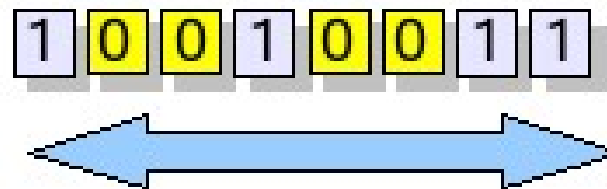


Rechnernetze

Kapitel 2: Grundlagen der Datenübertragung

Hochschule Ulm
Prof. Dr. F. Steiper



Rechnernetze, INF2, 2022

- *Urheberrechte*

- *Die Vorlesungsmaterialien und Vorlesungsaufzeichnungen zum Kurs „Rechnernetze (INF2)“ dürfen nur für private Zwecke im Rahmen Ihres Studiums an der Technischen Hochschule Ulm genutzt werden.*
- *Eine Vervielfältigung und Weitergabe dieser Materialien in jeglicher Form an andere Personen ist untersagt.*
- *© Copyright. Frank Steiper. 2022. All rights reserved*

2.1 Physik der Datenübertragung

- *Fourieranalyse*

[Ref 2] Kapitel 2, Seite 121-125

- ▶ *Jede periodische Funktion $g(t)$ der Zeit t mit der Periode T kann als Überlagerung von Sinus- und Cosinustermen dargestellt werden*

$$g(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(\omega_n t) + b_n \sin(\omega_n t)]$$

- ▶ *a_n und b_n sind die sogenannten Fourierkoeffizienten mit $\omega_n = 2\pi n/T$*

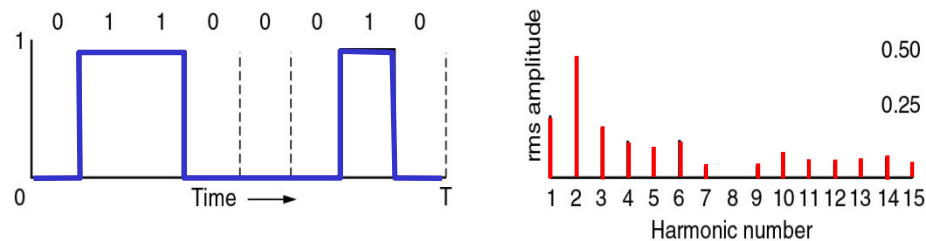
$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \cos(\omega_n t) dt \quad \text{für } n=0,1,2,\dots$$
$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \sin(\omega_n t) dt \quad \text{für } n=1,2,\dots$$

- ▶ *Es werden Wellen mit immer höheren Frequenzen $f_n = n/T$ addiert*
 - *Der n -te Summand heißt n -te Harmonische*
 - *Ist $g(t)$ der Spannungsverl. eines elektr. Signals, dann ist die Summe $(a_n^2 + b_n^2)$ proportional zur Leistung, die bei der zugehörigen Frequenz f_n übertragen wird*

2.1 Physik der Datenübertragung

• Fourieranalyse

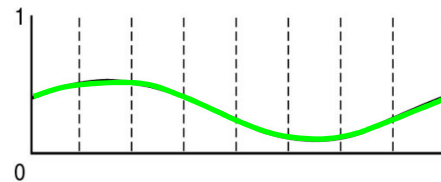
► Binärsignal „01100010“ und errechnete Effektiv-Amplituden



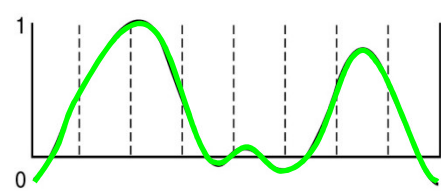
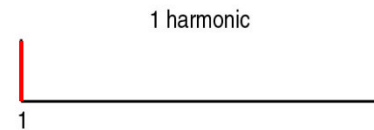
(a)

Beispiel-Applet:

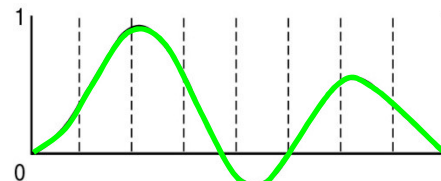
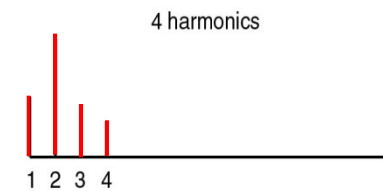
<http://www.falstad.com/fourier/>



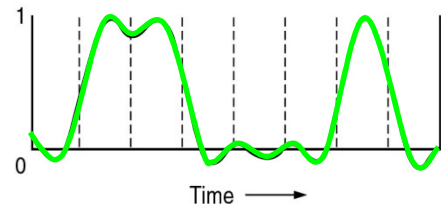
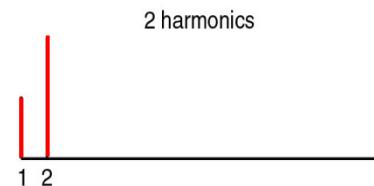
(b)



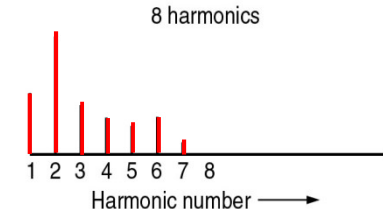
(d)



(c)



(e)



2.1 Physik der Datenübertragung

- Dämpfung D

[Ref 3] Kapitel D, Seite 86

- ▶ Verhältnis der eingespeisten Signalleistung P_{in} zur Leistung des Ausgangssignals P_{out} :

$$D_{abs} = P_{in} / P_{out}$$



- ▶ Üblicherweise wird die Dämpfung in der Einheit Dezibel angegeben

$$\begin{aligned} D_{dB} &= 10 \times \log_{10}(P_{in} / P_{out}) \text{ [dB]} \\ &= 20 \times \log_{10}(U_{in} / U_{out}) \text{ [dB]} \end{aligned}$$

- Unabhängig davon, ob die Leistung oder Spannung von elektrischen Signalen verglichen wird, ergibt sich nach obigen Formeln der gleiche Wert
- Wird als Einheit dB verwendet, addieren sich die Dämpfungen einzelner Leitungsabschnitte!

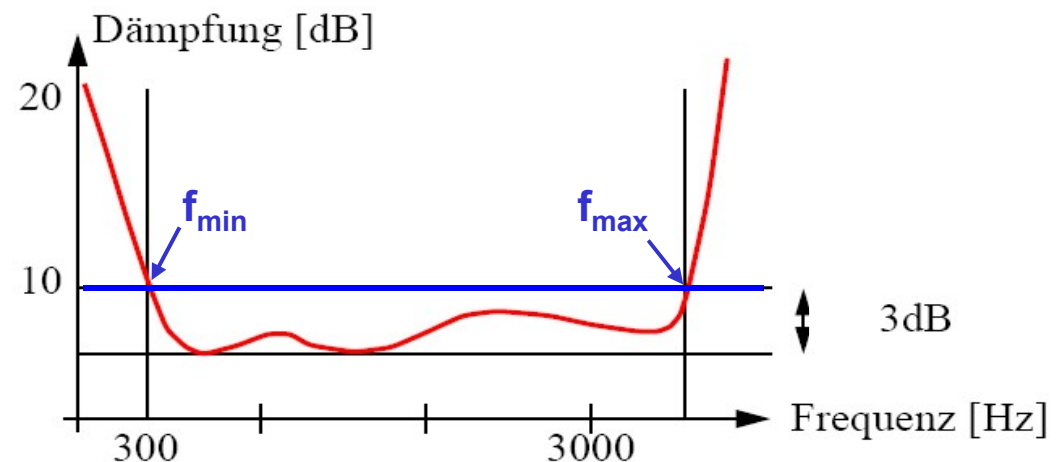
2.1 Physik der Datenübertragung

- *Bandbreite B*

[Ref 3] Kapitel D, Seite 87

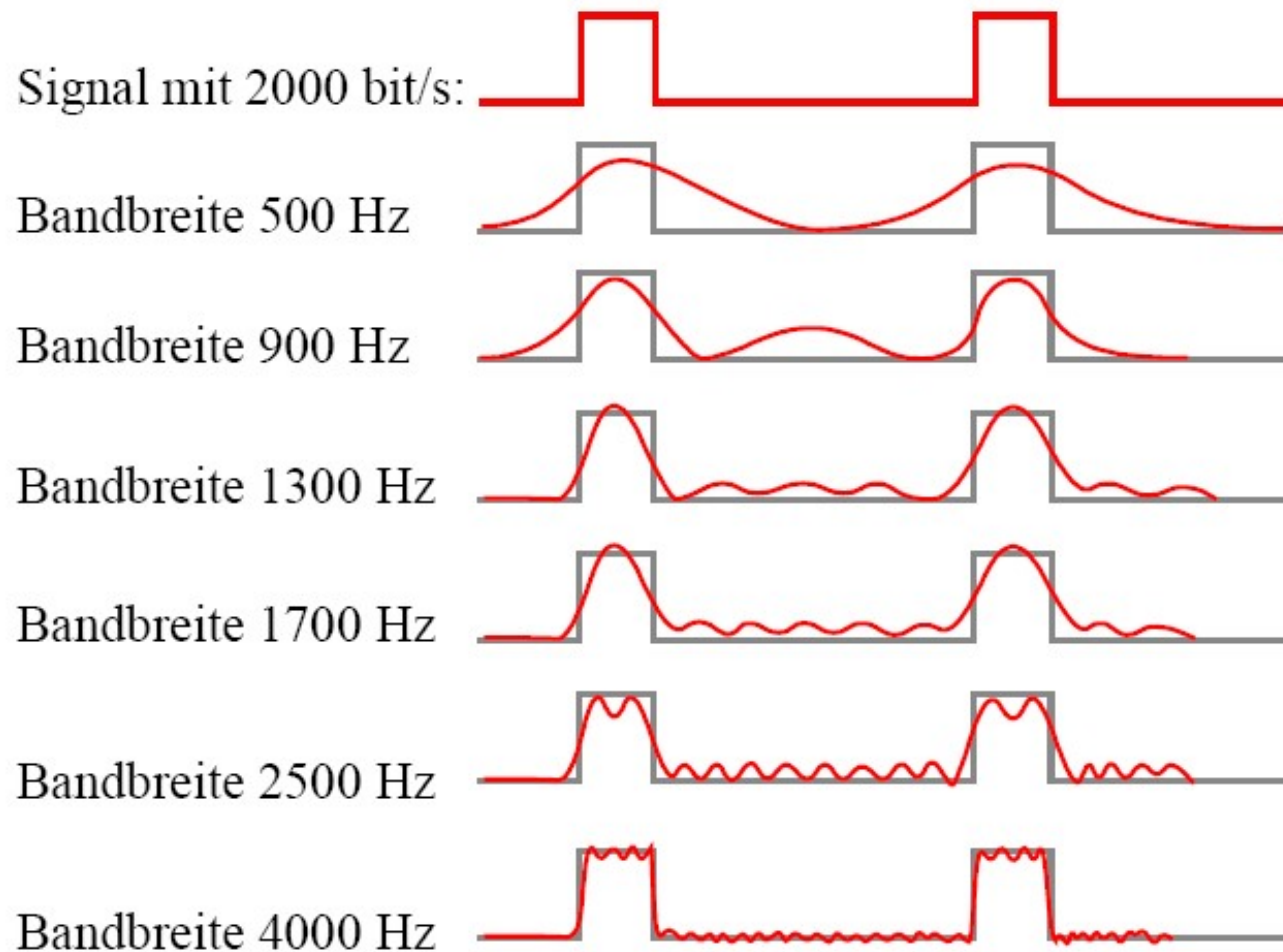
- ▶ *Bandbreite eines Übertragungskanals: $B = f_{\max} - f_{\min}$*
 - *Frequenzbereich der ohne wesentliche Dämpfung des Signals übertragen werden kann*
 - *f_{\max} und f_{\min} sind dadurch gegeben, dass die außen liegenden Frequenzen unter 50% der leistungsstärksten Frequenzen liegen*

- *Abbildung: analoger Telefonanschluss*



2.1 Physik der Datenübertragung

- Einfluss eines Übertragungskanal mit limitierter Bandbreite*



2.1 Physik der Datenübertragung

- *Nyquist-Theorem*

[Ref 2] Kapitel 2, Seite 125

- ▶ *Zusammenhang zwischen der Bandbreite B und der maximal möglichen Datenrate D eines *idealen* Übertragungskanals:*

$$D = 2 \cdot B \cdot \log_2(N)$$

- B = Bandbreite des Übertragungskanals in [Hz]
- N = Anzahl der möglichen diskreten Signalstufen pro Signaländerung
- D = Datenrate in bps (Bit pro Sekunde)

- ▶ *Beispiel*

- *Binäres Signal mit $N=2$ und Übertragungskanal mit 3000Hz (Telefon)*
 - *maximal erreichbare Datenrate beträgt 6000 bps*
- *Fragestellung:*
 - *Kann durch geschickte Wahl der Signalkodierung ($N=2,4,8\dots$) D beliebig erhöht werden?*

2.1 Physik der Datenübertragung

- *Shannon'scher Kanalkapazitätssatz* [Ref 2] Kapitel 2, Seite 126

- ▶ *Maximale Datenrate eines realen Datenkanals*
 - *D hängt vom „Signal-Rausch“-Abstand (SNR) ab*

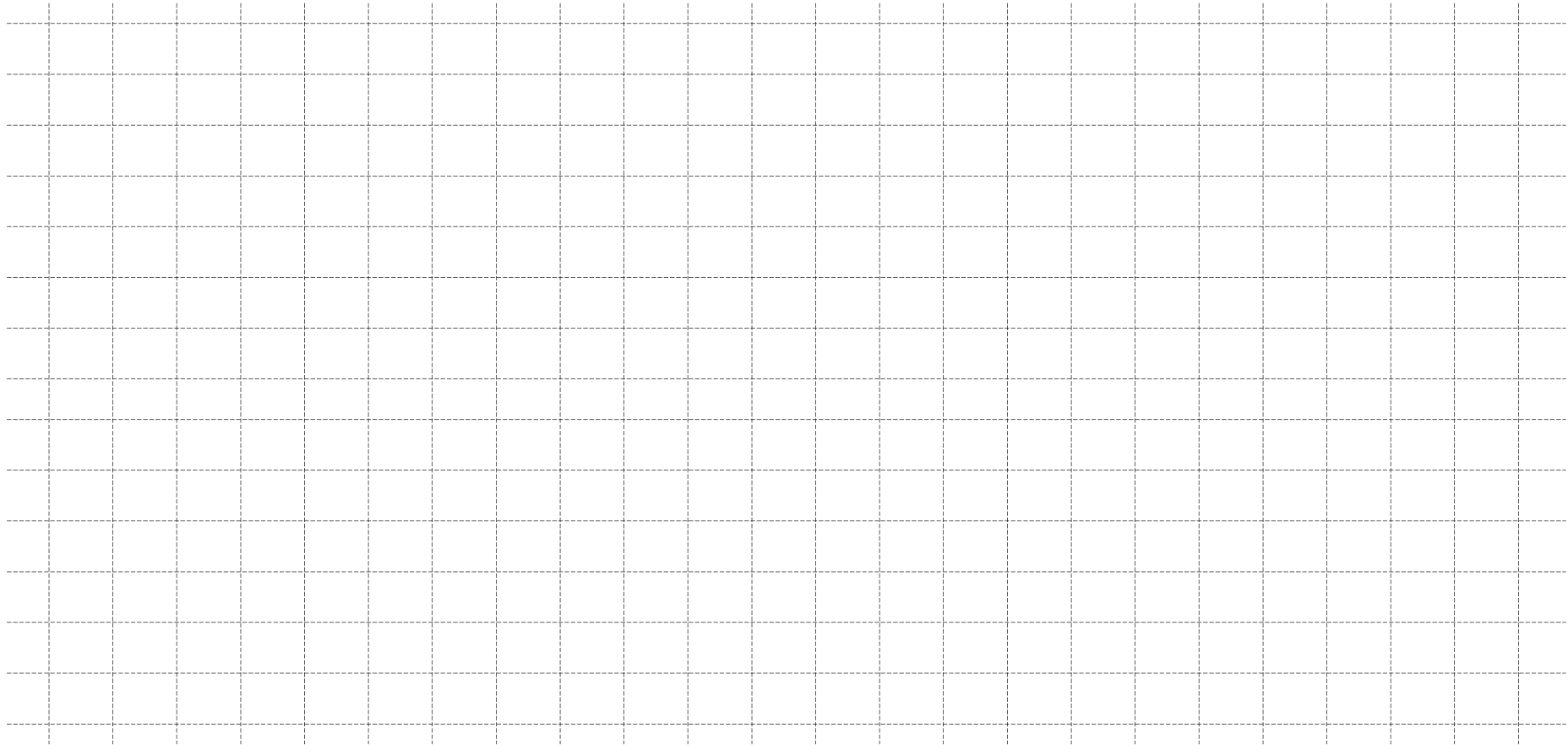
$$D = B \cdot \log_2(1 + \text{SNR})$$

- B = Bandbreite des Übertragungskanal in [Hz]
 - $\text{SNR} = P_S / P_R$
 - P_S = mittlere Leistung im Nutzsignal
 - P_R = mittlere Leistung im Rauschsignal
 - *Die gebräuchliche Einheit von SNR ist [dB]*
 - $(\text{SNR})_{\text{dB}} = 10 \cdot \log_{10}(\text{SNR})$
- ▶ *Beispiel*
 - *Übertragungskanal mit 3000Hz (Telefon); $(\text{SNR})_{\text{dB}} = 30\text{dB}$*
 - $\text{SNR} = 1000$
 - $D = 3000 \cdot \log_2(1+1000) \approx 30000\text{bit/s}$

2.1 Physik der Datenübertragung

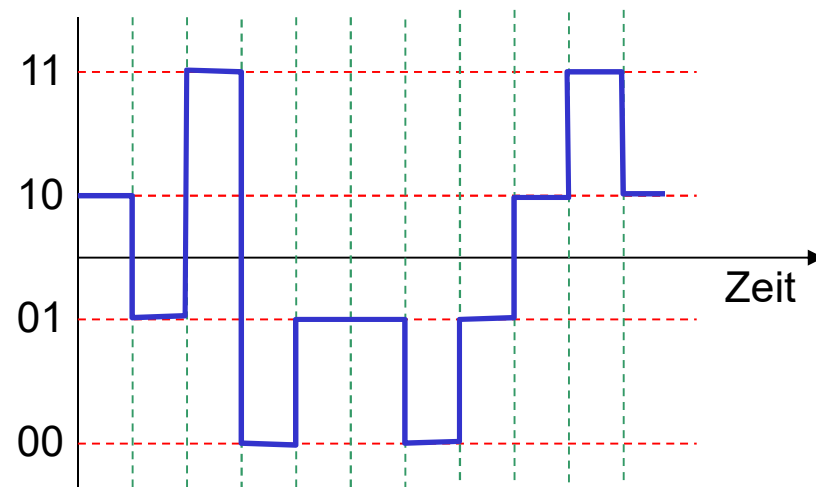
- *Beispiel*

- ▶ *Wie viele Signalstufen muss ein Übertragungsverfahren verwenden, um die Übertragungskapazität eines Übertragungskanals voll ausnutzen zu können?*



2.1 Physik der Datenübertragung

- *Bitrate vs. Signalgeschwindigkeit*
 - *Signalgeschwindigkeit: Anzahl der Signalwechsel pro Sekunde*
 - Die Signalgeschwindigkeit wird in Baud [Bd] angegeben
 - Oft auch als „Baudrate“ bezeichnet
 - *Bit-Rate: Anzahl der übertragenen Bits pro Sekunde*
 - Die Bitrate kann größer als die Baudrate werden
 - Für binäre Signalstufen (2-Stufen-Kodierung) gilt:
 $\text{Bitrate} = \text{Baudrate}$
 - Bei Nutzung einer 4-Stufen-Kodierung (siehe Abb.) gilt:
 $\text{Bitrate} = 2 \times \text{Baudrate}$



2.1 Physik der Datenübertragung

- *Die Ende-zu-Ende-Verzögerung von Datenpaketen*

- ▶ Zeit, die gebraucht wird, um ein Datenpaket von einem Quell-Knoten zu einem Ziel-Knoten zu transportieren
- ▶ Verzögerungsarten, die zur Ende-zu-Ende-Verzögerung $d_{\text{end-to-end}}$ beitragen:

$$d_{\text{end-to-end}} = \sum_{i=1}^N d_{\text{nodal}}^i ; N = \text{Anzahl der Verbindungsleitungen}$$

- d_{nodal}^i bezeichnet die Verzögerung in einem Knoten i (kann der Quell-Knoten oder ein Zwischenknoten sein, nicht jedoch der Ziel-Knoten)
- Die Knoten-Verzögerung d_{nodal}^i setzt sich aus folgenden Anteilen zusammen:

$$d_{\text{nodal}}^i = d_{\text{proc}}^i + d_{\text{queue}}^i + d_{\text{trans}}^i + d_{\text{prop}}^i$$

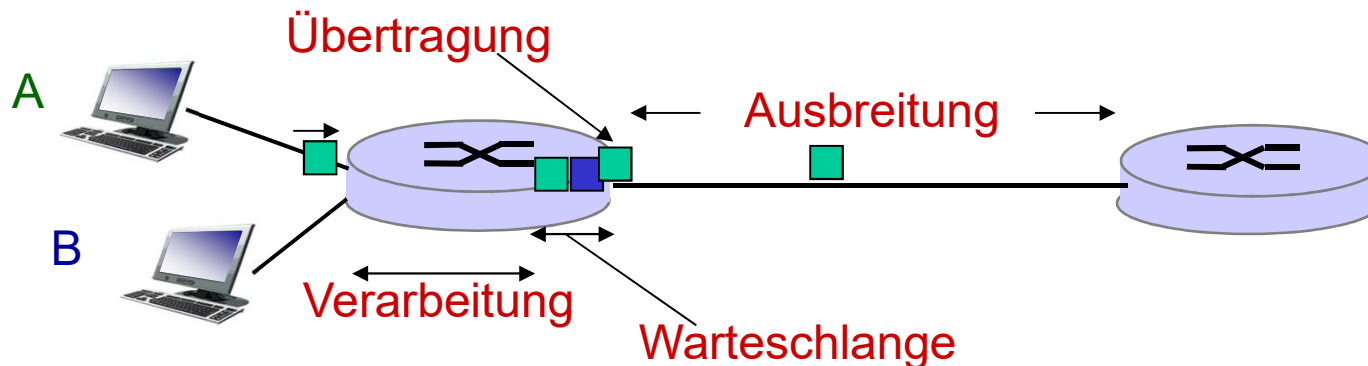
[Ref 1] Kapitel 1, Seite 56-60, 64

- d_{proc}^i = Verarbeitungsverzögerung (processing delay)
- d_{queue}^i = Warteschlangenverzögerung (queuing delay)
- d_{trans}^i = Übertragungsverzögerung (transmission delay)
- d_{prop}^i = Ausbreitungsverzögerung (propagation delay)

2.1 Physik der Datenübertragung

- Die Ende-zu-Ende-Verzögerung von Datenpaketen...

- Die Knotenverzögerung d_{nodal}^i



d_{trans}^i : Übertragungsverzögerung:

- L = Paketlänge [bits]
- R = Bitrate der Leitung [bps]
- $d_{trans}^i = L/R$

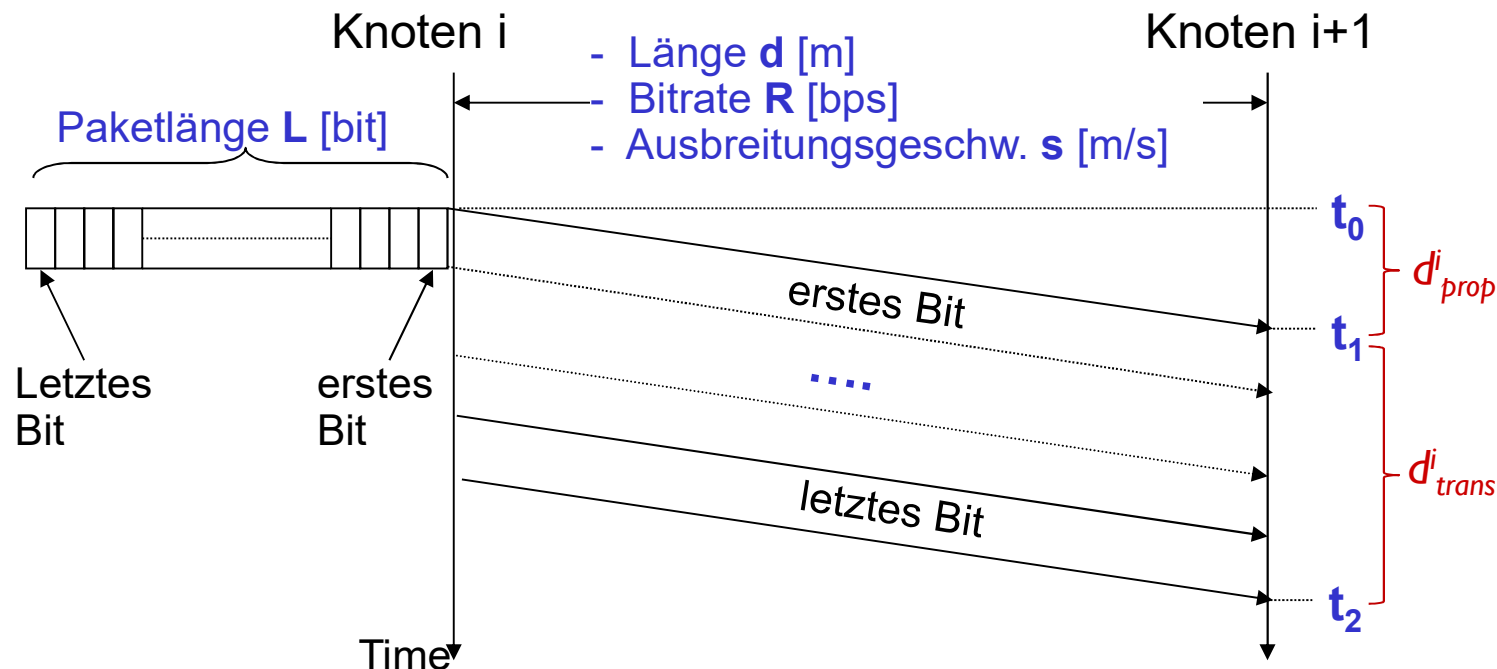
d_{prop}^i : Ausbreitungsverzögerung:

- d = Länge der Verbindungsleitung [m]
- s = Signalgeschwindigkeit $\sim 2 \times 10^8$ [m/sec]
- $d_{prop}^i = d/s$

2.1 Physik der Datenübertragung

- Die Ende-zu-Ende-Verzögerung von Datenpaketen...

- Die Übertragungsverzögerung d_{trans}^i und die Ausbreitungsverzögerung d_{prop}^i



$$t_1 - t_0 = \text{Ausbreitungsverzögerung} = d \text{ [m]} / s \text{ [m/s]}$$

$$t_2 - t_1 = \text{Übertragungsverzögerung} = L \text{ [bit]} / R \text{ [bps]}$$

2.2 Übertragungstechniken

- *Grundlegende Übertragungstechniken*
 - *Digitale Eingabe, digitale Übertragung:*
Digitale Leitungscodierung
 - *Beispiel: Ethernet*
 - *Bits werden direkt als digitale Signale auf die Leitung gegeben*
 - *Einsatz sogenannter **Basisband-Übertragungsverfahren***
 - *Digitale Eingabe, analoge Übertragung:*
Modulationstechniken
 - *Beispiel: DSL-Modemstrecken*
 - *Binäre Daten werden über eine Trägerwelle, die moduliert wird, übertragen*
 - *Einsatz sogenannter **Breitband-Übertragungsverfahren***

2.2.1 Digitale Leitungscodierung

- *Digitale Leitungscodierung*

[Ref 2] Kapitel 2, Seite 159 - 164

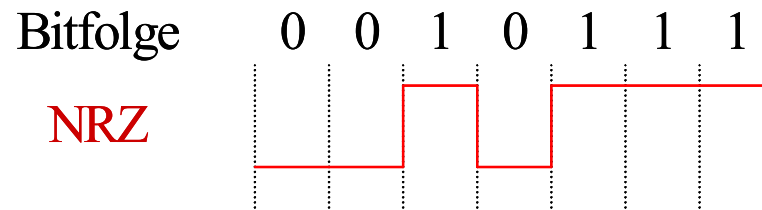
- ▶ *Direkte Übertragung rechteckförmiger Signale*
 - *Signal belegt gesamte verfügbare Bandbreite des Übertragungskanals*
- ▶ *Die Zuordnungsvorschrift*
„digitales Datenelement <-> digitales Signalelement“
*heißt **Signal- oder Leitungscodierung***
- ▶ *Die sich ergebenden zeit- und wert-diskreten Signalverläufe heißen*
*Signalcodes oder **Übertragungscode**s*
- ▶ *Erwünschte Eigenschaften von Übertragungscode*s:
 - *Bittaktrückgewinnung*
 - *Codierung mehrerer Bits pro Baud (also pro Signalwechsel)*
 - *Vermeidung von Gleichstromanteilen*
 - *Erkennung von Signalfehlern auf Signalebene*
 - *Minimales „Übersprechen“ bei Einsatz von Multiplex-Verfahren*

2.2.1 Digitale Leitungscodierung

- *Einige Beispiele für Leitungscodes*

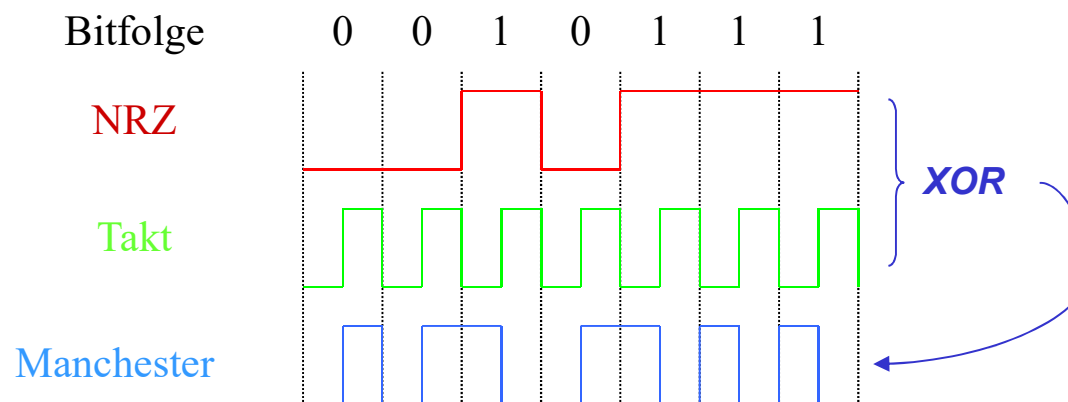
- *NRZ (Non Return to Zero)-Codes:*

- *Fester Pegel während eines Bitintervalls, Signalwechsel an Intervallgrenzen*
 - *Max. 1 Signalwechsel pro Bit*
 - *Vorteil: einfach zu implementieren*
 - *Nachteil: Gleichstromanteile und Synchronisationsprobleme bei langen „0“-Folgen*



2.2.1 Digitale Leitungscodierung

- *Einige Beispiele für Leitungscodes...*
 - *Manchester-Codierung*
 - *XOR-Verknüpfung von NRZ-Kodierung mit internem Taktsignal*
 - *Codierungsvorschrift: „1“ ⇒ Übergang high/low in der Intervallmitte*
„0“ ⇒ Übergang low/high in der Intervallmitte
 - *Effizienz nur 50%: Verdoppelt Baudrate gegenüber NRZ*
(→ betrachte lange „1“- oder „0“-Folgen...)
 - *Jedoch keine Gleichstromanteile; gute Synchronisationseigenschaften*
 - *Eingesetzt bei Ethernet (10 Mb)*



2.2.1 Digitale Leitungscodierung

- *Einige Beispiele für Leitungscodes...*

- ▶ *4B/5B-Kodierung*

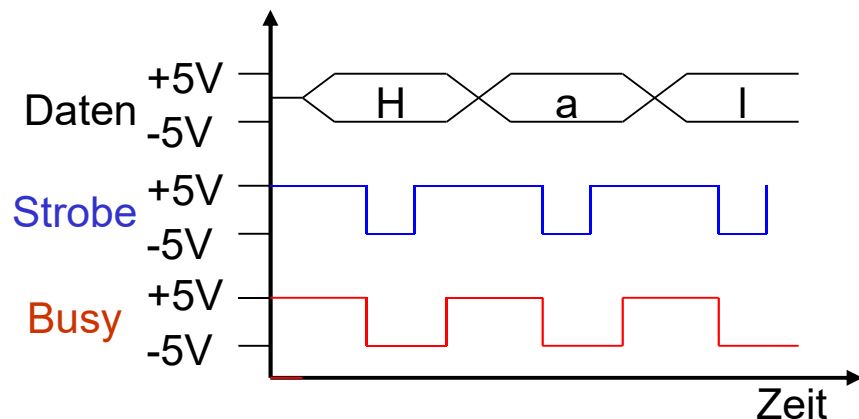
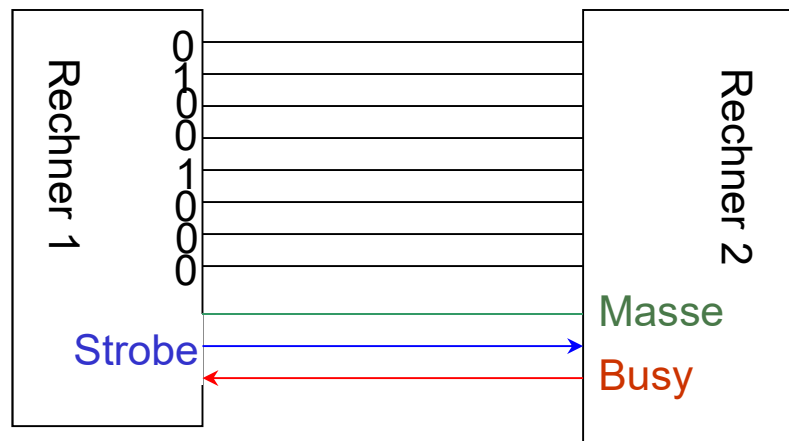
- Ziel: Ineffizienz der Manchester-Kodierung umgehen, ohne längere Gleichstromanteile zu erzeugen
- Verfahren: Umkodierung der Daten gemäß 4B/5B-Code und Übertragung gemäß NRZI-Signalcode
 - *NRZI-Signalcode* verhindert lange „1“-Level-Folgen:
1= Übergang in der Intervallmitte
0= kein Übergang
 - *4B/5B-Codierung* vermeidet lange „0“-Folgen:
nie mehr als eine führende Null,
nie mehr als zwei nachgestellte Nullen
 - Effizienz 80%
- Eingesetzt z.B. bei FastEthernet über Glasfaser oder FDDI

4-Bit Daten	5 Bit Code
0000	11110
0001	01001
0010	10100
0011	10101
0100	01010
0101	01011
0110	01110
0111	01111
1000	10010
1001	10011
1010	10110
1011	10111
1100	11010
1101	11011
1110	11100
1111	11101

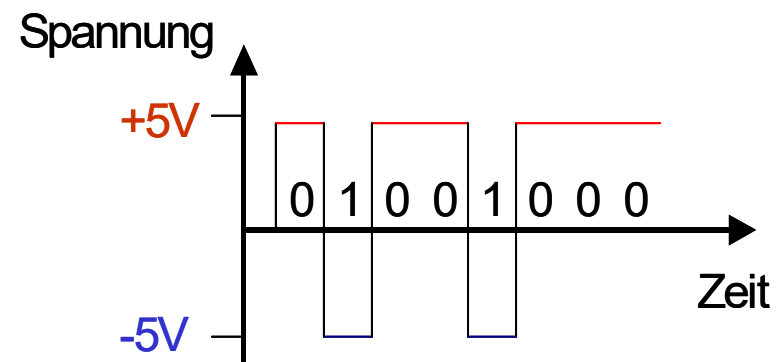
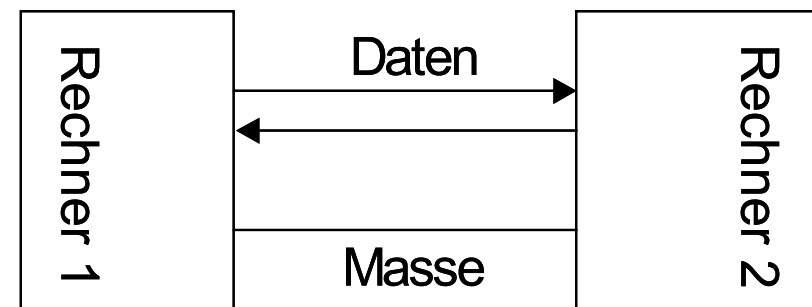
2.2.1 Digitale Leitungscodierung

Übertragungsarten

Parallele Übertragung



Serielle Übertragung



2.2.1 Digitale Leitungscodierung

- *Synchronisation bei Bit serieller Übertragung*

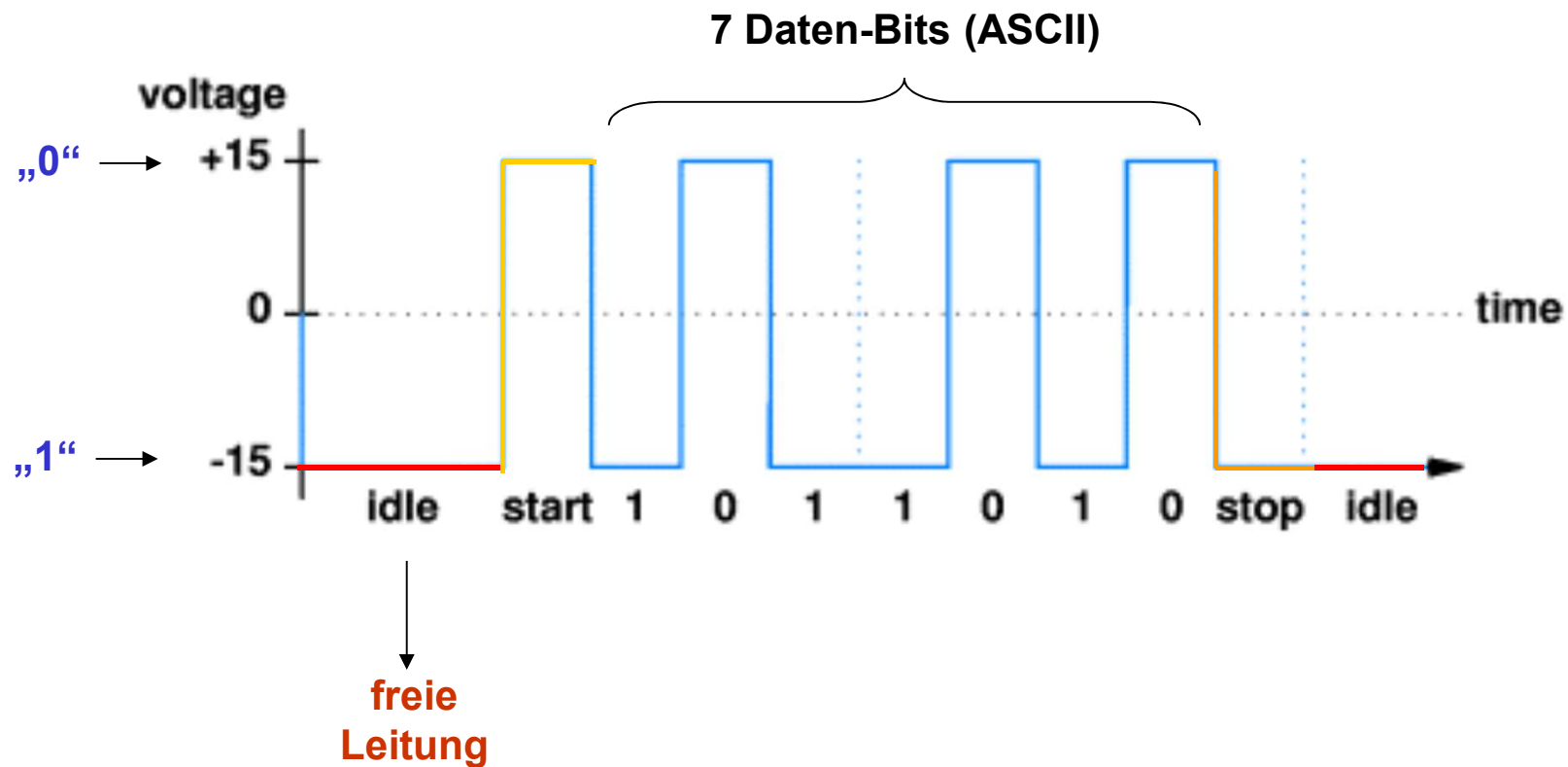
- ▶ *Beispiel: „RS-232-C“-Schnittstelle*

[Ref 3] Kapitel D, Seite 101

- *Standard-Schnittstelle zur Übertragung alphanumerischer Zeichen*
- *Sender und Empfänger sind vor Datenaustausch nicht synchronisiert*
 - *Sender- und Empfängertakt müssen übereinstimmen*
 - *Start/Stop-Verfahren, um Anfang/Ende einer Übertragung zu signalisieren*
 - *Sender-Verhalten:*
Übertragung von Daten beginnt, sobald Daten dazu anliegen;
beliebige Wartezeiten zwischen der Übertragung von Daten
 - *Empfänger-Verhalten:*
 - *Ständige Empfangsbereitschaft*
- *Spezifikationen*
 - „1“ ⇒ *Signalpegel von -3V - -15V*
 - „0“ ⇒ *Signalpegel von +3V - +15V*
 - *Start-Bit setzt Leitung auf 0 und startet Taktgeber des Empfängers*
 - *Stop-Bit setzt Leitung wieder auf 1*
(Signal muss mind. 1, aber auch 1.5 oder 2 Bitzeiten andauern)

2.2.1 Digitale Leitungscodierung

- *RS-232-C: Übertragung eines Zeichens*



2.2.1 Modulationstechniken

- *Modulationstechniken*

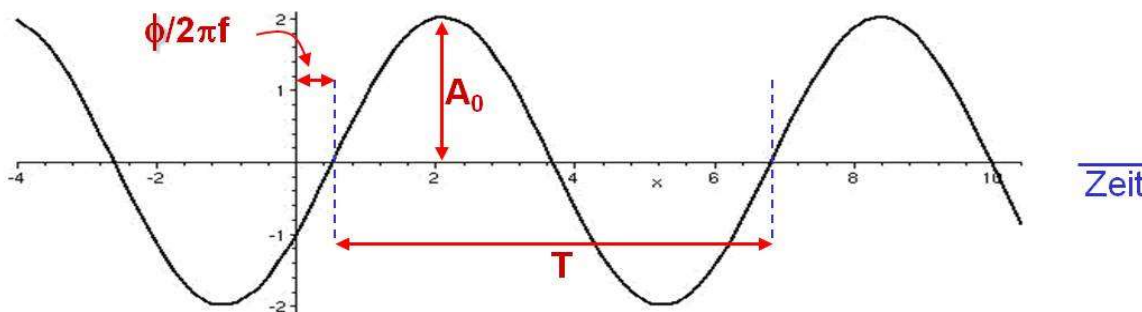
[Ref 2] Kapitel 2, Seite 164- 169

- ▶ *Nutzung e.m. Wellen (Träger genannt) zur Datenübertragung*
 - *Träger wird zur Datenübertragung vom Sender **moduliert***
 - *Empfänger **demoduliert** Träger und rekonstruiert Originaldaten*
- ▶ *Amplitudendarstellung einer Trägerwelle*

$$A(t) = A_0 \times \sin (2\pi f t - \phi)$$

A_0 : Amplitude; ϕ = Phasenverschiebung;

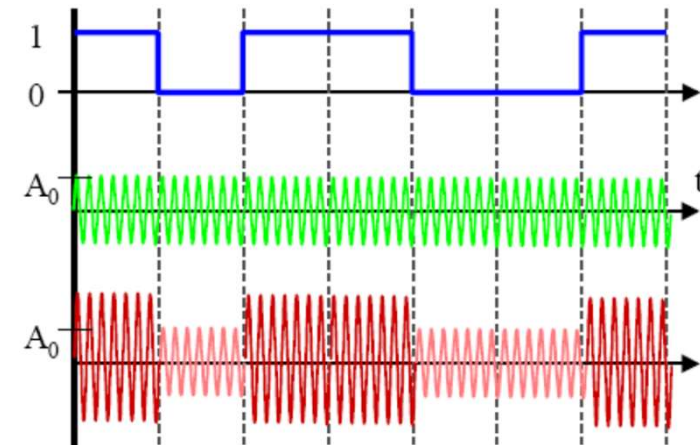
$f = 1/T$ = Frequenz; T = Schwingungsperiode;



2.2.2 Modulationstechniken

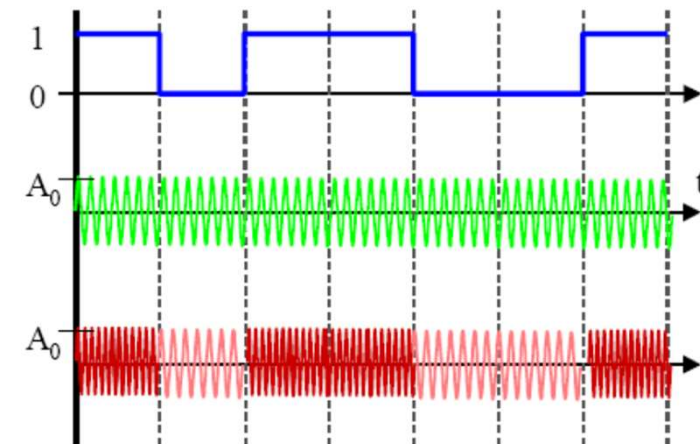
- *Amplitudenmodulation*

- *Bandbreiteneffizient*
- *Sehr störanfällig gegen Rauschen; genutzt in Glasfasernetzen, ungünstig bei Funknetzen*



- *Frequenzmodulation*

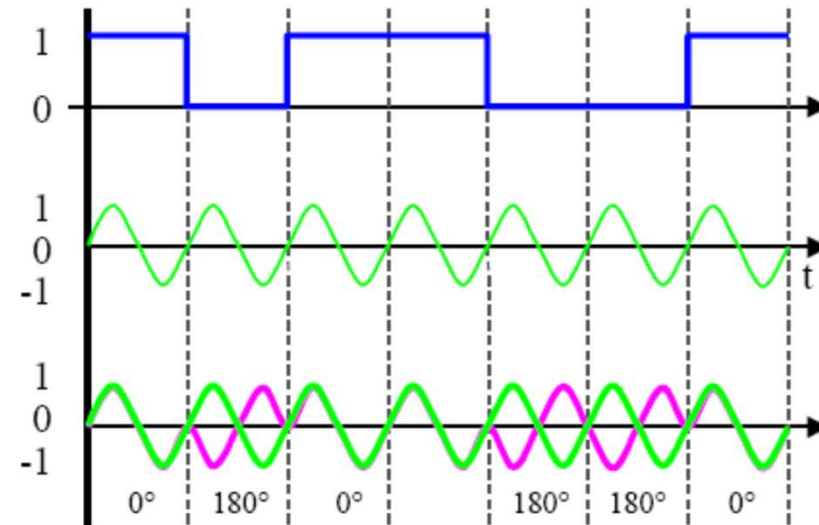
- *Wenig störanfällig*
- *Braucht mehr Bandbreite*



2.2.2 Modulationstechniken

- *Phasenmodulation*

- *Problematisch bei Mehrwegeausbreitung*
- *Genutzt z.B. bei ADSL, ungünstig in Funknetzen*
- *Abrupte Phasensprünge bedingen hohe Frequenzen*



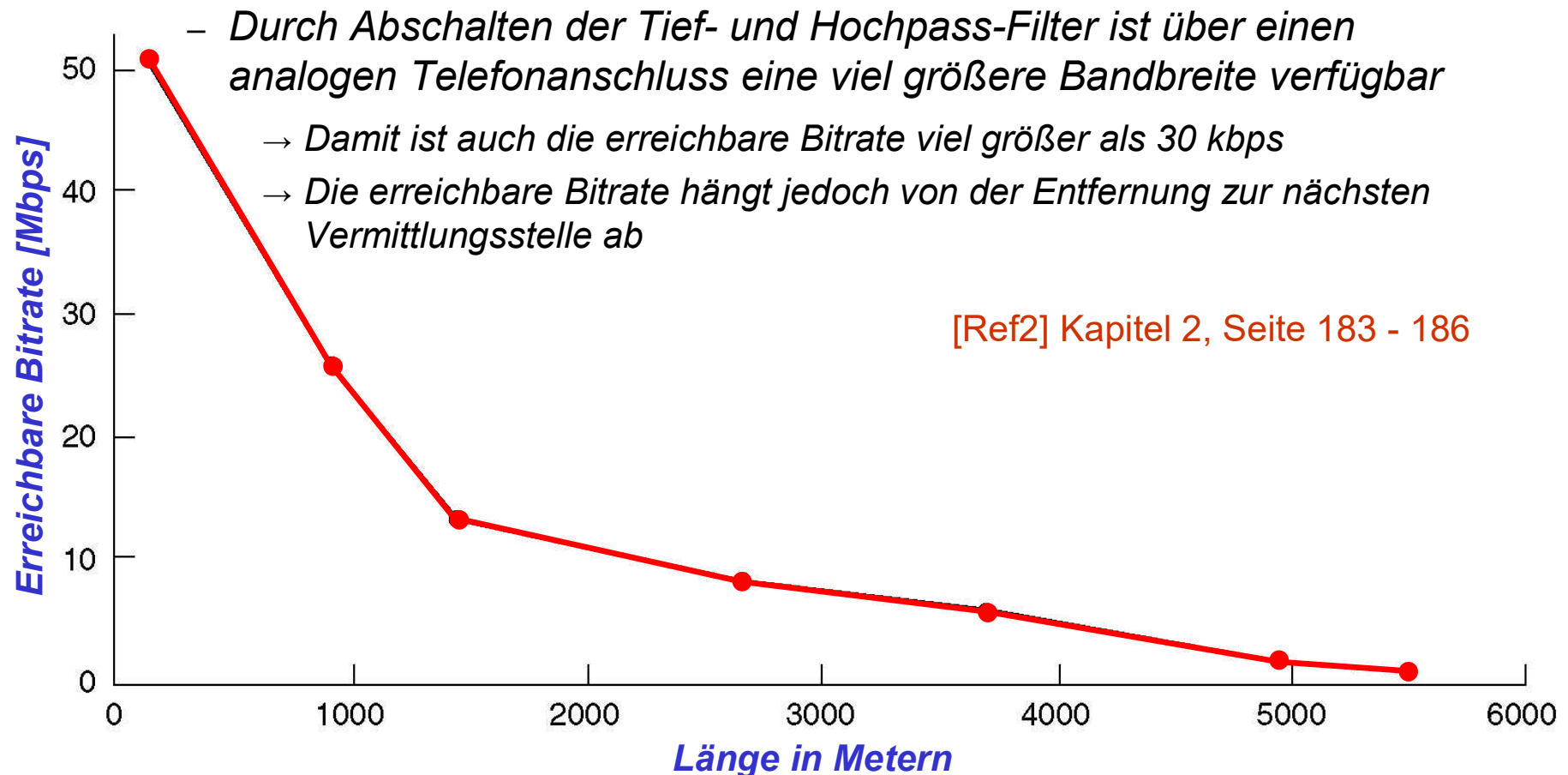
2.2.2 Modulationstechniken

- *Quadratur-Amplituden-Modulation (QAM)*
 - *Kombination aus Amplituden- und Phasenmodulation: Konstellationsmuster*



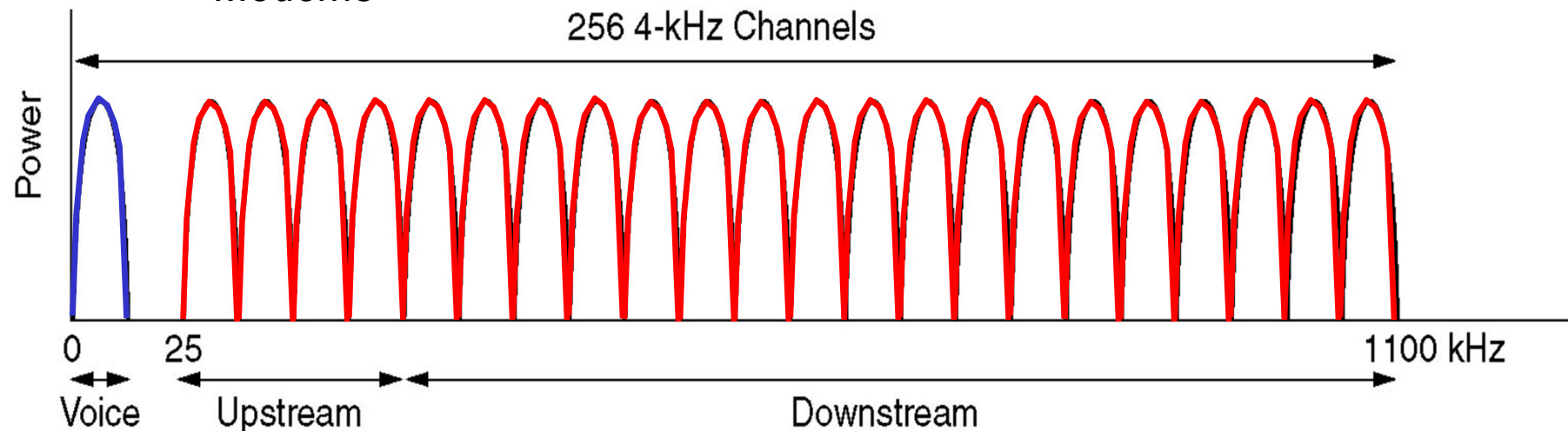
2.2.2 Modulationstechniken

- *Beispiel: DSL (Digital Subscriber Line)-Technologie*
 - *Erreichbare Bitrate als Funktion der Kabellänge (Cat3-UTP-Kabel)*



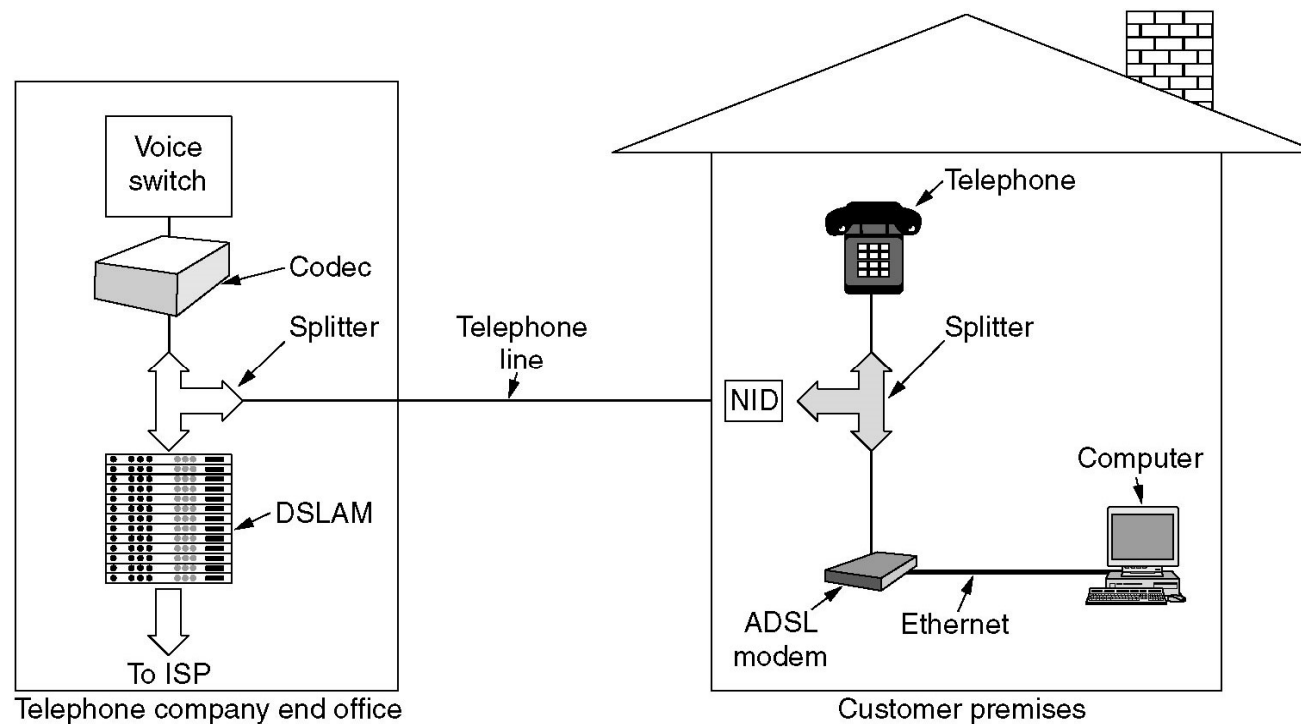
2.2.2 Modulationstechniken

- *Discrete Multi-Tone Modulation (DMT)*
 - *Eingesetzt für ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line)*
 - *Aufteilen des Frequenzspektrums in einzelne 4kHz-Subkanäle*
 - *Einsatz von QAM für jeden Subkanal (bei gutem Signal-zu-Rausch Verhältnis Kodierung vieler Bits per Baud, sonst weniger Bits per Baud)*
 - *Unterster 4kHz-Subkanal nicht für ADSL genutzt, analoge Sprachübertragung daher gleichzeitig möglich*
 - *ADSL-Modem funktioniert wie große Anzahl parallel arbeitender Modems*



2.2.2 Modulationstechniken

- *Typische ADSL-Konfiguration (Schema)*



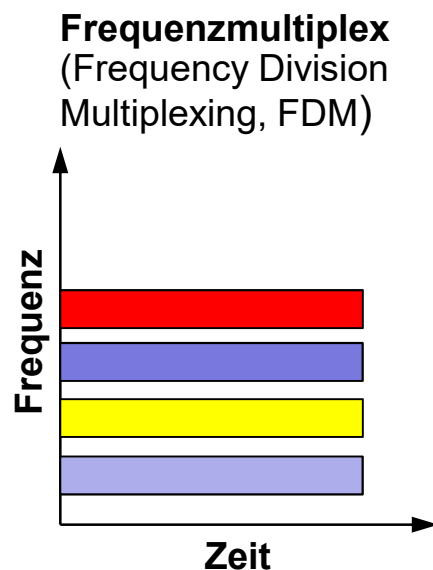
CODEC = Codierer/Decodierer; **DSLAM** = Digital Subscriber Line Access Multiplexer

2.3 Kanalaufteilungsprotokolle

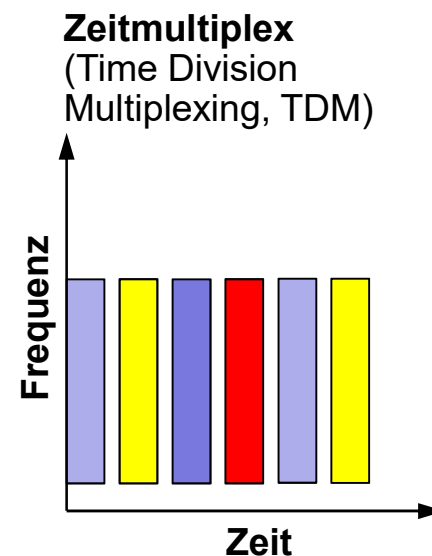
- *Multiplex-Verfahren*

[Ref 1] Kapitel 5, Seite 491- 492

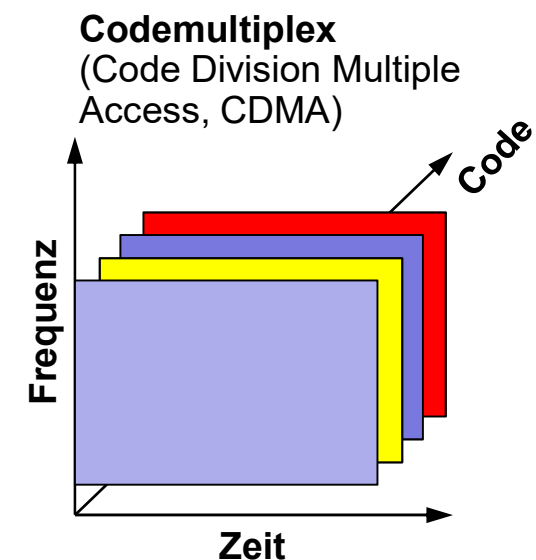
- *Nutzung eines physikalischen Transportsystems für die Übertragung der Signale verschiedener logischer Übertragungskanäle*



Jeder Benutzer bekommt einen Frequenzbereich zugewiesen, den er dauerhaft nutzen darf



Jeder Benutzer bekommt für bestimmte Zeitspannen alle Frequenzen zugewiesen

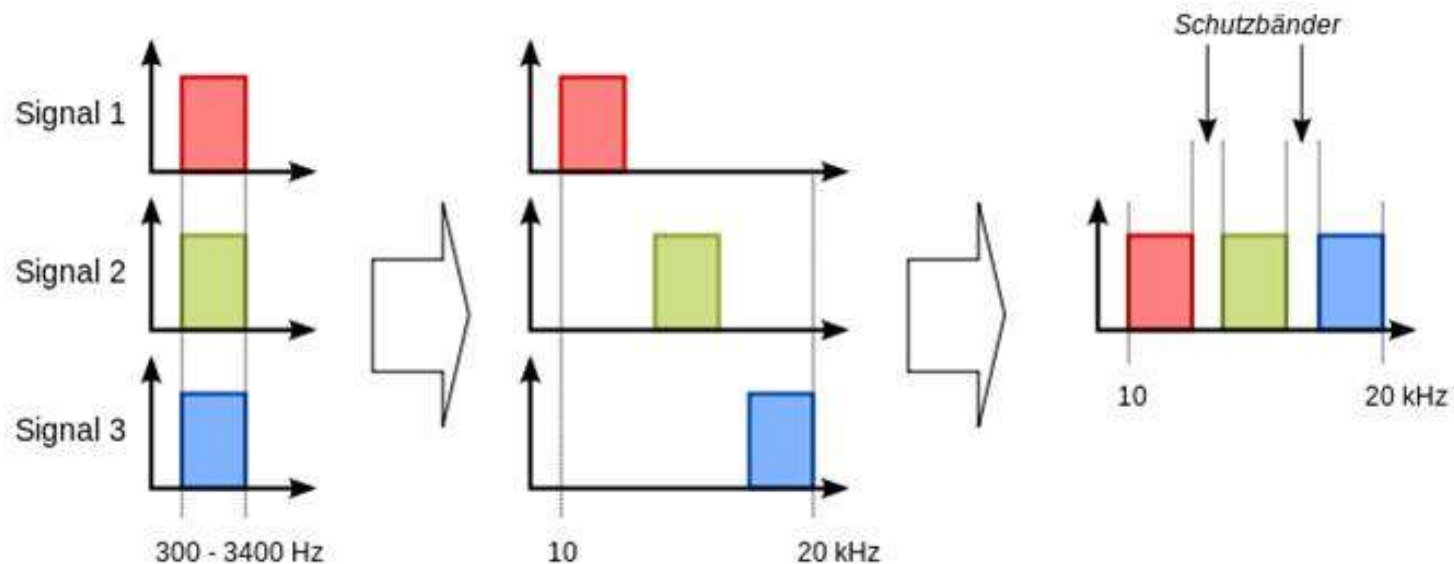


Alle Benutzer verwenden durchgehend alle Frequenzen, Verwendung eines Codes

2.3 Kanalaufteilungsprotokolle

- *Frequenzmultiplex-Verfahren*

- *Die zur Verfügung stehende Bandbreite wird in verschiedene Frequenzbereiche, sogenannte Kanäle aufgeteilt*
 - *Jeder Sender-Empfänger-Kombination wird exklusiv ein Kanal zugeordnet*
 - *Ein Sender kann zu beliebigen Zeiten den Kanal nutzen, jedoch nur zu einem Bruchteil der insgesamt verfügbaren Bitrate R*
 - *Nachteil: Verschwendung von Bandbreite, falls nicht alle Sender aktiv sind*



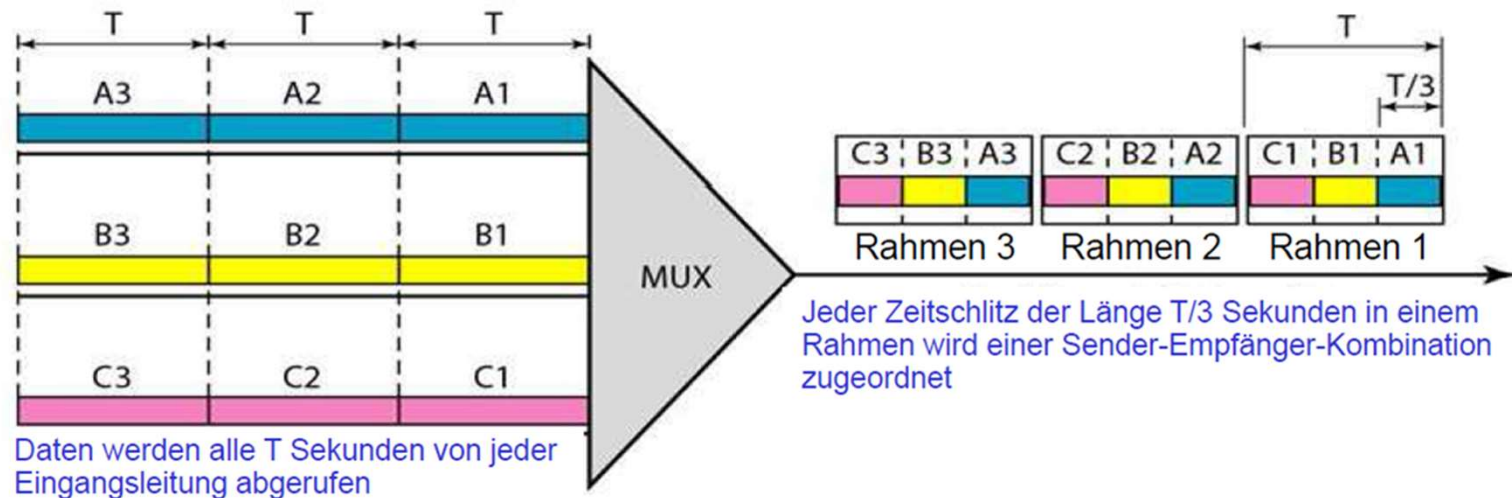
2.3 Kanalaufteilungsprotokolle

• Zeitmultiplex-Verfahren

- Die gesamte verfügbare Bandbreite wird innerhalb eines Zeitintervalls einer Sender-Empfänger-Kombination zugeordnet

- Synchrones Zeitmultiplexing

- Jeder Sender-Empfänger-Kombination wird nach vorgegebener Reihenfolge (Round-Robin-Verfahren) ein Zeitscheibe zugeordnet
- Jeder der N Sende-Empfänger-Kombinationen steht immer nur der N -te Teil der Bitrate zur Verfügung, auch wenn nur eine Kombination sendet!
- Nachteile: Genaue Zeitsynchronisation der Teilnehmer und evtl. Schutzzeiten nötig



2.3 Kanalaufteilungsprotokolle

- Codemultiplex-Verfahren

[Ref 1] Kapitel 6, Seite 567- 570

- ▶ *Jeder Sender kann jederzeit die gesamte verfügbare Bandbreite nutzen!*
 - *Jede Station bekommt einen eindeutigen **m-Bit-Code** zugeordnet, der als **Chipfolge** bezeichnet wird*
 - *Will eine Station ein „1“-Bit übertragen, sendet die Station ihre Chipfolge*
 - *Will eine Station ein „0“-Bit übertragen, sendet die Station das Einserkomplement der Chipfolge*
 - *Beispiel*
 - *Der Station A wird ein 8-Bit-Code zugeordnet ($m = 8$): 00011011*
 - *Will A ein „1“-Bit übertragen, wird „00011011“ gesendet*
 - *Will A ein „0“-Bit übertragen, wird „11100100“ gesendet*
 - *Bipolare Notation einer Chipfolge*
 - *Zur Vereinfachung wird die Chipfolge als bipolarer Vektor aufgefasst:
Eine „0“ in der Chipfolge wird durch „-1“ ersetzt*
 - *Die Chipfolge der Station A zur Übertragung eines „1“-Bits entspricht dem Chipvektor*
 $\mathbf{A} := (-1, -1, -1, +1, +1, -1, +1, +1)$
 - *Der negierte Vektor zur Übertragung eines „0“-Bits entspricht dem Chipvektor*
 $\overline{\mathbf{A}} := (+1, +1, +1, -1, -1, +1, -1, -1)$

2.3 Kanalaufteilungsprotokolle

- *Codemultiplex-Verfahren...*

- *Wahl der Chipfolgen für die beteiligten Stationen*

- Die Chipfolgen der beteiligten Stationen werden so gewählt, dass deren zugeordneten bipolaren Vektoren *paarweise orthogonal* sind
- Mathematisch ausgedrückt bedeutet dies, dass das normalisierte innere Produkt zweier Chipvektoren *A* und *B* (geschrieben als $A * B$) 0 sein muss:

$$A * B = (1/m) * \sum_{i=1}^m A_i * B_i = 0$$

- Aus $A * B = 0$ folgt auch $A * \bar{B} = 0$
- Das innere Produkt eines Chipvektors mit sich selbst ergibt 1

$$A * A = (1/m) * \sum_{i=1}^m A_i * A_i = (1/m) * \sum_{i=1}^m (+/- 1)^2 = 1$$

- Daher muss auch gelten: $A * \bar{A} = -1$
- Insgesamt können nur *m* Stationen beteiligt sein!

2.3 Kanalaufteilungsprotokolle

- *Codemultiplex-Verfahren...*

- ▶ *Gleichzeitige Übertragung mehrerer Stationen*

- Übertragen zwei oder mehrere Stationen gleichzeitig, sieht ein Empfänger den Summenvektor **S** der versandten Chipvektoren

- *Beispiel*

- Station A sendet ein „1“-Bit and B sendet ein „1“-Bit: **$S = A + B$**

- Station A sendet ein „1“-Bit and C sendet ein „0“-Bit: **$S = A + \bar{C}$**

- ▶ *Dekodierung des empfangenen Summenvektors*

- Um aus einem empfangenen Summenvektor die versandte Information eines bestimmten Senders zu dekodieren, multipliziert der Empfänger den Summenvektor mit dem Chipvektor dieses Sensors

- *Beispiel:*

- Der Empfänger erhält den Summenvektor **$S = A + \bar{C}$**

- Dekodierung des Datenbits von **C**: **$S * C = (A + \bar{C}) * C = A * C + C * \bar{C}$**
 $= 0 - 1$
 $= -1$

- Das Ergebnis -1 bedeutet, dass C ein 0-Bit gesendet haben muss

2.3 Kanalaufteilungsprotokolle

- *Codemultiplex-Verfahren...*

- *Weitere Beispiele*

Chipvektoren von 4 Stationen A-D

$$A = (-1 \ -1 \ -1 \ +1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1)$$

$$B = (-1 \ -1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1 \ +1 \ -1)$$

$$C = (-1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1 \ +1 \ -1 \ -1)$$

$$D = (-1 \ +1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ +1 \ -1)$$

$$S_1 = C = (-1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1 \ +1 \ -1 \ -1)$$

$$S_2 = B+C = (-2 \ 0 \ 0 \ 0 \ +2 \ +2 \ 0 \ -2)$$

$$S_3 = A+\bar{B} = (0 \ 0 \ -2 \ +2 \ 0 \ -2 \ 0 \ +2)$$

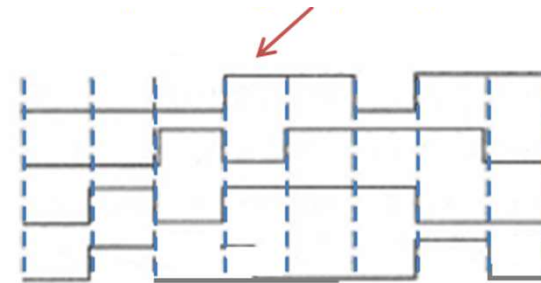
$$S_4 = A+\bar{B}+C = (-1 \ +1 \ -3 \ +3 \ +1 \ -1 \ -1 \ +1)$$

$$S_5 = A+B+C+D = (-4 \ 0 \ -2 \ 0 \ +2 \ 0 \ +2 \ -2)$$

$$S_6 = A+B+\bar{C}+D = (-2 \ -2 \ 0 \ -2 \ 0 \ -2 \ +4 \ 0)$$

Gesendete Summenvektoren

Korrespondierende Chipfolge



$$S_1 \cdot C = [1+1-1+1+1+1-1-1]/8 = 1$$

$$S_2 \cdot C = [2+0+0+0+2+2+0+2]/8 = 1$$

$$S_3 \cdot C = [0+0+2+2+0-2+0-2]/8 = 0$$

$$S_4 \cdot C = [1+1+3+3+1-1+1-1]/8 = 1$$

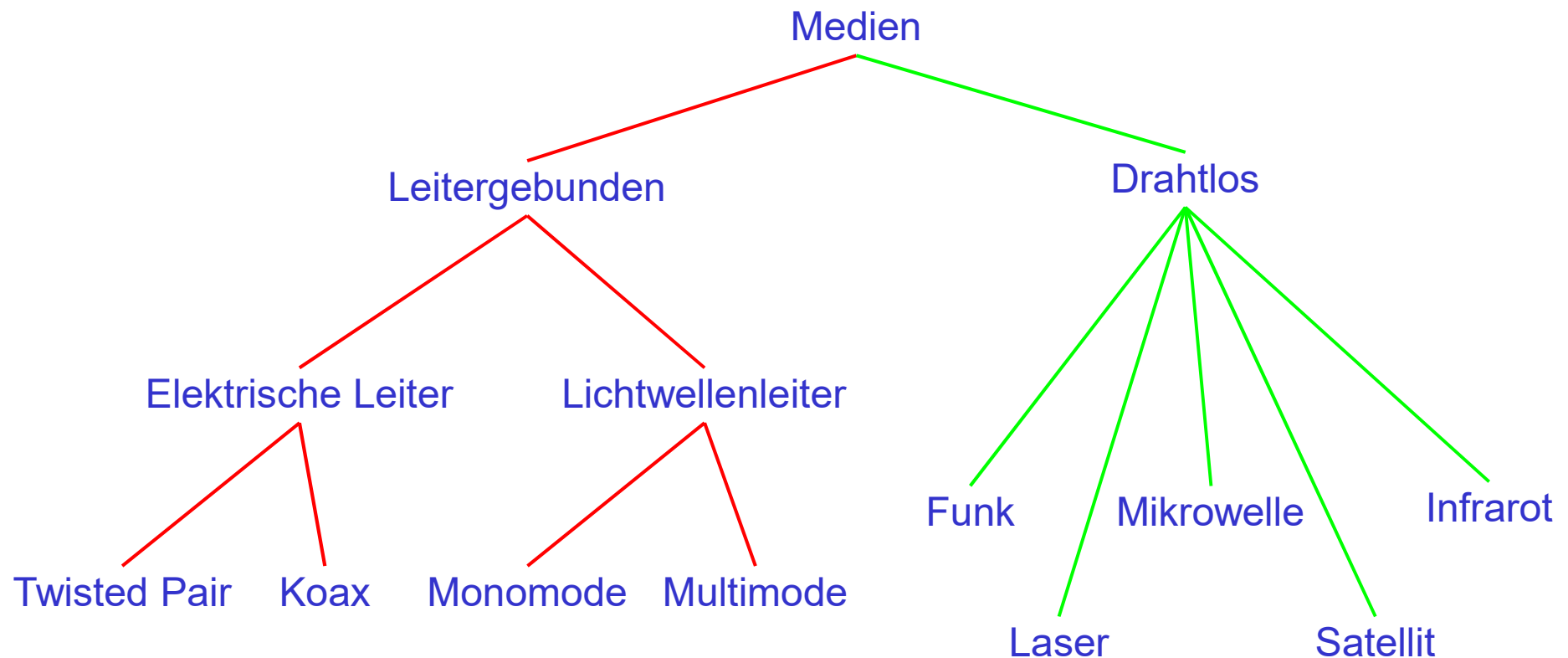
$$S_5 \cdot C = [4+0+2+0+2+0-2+2]/8 = 1$$

$$S_6 \cdot C = [2-2+0-2+0-2-4+0]/8 = -1$$

Von C dekodierte Information

2.4 Physikalische Übertragungsmedien

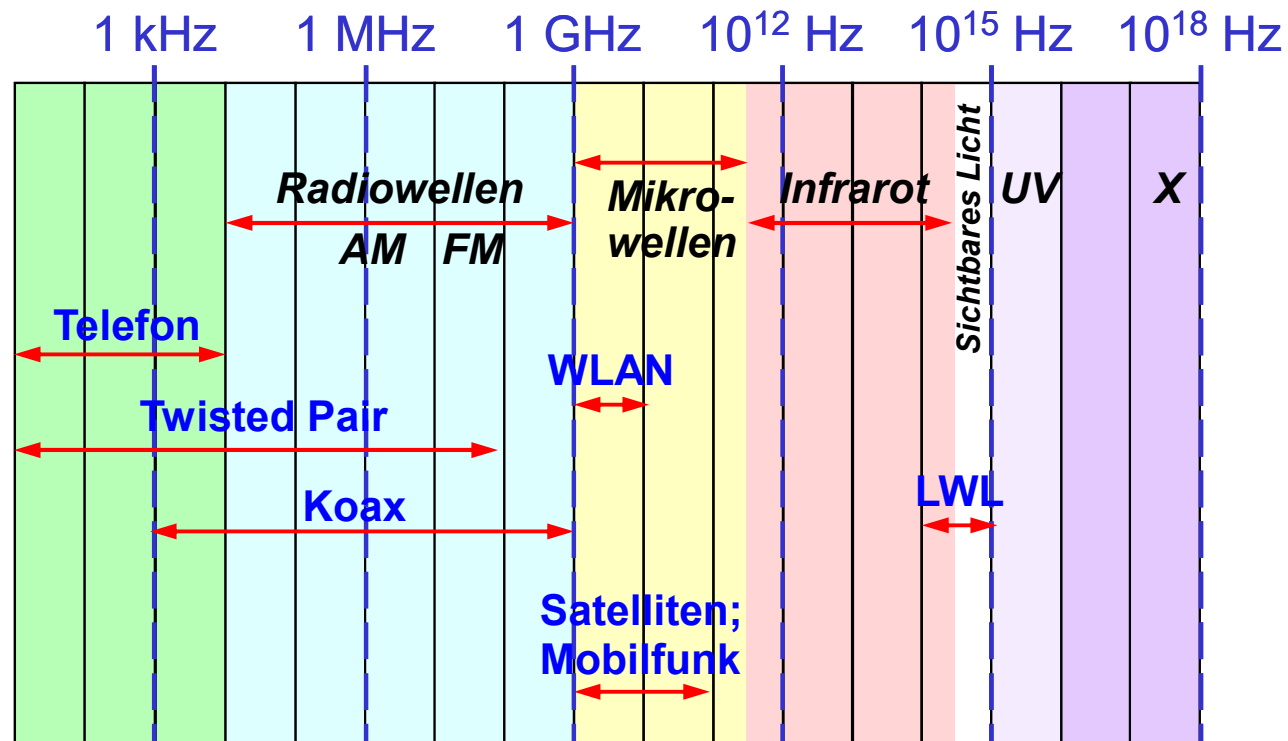
- *Arten von Übertragungsmedien*



2.4 Physikalische Übertragungsmedien

- Frequenzspektrum*

[Ref 2] Kapitel 2, Seite 138-130



2.4 Physikalische Übertragungsmedien

- *Typische Daten- und Bitfehlerraten*

	<i>Datenrate</i>	<i>Bitfehlerrate</i>
<i>Leitergebunden</i>		
– <i>Elektrische Leiter</i>		
→ <i>Twisted Pair-Kabel</i>	1 kbps - 1 Gbps	10^{-8}
→ <i>Koaxialkabel</i>	1 Mbps - 100 Mbps	10^{-10}
– <i>Lichtwellenleiter</i>		
→ <i>Monomode</i>	100 Gbps - 1 Pbps	10^{-13}
→ <i>Multimode</i>	10 Gbps - 100 Tbps	10^{-12}
<i>Drahtlos</i>		
→ <i>Funk</i>	10 kbps - 100 kbps	10^{-6}
→ <i>Mikrowelle</i>	10 Mbps - 1 Gbps	10^{-8}
→ <i>Infrarot</i>	10 kbps - 1 Tbps	10^{-8}