

# Systeme II

## 2. Die physikalische Schicht

Christian Schindelhauer

Technische Fakultät

Rechnernetze und Telematik

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Version 14.05.2014

## ■ Definition

- Die Bandweite  $H$  ist die Maximalfrequenz in der Fourier-Zerlegung

## ■ Angenommen:

- Die maximale Frequenz des empfangenen Signals ist  $f=H$  in der Fouriertransformation
  - (Komplette Absorption [unendliche Dämpfung] aller höheren Frequenzen)
- Die Anzahl der verschiedenen verwendeten Symbole ist  $V$
- Es treten keinerlei anderen Störungen, Verzerrungen oder Dämpfungen auf

## ■ Theorem von Nyquist

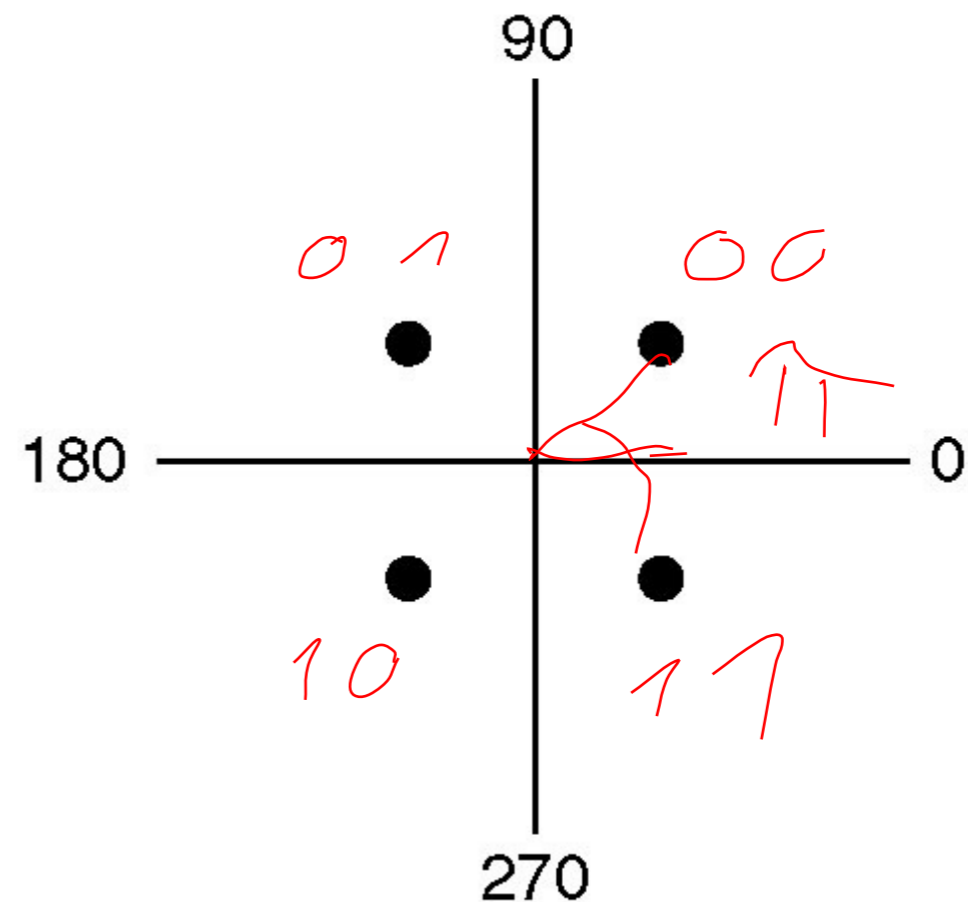
- Die maximal mögliche Symbolrate ist höchstens  $2 H$  baud.
- Die maximal mögliche Datenrate ist höchstens  $2 H \log_2 V$  bit/s.

# Helfen mehr Symbole?

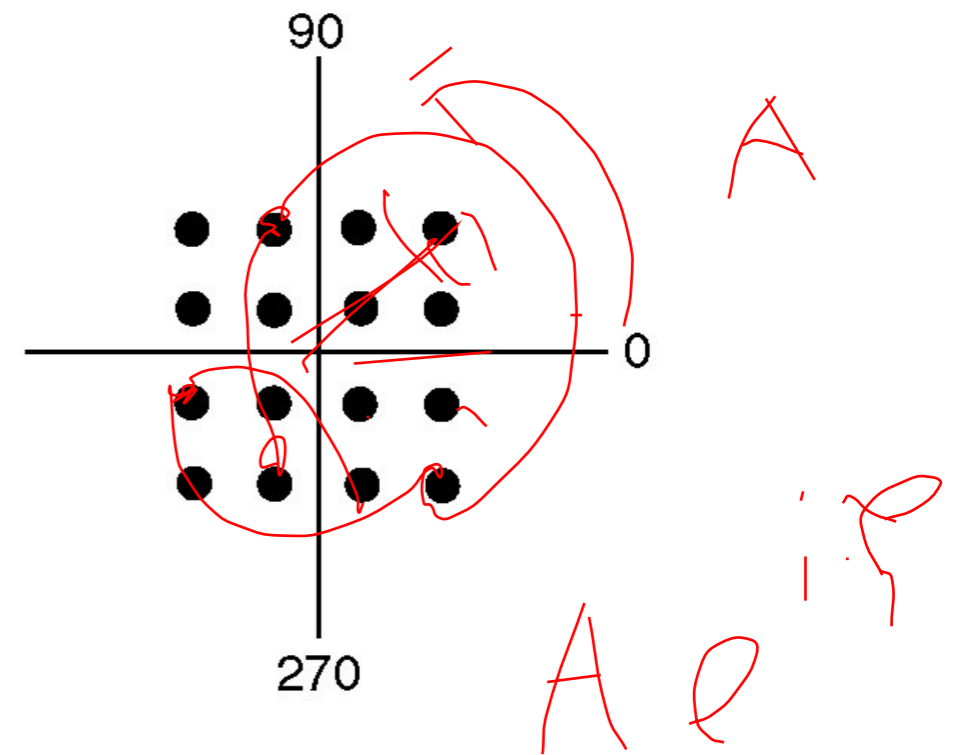
- Nyquists Theorem besagt, dass rein theoretisch die Datenrate mit der Anzahl der verwendeten Symbole vergrößert werden könnten
- Diskussion:
  - Nyquists Theorem liefert nur eine theoretische obere Schranke und kein Verfahren zur Übertragung
  - In der Praxis gibt es Schranken in der Messgenauigkeit
  - Nyquists Theorem berücksichtigt nicht das Problem des Rauschens

# PSK mit verschiedenen Symbolen

- Phasenverschiebungen können vom Empfänger sehr gut erkannt werden
- Kodierung verschiedener Symbole sehr einfach
  - Man verwendet Phasenverschiebung z.B.  $\pi/4$ ,  $3/4\pi$ ,  $5/4\pi$ ,  $7/4\pi$ 
    - selten: Phasenverschiebung 0 (wegen Synchronisation)
  - Bei vier Symbolen ist die Datenrate doppelt so groß wie die Symbolrate
- Diese Methode heißt Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)



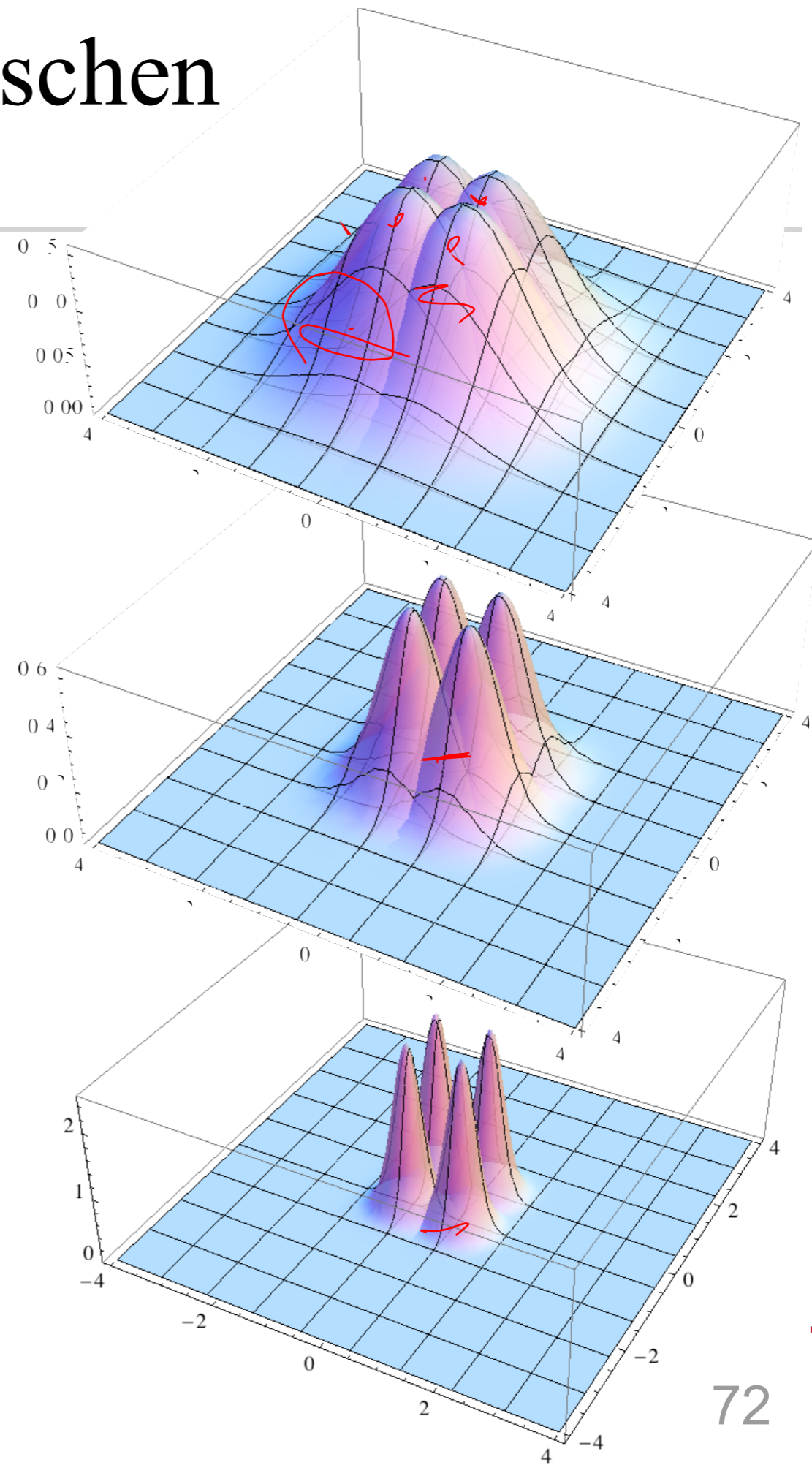
- Amplituden- und Phasenmodulation können erfolgreich kombiniert werden
- Beispiel: 16-QAM (Quadrature Amplitude Modulation)
  - Man verwendet 16 verschiedene Kombinationen von Phasen und Amplituden für jedes Symbol
  - Jedes Symbol kodiert vier Bits ( $2^4 = 16$ )
  - Die Datenrate ist also viermal so groß wie die Symbolrate



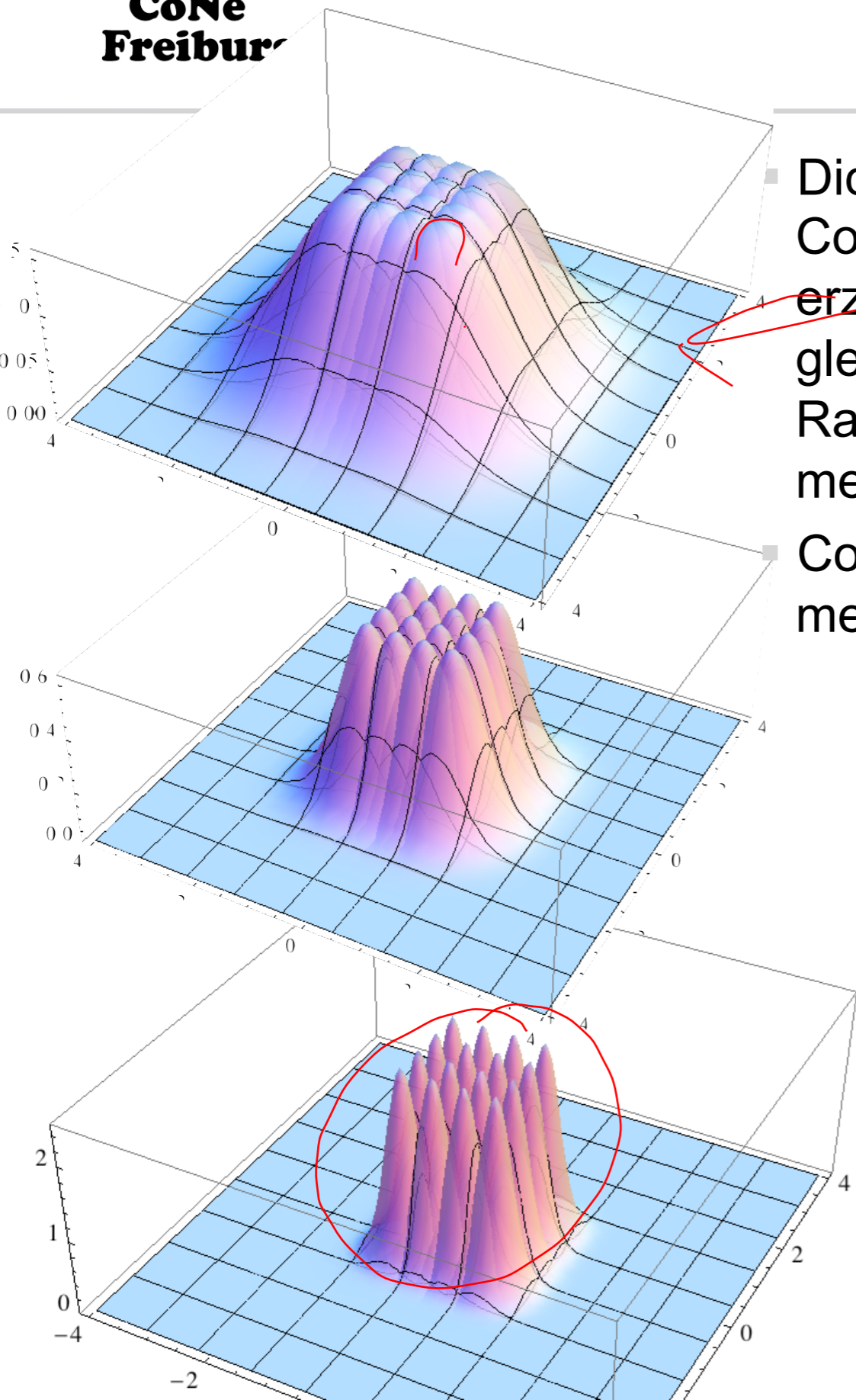
- Rauschen wird mit der Normalverteilung beschrieben

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x - \mu}{\sigma} \right)^2}$$

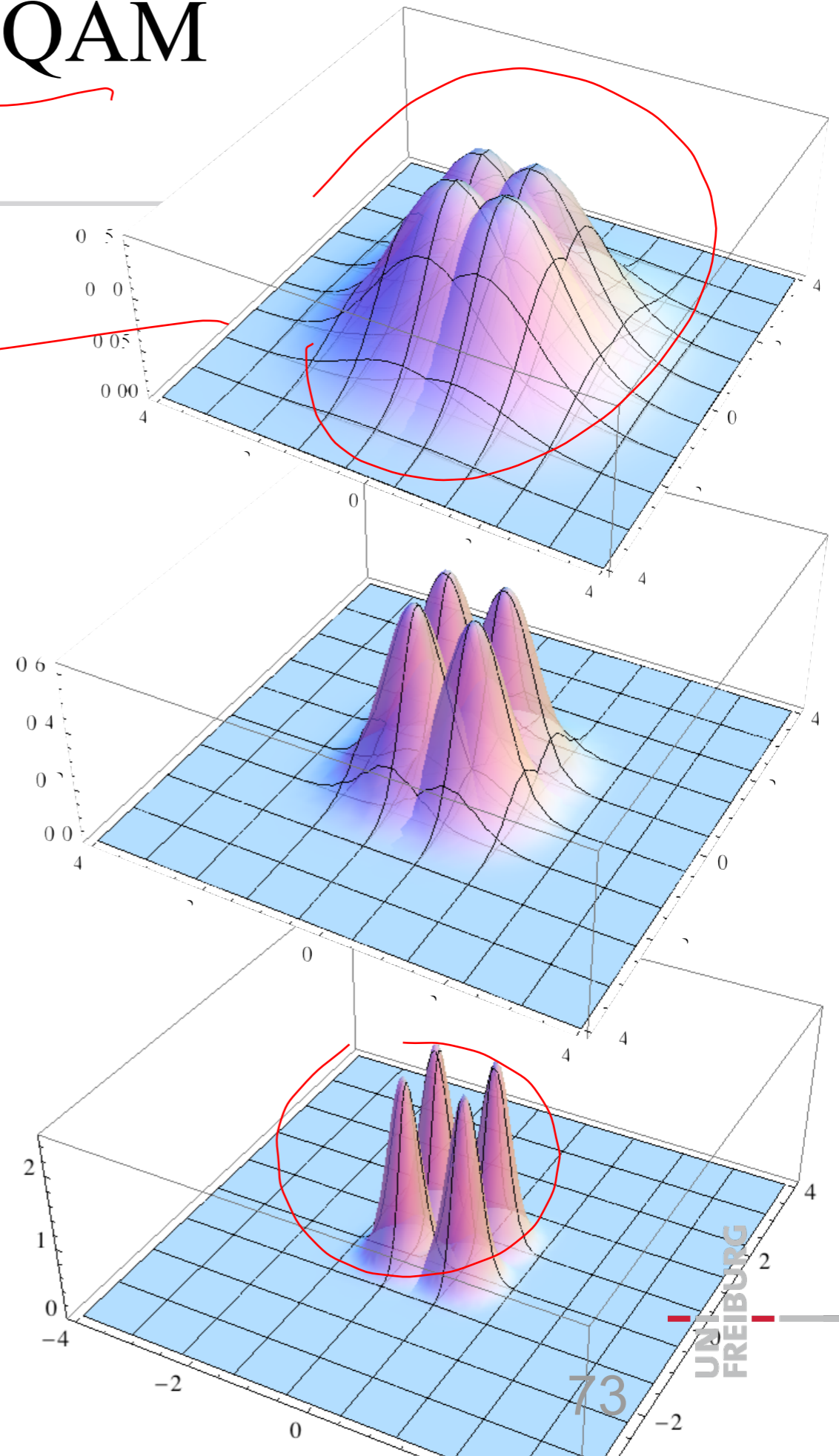
- Bitfehler entstehen, wenn das dekodierte Signal zu stark abweicht
- Das Signal/Rauschverhältnis korreliert mit der Standardabweichung  $\sigma$



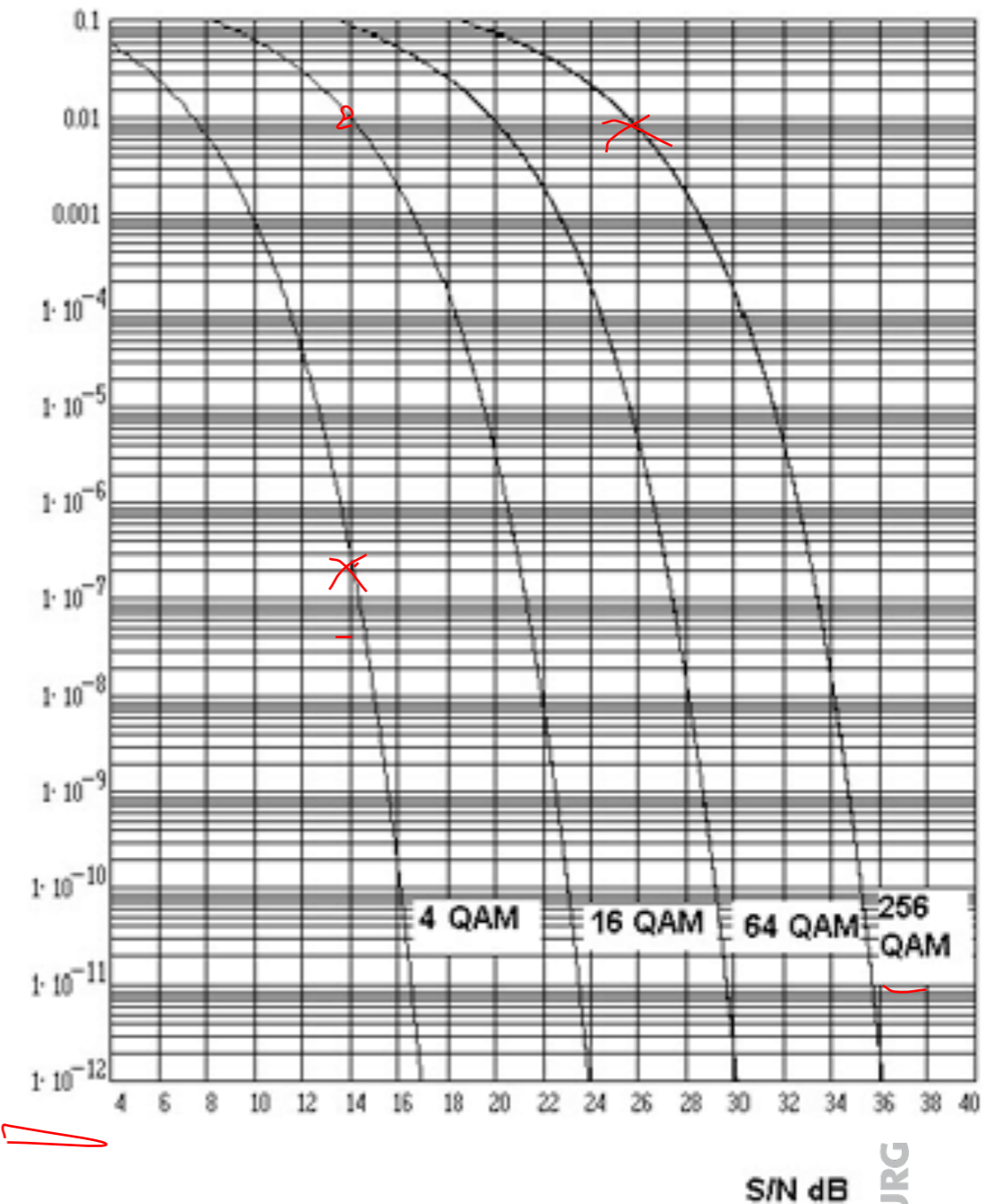
# QAM versus 16QAM



■ Dichtere Codes erzeugen bei gleichem Rauschen mehr Fehler  
■ Codieren aber mehr Bits



- Je höher das Signal-Rausch-Verhältnis, desto geringer ist der auftretende Fehler
- Bitfehlerhäufigkeit (bit error rate - BER)
  - Bezeichnet den Anteil fehlerhaft empfangener Bits
- Abhängig von
  - Signalstärke,
  - Rauschen,
  - Übertragungsgeschwindigkeit
  - Verwendetem Verfahren
- Abhängigkeit der Bitfehlerhäufigkeit (BER) vom Signal-Rausch-Verhältnis
  - Beispiel:  
4 QAM, 16 QAM, 64 QAM, 256 QAM





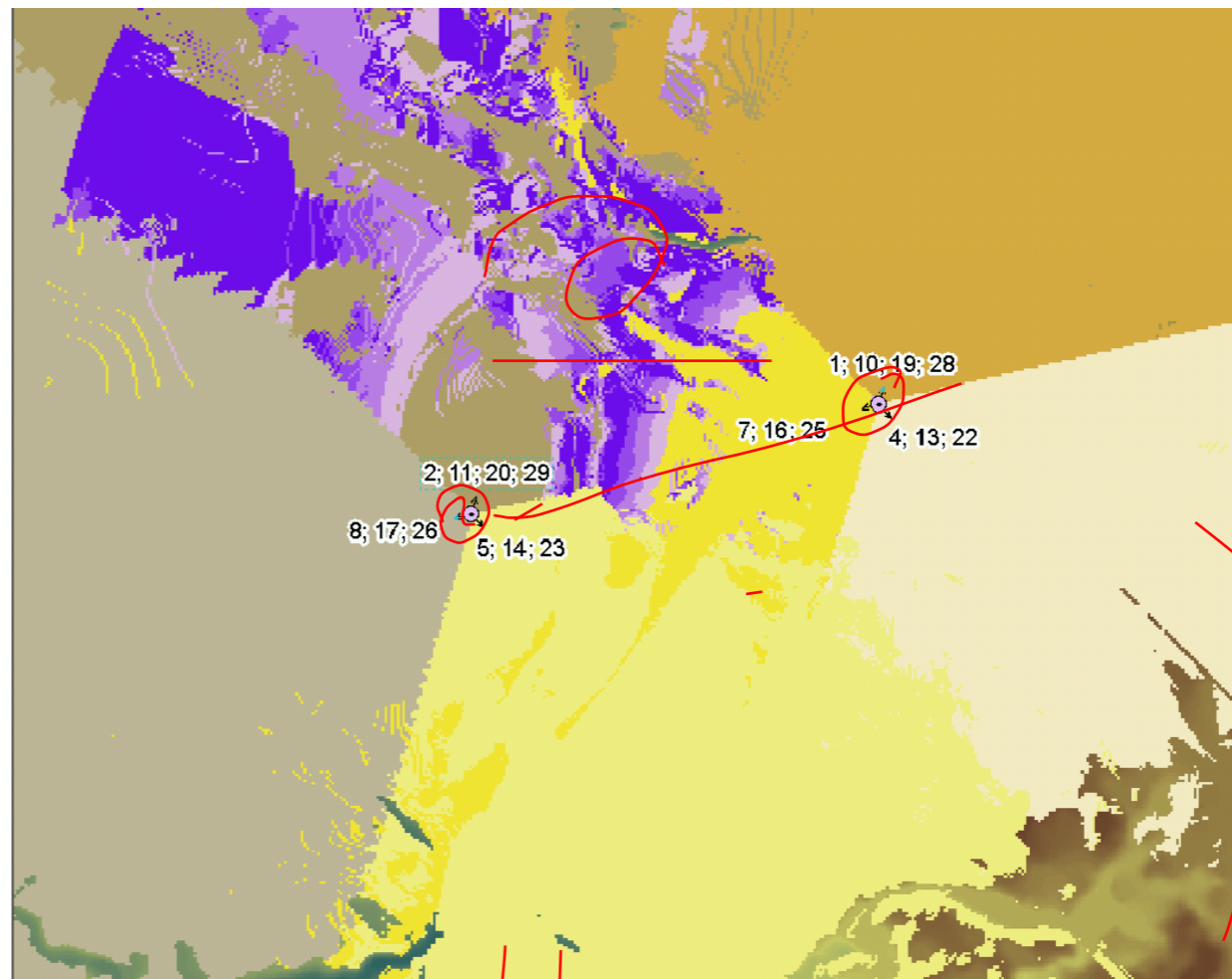
- Tatsächlich ist der Einfluss des Rauschens fundamental
  - Betrachte das Verhältnis zwischen Sendestärke  $S$  zur Stärke des Rauschens  $N$
  - Je weniger Rauschen desto besser können Signale erkannt werden
- Theorem von Shannon
  - Die maximale mögliche Datenrate ist  $H \log_2 (1+S/N)$  bit/s
    - bei Bandweite  $H$
    - Signalstärke  $S$
- Achtung
  - Dies ist eine theoretische obere Schranke
  - Existierende Kodierungen erreichen diesen Wert nicht



- Raummultiplexverfahren
  - Parallele und exklusive Nutzung von Übertragungskanäle
    - z.B. Extraleitungen/Zellen/Richtantenne
- Frequenzmultiplexverfahren
  - Mehrere zu übertragende Signale in einem Frequenzbereich gebündelt;
  - Bei Funkübertragung werden unterschiedlichen Sendern unterschiedliche Frequenzen zugewiesen.
- Zeitmultiplexverfahren
  - Zeitversetztes Senden mehrerer Signale
- Wellenlängenmultiplexverfahren
  - Optisches Frequenzmultiplexverfahren für die Übertragung in Glasfaserkabel
- Codemultiplexverfahren
  - Nur in Funktechnik: Kodierung des Signals in orthogonale Codes, die nun gleichzeitig auf einer Frequenz gesendet werden können
  - Dekodierung auch bei Überlagerung möglich

## ■ Raumaufteilung (Space-Multiplexing)

- Ausnutzung des Abstandsverlusts zum parallelen Betriebs verschiedener Funkzellen → zellulare Netze
- Verwendung gerichteter Antennen zur gerichteten Kommunikation
  - GSM-Antennen mit Richtcharakteristik
  - Richtfunk mit Parabolantenne
  - Laserkommunikation
  - Infrarotkommunikation



## ■ Frequenzmultiplex

- Aufteilung der Bandbreite in Frequenzabschnitte
- Spreizen der Kanäle und Hopping
  - Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)
    - Xor eines Signals mit einer Folge Pseudozufallszahlen beim Sender und Empfänger (Verwandt mit Codemultiplex)
    - Fremde Signale erscheinen als Hintergrundrauschen
  - Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)
    - Frequenzwechsel durch Pseudozufallszahlen
    - Zwei Versionen
      - Schneller Wechsel (fast hopping): Mehrere Frequenzen pro Nutzdatenbit
      - Langsamer Wechsel (slow hopping): Mehrere Nutzdatenbits pro Frequenz

- CDMA (Code Division Multiple Access)
  - z.B. GSM (Global System for Mobile Communication)
  - oder UMTS (Universal Mobile Telecommunications System)

- Beispiel:

- Sender A:

- 0 ist (-1,-1)  $\rightarrow -1 -1$
- 1 ist (+1,+1) :

$$\begin{array}{r} +1 \quad +1 \\ -1 \quad -1 \\ \hline 0 \quad 0 \end{array}$$

- Sender B:

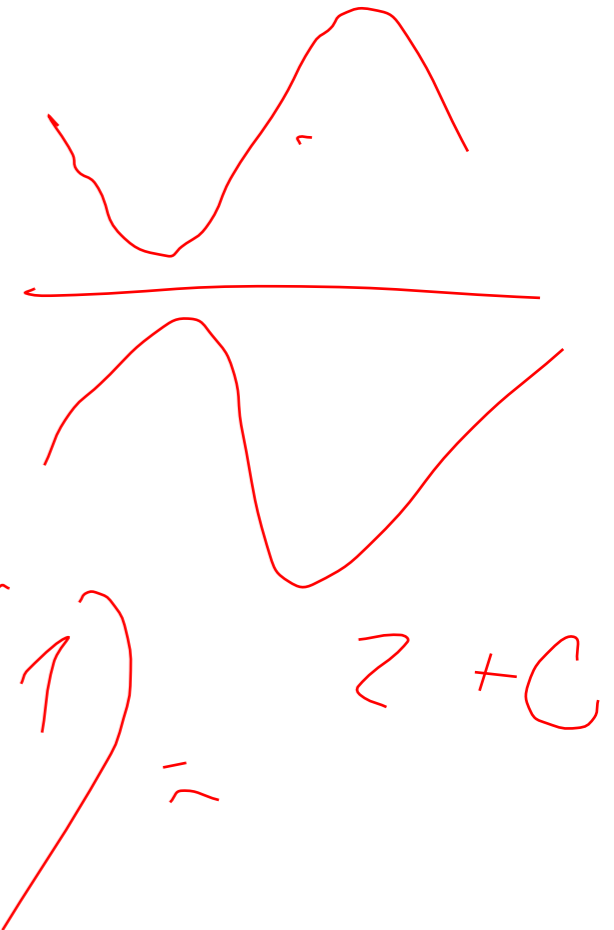
- 0 ist (-1,+1)  $\rightarrow -1 +1$
- 1 ist (+1,-1)  $\rightarrow +1 -1$

- A sendet 0, B sendet 0:

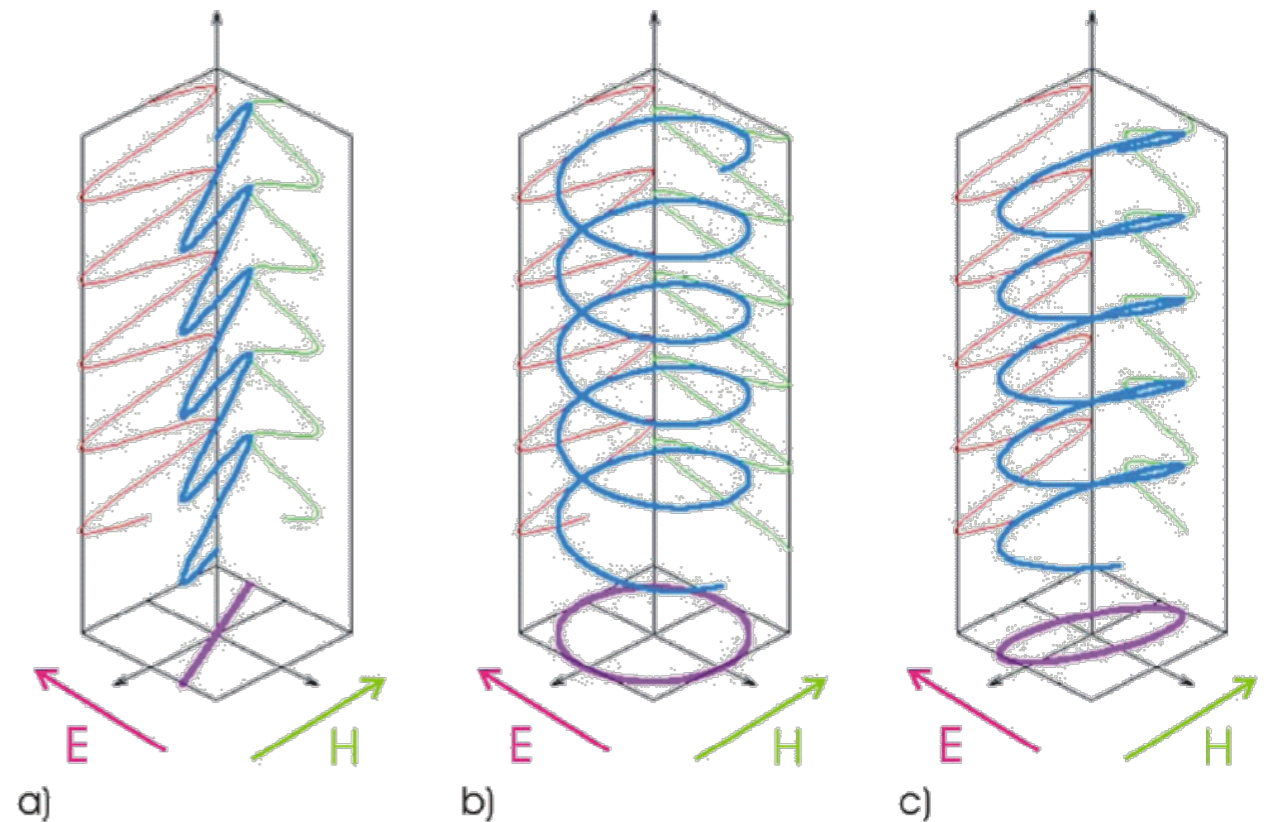
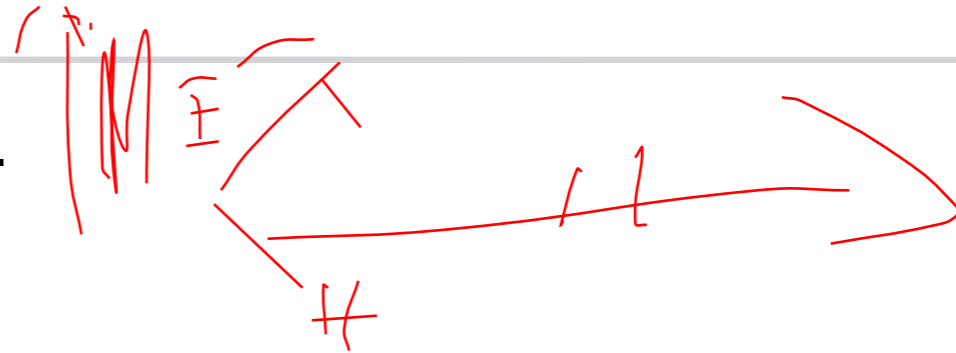
- Ergebnis: (-2,0)

- C empfängt (-2,0):

- Dekodierung bzgl. A:  $(-2,0) \cdot (-1,-1) = (-2)(-1) + 0(-1) = 2$
- A hat also 0 gesendet (da Ergebnis positiv)



- Spezialfall des Wellenlängenmultiplex-Verfahren
- Polarisation
  - Durch die Bewegungsrichtung der elektrischen Ladung ergibt sich eine Polarisation
- Z.B.
  - linear: horizontal, vertikal
  - zirkular
  - elliptisch (allgemeiner Fall)
- Die Verwendung verschiedener Polarisationen kann zur Trennung oder zur Modulation verwendet werden
  - in Kombination mit QPSK = 4-PSK
  - Z.B. 112 Gb/s PM-QPSK in Glasfaser mit Übertragungen bis zu 6000 km mit 200 km Distanz zwischen den Verstärkern



<http://optikwiki.harzoptics.de/doku.php?id=polarisation>

# Beispiel: Internet über Telefon

- Analog
  - typisch 3-4 kBit/s
  - maximal bis 56 kBit/s
- ISDN (Integrated Services Digital Network)
  - 128 kBit/s (Nutzdaten)
    - Hin/Rückrichtung jeweils 64 kBit/s
  - Pulse-Code Modulation (Amplitudenmodulation)
- DSL
  - maximal
    - bis 25 Mbit/s Downstream
    - bis 3,5 Mbit/s Upstream
  - typisch (DSL 6000)
    - 6 Mbit/s Downstream
    - 0,5 Mbit/s Upstream

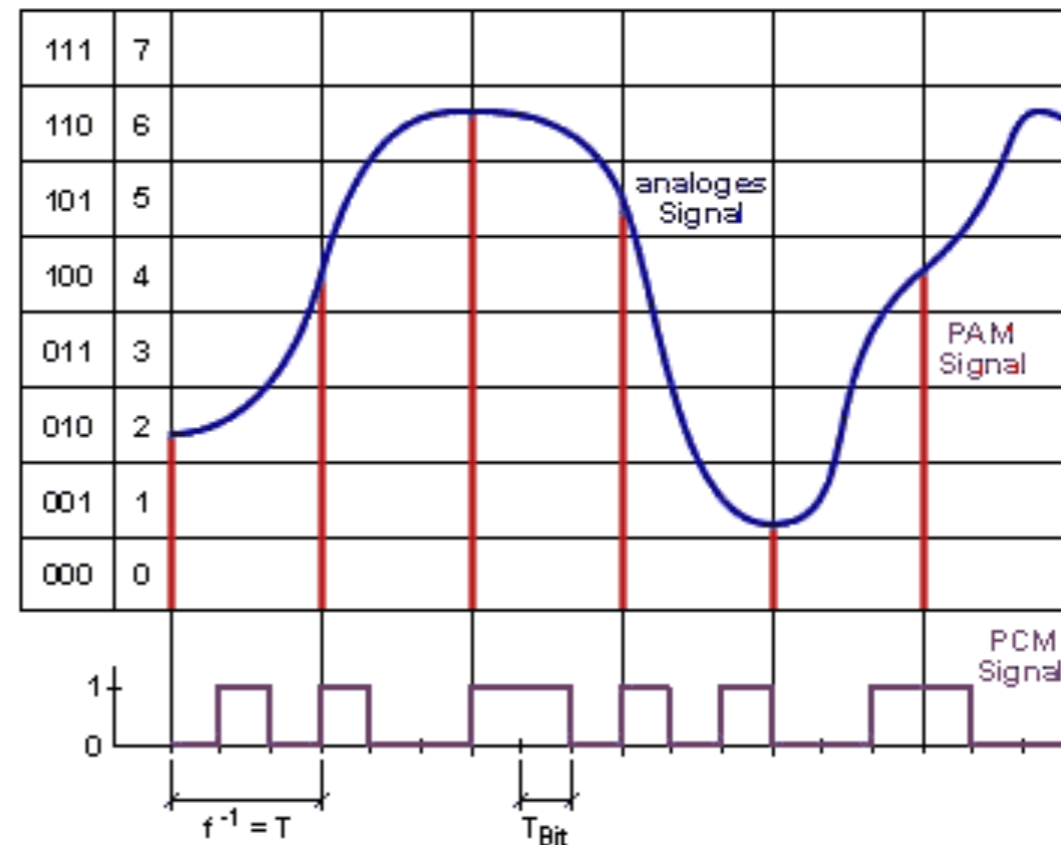
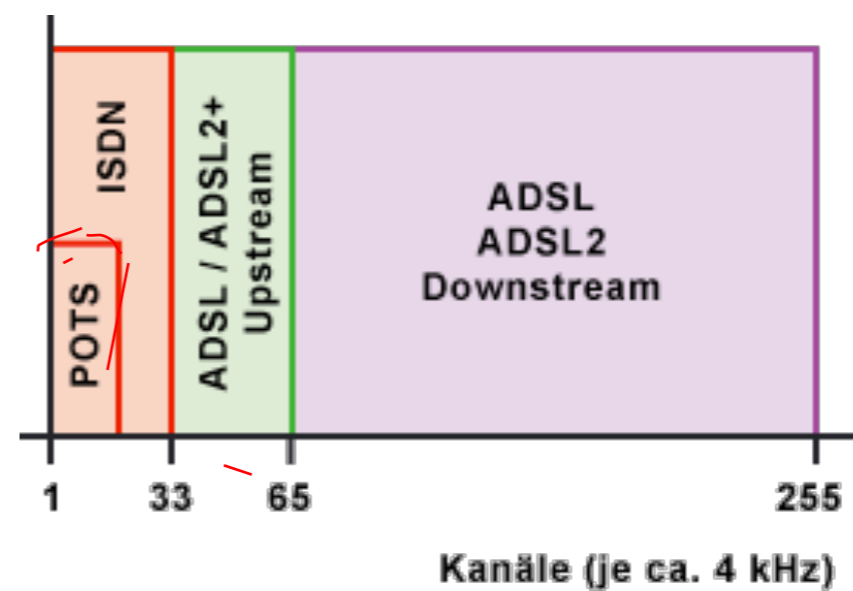
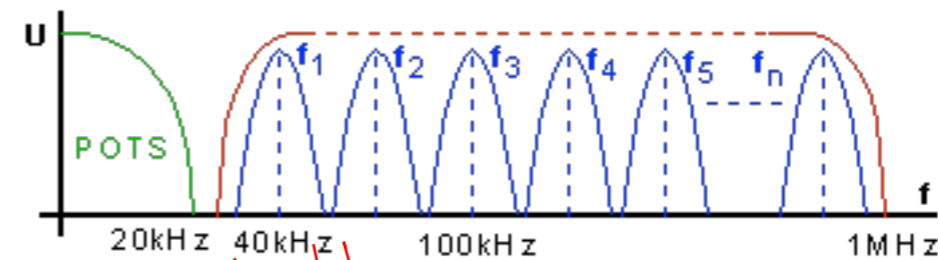
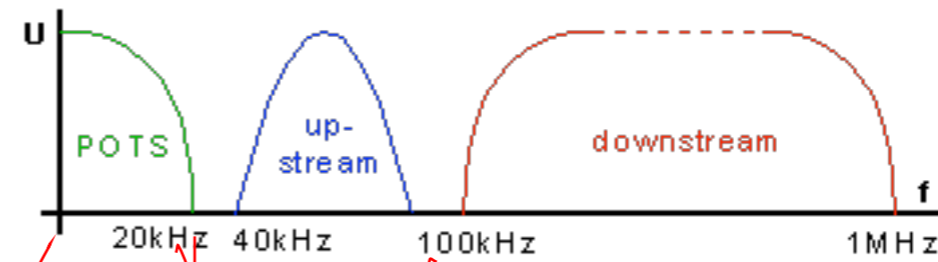


Abb. aus <http://de.wikipedia.org/wiki/Puls-Code-Modulation>

# Beispiel DSL

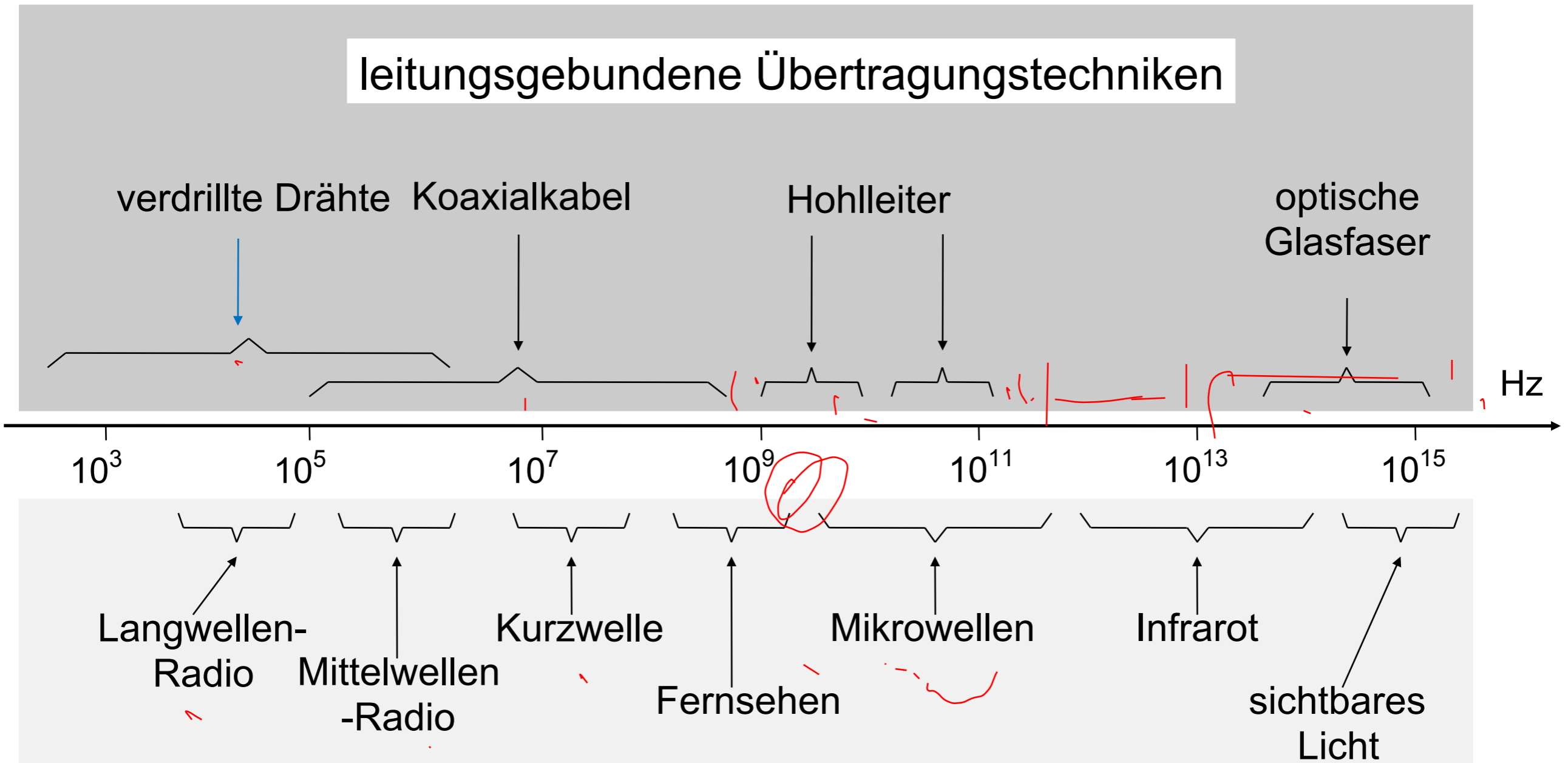
- Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL)
  - momentan der Standard zur Anbindung von Endverbrauchern zu ISP (Internet Service Providers)
  - verwendet herkömmliche Kupferkabel
- Übertragungsverfahren:
  - Carrier-less Amplitude/Phase Modulation CAP (wie QAM)
    - Eine Modulation für Upstream/Downstream
  - Discrete Multitone Modulation (DMT)
    - 256 Kanäle mit je 4 kHz Bandbreite
- DMT: 3 Kanalstränge:
  - POTS/ISDN (public switched telephone network/ Integrated Services Digital Network)
    - bleibt im Frequenzbereich 1-20 kHz von ADSL unberührt
  - Upstream
    - 32 Trägerkanäle für Verbindung zum ISP
  - Downstream
    - 190 Trägerkanäle für Verbindung vom ISP





# Das elektromagnetische Spektrum

## leitungsgebundene Übertragungstechniken



## nicht-leitungsgebundene Übertragungstechniken

# Frequenzbereiche

- LF Low Frequency =
  - LW Langwelle
- MF Medium Frequency =
  - MW Mittelwelle
- HF High Frequency =
  - KW Kurzwelle
- VHF Very High Frequency =
  - UKW Ultrakurzwelle
- UHF Ultra High Frequency
- SHF Super High Frequency
- EHF Extra High Frequency
- UV Ultraviolettes Licht
- X-ray Röntgenstrahlung

