

Systeme II

2. Die physikalische Schicht

Christian Schindelhauer

Technische Fakultät

Rechnernetze und Telematik

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Version 26.04.2017

- Realzahlendarstellung

- Sinus und Cosinus-Funktionen der einzelnen Frequenzen

$$g(x) = \sum_{k=0}^{N-1} a_k \cos \frac{2\pi kt}{T} + b_k \sin \frac{2\pi kt}{T}$$

- Berechnung der Inversen durch Integralprodukt mit Cosinus/Sinus

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \cos(2\pi n f t) dt$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \sin(2\pi n f t) dt$$

- Komplexe Darstellung

- Realteil der Exponentialfunktion der verschiedenen Frequenzen

$$f(x) = \sum_{k=0}^{N-1} z_k e^{i2\pi kt/T}$$

- Berechnung der Inversen durch Integral des Produkts mit der komplex konjugierten Trägerwelle

$$z_k = \frac{1}{T} \int_0^T \left(e^{i2\pi kt/T} \right)^* f(x) dt$$

Vorteil der komplexen Darstellung

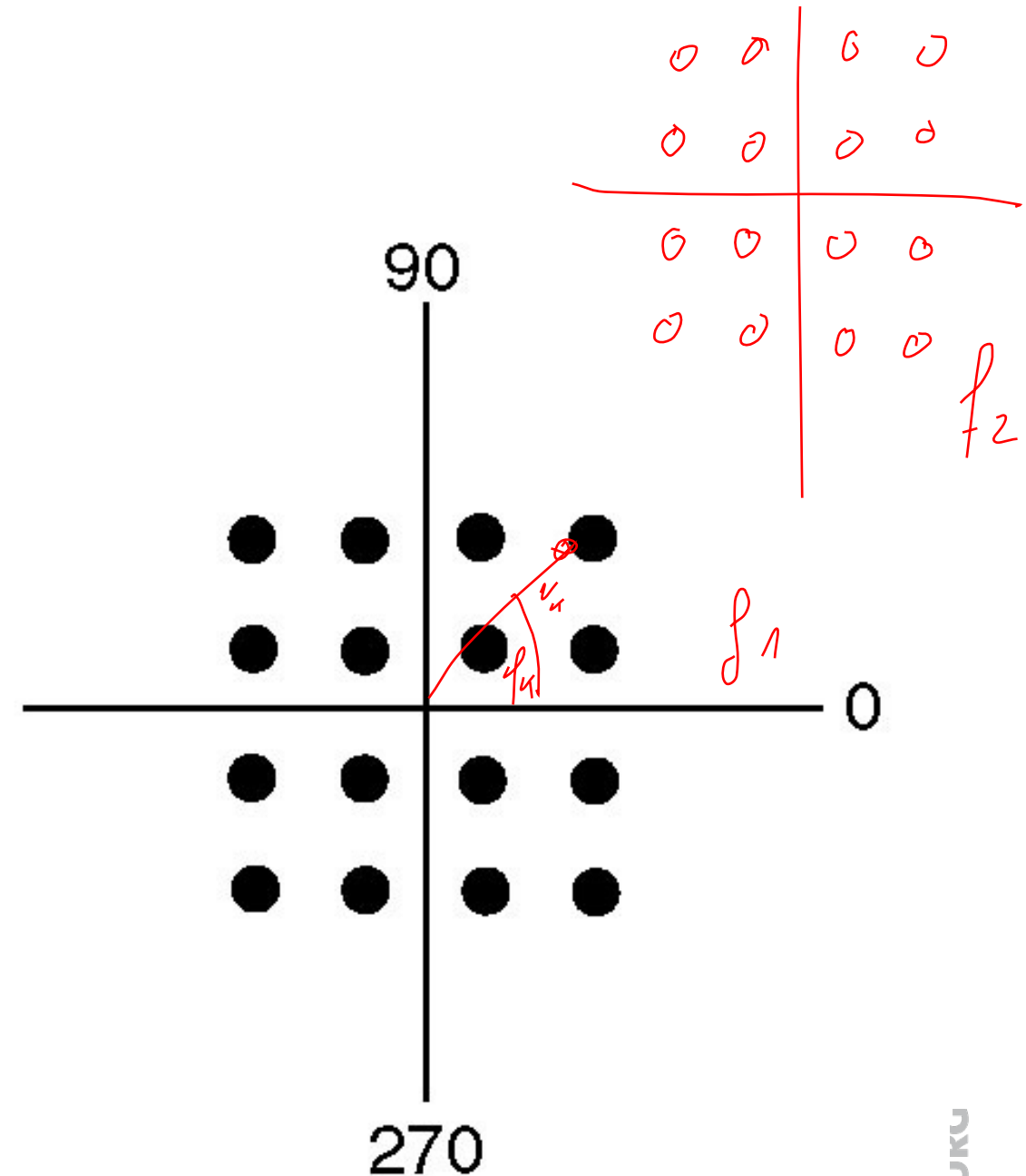
- Jedes Symbol des QAM kann direkt als komplexe Zahl dargestellt werden

$$f(x) = \sum_{k=0}^{N-1} z_k e^{i2\pi kt/T}$$

\uparrow
 (red arrow pointing to z_k)

$$e^{it} = \cos t + i \sin t$$

$$z_u = r_{ku} \cdot e^{i\varphi_u}$$

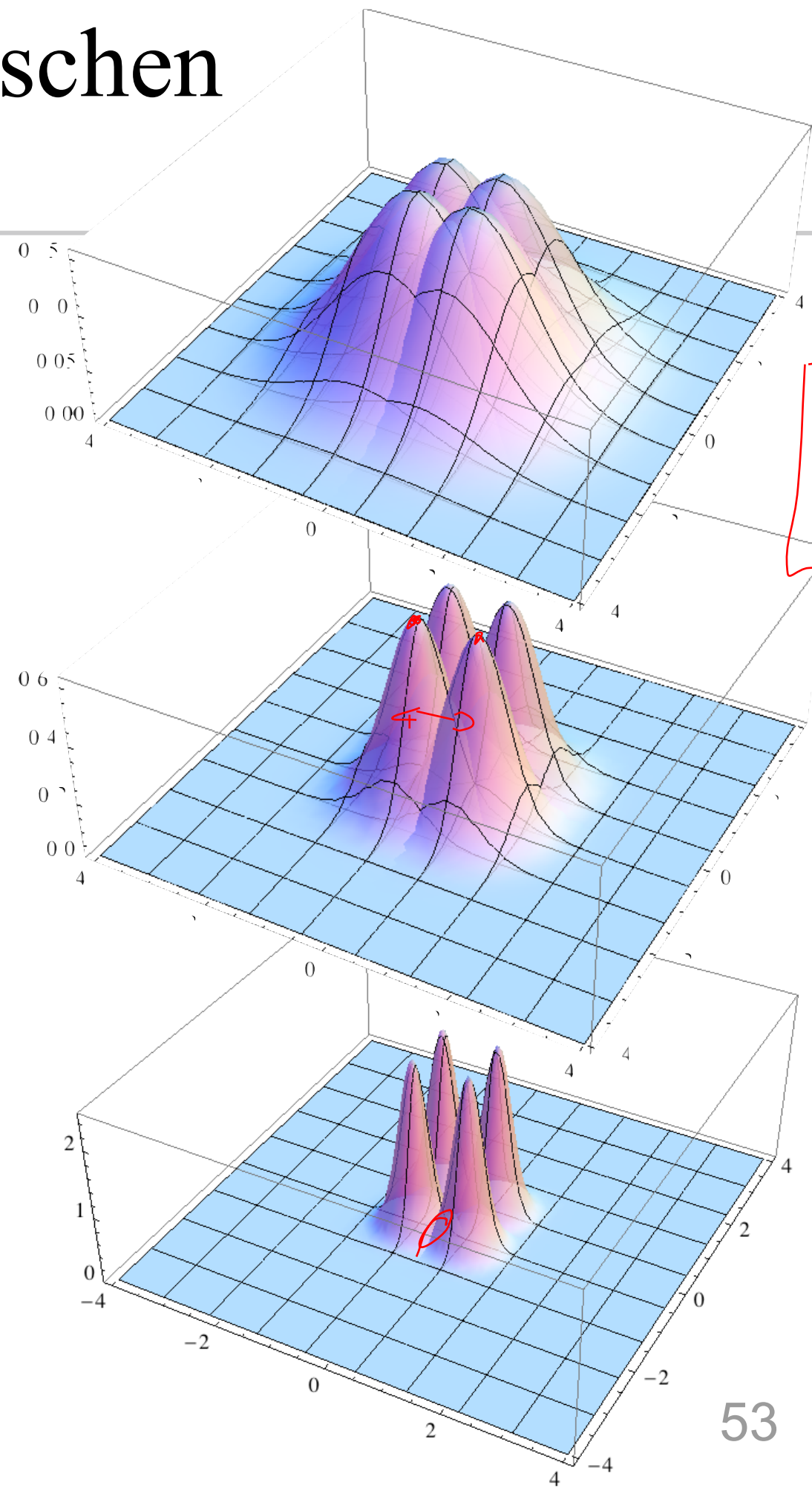


QAM und Rauschen

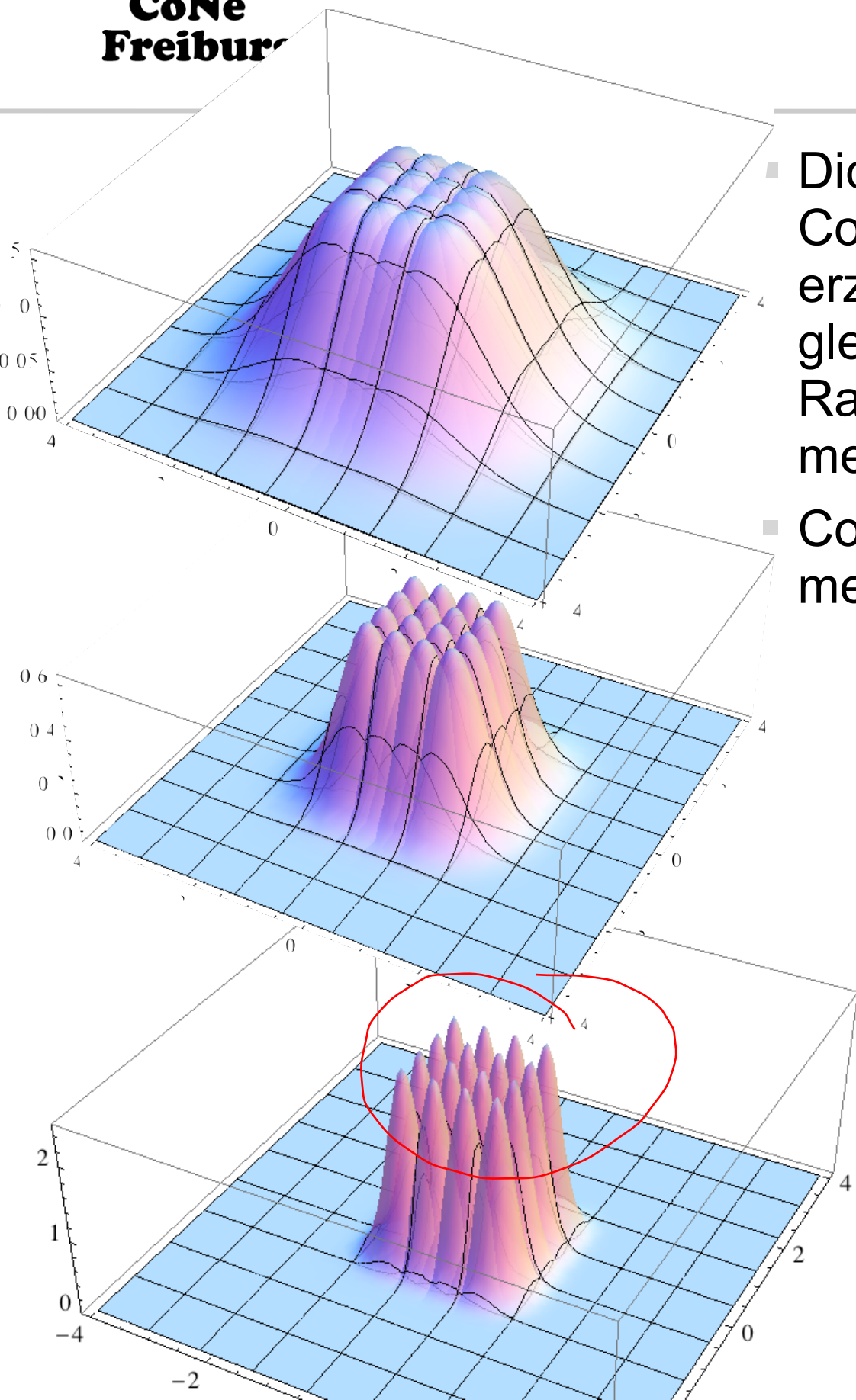
- Rauschen wird mit der Normalverteilung beschrieben

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

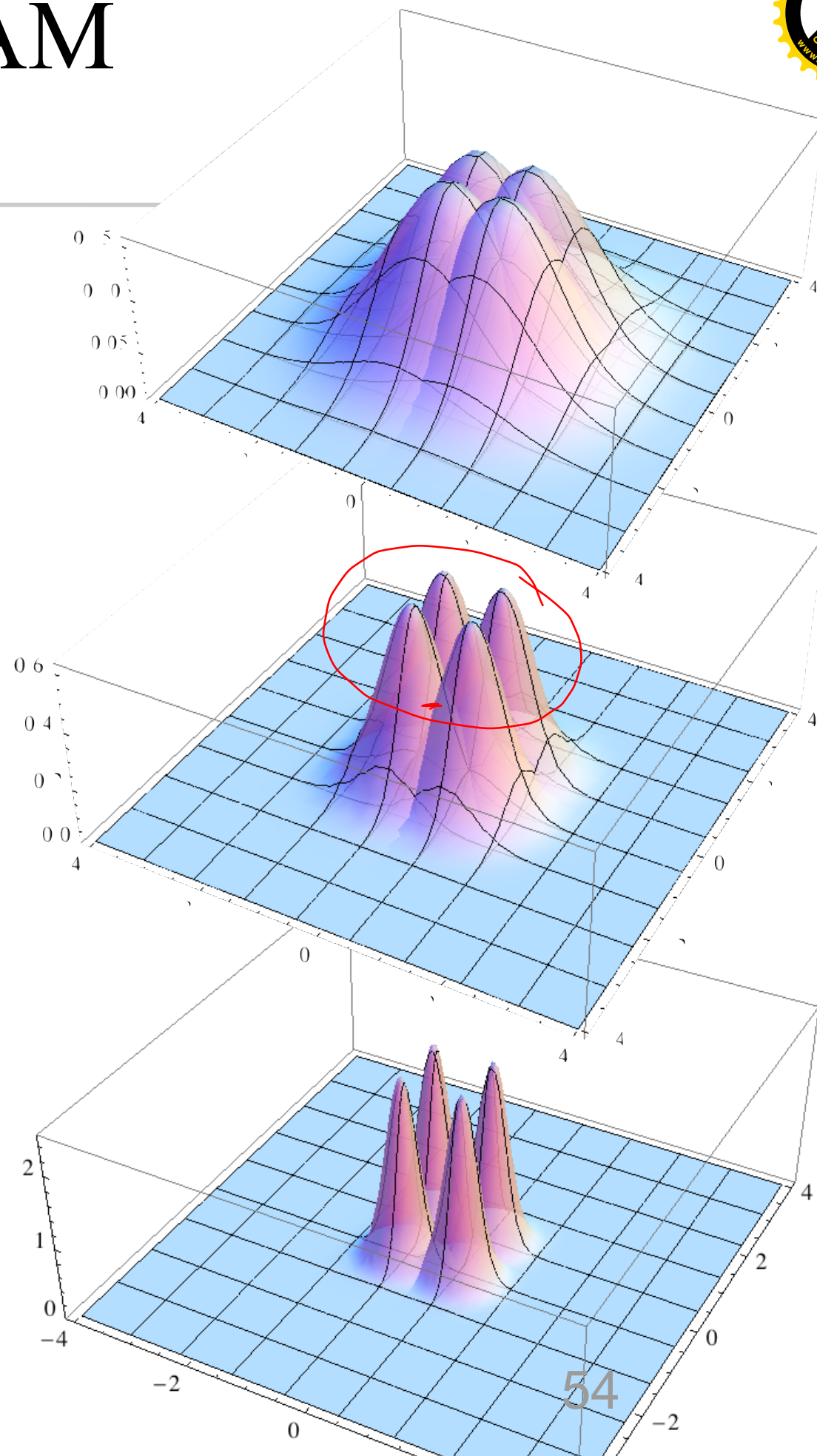
- Bitfehler entstehen, wenn das dekodierte Signal zu stark abweicht
- Das Signal/Rausch-verhältnis korreliert mit der Standardabweichung σ



QAM versus 16QAM

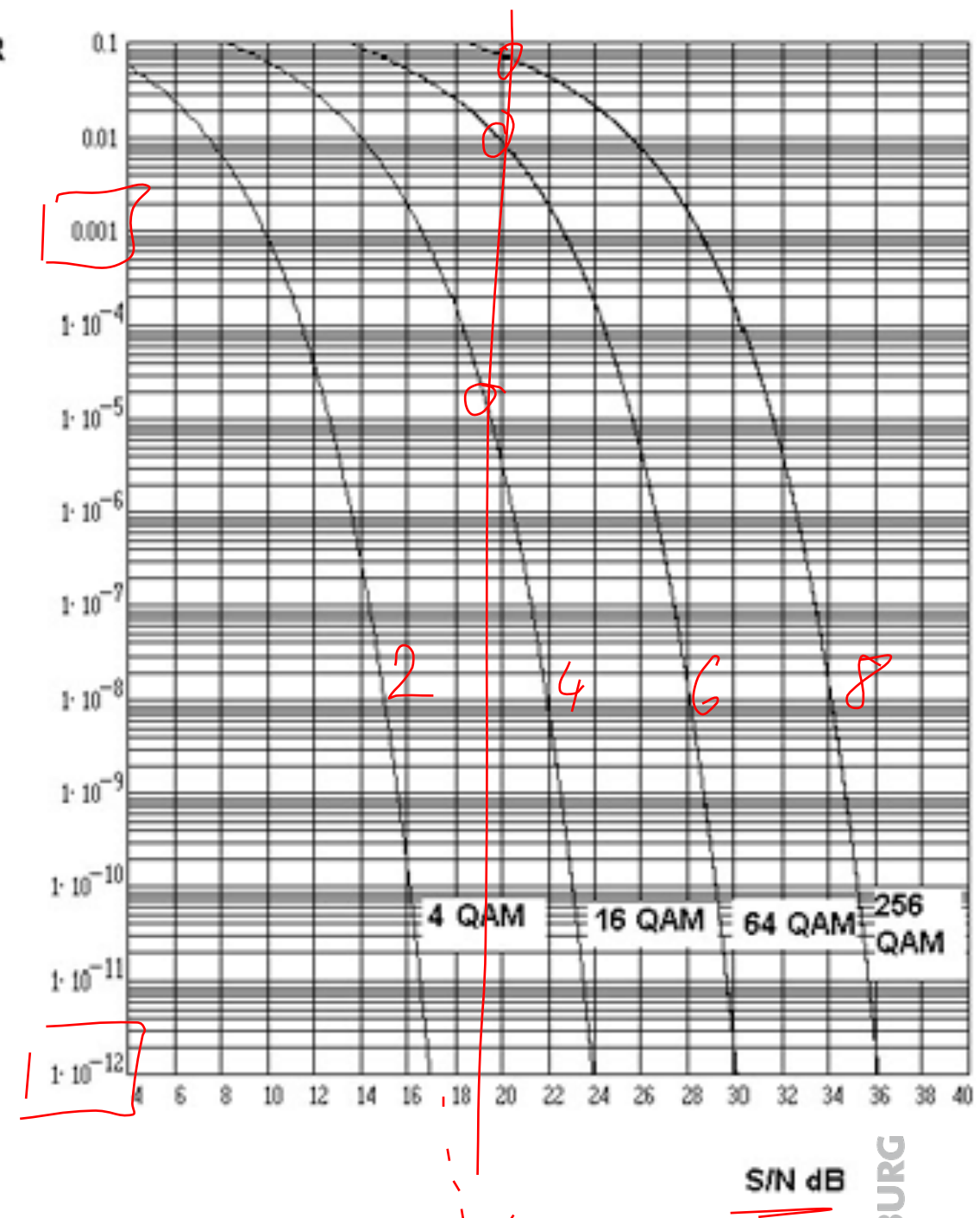


- Dichtere Codes erzeugen bei gleichem Rauschen mehr Fehler
- Codieren aber mehr Bits



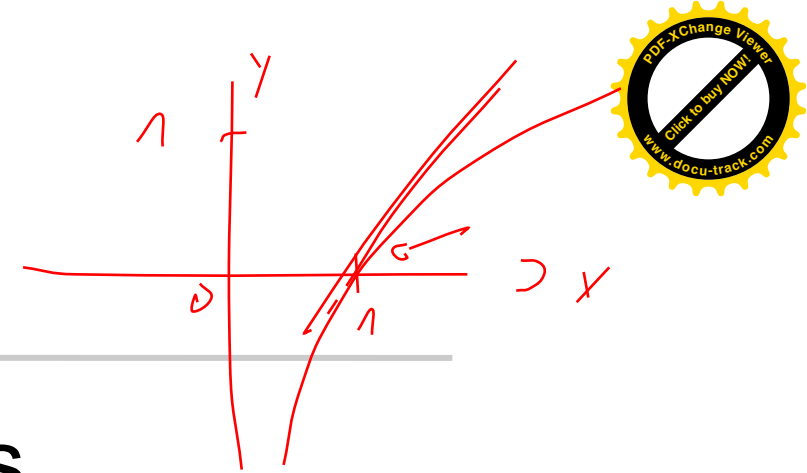
Die Bitfehlerhäufigkeit und das Signalrauschverhältnis

- 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



- OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex)
 - Signale werden in parallele Signalströme aufgeteilt
 - Parallele Signale werden auf Trägerwellen verschiedener Frequenzen Phasen/Amplituden moduliert
 - z.B. 16-QAM
 - Die Trägersignale werden zusammengefasst und gleichzeitig gesendet
- Sonderform der Frequenz-Multiplex-Verfahren
- Die Trägerwellen verwenden orthogonale Frequenzen:
 - Frequenzen $f, 2f, 3f, 4f, 5f, \dots$

Der Satz von Shannon



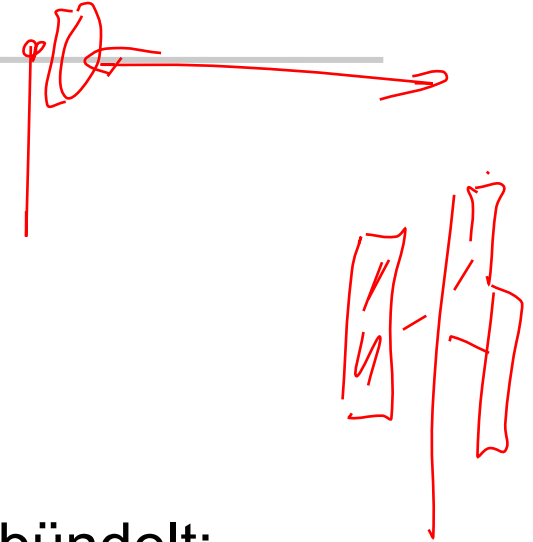
- Tatsächlich ist der Einfluss des Rauschens fundamental
 - Betrachte das Verhältnis zwischen ^{Empfangs} ~~Sendestärke~~ S zur Stärke des Rauschens N
 - Je weniger Rauschen desto besser können Signale erkannt werden
- Theorem von Shannon
 - Die maximale mögliche Datenrate ist $H \log_2 (1 + S/N)$ bit/s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

Signal/Rauschverhältnis

↓
Symbolrate

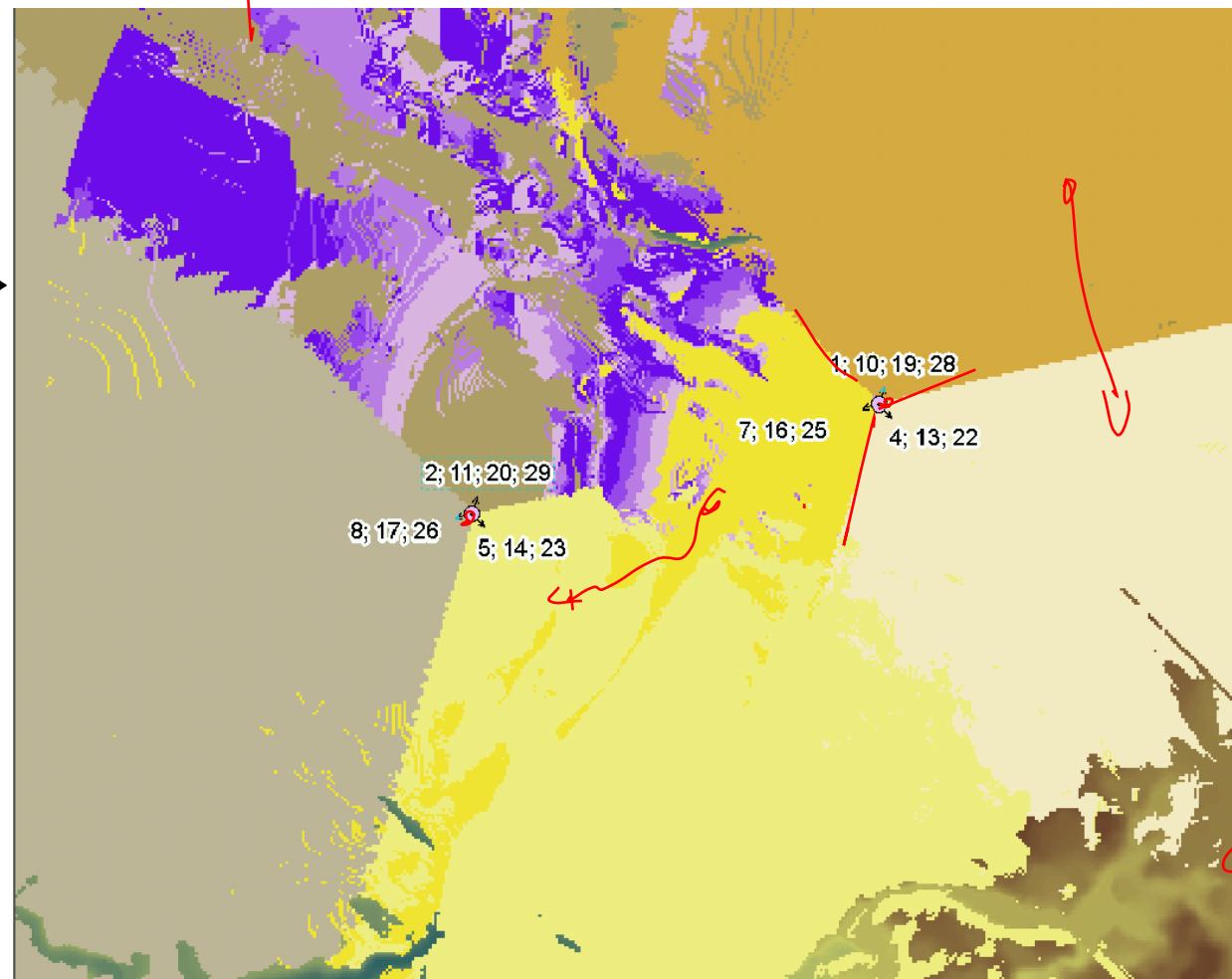
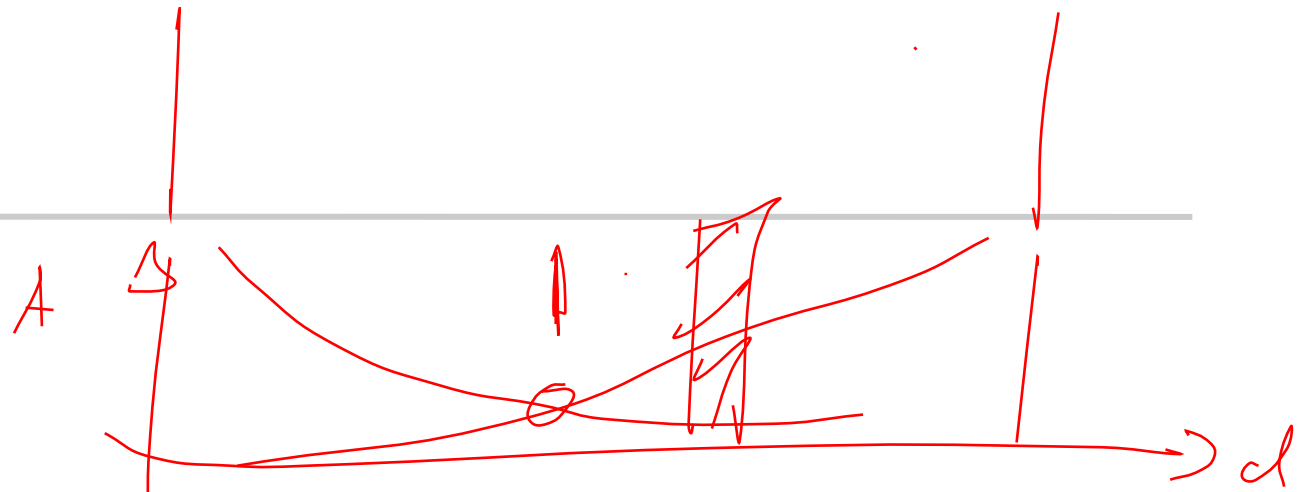
Mehrfachnutzung des Mediums

- 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



Zeit



MAC

- Zeitaufteilung (Time-Multiplexing)
 - Zeitliche Aufteilung des Sende-/Empfangskanals
 - Verschiedene Teilnehmer erhalten exklusive Zeiträume (Slots) auf dem Medium
 - Genaue Synchronisation notwendig
 - Koordination notwendig, oder starre Einteilung
- Wird in der Medium-Zugriffsschicht koordiniert

1
↓

2
↓

1
↓

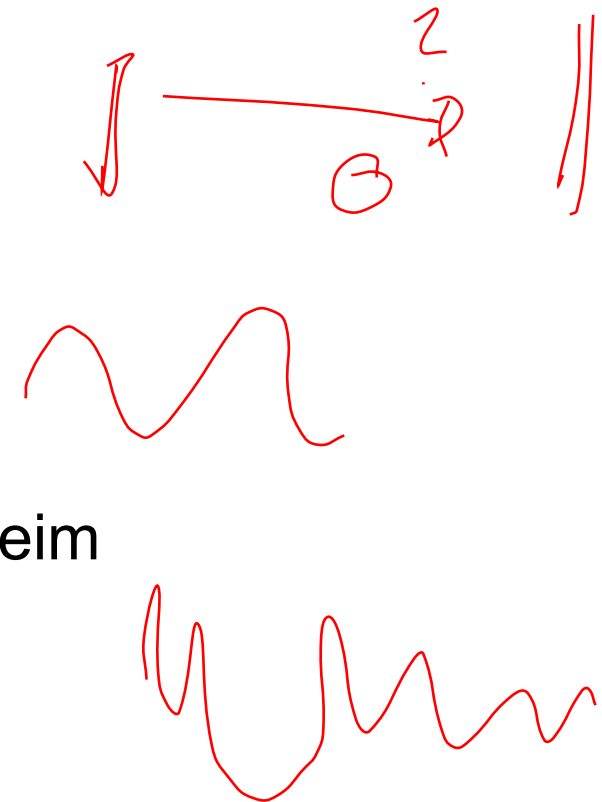
■ Frequenzmultiplex

• Aufteilung der Bandbreite in Frequenzabschnitte

• Spreizen der Kanäle und Hopping

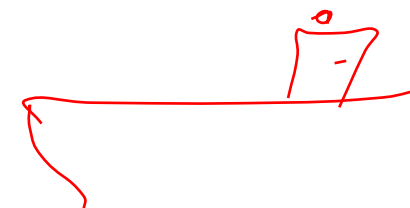
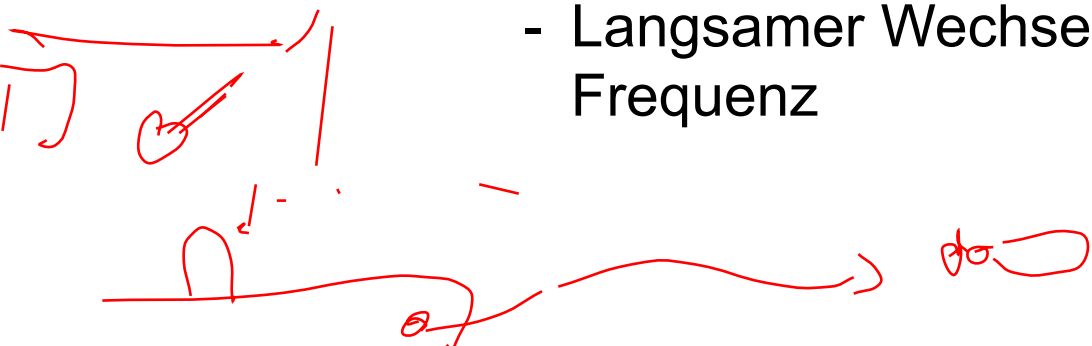
→ • Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)

- 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



$$\begin{pmatrix} 0 & -2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -1 & -1 \end{pmatrix} = \textcircled{2} \rightarrow 0$$

■ 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)
- 1 ist (+1,+1)

- Sender B:

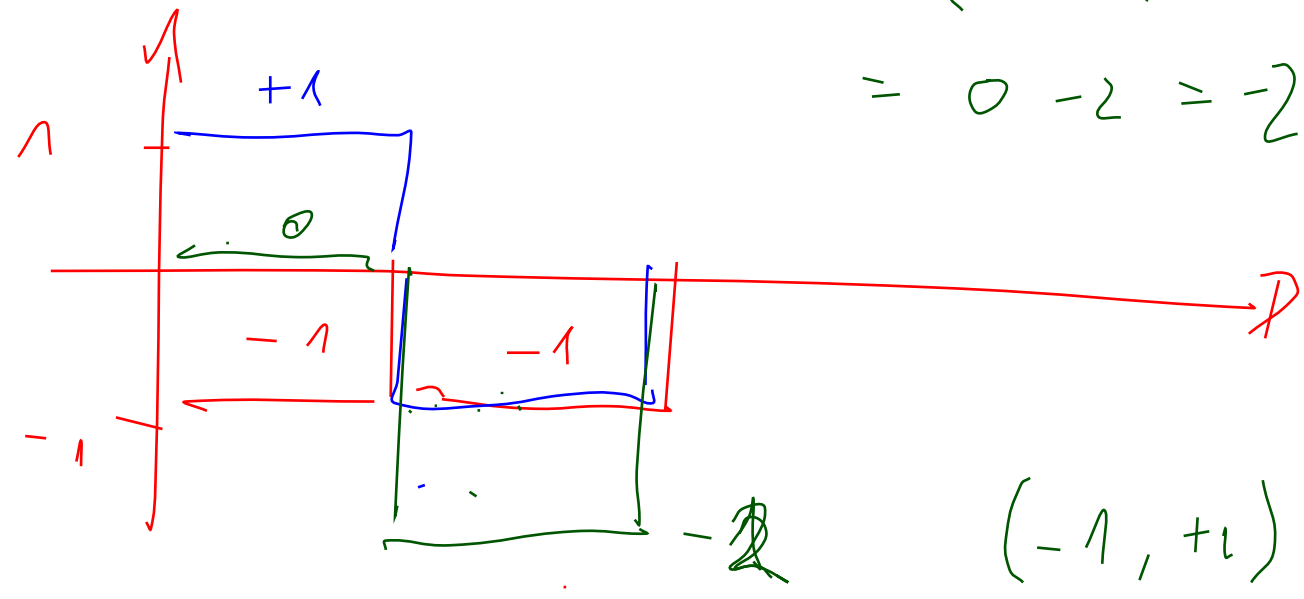
- 0 ist (-1,+1)
- 1 ist (+1,-1)

- 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)

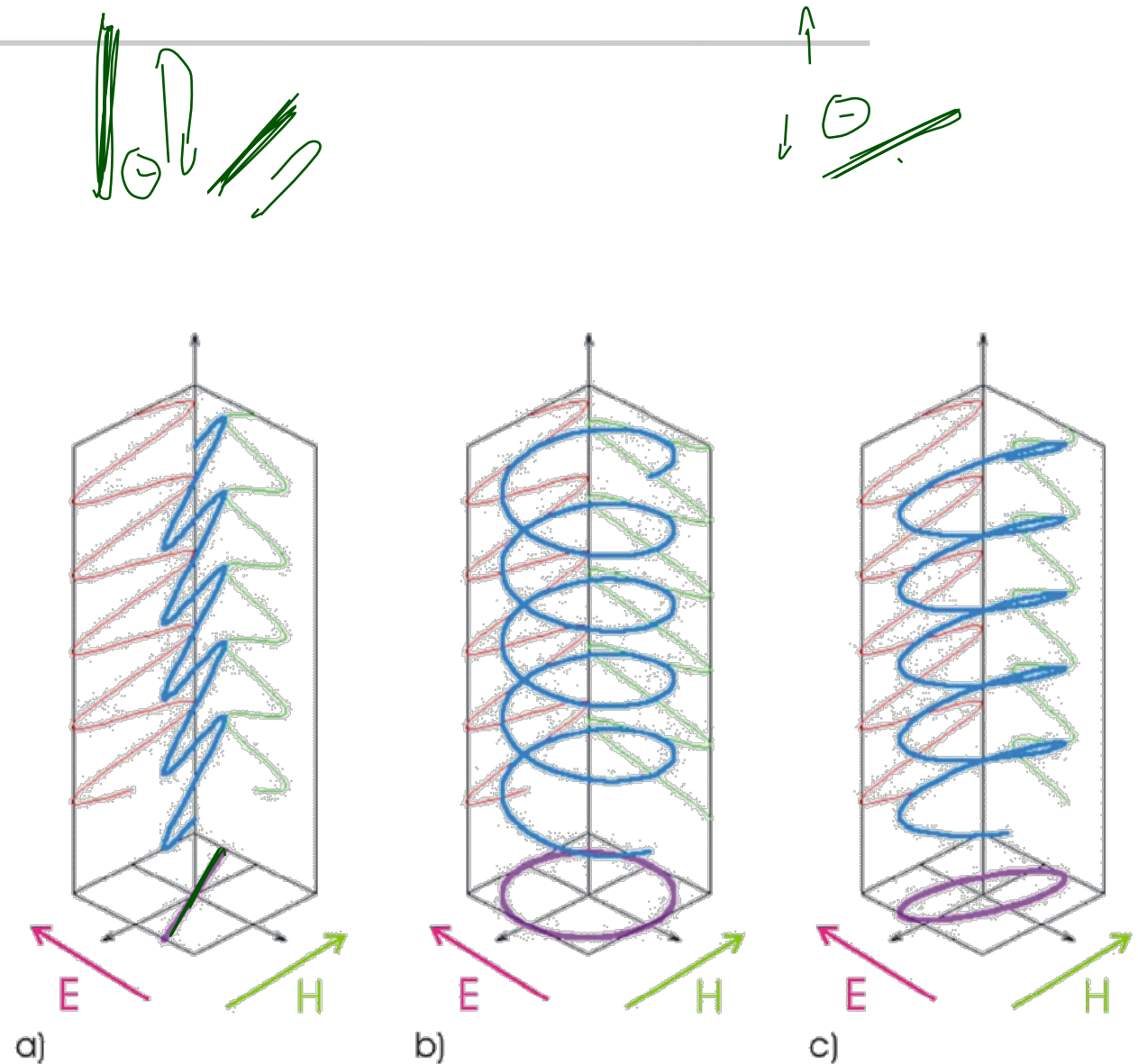


$$\begin{pmatrix} 0 & -2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -1 & +1 \end{pmatrix} = 0 - 2 = -2 \rightarrow 1$$

$$\begin{pmatrix} -1 & +1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -1 & -1 \end{pmatrix} = 1 - 1 = 0$$

Polarization-division multiplexing

- 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>

■ Leitungsgebundene Übertragungsmedien

- Kupferdraht – Twisted Pair
- Kupferdraht – Koaxialkabel
- Glasfaser

→ Ethernet

■ Drahtlose Übertragung

- Funkübertragung
- Mikrowellenübertragung
- Infrarot
- Lichtwellen