

# Rechnernetze

## Kapitel 2: Physical Layer

Prof. Dr. Wolfgang Mühlbauer

Fakultät für Informatik

wolfgang.muehlbauer@th-rosenheim.de

Wintersemester 2019/2020

Folien basieren auf:

A. Tanenbaum, D. Wetherall: Computer Networks

## ❑ Nachrichtentechnische Grundlagen

- Welche Grenzen setzt die Physik bzgl. der Datenrate?

## ❑ Übertragungsmedien

- Über welche Medien kann man Daten übertragen?

## ❑ Digitale Modulation

- Wie überträgt man Bitsequenzen über Kabel und über die Luft

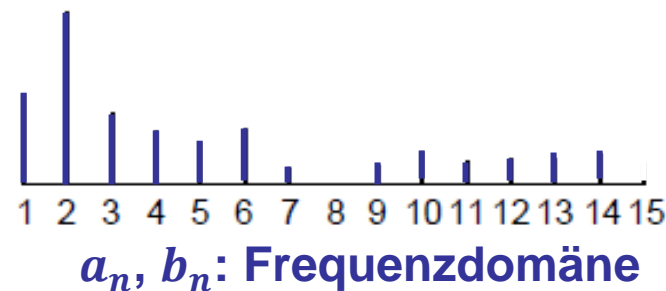
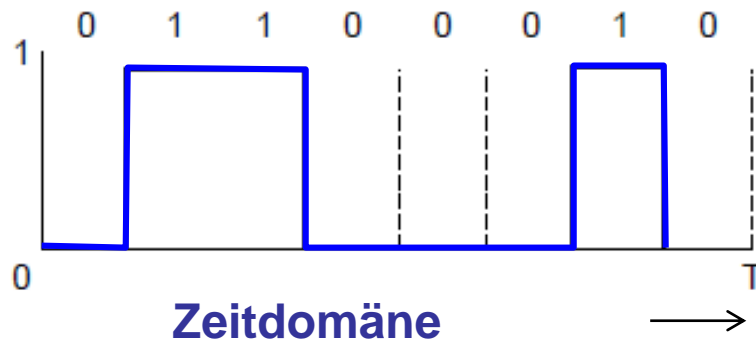
## ❑ Multiplexing

- Wie überträgt man Datenströme über ein geteiltes Medium?

# Fourier-Analyse

- Übertragung von Bitsequenzen durch zeitliche Veränderung von physikalischen Größen (z.B. Spannung)
- Fourier: 2 **gleichwertige** Beschreibungen für ein **Signal**
  - **Zeitdomäne**: Signalverlauf über die Zeit
  - **Frequenzdomäne**: Frequenzanteile  $a_n, b_n$  aus denen sich Signal zusammensetzt.

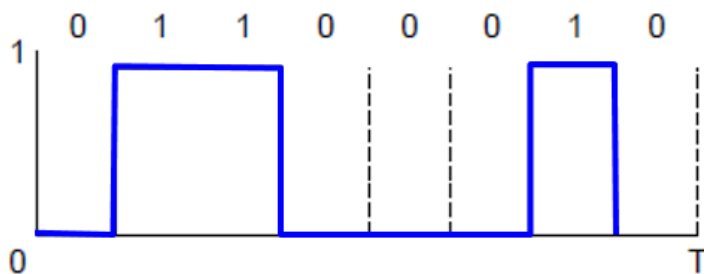
$$g(t) = \frac{1}{2}c + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(2\pi nft) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(2\pi nft)$$



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

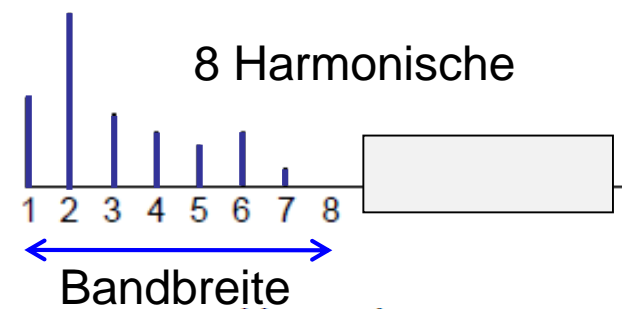
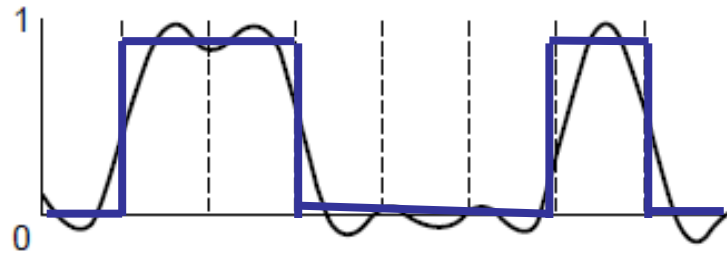
# Signalübertragung bei begrenzter Bandbreite

- Jedes Signal besteht aus vielen verschiedenen Frequenzen.
- **Dämpfung**
  - Je länger die Leitung, desto mehr Dämpfung (Verringerung der Leistung/Amplituden)
- **Verzerrung**
  - Übertragungsmedien dämpfen Frequenzen **verschieden stark**.
  - Meist nur Frequenzen bis zu bestimmtem Maximalwert  $f_c$  gut übertragbar.
- **Bandbreite**
  - *Elektrotechnik*: Frequenzbereich, der "gut" übertragen werden kann.
  - *Informatik*: Datenrate, die bei physikalischen Bedingungen möglich ist.
- Beispiel: Übertragung des Signals 01100010

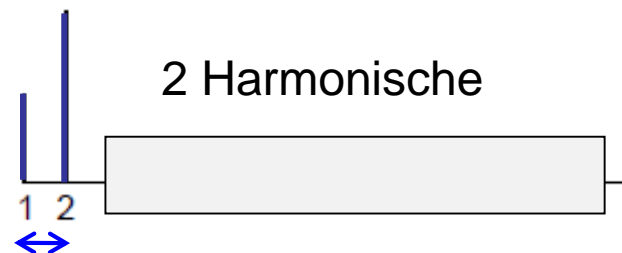
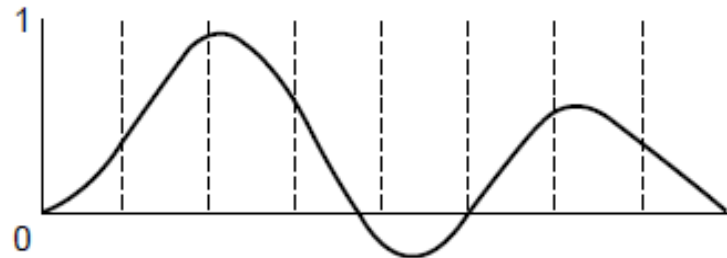
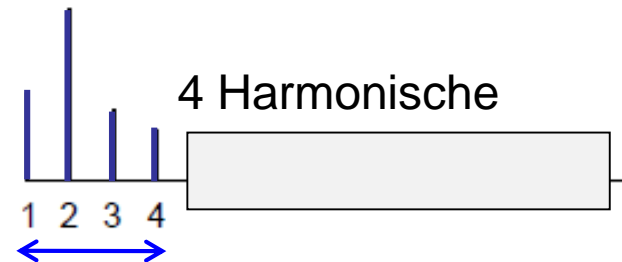
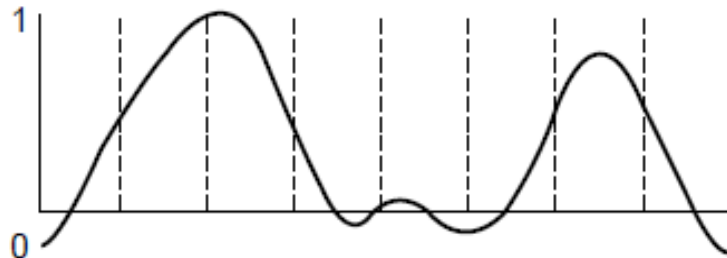


# Signale mit begrenzter Bandbreite

- ❑ Wegen Verzerrung werden bestimmte Frequenzanteile nicht gut übertragen.
- ❑ Verlust hoher Frequenzanteile → Signal nicht rekonstruierbar.



Harmonische ==  
Ganzzahlige  
Vielfache der  
Grundfrequenz

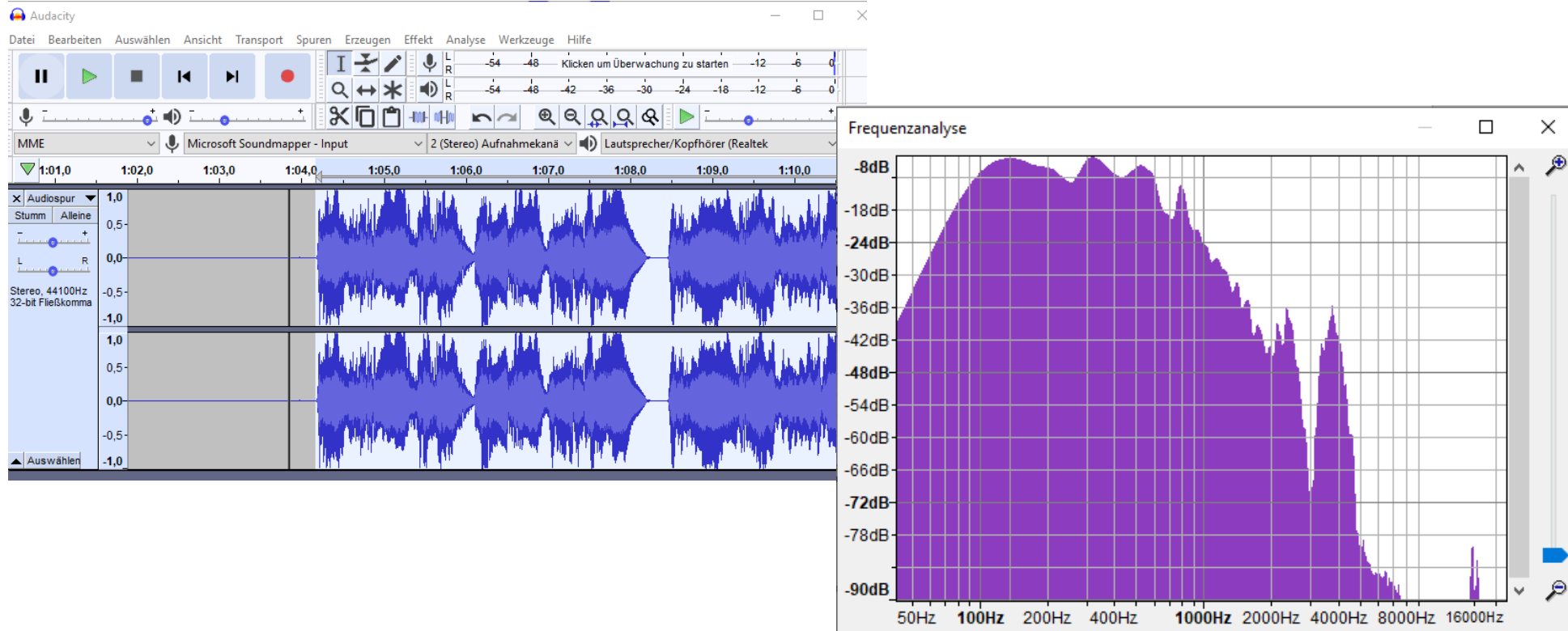


# Demo: Audacity

- ❑ Download: [www.audacity.de](http://www.audacity.de)
- ❑ Aufzeichnung und Analyse von Audiodateien
- ❑ Demo: Welche "Bandbreite" hat ein Mensch?
  - Aufzeichnung der Stimme mit Laptop-Mikrofon
  - Analyse der enthaltenen Frequenzen (= Bandbreite)



Quelle: [www.audacity.de](http://www.audacity.de)



# Nyquist: Datenrate $D$ bei unverraushtem Kanal

## □ Datenrate $D$ bei **unverraushtem Kanal** abhängig von:

- $B$ : Bandbreite, Größe des übertragbaren Frequenzbereichs
- $V$ : Anzahl der verwendeten Signalstufen

## Nyquist-Theorem:

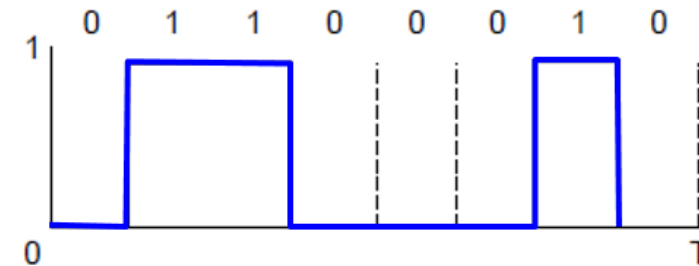
$$D = 2B \log_2 V$$

## □ Hohe Bandbreite → hohe Datenrate

## □ Übung:

- Wert von  $V$  für das abgebildete Signal?
- $B=4$  kHz, Kanal unverrauscht.
- Wie hoch ist maximal mögliche Datenrate?

Binäres Signal:  $V=2$   
(2 Signalstufen)



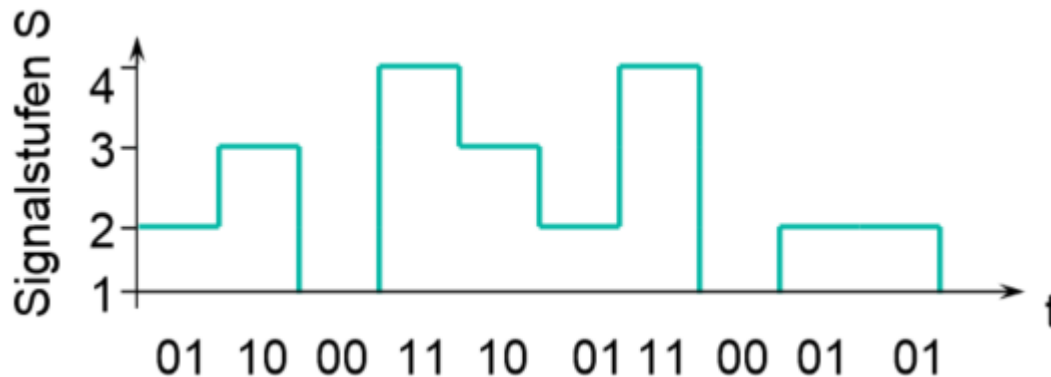
# Baudrate vs. Bitrate

## □ **Bitrate = Datenrate**

- Anzahl der übertragenen Bits pro Zeiteinheit.
- Einheit: **bit/s, kbit/s, KB/s**, etc.

## □ **Baudrate = Schrittgeschwindigkeit**

- Anzahl der Signalschritte pro Sekunde (Symbole)
- Einheit: **Baud / Bd**
- Bsp.: Jeder Signalschritt / jedes Symbol / jede Stufe repräsentiert 2 Bits!
- Bei sehr vielen möglichen Symbolen steigt der Hardwareaufwand.



**Was ist hier der Wert von V?**



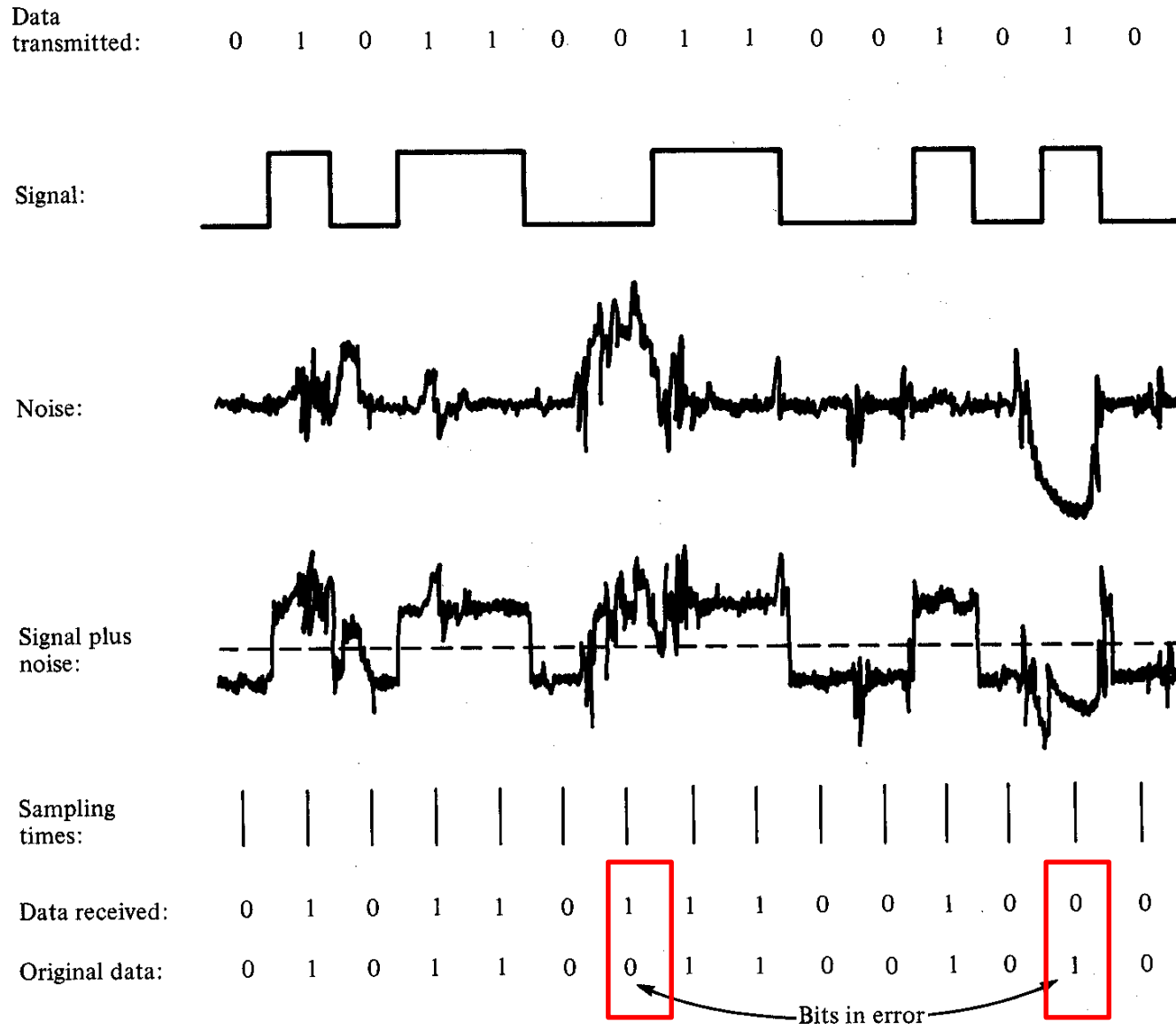
# Publikums-Joker: Bit vs. Baudrate

## Welche Aussage ist falsch?

- A. In einem rauschfreien Medium ist die erzielbare Bitrate nach oben begrenzt.
- B. Die Bitrate kann gleich groß sein wie die Baudrate.
- C. Die Baudrate bezeichnet die Anzahl der Signalveränderungen pro Sekunde.
- D. Verdoppelt man die Baudrate, so verdoppelt sich auch die Bitrate (Rahmenbedingungen bleiben unverändert)



# Beispiel: Bitfehler in verrauschtem Kanal



Aus Tanenbaum

# Shannon: Maximale Datenrate $D$ bei verrauschtem Kanal

**Shannon Theorem:**  $D = B \log_2(1 + \textcircled{S/N})$  ← absolut, nicht in dB

## □ **Abgrenzung**

- Gilt zusätzlich (!) zu Nyquist bei **verrauschem** Kanal.

## □ **S/N: Signal-Rauschabstand (Signal-to-Noise Ratio)**

- Leistung des Nutzsignals  $S$  / Leistung des Rauschens  $N$

## □ S/N meist in **Dezibel (dB)** angegeben

- *dB-Wert:*  $10 * \log_{10} S/N$
- Beispiel:  $S = 100\text{mW}$ ,  $N = 1\text{ mW}$ 
  - $S/N = 100 \rightarrow$  Das entspricht 20 dB!

## □ **Rauschquellen**

- Intermodulation, Übersprechen, thermisches Rauschen

- ❑ Nachrichtentechnische Grundlagen
- ❑ **Übertragungsmedien**
- ❑ Digitale Modulation
- ❑ Multiplexing

## ❑ **Drahtgebunden / Kabel**

- Twisted Pair
- Koaxialkabel
- Lichtwellenleiter
- Stromnetz

## ❑ **Drahtlos / Luft**

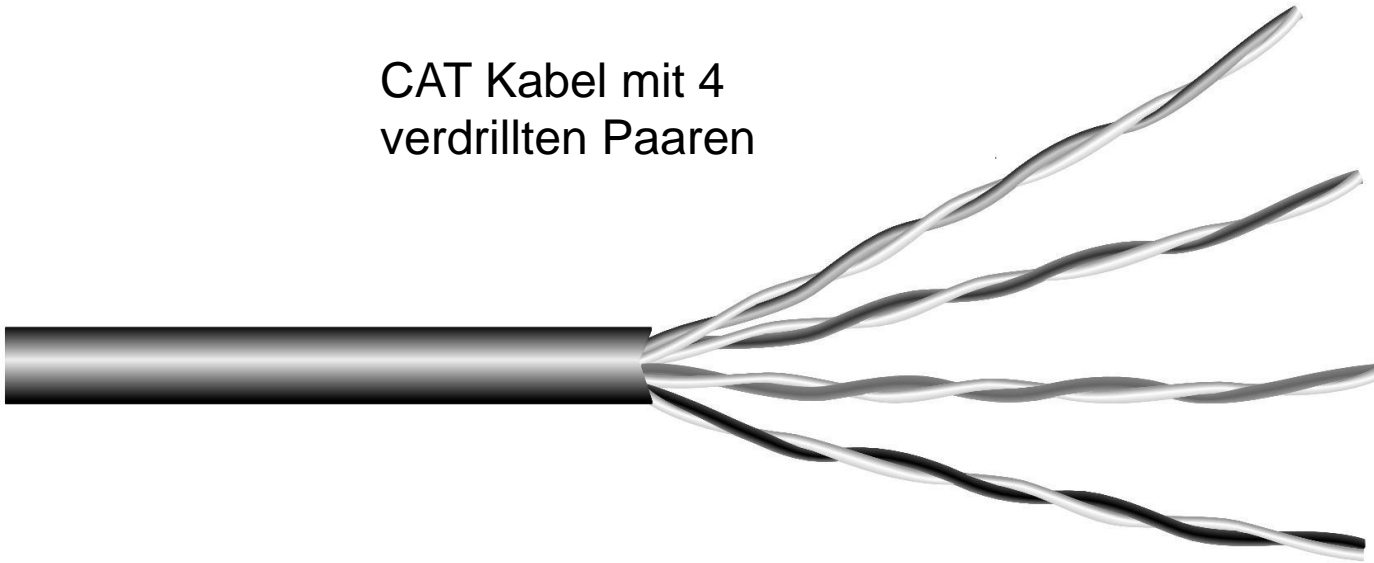
- Richtfunkstrecken
- Satellit
- Mobilfunk
- WLAN

## ❑ **Verschiedene Übertragungsmedien → verschiedene Eigenschaften und Bandbreiten**

# Twisted Pair

- ❑ Häufig verwendet in
  - Local Area Networks (LANs)
  - Telefonleitungen
- ❑ Verdrillung vermindert Dämpfung
  - Kabel strahlt sonst wie eine Antenne ab.
- ❑ Verschiedene Spezifikationen (*Categories*)
  - CAT5: Betriebsfrequenz 100 MHz
  - CAT6: Betriebsfrequenz bis 250 MHz 100m
  - CAT6/7: Bis zu 600 Mbps auf 100m

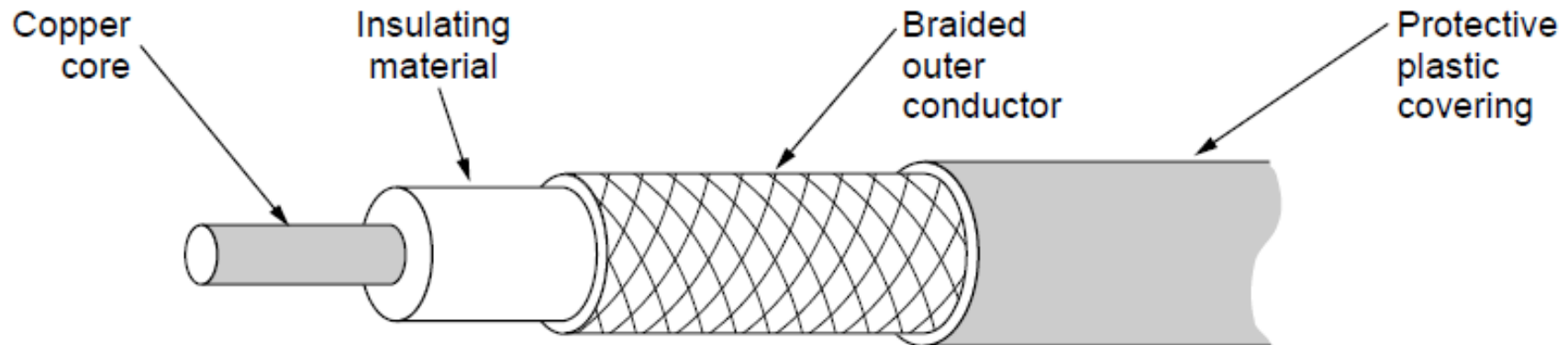
CAT Kabel mit 4  
verdrillten Paaren



Aus Tanenbaum

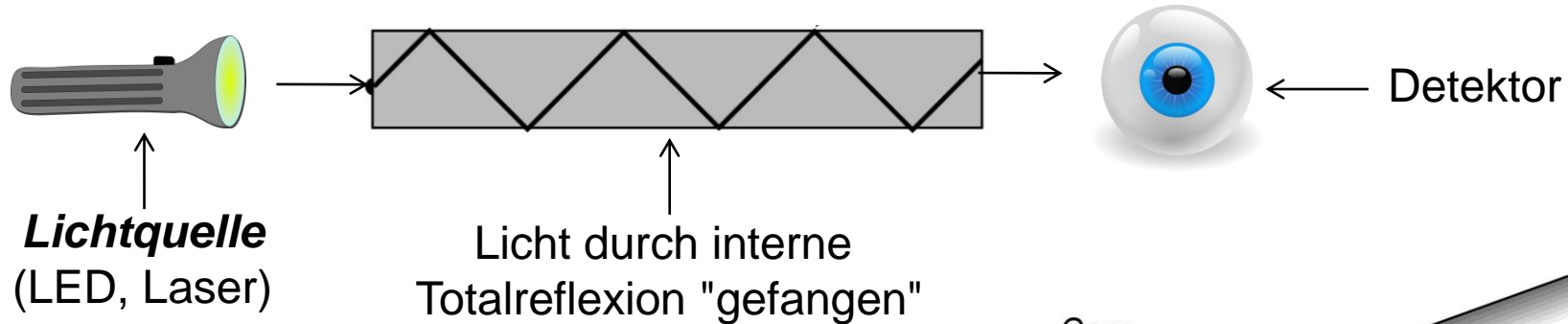
# Koaxialkabel

- ❑ Bessere Isolierung als Twisted Pair
- ❑ Im allgemeinen höhere Bandbreite



Aus Tanenbaum

# Glasfaser



## □ **Einsatz**

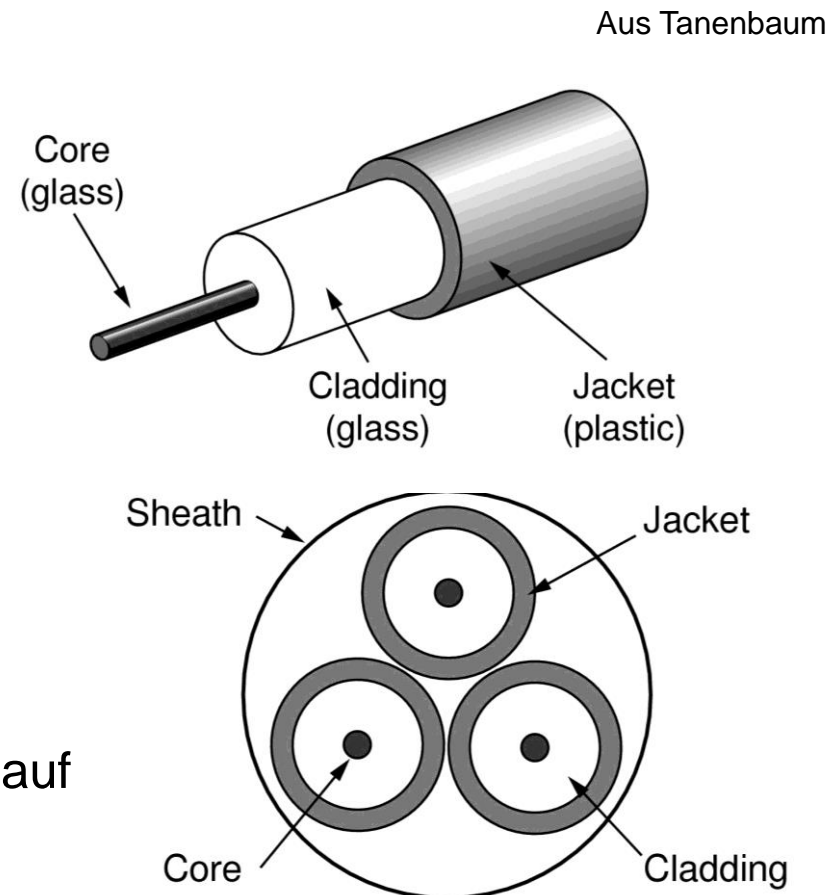
- Backbone Links
- Fiber-to-the-Home (FTTH)

## □ **Multi-mode**

- Kern mit "größerem" Durchmesser ( $>10\ \mu\text{m}$ )
- Mehrere gleichzeitige Lichtstrahlen möglich.

## □ **Single-Mode**

- Sehr enger Kern ( $<10\ \mu\text{m}$ )
- 1 gleichzeitiger Lichtstrahl, kein Zickzackverlauf
- Teurer → für weitere Entfernungen!





# Terminologie: Duplex vs. Simplex

## ❑ Full duplex (dt. vollduplex)

- Beide Übertragungsrichtungen **gleichzeitig** möglich

## ❑ Half duplex (dt. halbduplex)

- Beide Übertragungsrichtungen, **aber nicht gleichzeitig**

## ❑ Simplex

- Nur eine Übertragungsrichtung möglich
- Unüblich.

## ❑ Frage: Full-duplex, half-duplex, oder simplex?

- Vorlesung?
- Fußballstadium?
- Einbahnstraße?

# Publikums-Joker: Duplex vs. Simplex

Welche der folgenden Technologien ist so gut wie immer **halbduplex**?

- A. Ethernet
- B. WLAN
- C. USB
- D. Zugang zu Mobilfunknetz



- ❑ Nachrichtentechnische Grundlagen
- ❑ Übertragungsmedien
- ❑ **Digitale Modulation**
  - Übertragung im Basisband
  - Übertragung im Bandpassbereich
- ❑ Multiplexing

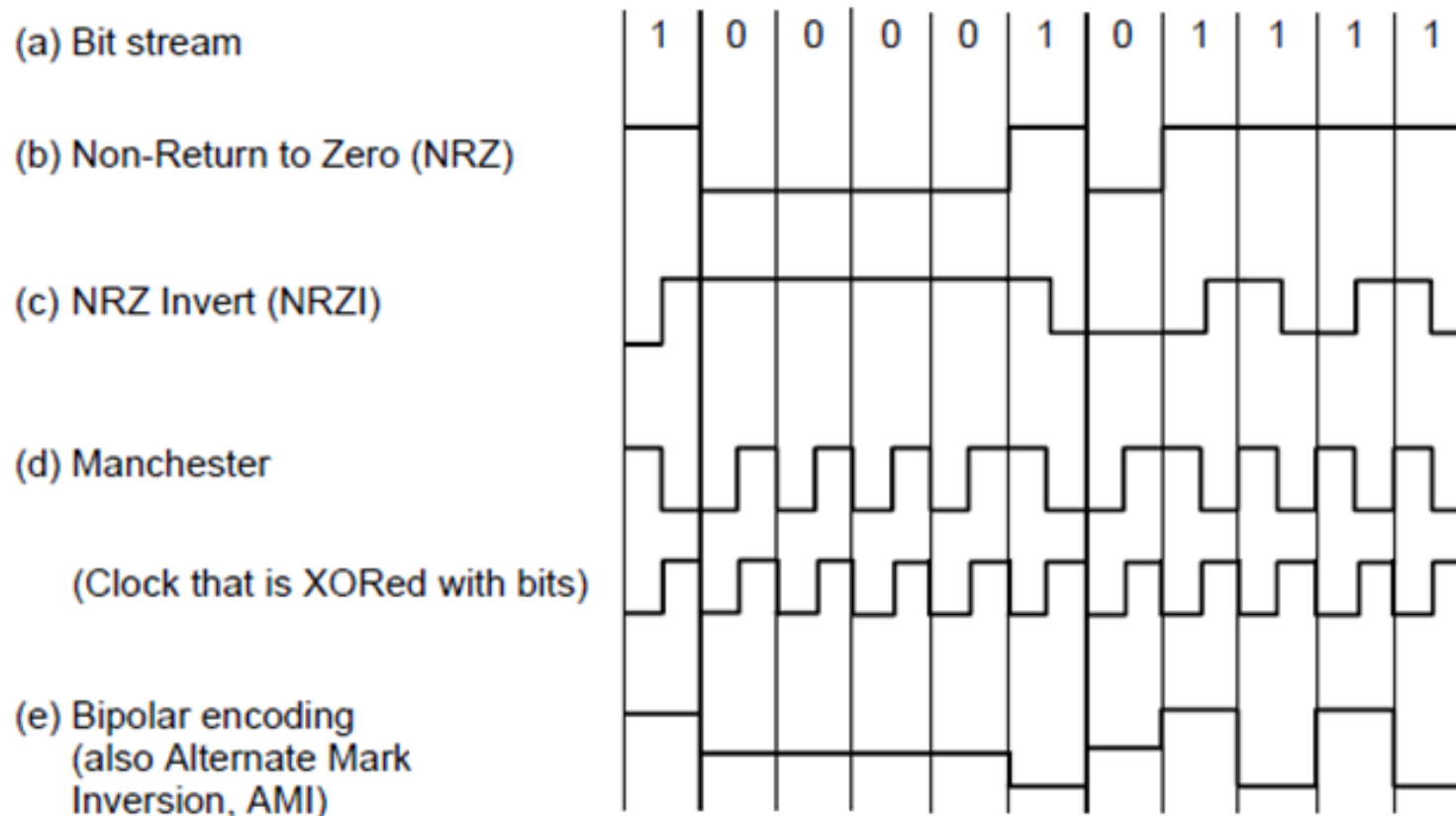
# Basisband vs. Bandpassbereich

- ❑ **Modulation** am Sender: Bitsequenz → übertragbares Signal
- ❑ **Demodulation** am Empfänger: Übertragenes Signal → Bitsequenz
  
- ❑ 2 Grundarten:
  - **Übertragung im Basisband**
    - Signal beinhaltet Frequenzen im Bereich  $[0; f_{\max}]$  und wird **direkt / unverändert** in diesem Frequenzbereich  $[0; f_{\max}]$  übertragen.
    - Normales Vorgehen bei **drahtgebundener** Kommunikation.
  
  - **Übertragung im Bandpassbereich**
    - Nutzsignal wird in höheren Frequenzbereich verschoben.
    - Nutzsignal verändert ein sogenanntes **Trägersignal**.
    - Am Empfänger: Rückgewinnung der Bitsequenz (**Demodulation**)
    - Vorgehen bei **drahtloser** Übertragung.

# Übertragung im Basisband

## ❑ Leitungscodes

- Festlegung: Was repräsentiert ein 0- bzw. 1-Bit?
- Beispiel NRZ-Code: +1V ist "1", -1V = "0"



Welches  
Prinzip liegt  
den  
Leitungscodes  
zugrunde?

Warum  
werden  
Leitungscodes  
eingesetzt?

# Warum Leitungscodes? (1)

- ❑ Zur Rückgewinnung der Symbole: **Häufige Symbolwechsel** beim Empfänger benötigt.
  - Beispiel: In folgendem Beispiel hätte es der Empfänger schwer zu entscheiden wie viele 0er gesendet wurden.

1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

- ❑ **Mögliche Abhilfe:**
  - **Synchrone Uhren** bei Empfänger/Sender
  - **Manchester-Code:** XOR von Takt und Nutzsignal (Taktfrequenz = 2\* "Bitfrequenz")
  - **Codierung:** z.B. 4B/5B Code bildet 4 Bits auf 5 Bits mit 0er und 1er ab.

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

## 4B/5B Code

Was ist allen Codes  
Gemeinsam?

# Publikums-Joker: 4B/5B Code

Welche der folgenden Aussagen bzgl. des 4B/5B Codes ist **falsch**?

- A. Der 4B/5B Code vereinfacht die Taktrückgewinnung beim Empfänger.
- B. Die Verwendung des 4B/5B Codes senkt die effektive Datenrate.
- C. Der 4B/5B Code erhöht die Baudrate.
- D. Der 4B/5B Code vermeidet lange Sequenzen von 0-Bits oder 1-Bits.



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

# Warum Leitungscode? (2)

## ❑ Effizientes Ausnutzen der vorhandenen Bandbreite

- Übersetzen der Bitsequenz in eine Sequenz von Symbolen mit vielen verschiedenen Symbolen (hohe Baudrate).
- Siehe auch: Bitrate vs. Baudrate

## ❑ Unterdrückung eines Gleichspannungsanteils

- Starke Dämpfung von Gleichstromanteilen bei Übertragung!
- Gleichstromanteilen erschweren kapazitive Kopplung.
- Möglich Abhilfe, z.B. **AMI-Code**:
  - Spannung +1V und 0V;
  - Jedes HIGH ändert den Pegel.

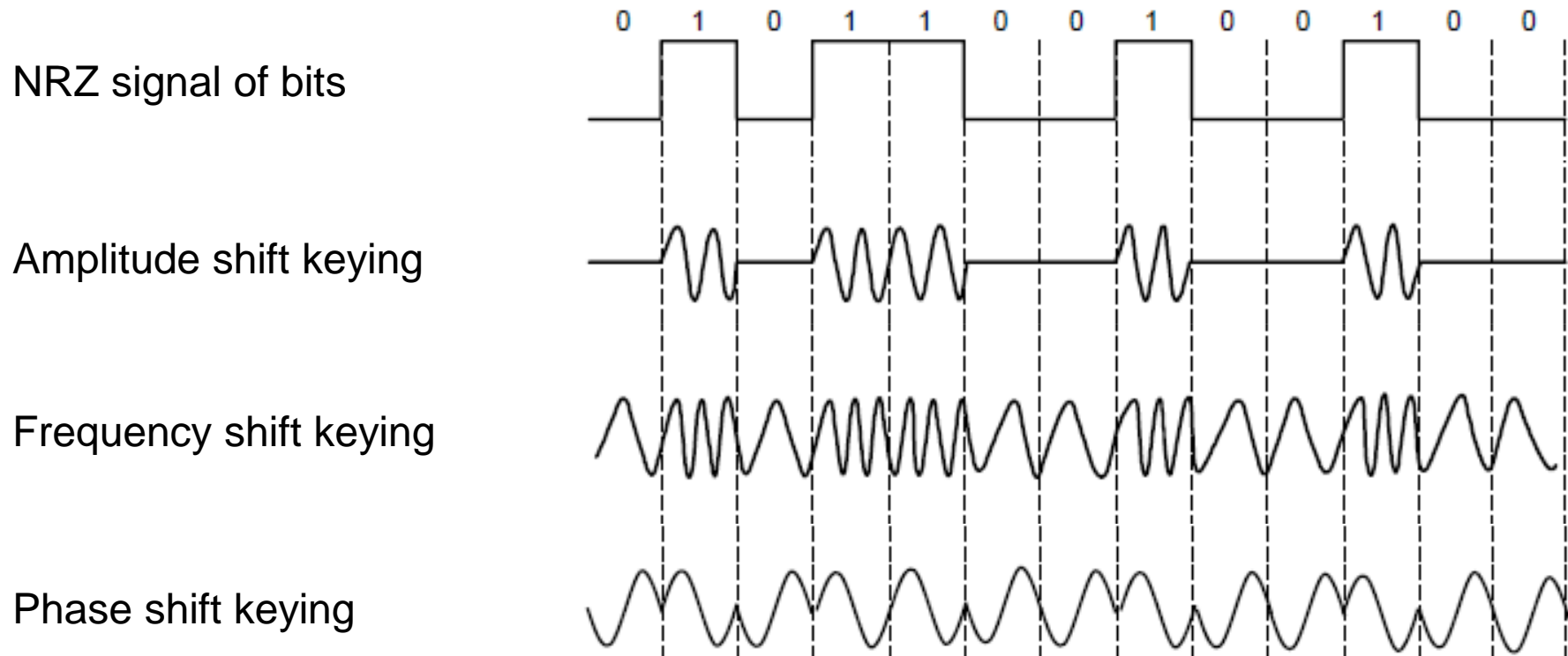


- ❑ Nachrichtentechnische Grundlagen
- ❑ Übertragungsmedien
- ❑ **Digitale Modulation**
  - Übertragung im Basisband
  - **Übertragung im Bandpassbereich**
- ❑ Multiplexing

# Übertragung im Bandpassbereich

- ❑ Verschiebe Nutzsignal vor Übertragung in höheren Frequenzbereich!
  
- ❑ Warum ist das notwendig?
  - Antennen müssten für tiefe Frequenzen (z.B. 500 Hz) riesig sein.
  - Nur 1 gleichzeitiges Signal möglich, falls nur Bereich  $[0; f_{\max}]$  verwendbar.
  
- ❑ **Ansatz: *Nutzsignal* verändert ein sogenanntes *Trägersignal*.**
  - **Amplitude:** Das Signal wechselt zwischen  $> 2$  verschiedenen Amplituden.
  - **Frequenz:** Mehr als 2 Frequenzen werden verwendet, um 1 oder 0 zu repräsentieren.
  - **Phase:** Zwei oder mehr Phasensprünge kodieren die Information.

# Bandpassbereich: Modulationsarten

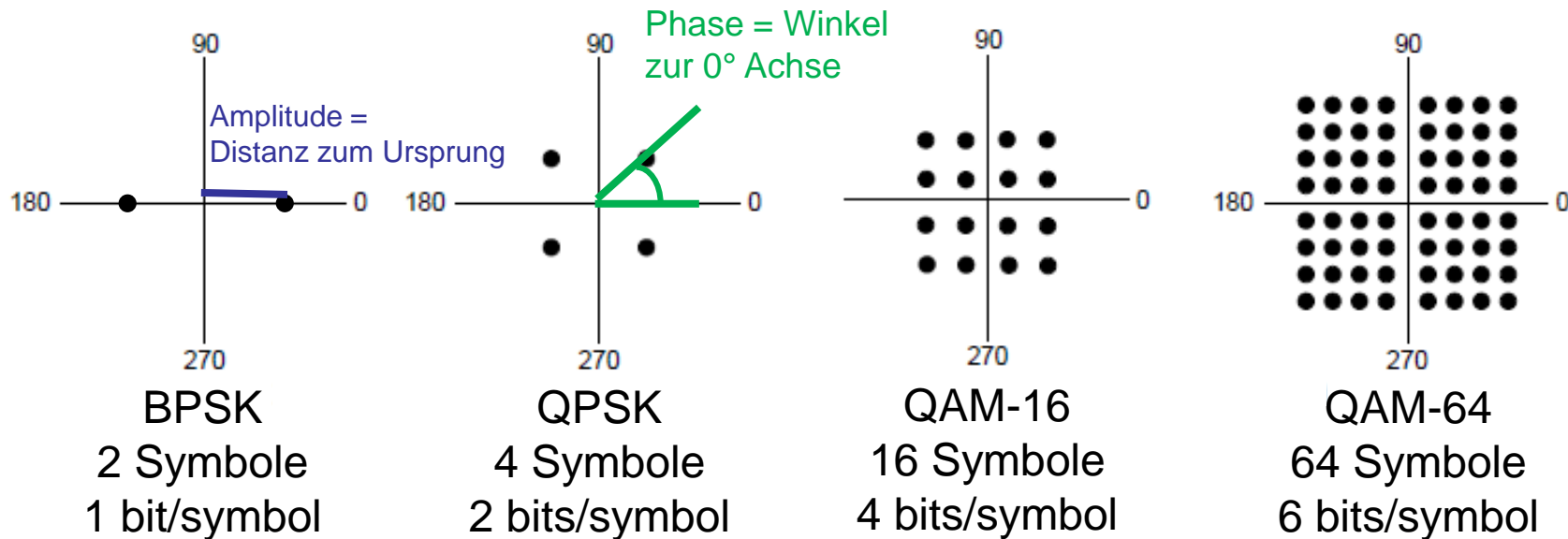


## □ Beispiel: Amplitude Shift Keying (ASK)

- Durch An- und Ausschalten des Signals wird Information übertragen.

# Bandpassbereich: Kombination von Modulationsarten

- ❑ Amplituden- (ASK) und Phasenmodulation (PSK) werden häufig kombiniert.
  - Ergibt mehr Symbole und damit eine höhere Bitrate bei gleichbleibender Baudrate.
- ❑ Darstellung als **Konstellationsdiagramm**
  - Zeigt durch welche Amplituden und Phasensprünge Symbole repräsentiert werden.



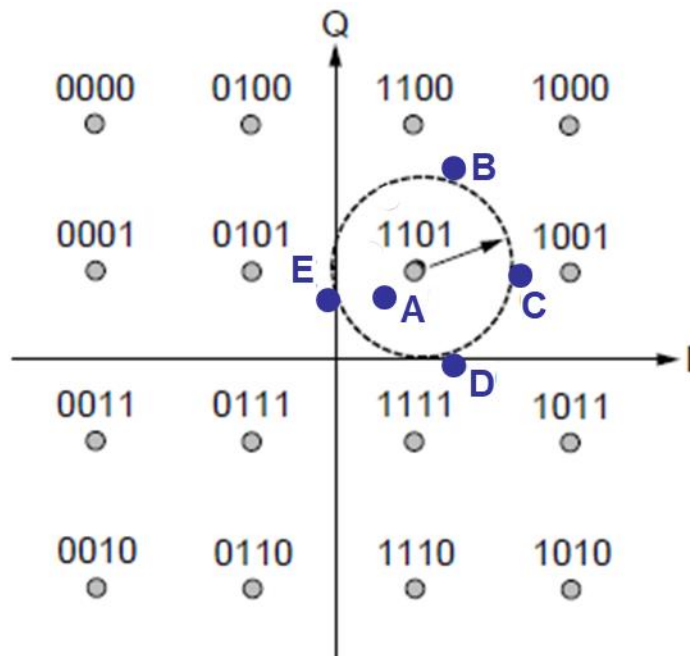
BPSK/QPSK ändert nur die Phase.

QAM ändert Amplitude und Phase

# Bandpassbereich: Zuweisen von Bitcodes

## □ Gray-Code

- Zuweisung von Bits zu Symbolen, so dass kleine Fehler bei der Symbolerkennung nur wenige Bitfehler verursachen.



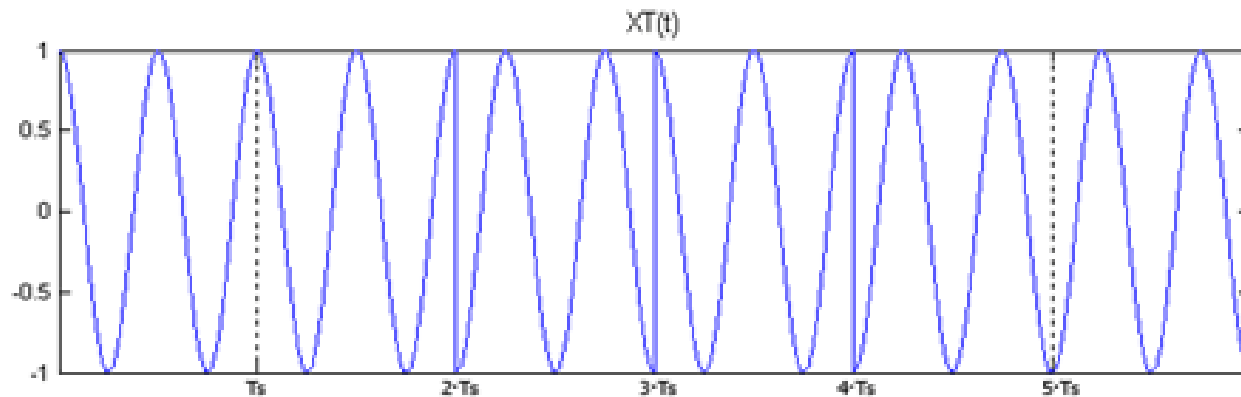
When 1101 is sent:

Point	Decodes as	Bit errors
A	1101	0
B	110 <u>0</u>	1
C	<u>1</u> 001	1
D	11 <u>1</u> 1	1
E	<u>0</u> 101	1

# Publikums-Joker: Digitale Modulation

Um welche Modulationsart handelt es sich unten?

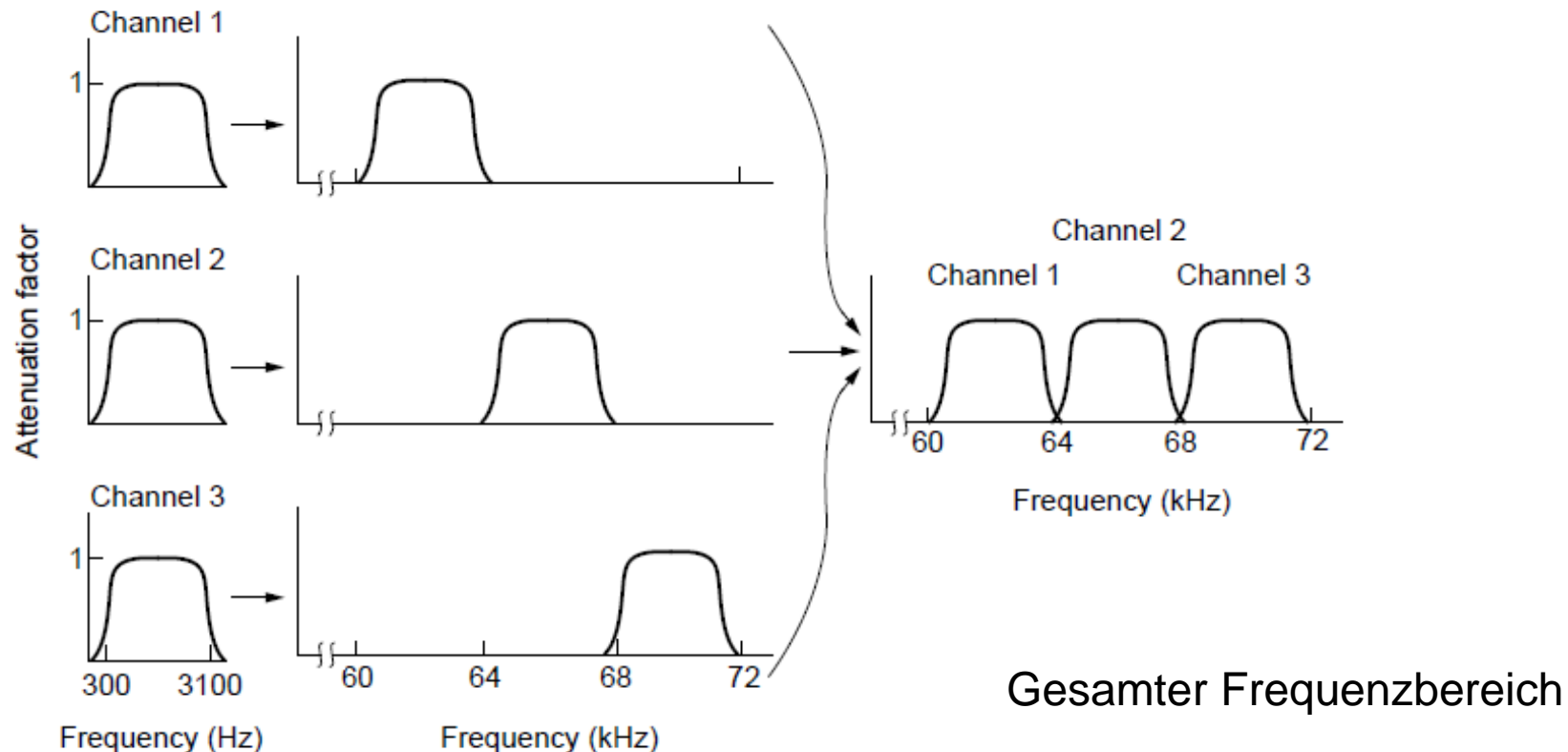
- A. ASK
- B. FSK
- C. PSK



- ❑ Nachrichtentechnische Grundlagen
- ❑ Übertragungsmedien
- ❑ Digitale Modulation
  - *Wie übersetzt man Bits in Signale?*
- ❑ **Multiplexing**
  - *Wie teilen sich mehrere Nutzer ein Übertragungsmedium?*

# Frequency Division Multiplexing (FDM)

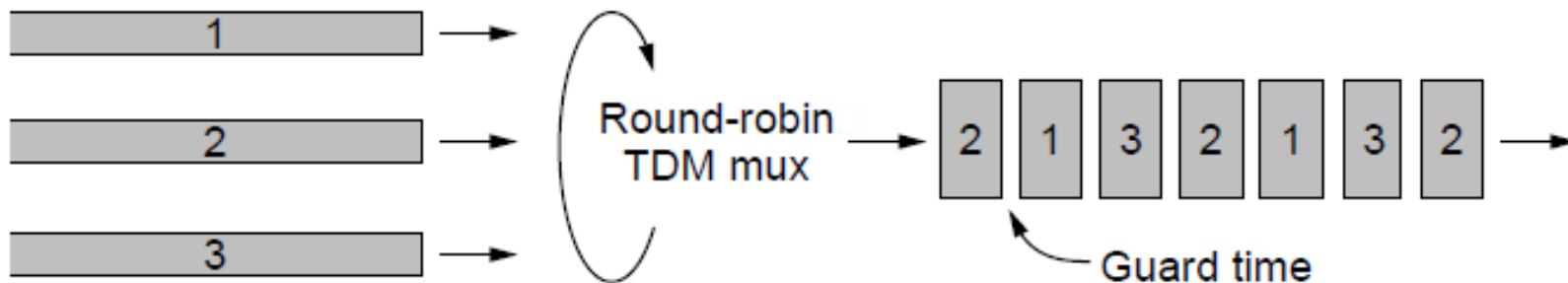
- ❑ Frequenzbereiche werden Benutzern zugeteilt.
- ❑ Jeder Benutzer verwendet seinen Frequenzbereich.





# Time Division Multiplexing (TDM)

- ❑ Frequenzbereich (Kanal) wird über die Zeit geteilt.
- ❑ Benutzer wechseln sich zeitlich ab.
- ❑ Häufig verwendet in Telefon- und Mobilfunknetzen.



# Zusammenfassung

---

- ❑ Nachrichtentechnische Grundlagen
  - Die Physik setzt der maximalen Datenrate Grenzen
  - Nyquist, Shannon
- ❑ Übertragungsmedien
  - Twisted Pair, Koaxial, Glasfaser
- ❑ Digitale Modulation
  - Wie übersetzt man Bits in Signale?
  - Basisband: Leitungscodes
  - Bandpassbereich: Amplitude, Phase, Frequenz
- ❑ Multiplexing
  - Wie teilen sich mehrere Nutzer ein Übertragungsmedium?
  - Frequenz- und Zeitmultiplex