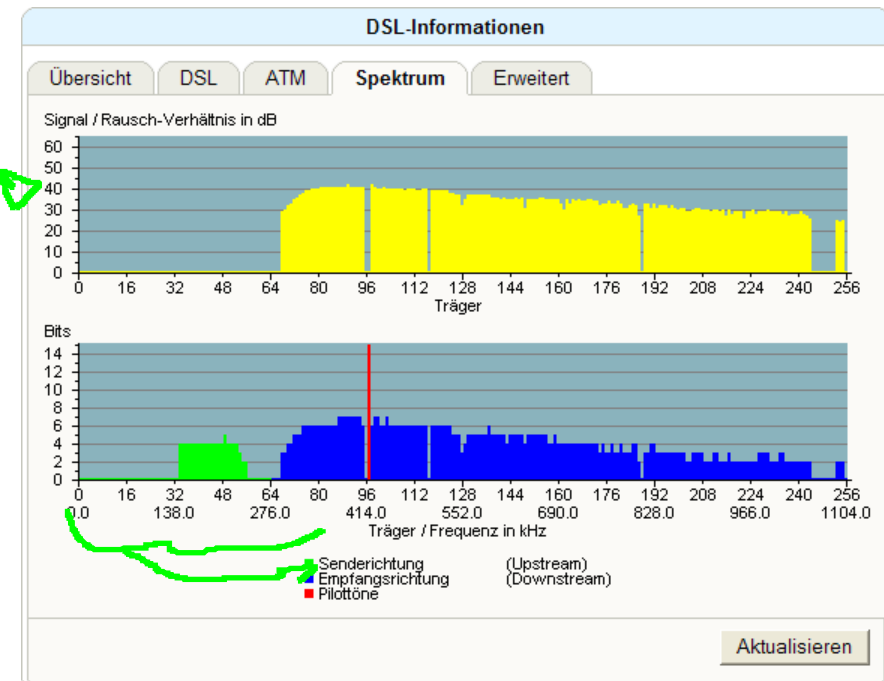


Modulation

DSL; effektiv das gleich wie OFDM

- Mehrträgerverfahren: Discrete Multitone Transmission (DMT), Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) W-Lan 5G etc
 - Frequenzband wird in Subkanäle zerteilt
 - zu übertragendes Signal wird in Symbole aufgeteilt, die in den Subkanälen parallel übertragen werden
 - Modulation in jedem Subkanal, z.B. QAM, jeweils angepasst an Rauschabstand in Subkanal
 - z.B. ADSL mit 255 Subkanälen:
 - Überlappung der Subkanäle durch orthogonale Schwingungen möglich
 - Verwendung u.a. in 802.11a/g/n/ac, Bluetooth 3.0, WiMAX, LTE, 5G
 - große Leistungssteigerung

also ob QAM256



Modulation

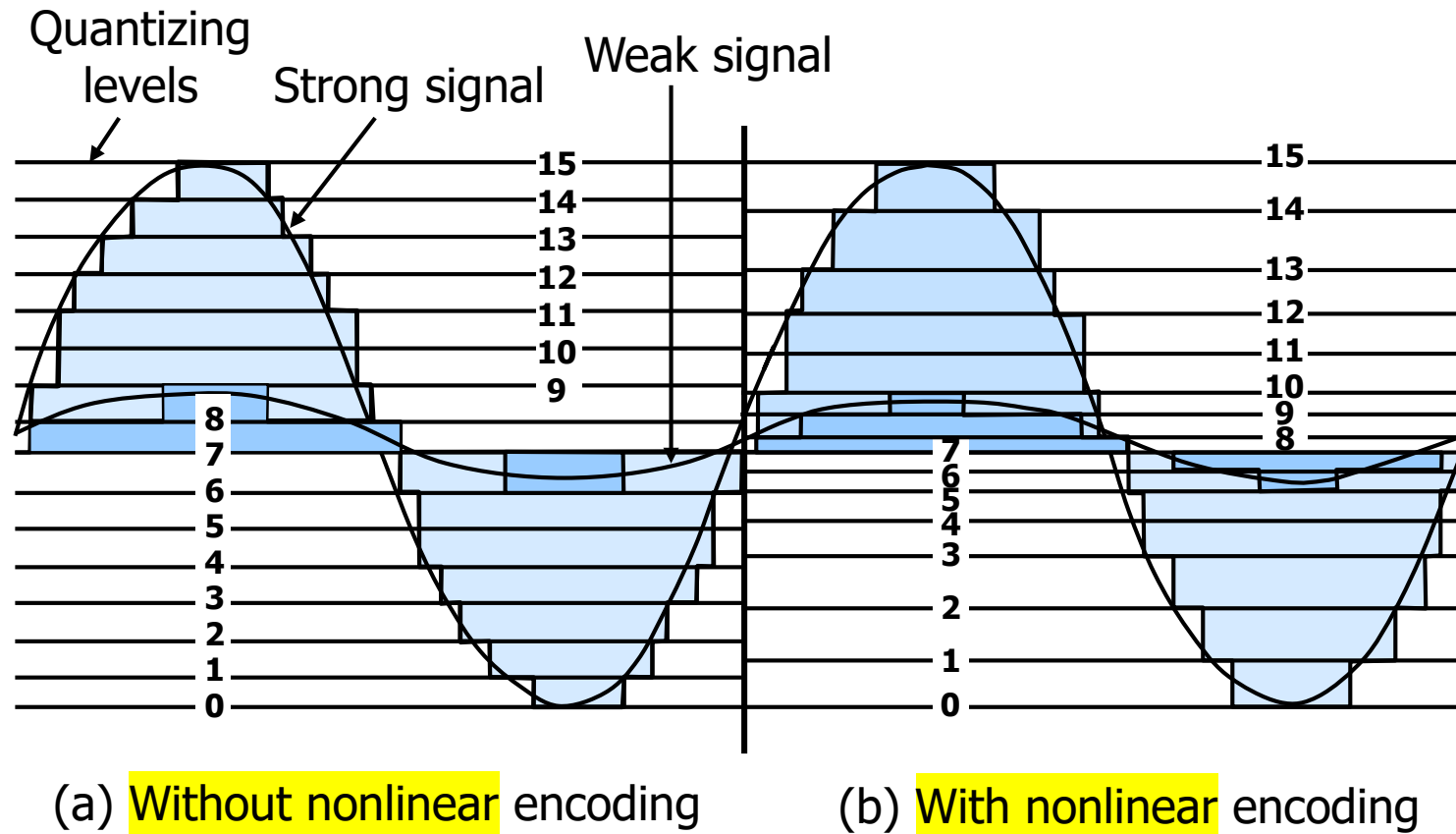
■ Verfahren zur Analog-Digital-Wandlung

● Pulscodemodulation Verbreitet bei sprache

- **Abtastung**: analoges Signal wird zu diskreten Zeitpunkten gemessen
- **Quantisierung** der Messwerte: analoge Messwerte werden in diskrete Messwerte abgebildet
- **Codierung** der quantisierten Werte: diskrete Messwerte werden in digitale Signale umgewandelt und übertragen (Pulse Codes)
- z.B. ISDN: 8 Bits alle 125 μ s, also 256 Quantisierungsstufen, 8000 Abtastungen/s, 64 kbps

Modulation

- Quantisierung mit linearer oder nicht-linearer Skala:



Quelle: W. Stallings.
*Data and Computer
Communications*,
10th Ed., Pearson
Education, 2014.

Physikalische Schicht

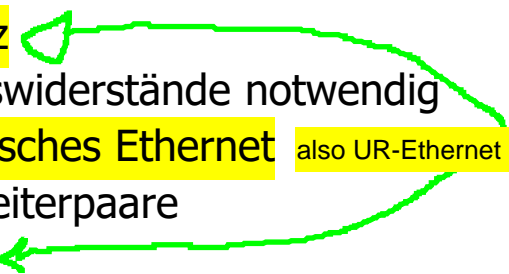
- ✓ Signale und Übertragungssysteme
- ✓ Maximale Datenrate
- ✓ Modulation
- Übertragung über elektrische Leiter
- Übertragung über Lichtwellenleiter
- Strukturierte Verkabelung
- Funkübertragung

Signalübertragung über elektrische Leitungen

■ Eigenschaften elektrischer Leiter

- **Bandbreite** (Bandwidth)
- **Wellenwiderstand** (Impedance): frequenzabhängig, komplex, für **Hochfrequenzverhalten** müssen alle Komponenten **gleichen Wellenwiderstand besitzen, um Reflexionen zu vermeiden**
- **Dämpfung** (Attenuation): Signalabschwächung durch Kabel, Differenz zwischen Sende- und Empfangspegel
- **Nebensprechen** (**Crosstalk**): Dämpfung durch andere Leiter

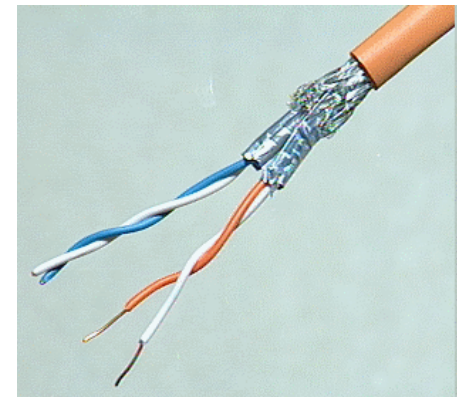
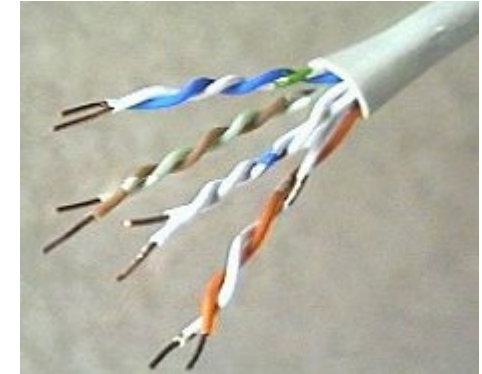
■ 2 Arten

- **Koaxialkabel**: Kupfer-Innenleiter, Kupfergeflecht-Außenleiter
 - Dämpfung ca. **0,15 dB/m bei 100 MHz**
 - Wellenwiderstand **ca. 50 Ω** , Abschlusswiderstände notwendig
 - abstrahlungsarm, Audio-/Video, **klassisches Ethernet** also UR-Ethernet
 - **Twisted-Pair-Kabel** (TP): verdrehte Kupferleiterpaare
 - Dämpfung ca. **0,05 dB/m bei 10 MHz**
 - Wellenwiderstand **100 - 300 Ω** , Abschlusswiderstände notwendig
 - **Verdrillung und Schirmung reduziert Störanfälligkeit**
 - preiswert, verbreitet
- 

Signalübertragung über elektrische Leitungen

■ Bauarten von Twisted-Pair-Kabeln

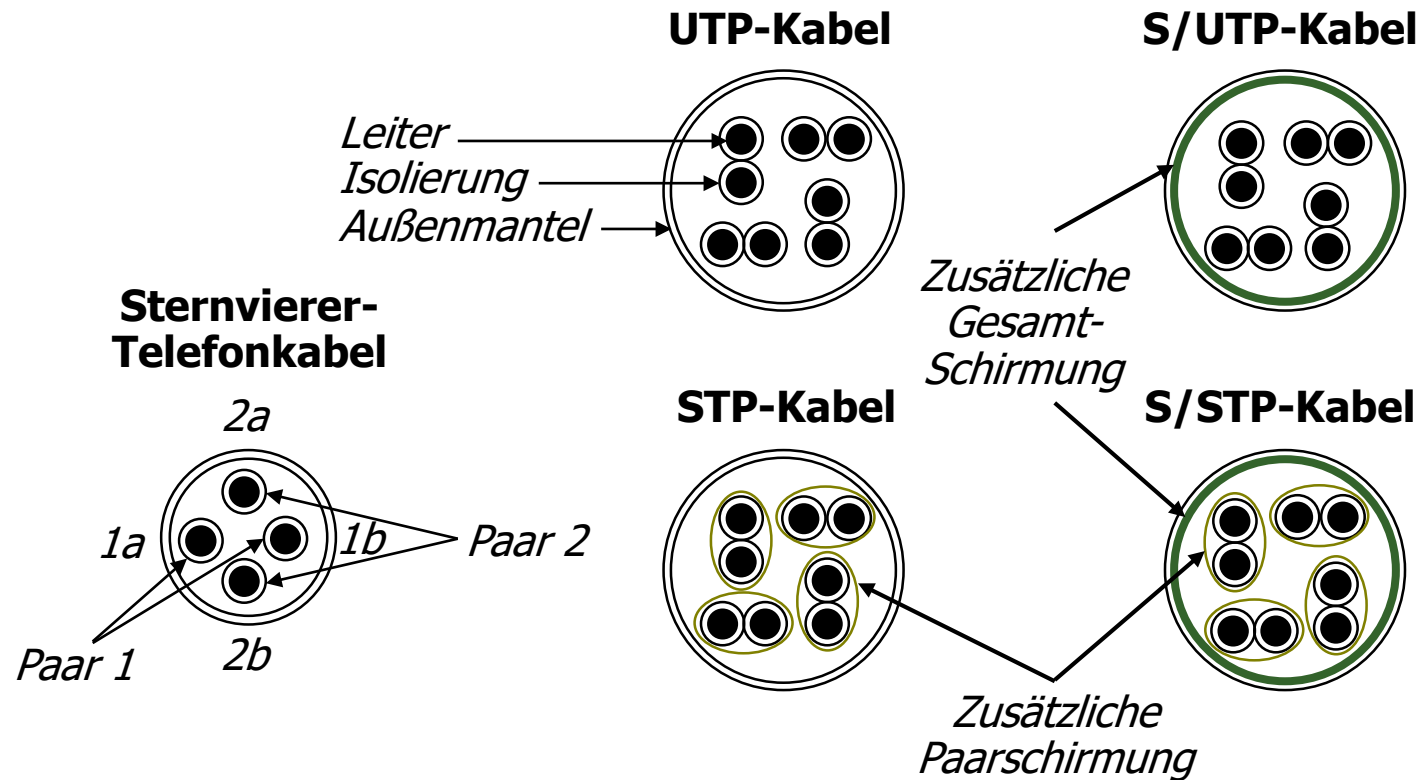
- **Sternvierer:**
2 Adernpaare, alle 4 Adern sind zu Spiralform verseilt,
keine Schirmung, klassische Telefonkabel
- **UTP (Unshielded TP):**
ungeschirmt, meist 4 einzeln verseilte Adernpaare
- **S/UTP (Screened/Unshielded TP):**
Gesamtschirm, meist 4 einzeln verseilte Adernpaare
- **STP (Shielded TP):**
ungeschirmt, meist 4 einzeln verseilte Adernpaare mit Einzelschirm
- **S/STP (Screened/Shielded TP):**
Gesamtschirm, meist 4 einzeln verseilte Adernpaare mit Einzelschirm
- **FTP (Foiled TP) bzw. S/FTP (Screened/Foiled TP):**
Schirmung aus Metallfolie



Quelle:
www.wikipedia.de

Signalübertragung über elektrische Leitungen

- Bauarten von Sternvierer- und TP-Kabeln im Querschnitt:



Quelle: J. Scherff:
Grundkurs
Computernetze, 2.
Auflage, Vieweg
Verlag, 2010.

Signalübertragung über elektrische Leitungen

■ TP-Kabelstandards

- Normen:
 - amerikanisch: TIA/EIA 568
 - europäisch: CENELEC EN 50173
 - international: ISO/IEC 11801
- Kategorie 1: UTP, bis 100 KHz, Telefon und ISDN-Hausanschluss, Datenrate $R < 1$ Mbps
- Kat 2: UTP, bis 1 MHz, ISDN-Primärmultiplexanschluss, $R \leq 4$ Mbps
- Kat 3: UTP, bis 16 MHz, Ethernet, Token Ring, $R \leq 4$ Mbps
- Kat 4: UTP, bis 20 MHz, Ethernet, Token Ring, $R \leq 16$ Mbps
- Kat 5: UTP, bis 100 MHz, Fast Ethernet, $R \leq 100$ Mbps
- Kat 5e: UTP, bis 100 MHz, Gigabit Ethernet
- Kat 6/6a: UTP, STP, bis 250 MHz, Gigabit Ethernet
- Kat 7/7a: STP, S/FTP, bis 600 MHz, 10 Gigabit Ethernet
- Kat 8: S/FTP, bis 2 GHz, 40 Gigabit Ethernet

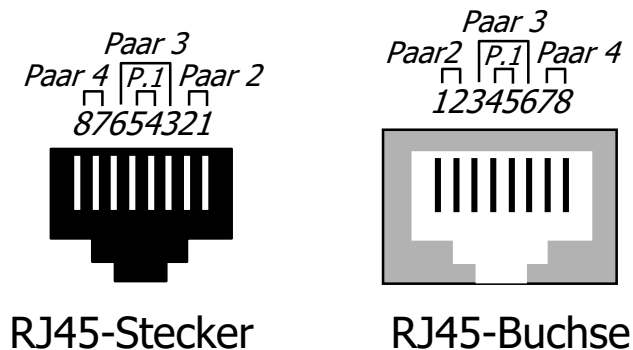
Anscheinend ist Kat 8 schon draußen...

Signalübertragung über elektrische Leitungen

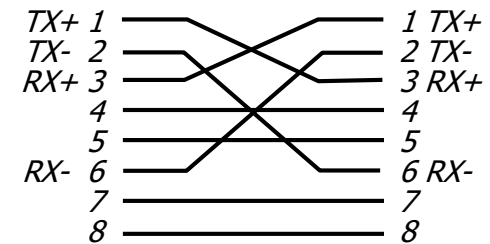
■ TP-Steckverbindungen

- RJ45 (Registered Jack Connectors, TIA/EIA 568)
- Paarbelegung unterschiedlich (z.B. Ethernet Paare 2 und 3)
 - Straight-Through-Kabel: durchgeschleift, z.B. für Anschluss an Switch
 - Crossover-Kabel: Paare 2 und 3 gekreuzt, z.B. für Verbindung von Rechnern
 - Rollover-Kabel: alle Paare paarweise gekreuzt, z.B. für Router-Konsole
- für Kat-7 und Kat-8 TP neue Steckverbindungen wg. Frequenzen

interessant, wusste ich nicht



Straight-Through-Kabel



Crossover-Kabel

Quelle: J. Scherff: Grundkurs Computernetze, 2. Auflage, Vieweg Verlag, 2010.

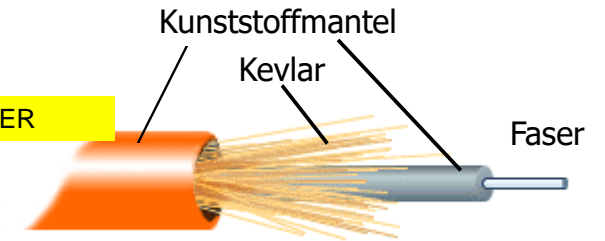
Physikalische Schicht

- ✓ Signale und Übertragungssysteme
- ✓ Maximale Datenrate
- ✓ Modulation
- ✓ Übertragung über elektrische Leiter
- Übertragung über Lichtwellenleiter
- Strukturierte Verkabelung
- Funkübertragung

Signalübertragung über Lichtwellenleiter

■ Eigenschaften von Lichtwellenleitern

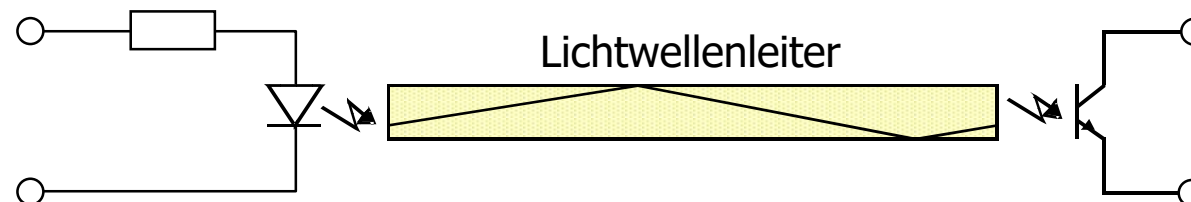
- hohe Datenübertragungsrate (Gbps) vgl Twisted pair wahr bei 10MHz 0.5db pro METER
- geringe Dämpfung (z.B. 0,5 dB/km möglich), daher große Entfernungen (mehrere 1000 km) möglich
- keine Störung durch elektromagnetische Felder, kein Nebensprechen
- geringe Bitfehlerrate
- Abhörsicherheit? Es gibt theorien, dass das möglich sein könnte von außen genug licht aufzunehmen
- Einsatz heute überall außer im Anschlussbereich



Quelle: Bernd Schürmann.
Grundlagen der
Rechnerkommunikation,
Vieweg Verlag, 2004.

■ Prinzip

- Sender wandelt elektrisches Signal mit LED/Laserdiode in optisches Signal (Amplitudenmodulation: „1“ = Puls, Frequenzmultiplex möglich)
- Empfänger wandelt optisches Signal mit Fotodiode in elektrisches Signal

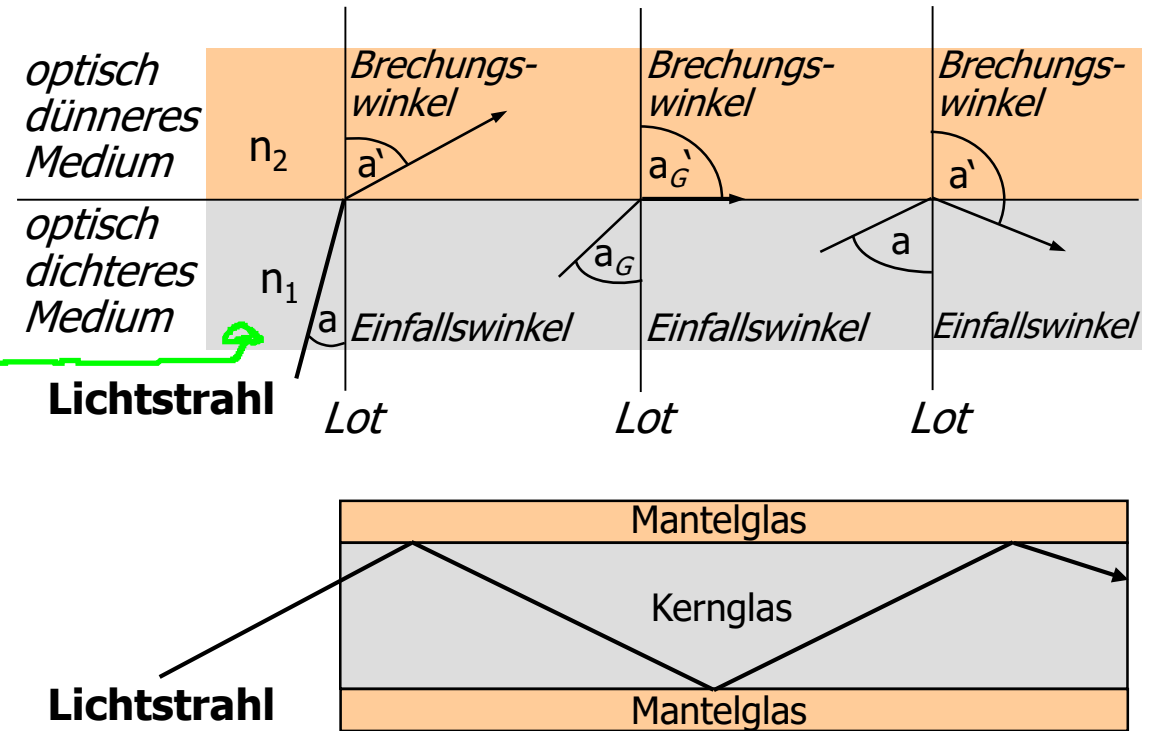


Quelle: Bernd Schürmann.
Grundlagen der
Rechnerkommunikation,
Vieweg Verlag, 2004.

Signalübertragung über Lichtwellenleiter

■ Führung des Lichtstrahls

- Kern ist optisch dichteres, Mantel optisch dünneres Medium
- Brechung zum optisch dichteren Medium
- Totalreflexion bei Einfallswinkel $>$ Grenzwinkel
- kein Licht tritt aus, Leiter „führt“ Lichtstrahl

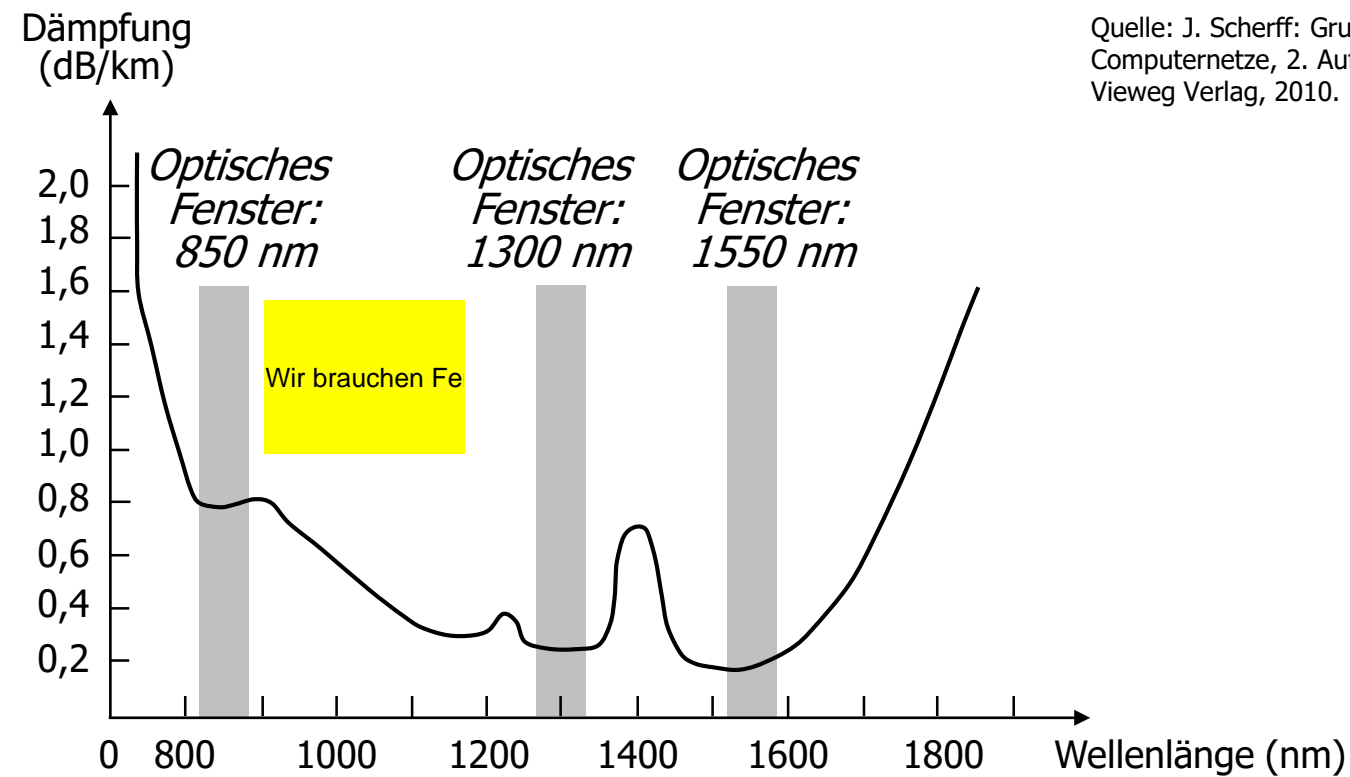


Quelle: J. Scherff: Grundkurs Computernetze, 2. Auflage, Vieweg Verlag, 2010.

Signalübertragung über Lichtwellenleiter

■ Dämpfungsverhalten von Lichtwellenleitern

- drei **optische Fenster** werden zur Signalübertragung genutzt



Quelle: J. Scherff: Grundkurs Computernetze, 2. Auflage, Vieweg Verlag, 2010.

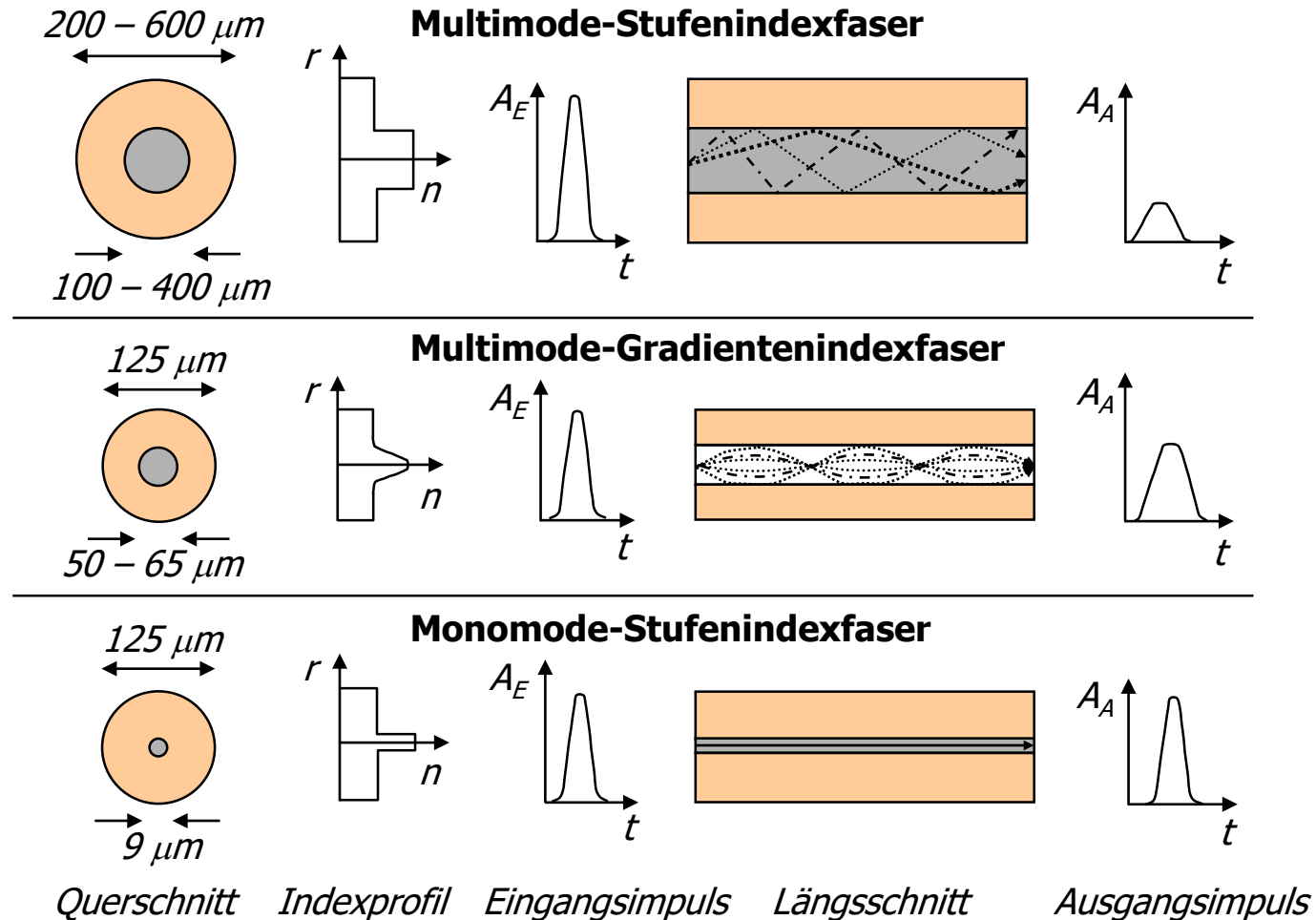
Signalübertragung über Lichtwellenleiter

■ Moden in Lichtwellenleitern

- **Modus:** Ausbreitungsweg eines Lichtimpulses, niedrig: fast parallel, hoch: zickzackförmig
- **Dispersion:** Lichtimpuls teilt sich in verschiedene Moden auf, Verschlechterung des Empfangssignals
- **Bandbreitenlängenprodukt B·l:** max. Impulsfrequenz bei Leiterlänge
 - z.B. bei 1 GHz · km sind möglich: höher frequenz oder mehr distanz.
2 GHz bei 500 m, 1 GHz bei 1 km, 500 MHz bei 2 km
- **Glasfasertypen**
 - **Multimode-Stufenindexfaser:** großer Durchmesser, sprunghafter Anstieg des Brechungsindex, $\leq 100 \text{ MHz} \cdot \text{km}$
 - **Multimode-Gradientenindexfaser:** kontinuierlich ansteigender Brechungsindex, ca. $1 \text{ GHz} \cdot \text{km}$
 - **Monomode-Stufenindexfaser:** kleiner Kerndurchmesser, stufenförmig ansteigender Brechungsindex, geringe Dispersion durch nur einen Modus, $\geq 10 \text{ GHz} \cdot \text{km}$

Signalübertragung über Lichtwellenleiter

- Überblick über die Glasfasertypen:



Quelle: J. Scherff: Grundkurs Computernetze, 2. Auflage, Vieweg Verlag, 2010.

Signalübertragung über Lichtwellenleiter

■ Verbindungstechnik und Stecker

- Spleißtechnik: punktgenaue Verbindung von Glasfasern
 - Fusions-Spleiß (Lichtbogen)
 - Klebe-Spleiß
 - Crimp-Spleiß (klemmen)
- Steckertechnik
 - Glasfasern sind am Faserende in Adernhülse (Ferrule) eingebettet, um punktgenaue Justierung beim Steckvorgang zu ermöglichen
 - Verspleißung
 - Breakoutkabel zur einfachen Montage
 - größere Vielfalt an standardisierten Steckern, z.B.
 - FSMA (Field Installable Subminiature Assembly), runder Schraubstecker, früher Standard
 - SC (Subscriber Connector), EN 50173, Anschluss Endgeräte, weit verbreitet
 - MT-RJ: soll SC ersetzen, ähnlich zu RJ45

Physikalische Schicht

- ✓ Signale und Übertragungssysteme
- ✓ Maximale Datenrate
- ✓ Modulation
- ✓ Übertragung über elektrische Leiter
- ✓ Übertragung über Lichtwellenleiter
- Strukturierte Verkabelung
- Funkübertragung

Strukturierte Verkabelung

■ Verkabelungsstandards

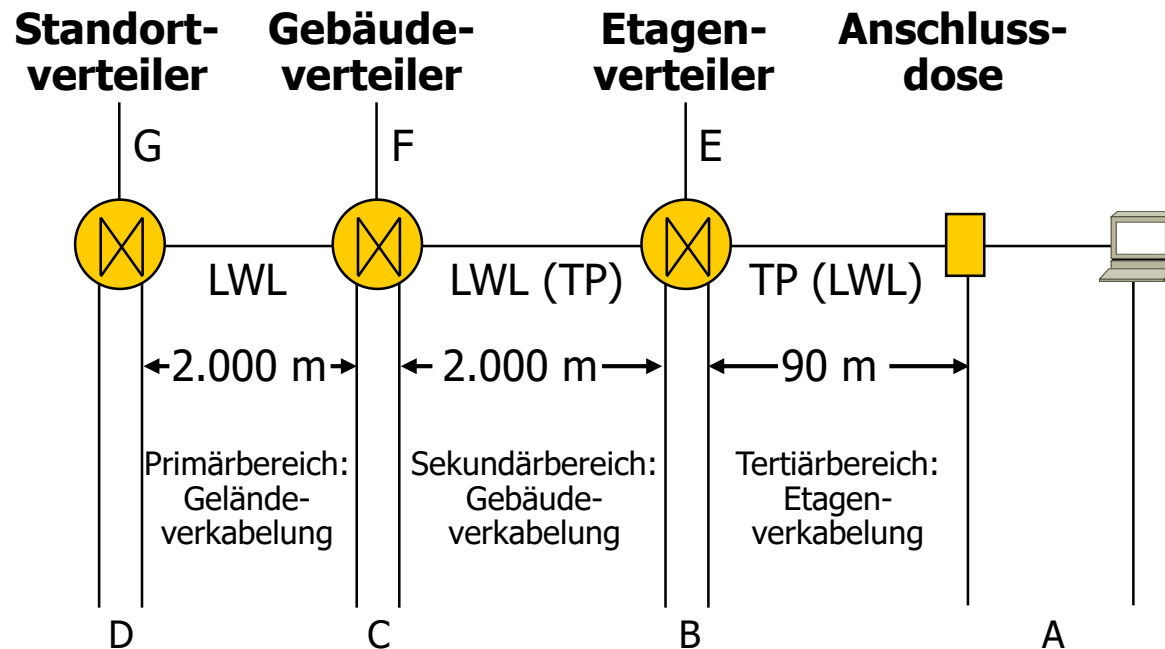
- bedarfsorientierte Verkabelung führt zu unüberschaubarer Komplexität
- Standards für strukturierte Verkabelung: ISO/IEC 11801 (1995, 2002), CENELEC EN 50173 (2007)

■ Hierarchische Verkabelungsbereiche

- **Primärbereich** (je nach LWL-Typ max. 2.000 m, Glasfaser)
 - Geländeverkabelung zwischen Gebäuden
 - Anbindung an WAN über Standortverteiler (Campus Distributor, CD)
- **Sekundärbereich** (je nach LWL-Typ max. 2.000 m, Glasfaser empfohlen, alternativ TP mit max. 100 m)
 - Gebäudeverkabelung mit zentralem Gebäudeverteiler (Building Distributor, BD)
 - Etagen über Steigleitungen
- **Tertiärbereich** (max. 90 m + 10 m, TP empfohlen, Glasfaser möglich)
 - Etagenverkabelung von Etagenverteiler an Anschlussdosen (Telecommunication Outlet, TO)
 - Geräteanschlusskabel (max. 10 m, TP)
 - Patchkabel zwischen Netzwerkkomponenten (max. 10 m, TP)

Strukturierte Verkabelung

- Verkabelungsbereiche und max. Kabellängen:



Quelle: J. Scherff: Grundkurs Computernetze, 2. Auflage, Vieweg Verlag, 2010.

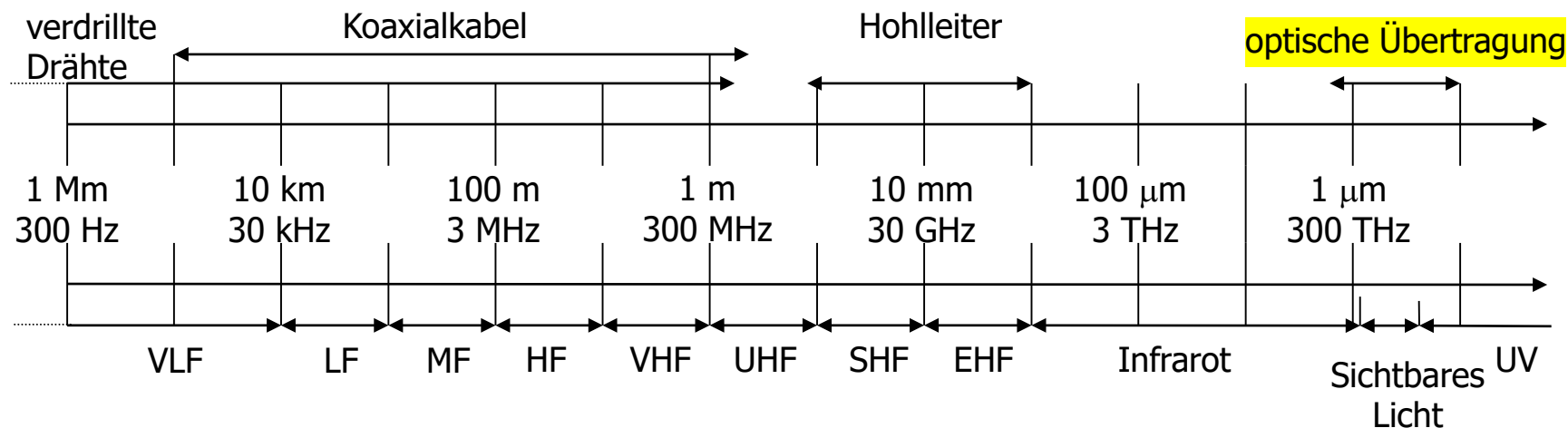
Physikalische Schicht

- ✓ Signale und Übertragungssysteme
- ✓ Maximale Datenrate
- ✓ Modulation
- ✓ Übertragung über elektrische Leiter
- ✓ Übertragung über Lichtwellenleiter
- ✓ Strukturierte Verkabelung
- Funkübertragung

Funkübertragung

■ Grundlegende Eigenschaften

- kabellose Signalübertragung durch elektromagnetische Wellen
- Frequenz f , Wellenlänge λ , Lichtgeschwindigkeit $c = 300.000 \text{ km/s}$
- Zusammenhang: $c = \lambda \cdot f$
- z.B. 50 Hz u. 6.000 km, 1 MHz u. 300 m, 300 MHz u. 1m, 1 GHz u. 30 cm
- regulierte Zuteilung der Funkfrequenzen (internat. ITU-R, USA FCC, Deutschland Bundesnetzagentur)
- Industrial, Scientific, Medical (ISM): 3 Bänder, die mit allgemeiner Zulassung verwendet werden können, bei 433 MHz, 2,4 GHz, 5 GHz → auch relevant für WLAN
- elektromagnetisches Spektrum:



Funkübertragung

■ Für Datenkommunikation relevant

● Radiowellen

- $f \approx 10 \text{ kHz} \dots 10 \text{ MHz}$
- omnidirektionale Ausbreitung, Gbps möglich
- große Entfernungen, Durchdringung von Hindernissen, störanfällig (z.B. Regen)

● Mikrowellen

- $f \approx 10 \text{ MHz} \dots 1 \text{ GHz}$: omnidirektionale Ausbreitung, Einsatz für PANs und LANs
- $f \approx 1 \text{ GHz} \dots 100 \text{ GHz}$: geradlinige Ausbreitung möglich, Einsatz im Nahbereich und für Richtfunkstrecken und Satellitenübertragung, mehrerer 100 Gbps möglich

● Infrarot

- $f \approx 3 \cdot 10^{11} \text{ Hz} \dots 2 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$, geradlinige Ausbreitung, Gbps möglich, bis ca. 1 km, Einsatz im Nahbereich und für optische Richtfunkstrecken, benötigt Sichtverbindung

Funkübertragung

■ Funksysteme

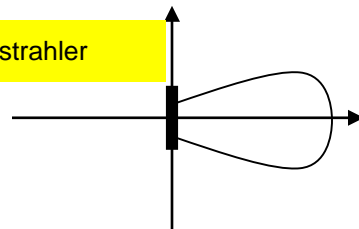
- terrestrischer Funk: auf Erdoberfläche
 - Rundfunk (Radio + Fernsehen): Broadcast, Radiowellen, Sendereichweite 50 km bis zu Erdumrundung
 - Mobilfunk (Telefonie, Daten): Funksysteme mit Zellen und mobilen Teilnehmern, Anbindung an Vermittlungssystem über Basisstationen
 - Richtfunk: Verbindung von Gebäuden durch Richtfunkstrecken, optisch oder durch Mikrowellen
- Satellitenfunk
 - als Fernmelde- (Daten, Sprache, Video) oder Fernsehsatelliten
 - Nutzung von Mikrowellen, höhere Frequenzbereiche
 - geostationär (ca. 36.000 km Höhe, 270 ms Latenz), MEO (medium earth orbit), LEO (low earth orbit)

Funkübertragung

■ Antennen

- Abstrahlung und Aufnahme elektromagnetischer Felder
- **isotroper Punktstrahler** (theoretische Bezugsantenne)
 - strahlt Wellen kugelförmig aus
 - Leistung auf konzentrischen Kugeln gleich
 - **Dämpfung**: Oberfläche $4\pi r^2$, Leistungsdichte S nimmt also mit $1/r^2$ ab
- **reale Antennen**
 - z.B. Dipol, Parabol
 - besitzen **Hauptstrahlrichtungen**
 - Antennengewinn **G**: Verhältnis Leistungsdichte in Hauptstrahlrichtung zu isotropem Punktstrahler

also wie nah ist das am idealen punktstrahler



gerichtete
Antenne



Quelle: Jochen H. Schiller,
Vorlesungsunterlagen "Mobile
Communications", FU Berlin

Funkübertragung

■ Rauschen

- Summe aller Störeffekte, die nur mit statistischen Methoden beschreibbar sind
- z.B. atmosphärische Strahlung, thermisches Rauschen in Empfängerelektronik, Ungenauigkeiten bei Analog-/Digitalwandlung
- verbreitetes Modell: Additive White Gaussian Noise (AWGN)
- Varianz der Gauß-Verteilung ergibt Rauschleistungsdichte N
- verbreitetes Maß: Signal-to-Noise-Ratio $SNR = S/R$

Funkübertragung

■ Interferenz

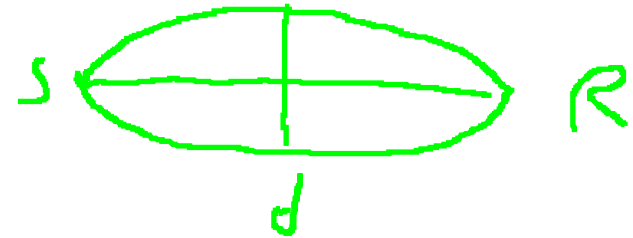
- Signale, die aufgrund nicht perfekter räumlicher, zeitlicher oder spektraler Trennung das Nutzsignal störend überlagern
 - Intersysteminterferenz: von anderen Systemen
 - Intersymbolinterferenz (ISI): durch Verschiebung aufeinanderfolgender Symbole beim Empfänger
- Ursachen
 - Abschattung durch Hindernisse
 - Spiegelung (Reflexion) an Flächen größer als Wellenlänge
 - Beugung (Diffraction) an scharfen Kanten
 - Streuung (Scattering) an kleinen Hindernissen
 - Brechung (Refraction) in Abhängigkeit der Dichte eines Mediums
 - Dopplereffekt bei mobilem Sender/Empfänger
- Abhilfe: Diversitätstechnologien (Zeit, Frequenz, Raum)

Funkübertragung

■ Ausbreitung über Sichtverbindung (Line-of-Sight, LOS)

- typisch bei Richtfunkübertragung
- Dämpfung i.w. gleich der Freiraumausbreitungsdämpfung, andere Interferenzen nicht signifikant
- **Fresnelzone**: Ellipsoid um direkte Verbindung zwischen Sender und Empfänger mit Abstand d , breiter Durchmesser

$$D_{Fresnel} = \sqrt{d \cdot \lambda}$$



- Bedingung für LOS-Verbindung: Ellipsoid mit Durchmesser $D = 0,6 \cdot D_{Fresnel}$ ist frei von Hindernissen
- Dämpfung der Empfangsleistung:


$$P_{Rx} = P_{tx} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_{Tx} G_{Rx} = P_{tx} \left(\frac{c}{4\pi d f} \right)^2 G_{Tx} G_{Rx}$$

→ quadratisch in Abstand und Frequenz

Kugelfläche idealquadratisch mit

Funkübertragung

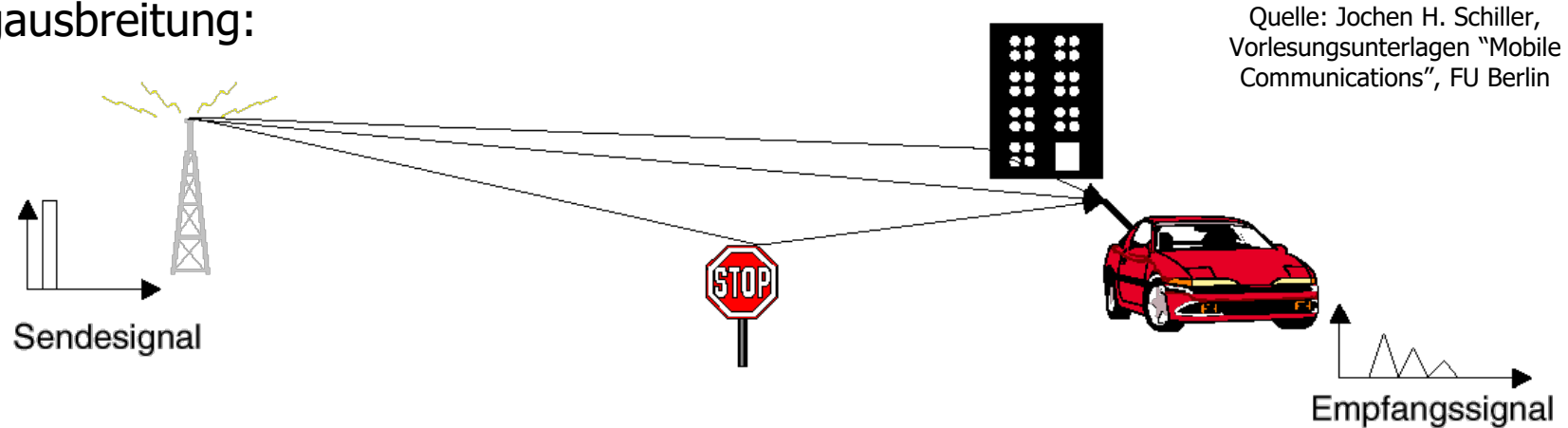
■ Ohne Sichtverbindung (Non-Line-of-Sight, NLOS)

- typisch bei Mobilkommunikation mit Benutzermobilität
- mittlere Übertragungsdämpfung durch Hindernisse größer als bei Freiraumübertragung, proportional d^g mit $2 \leq g \leq 5$
- Abschattungsämpfung
 - zusätzliche variable Dämpfung durch Hindernisse wie Gebäude, Berge
 - langsamer Schwund (Slow Fading) 
- Mehrwegausbreitung
 - durch Reflexion, Beugung und Streuung entstehen unterschiedliche Ausbreitungswege zum Sender
 - diese sind phasenverschoben und überlagern sich beim Empfänger
 - hierdurch kann Signal zeitweise stark abgeschwächt werden
 - schneller Schwund (Fast Fading)

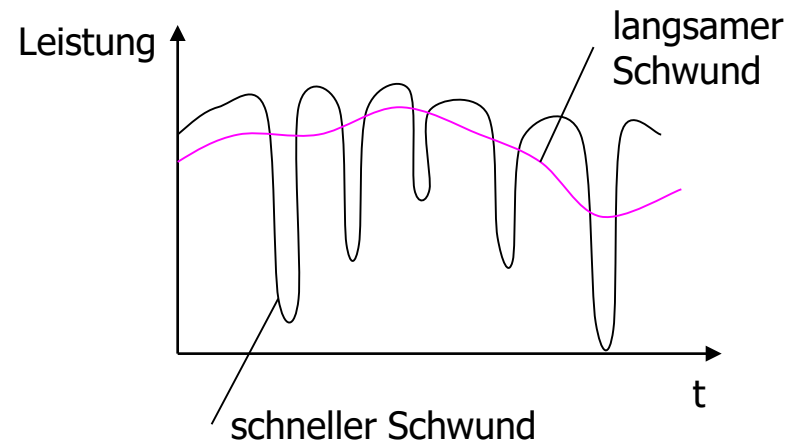
abhängig von bewegung, also zeitabhängig, aber l

Funkübertragung

- Mehrwegausbreitung:



- typischer Verlauf der Signalstärke bei einem Empfänger in Bewegung:



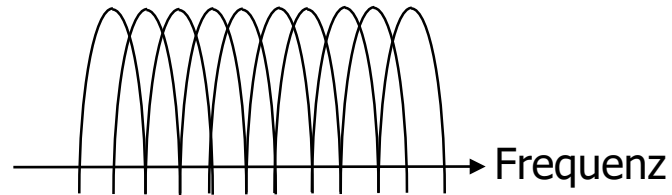
wir haben auslöschung durch selbst-interferenz

Quelle: Jochen H. Schiller,
Vorlesungsunterlagen "Mobile
Communications", FU Berlin

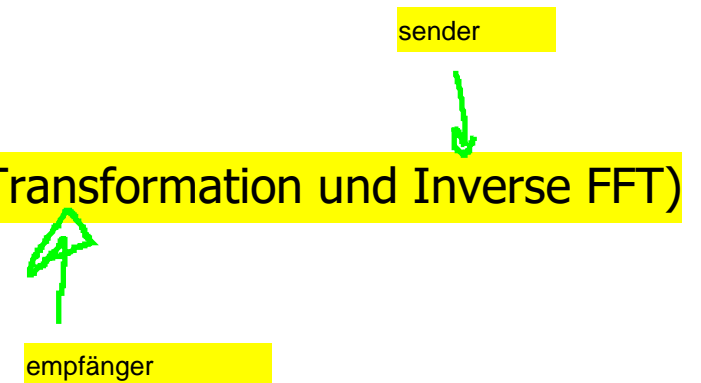
Funkübertragung

■ Mehrträgerverfahren: Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

- zu übertragendes Signal wird wie bei QAM in Symbole aufgeteilt
- je N Symbole werden so auf höhere Frequenzen moduliert, dass die Signale orthogonal zueinander sind (Integral des Produkts gleich 0)
- diese N Signale werden in parallelen Subkanälen übertragen



- durch Orthogonalität können Subkanäle enger liegen als bei FDM
- damit verringert sich Bitrate pro Subkanal und damit ISI
- realisiert durch fortgeschrittene Signalverarbeitung (Fast Fourier Transformation und Inverse FFT)
- Adaptivität an Störverhältnisse im Subkanal möglich
- insgesamt große Leistungssteigerung bei kleiner Fehlerrate
- auch als Multiplextechnik: Kombination von Signalen, OFDMA



Funkübertragung

■ Multi-Antennentechnik

- Anordnung mehrerer Sende- bzw. Empfangsantennen ($N \times M$), z.B. $N, M = 2, 4, 8$, Abstand in Größenordnung mehrerer Wellenlängen
- ermöglicht Erhöhung der Zuverlässigkeit, Kapazität, Energieeffizienz, Reduktion der Interferenz
- **Spatial Diversity**: Erhöhung der Zuverlässigkeit durch Überlagerung der gleichen Signale verschiedener Antennen
- **Spatial Multiplexing**: Erhöhung der Kanalkapazität durch parallele Übertragung zwischen verschiedenen Antennen, **Multiple Input Multiple Output (MIMO)**
- **Beamforming**: jede Sendeantenne sendet gleiches Signal mit jeweils leichtem Phasenversatz, dadurch **konstruktive Interferenz** in Hauptstrahlrichtung, **destruktive Interferenz** in anderen Richtungen, analog zum Empfang aus Haupteinfallrichtung, Abstand in Größenordnung einer Wellenlänge benötigt
wir schmeißen also alles außer die Hauptrichtung raus
- **Massive MIMO**: einige 100 oder 1000 Sendeantennen, einige 10 Empfänger

Funkübertragung

■ Ultrabreitband (Ultra-Wideband, UWB)

- Übertragung von sehr kurzen Impulsen (z.B. 1 ns) mit sehr großer Bandbreite (> 500 MHz) z.B. im 2,4-GHz-ISM-Band
- diese erreichen fast Rechtecksignal und benötigen deswegen großes Spektrum, für das aber kleine Leistung reicht (ähnlich wie Rauschen)
- ermöglicht große Datenraten (> 500 Mbps) über kurze Entfernungen, Hindernisse (wie Wände) können durchdrungen werden
- Entfernungsmessung auch möglich

6

Funkübertragung

■ Beispiele für die Verwendung von Funktechnologie

- GSM
 - FDMA+TDMA, GMSK (Gauss-Filter+FSK), 900 MHz, 13 Kbps/Kanal
 - EDGE: 8PSK 69,2 Kbps/Kanal
- UMTS, Release 99: CDMA-DSSS, QPSK, bis 384 Kbps/Kanal
- HSPA+: 64-QAM und MIMO bis zu 337,5 Mbps (DL), 23 Mbps (UL)
- LTE: OFDM und MIMO bis zu 300 Mbps (DL), 75 Mbps (UL) also zurück zu besserem Frequenzmultiplex
- LTE-Advanced: OFDM und MIMO bis zu 3 Gbps (DL), 1,5 Gbps (UL)
- 5G: OFDM und Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA), 20 Gbps absolute spitze
- WLAN
 - 802.11-1997: DSSS, DQPSK, 2,4 GHz, bis 2 Mbps
 - 11g-2003: DSSS, OFDM, 2,4 GHz, bis 54 Mbps
 - 11n: OFDM bis 100 Mbps, MIMO bis 600 Mbps
 - 11ad: OFDM bis 6,76 Gbps
- Bluetooth
 - 802.15.1: FHSS, GFSK, 2,4 GHz, bis 723,2/57,6 Kbps (ursprünglich, diverse weitere Varianten)
- ZigBee
 - 802.15.4: DSSS, BPSK bei 868 MHz (20 Kbps) und 915 MHz (40 Kbps), QPSK bei 2,4 GHz (250 Kbps)