

**Vorlesung am  
Freitag (24.7.) in  
anderem Raum**

# Systeme II

## 8. Die physikalische Schicht (Teil 5)

Thomas Janson<sup>°</sup>, Kristof Van Laerhoven\*, Christian  
Ortolf<sup>°</sup>

Folien: Christian Schindelhauer<sup>°</sup>

Technische Fakultät

<sup>°</sup>: Rechnernetze und Telematik, \*: Eingebettete Systeme

$$\sin(2\pi f t)$$

$$2\pi$$

$$\sin(2\pi(f + f')t)$$

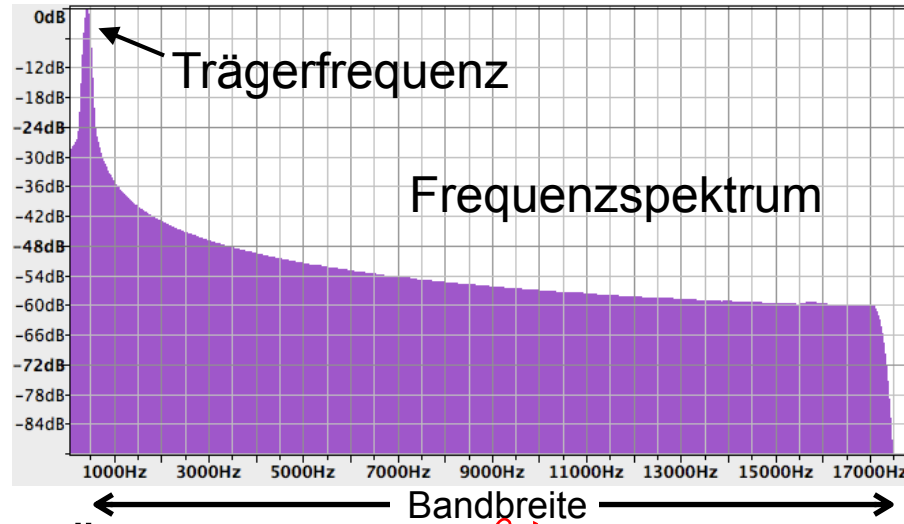
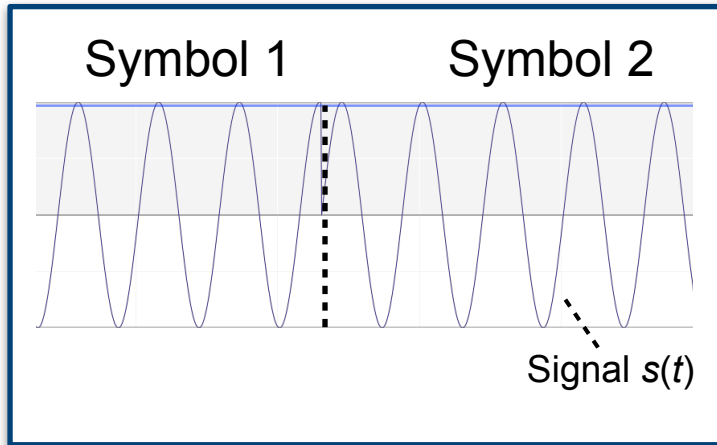
$$2\pi f t + 2\pi = 2\pi(f + f')t$$

$$2\pi = 2\pi f' t$$

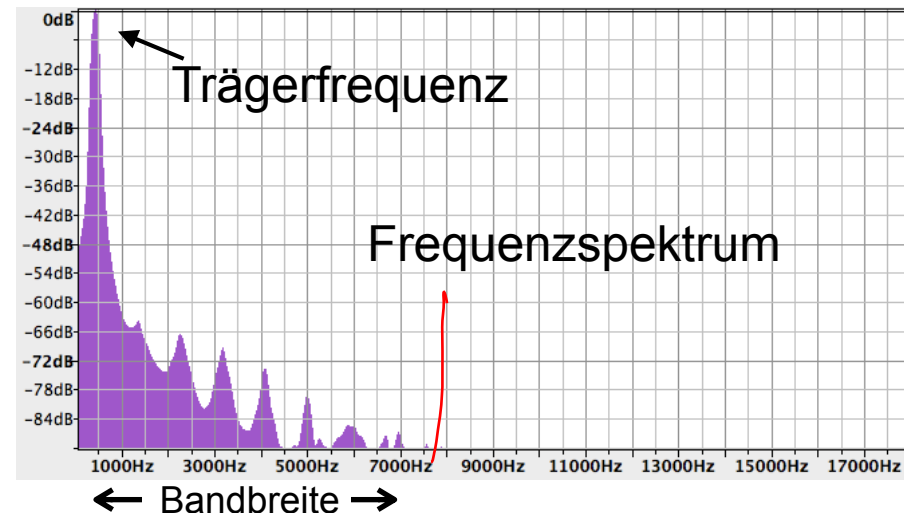
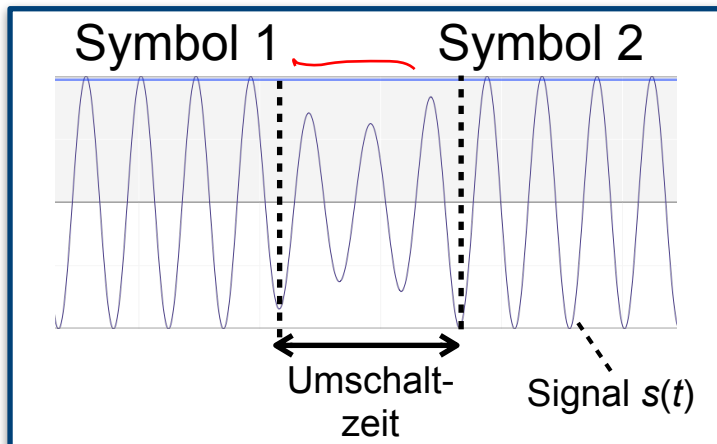
$$t = \frac{1}{f'}$$

$$t' = \frac{1}{2f'}$$

- Phasenmodulation mit hartem Übergang:



- Phasenmodulation mit glattem Übergang:



# Rückblick: Shannon-Hartley Theorem

$A \cdot \sin(2\pi f t + \phi)$

## Shannon-Hartley Theorem (ohne Störungen)

- gegeben Bandbreite  $H$

- max. Symbolrate  $\leq 2 \cdot H$  baud

- max. Datenrate  $\leq 2 \cdot H \cdot \log_2(V)$  bit/s

• Anzahl Bits für  $V$  Symbole:  
 $\log_2(V)$

256 Symbole  $\Rightarrow$  8 Bit

tatsächlich: Rauschen führt zu Bitfehlern

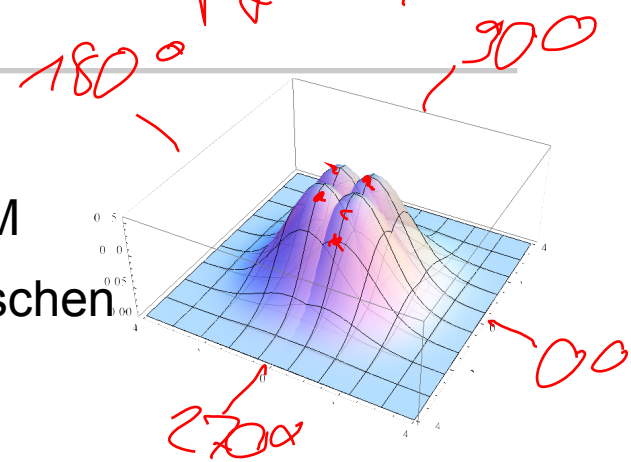
- z.B. QAM mit Rauschen

## Bitfehlerrate (BER)

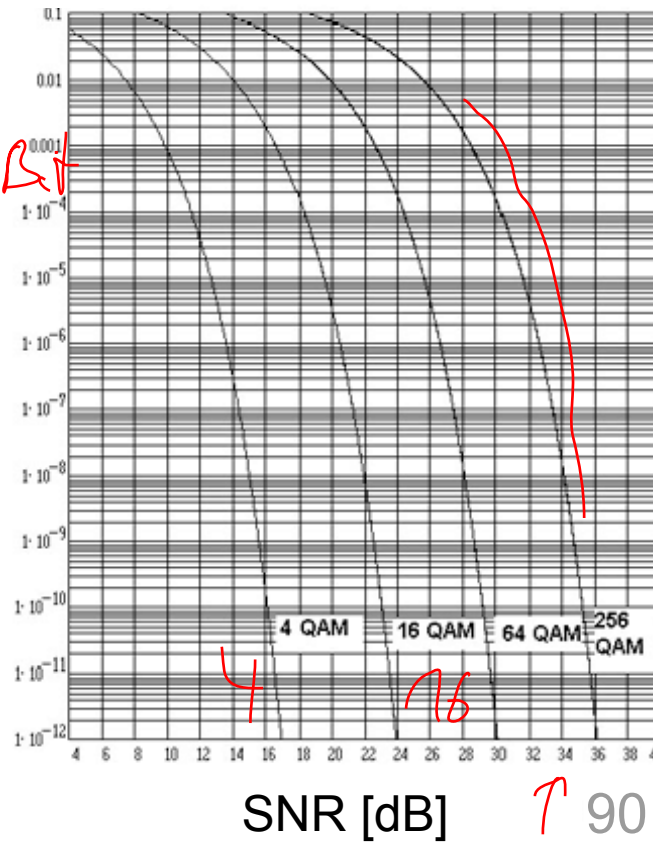
abhängig vom Signal-Rausch-Verhältnis (SNR)

$\log_2(V)$

QAM  
mit Rauschen



BER



- Tatsächlich ist der Einfluss des Rauschens fundamental
  - Betrachte das Verhältnis zwischen Signalleistung  $S$  und Rauschleistung  $N$  beim Empfänger
  - Je weniger Rauschen desto besser können Signale erkannt werden
- Theorem von Shannon
  - Die maximale mögliche Datenrate ist  $H \cdot \log_2 (1 + S/N)$  bit/s
    - bei Bandbreite  $H$  (Einheit: Hz)
    - Signalleistung  $S$  (Einheit: Watt)
    - Rauschleistung  $N$  (Einheit: Watt)
- Achtung
  - Dies ist eine theoretische obere Schranke
  - Existierende Kodierungen erreichen diesen Wert nicht

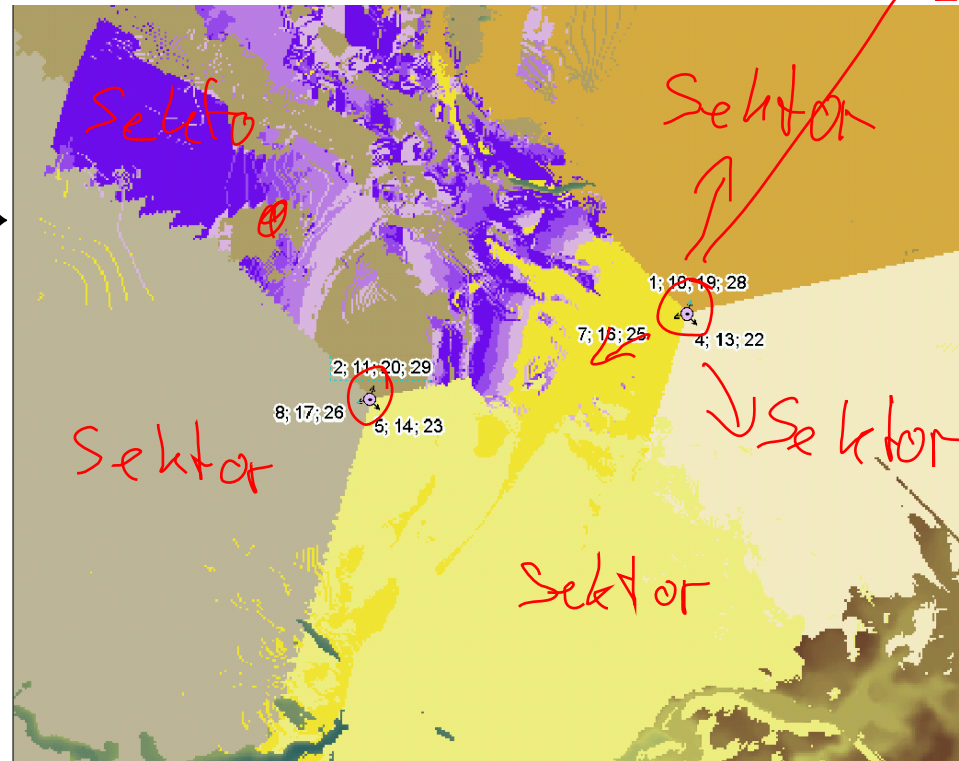
↓ ↓  
Amplitude  $A = \sqrt{S}$

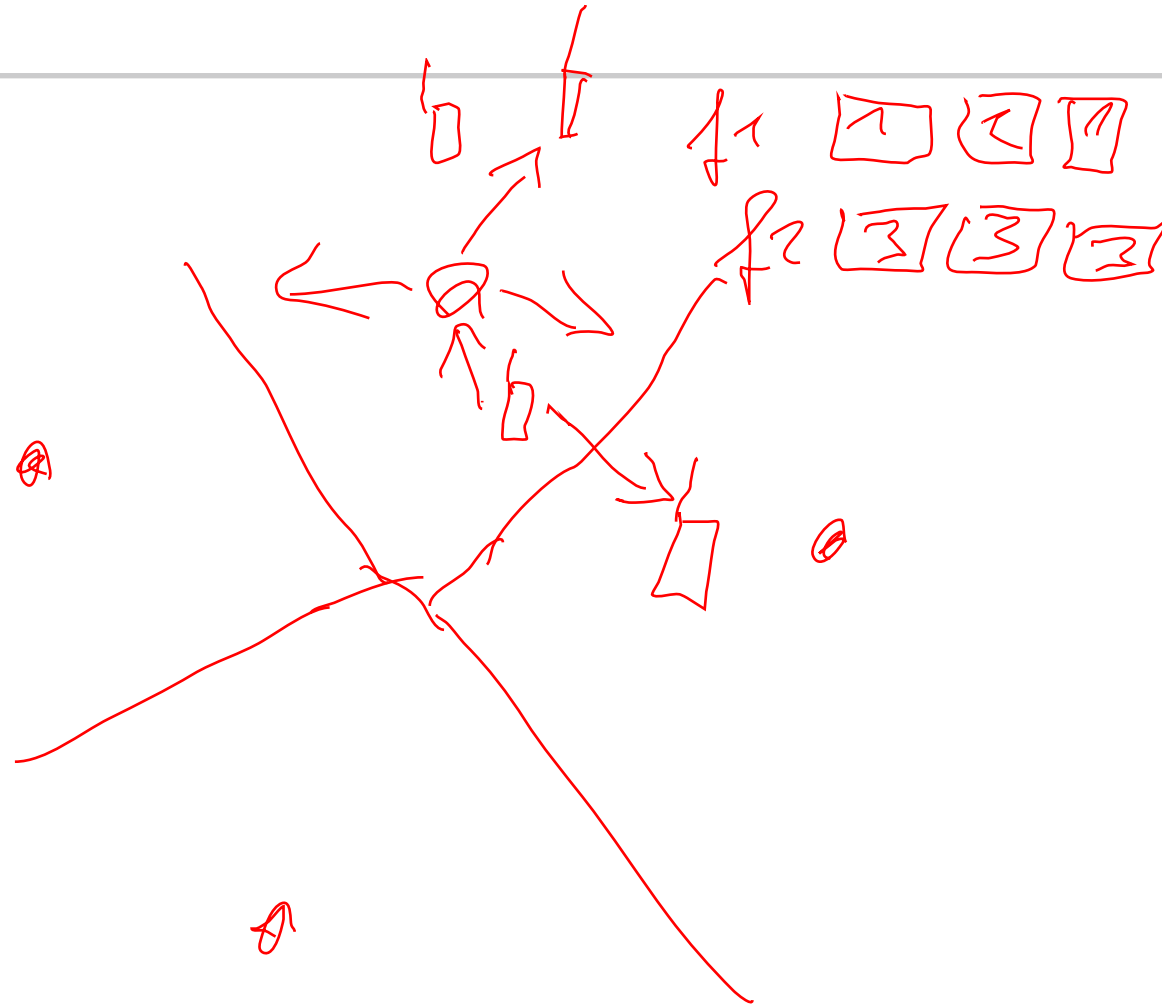
- Raummultiplexverfahren
  - Parallele und exklusive Nutzung von Übertragungschanäle
    - z.B. Extraleitungen/Zellen/Richtantenne
- Frequenzmultiplexverfahren
  - Mehrere zu übertragende Signale in einem Frequenzbereich gebündelt;
  - Bei Funkübertragung werden unterschiedlichen Sendern unterschiedliche Frequenzen zugewiesen.
- Zeitmultiplexverfahren TDMA
  - 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)

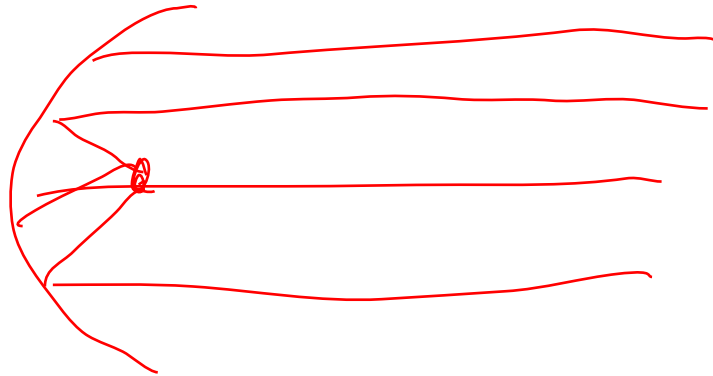
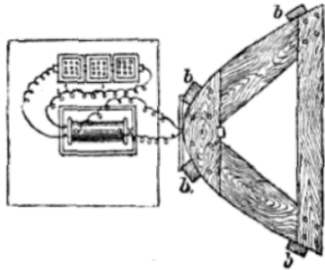
- Ausnutzung des Abstandsverlusts zum parallelen Betriebs verschiedener Funkzellen → zellulare Netze
- Verwendung gerichteter Antennen zur gerichteten Kommunikation
  - GSM-Antennen mit Richtcharakteristik
  - Richtfunk mit Parabolantenne
  - Laserkommunikation
  - Infrarotkommunikation





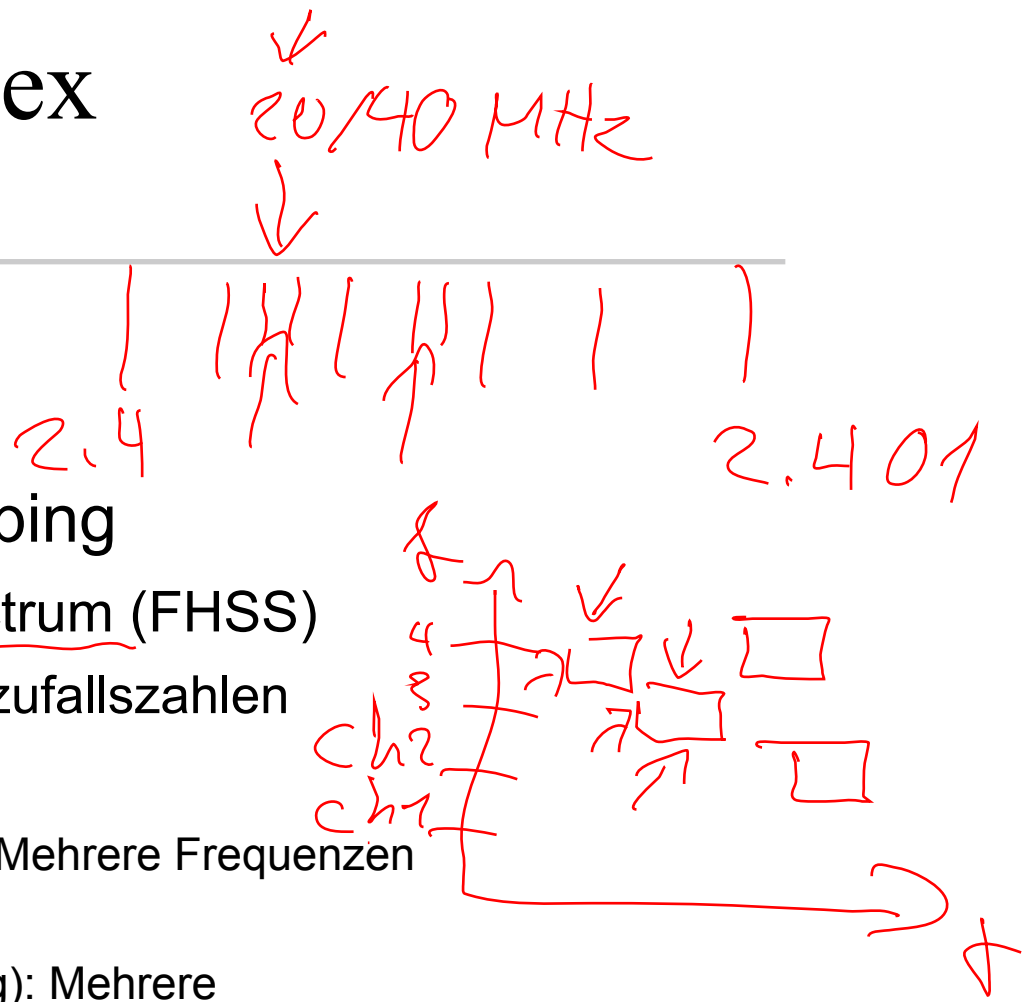
# Parabolantenne

- Parabolic Reflector Antenna, Heinrich Hertz (1888)





- Aufteilung der Bandbreite in Frequenzabschnitte
- Spreizen der Kanäle und Hopping
  - 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
  - Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)
    - XOR eines Signals mit einer Folge Pseudozufallszahlen beim Sender und Empfänger (Verwandt mit CDMA)
    - fremde Signale erscheinen als Hintergrundrauschen



$$+1 \sin(2\pi f t)$$

$$-1 \sin(2\pi f t + \pi) = -\sin(2\pi f t)$$



- CDMA (Code Division Multiple Access) für Funk
  - z.B. GSM (Global System for Mobile Communication)
  - oder UMTS (Universal Mobile Telecommunications System)
- Beispiel für 2 Sender:

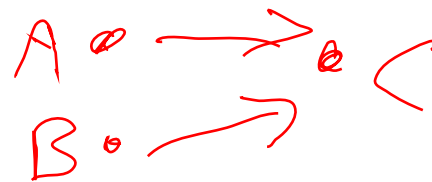
Sender	Eingabe	Ausgabe
A	Bit 0	<u>(-1, -1)</u>
	Bit 1	(+1, +1)
B	<u>0</u>	<u>(-1, +1)</u>
	1	(+1, -1)

$$\sin(2\pi f t) + \sin(2\pi f t)$$

$$= 2 \cdot \sin(2\pi f t)$$

superposition

$$(-1, -1) + (-1, +1) = (-2, 0)$$



- A sendet 0, B sendet 0:

- Ergebnis: (-2, 0)

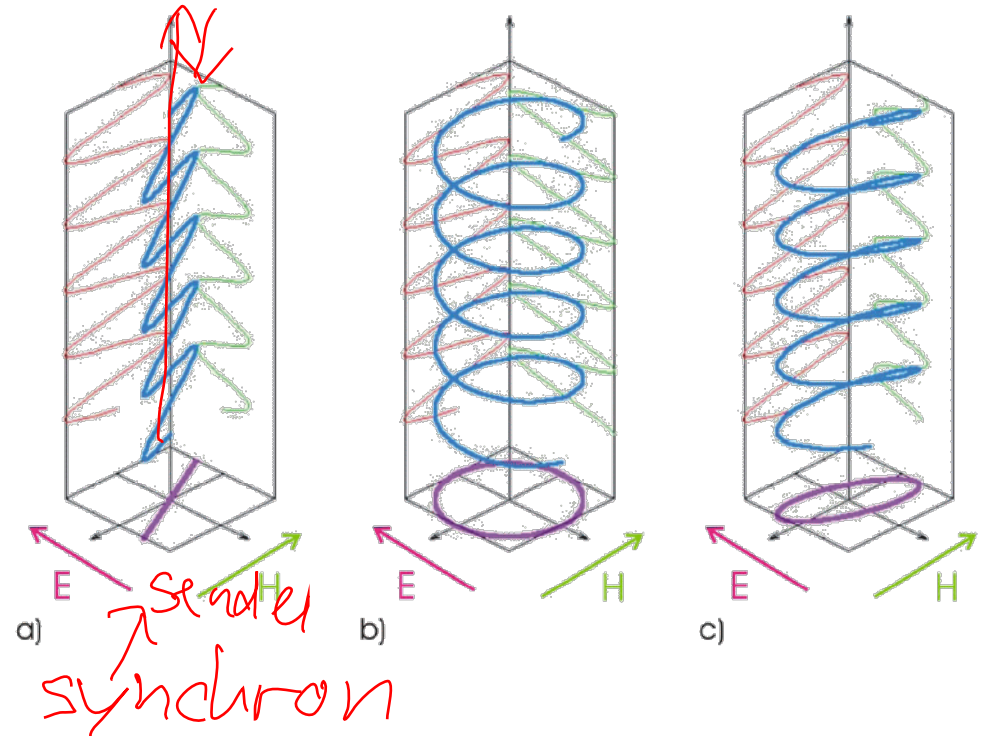
- C empfängt (-2, 0):

- Dekodierung bzgl. A:  $(-2, 0) \cdot (-1, -1)^T = (-2)(-1) + 0(-1) = 2 > 0$

- A hat also 0 gesendet (da Ergebnis positiv)

$$(-2, 0) \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = -2 < 0 \quad \left| \quad (-2, 0) \cdot \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix} = 2$$

- 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

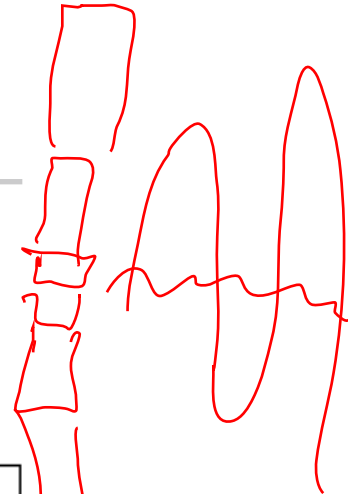


<http://optikwiki.harzoptics.de/doku.php?id=polarisation>

# 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 (PCM)
- 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

Quantisierungsrauschen



48 Bit  
4000 Frames

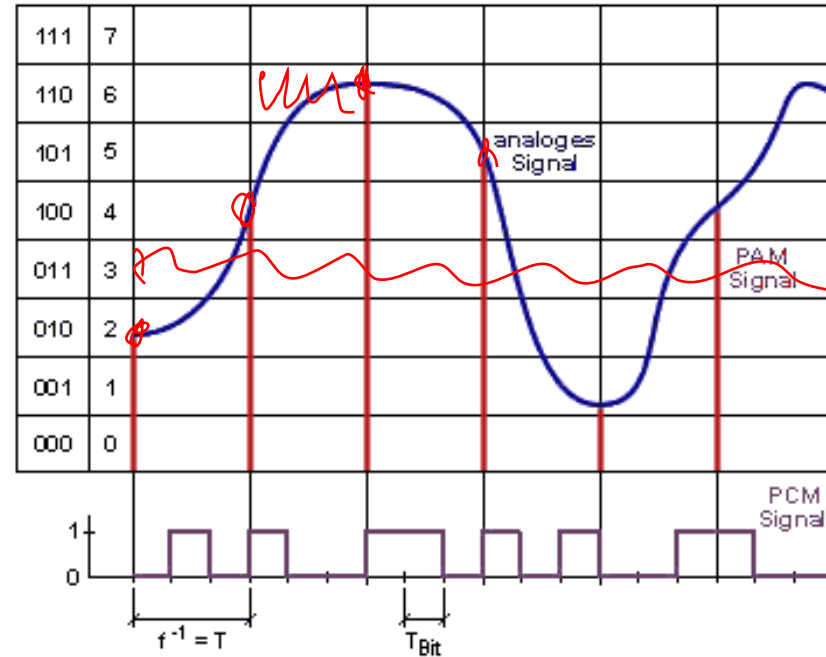
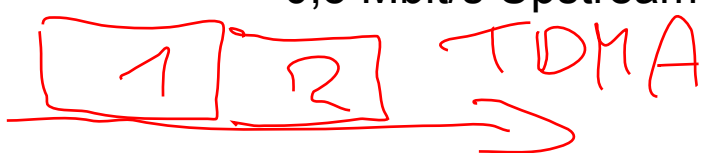
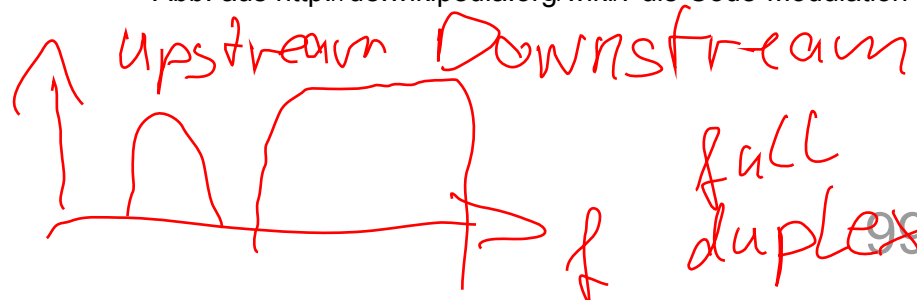
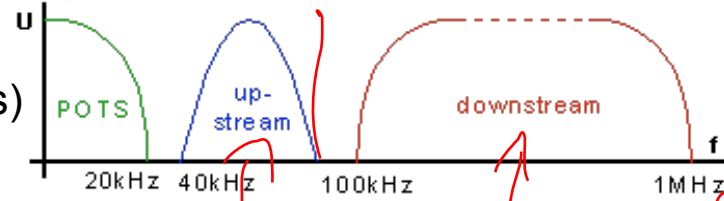


Abb. aus <http://de.wikipedia.org/wiki/Puls-Code-Modulation>

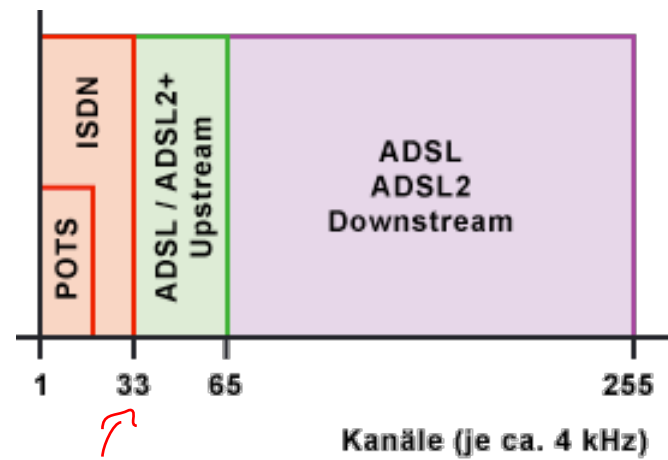
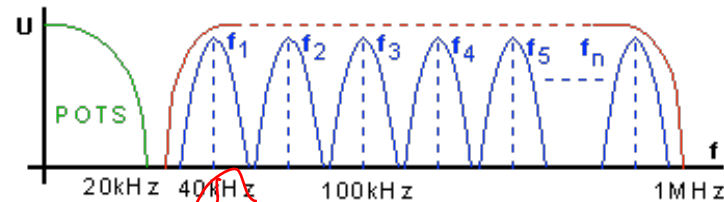


Plain old telephone service

- 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



Logarithm



Kanäle

138 kHz

# Das elektromagnetische Spektrum

## leitungsgebundene Übertragungstechniken

verdrillte Drähte

Koaxialkabel

Hohlleiter

optische  
Glasfaser

*EM*



Hz

$10^3$

$10^5$

*10<sup>6</sup>*

$10^7$

*10<sup>8</sup>*

$10^9$

$10^{11}$

$10^{13}$

$10^{15}$

Langwellen-  
Radio

Mittelwellen-  
-Radio

Kurzwele

*UKW*

Fernsehen

*GHz*

Mikrowellen

Infrarot

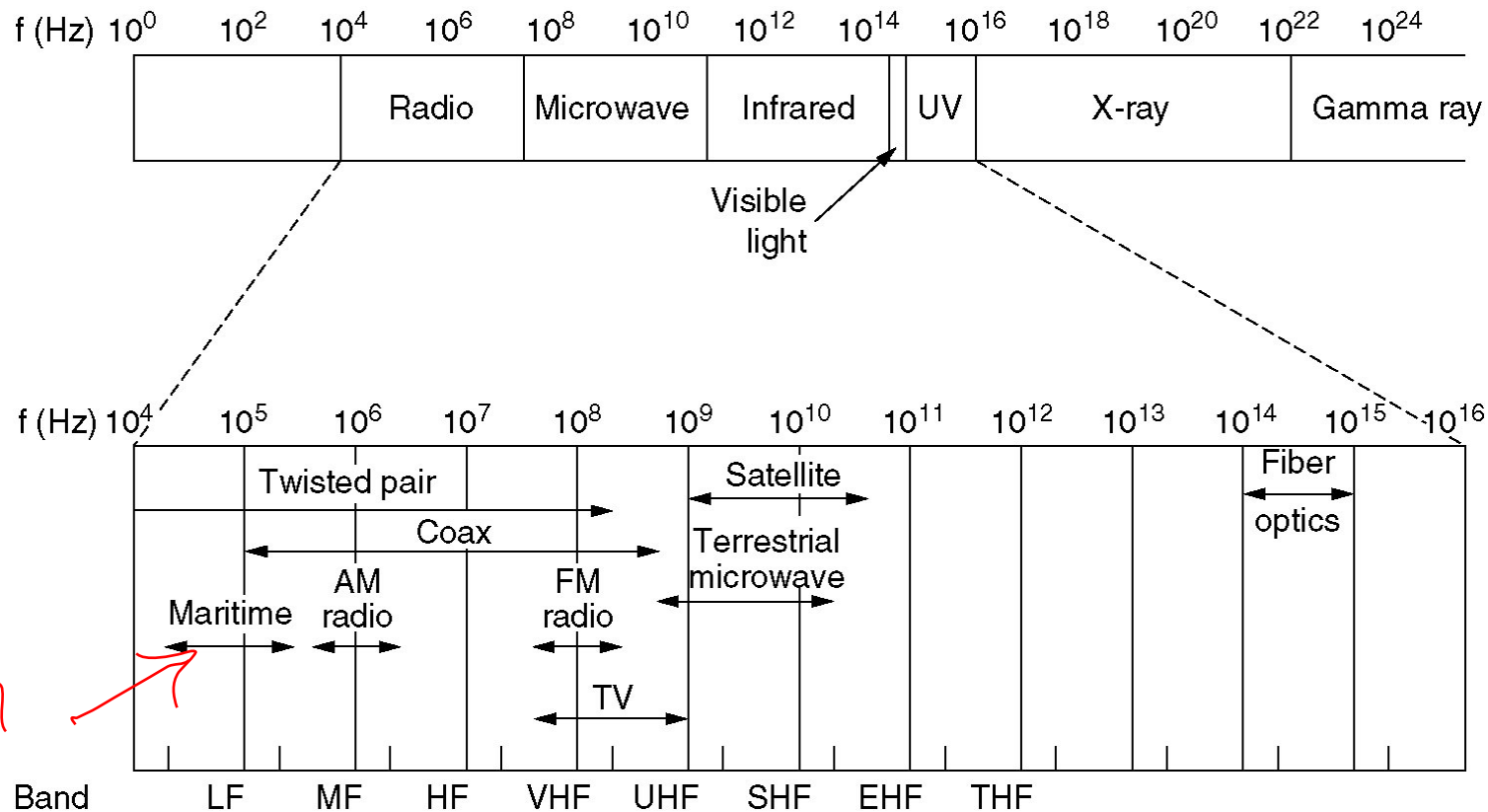
sichtbares  
Licht

*1 km*

## nicht-leitungsgebundene Übertragungstechniken

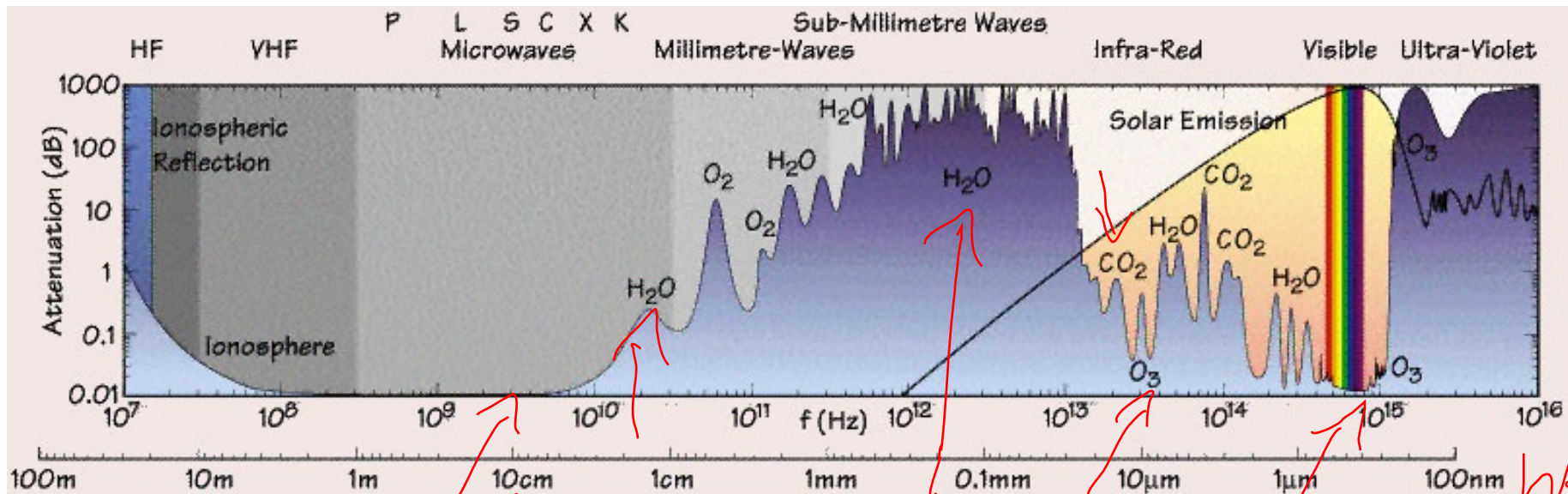
# Frequenzbereiche

- 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



# Dämpfung in verschiedenen Frequenzbereichen

- Frequenzabhängige Dämpfung elektromagnetischer Wellen in der Atmosphäre



[http://www.geographie.uni-muenchen.de/iggf/Multimedia/Klimatologie/physik\\_arbeit.htm](http://www.geographie.uni-muenchen.de/iggf/Multimedia/Klimatologie/physik_arbeit.htm)



30-300 MHz

0.3-3 GHz

- VHF/UHF für Mobilfunk

- Antennenlänge

- SHF für Richtfunkstrecken, Satellitenkommunikation

3-30 GHz

- Drahtloses (Wireless) LAN: UHF bis SHF

- Geplant: EHF

- Sichtbares Licht

- Kommunikation durch Laser

← Richtfunk

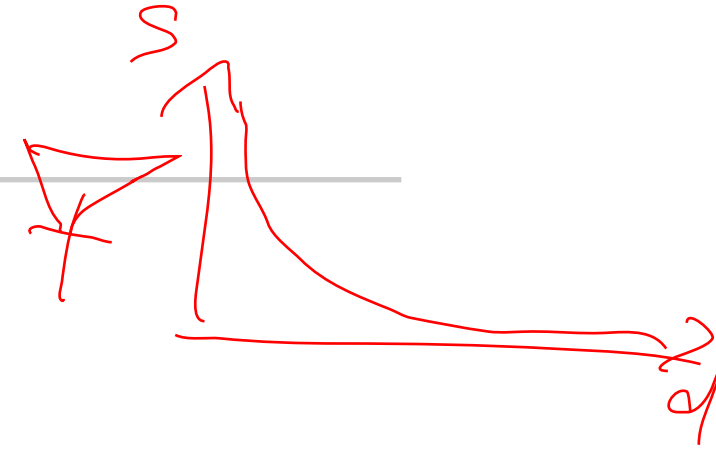
- Infrarot

- Fernsteuerungen

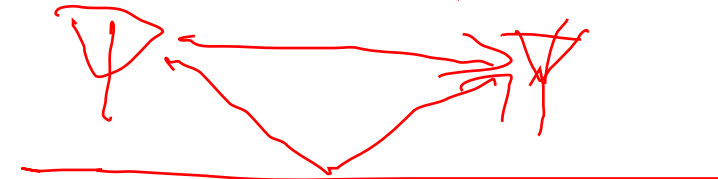
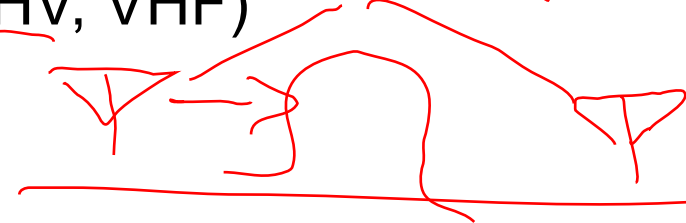
kHz

- Lokales LAN in geschlossenen Räumen

- Geradlinige Ausbreitung im Vakuum
- Empfangsleistung nimmt mit  $1/d^2$  ab
  - Theoretisch, praktisch mit höheren Exponenten bis zu 4 oder 5
- Einschränkung durch
  - Dämpfung in der Luft (insbesondere HV, VHF)
  - Abschattung
  - Reflektion
  - Streuung an kleinen Hindernissen
  - Beugung an scharfen Kanten



$$\frac{1}{d^4}$$
$$\frac{1}{2d}$$



DCF77 → 77 kHz

- VLF, LF, MF-Wellen

- folgen der Erdkrümmung (bis zu 1000 km in VLF)
- Durchdringen Gebäude

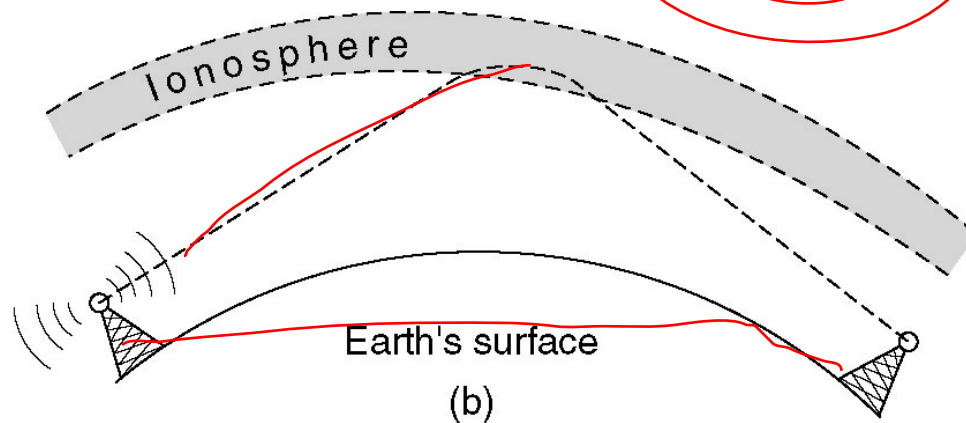
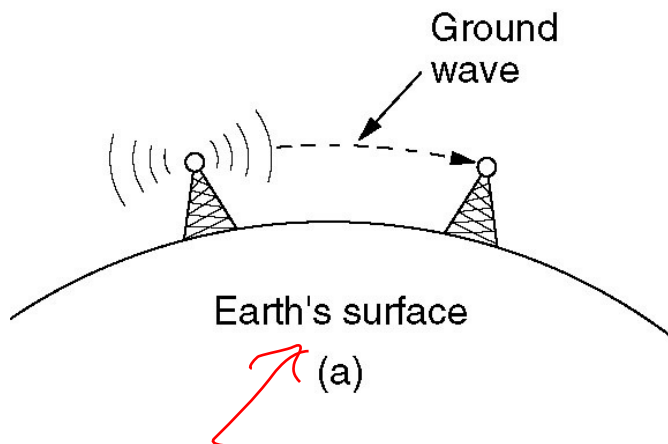
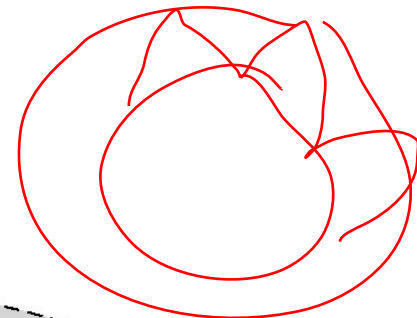
- HF, VHF-Wellen

- Werden am Boden absorbiert
- Werden von der Ionosphäre in 100-500 km Höhe reflektiert

- Ab 100 MHz

- Wellenausbreitung geradlinig
- Kaum Gebäudedurchdringung
- Gute Fokussierung

- Ab 8 GHz Absorption durch Regen



$$\sin(2\pi f t)$$

$$\cos(2\pi f t)$$

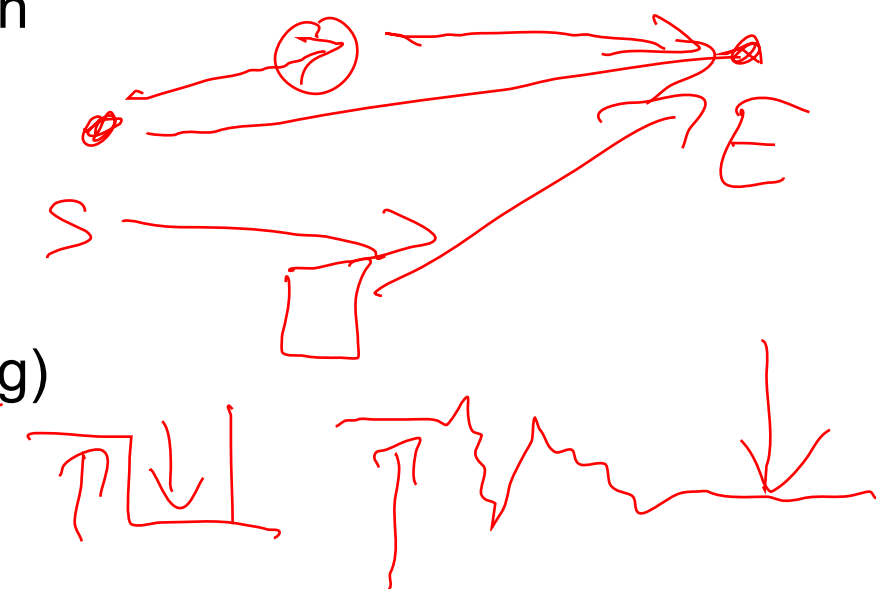
## ■ Mehrwegeausbreitung (Multiple Path Fading)

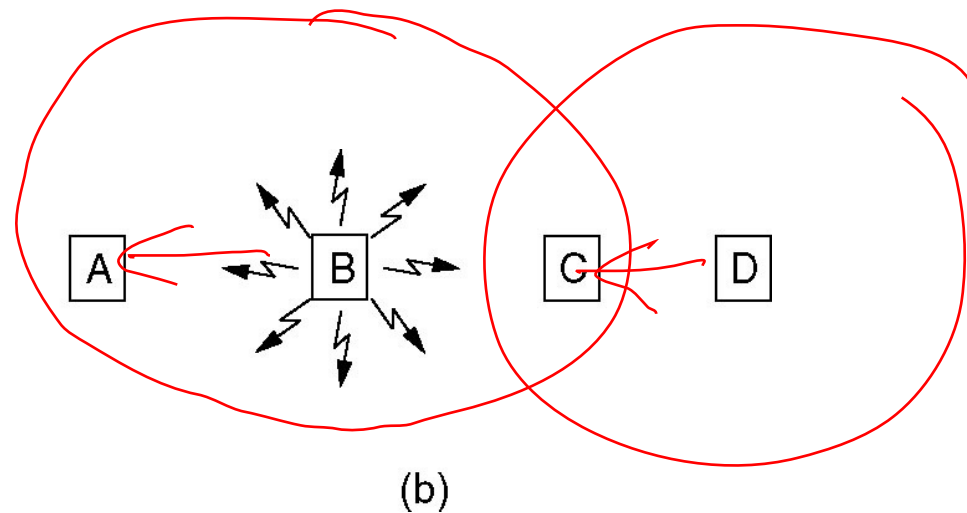
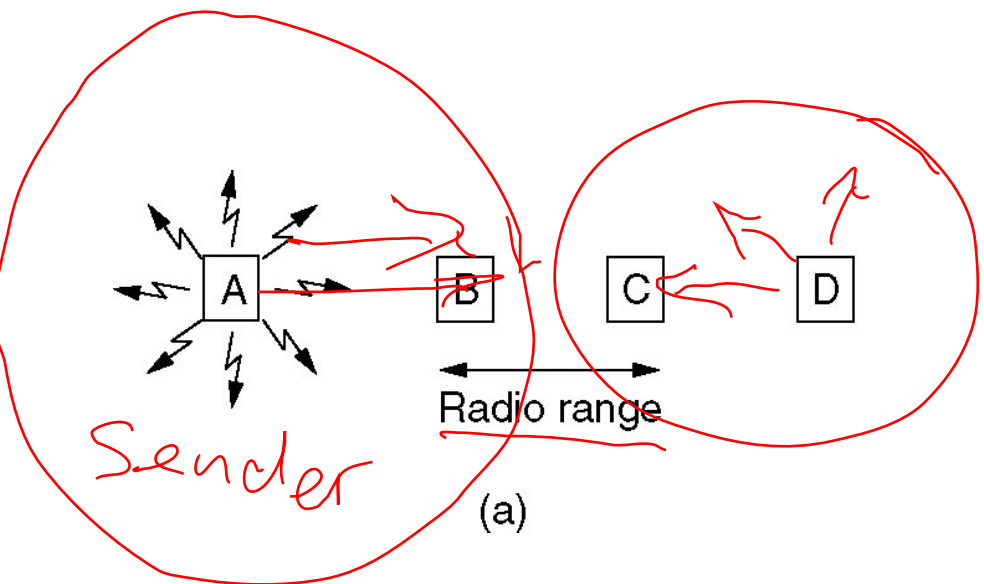
- Signal kommt aufgrund von Reflektion, Streuung und Beugung auf mehreren Wegen beim Empfänger an
- Zeitliche Streuung führt zu Interferenzen
  - Fehlerhafter Dekodierung
  - Abschwächung



## ■ Probleme durch Mobilität

- Kurzzeitige Einbrüche (schnelles Fading)
  - Andere Übertragungswege
  - Unterschiedliche Phasenlage
- Langsame Veränderung der Empfangsleistung (langsames Fading)
  - Durch Verkürzen, Verlängern der Entfernung Sender-Empfänger

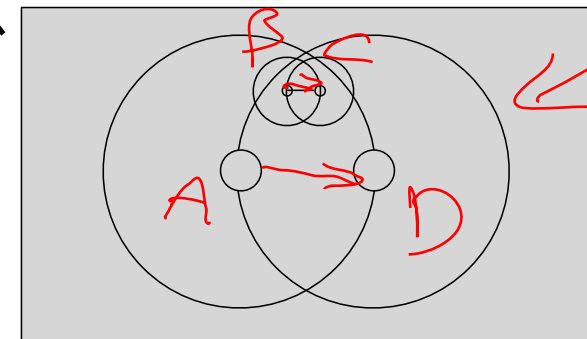
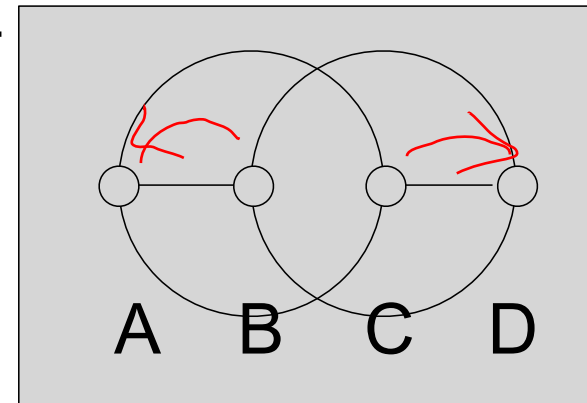
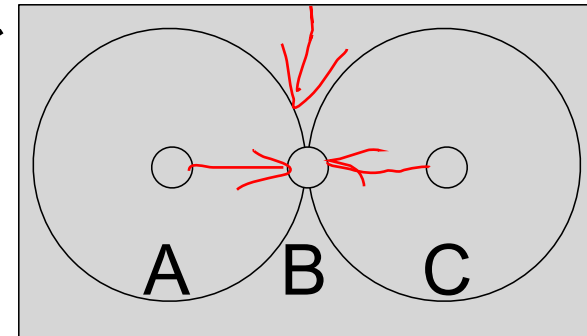
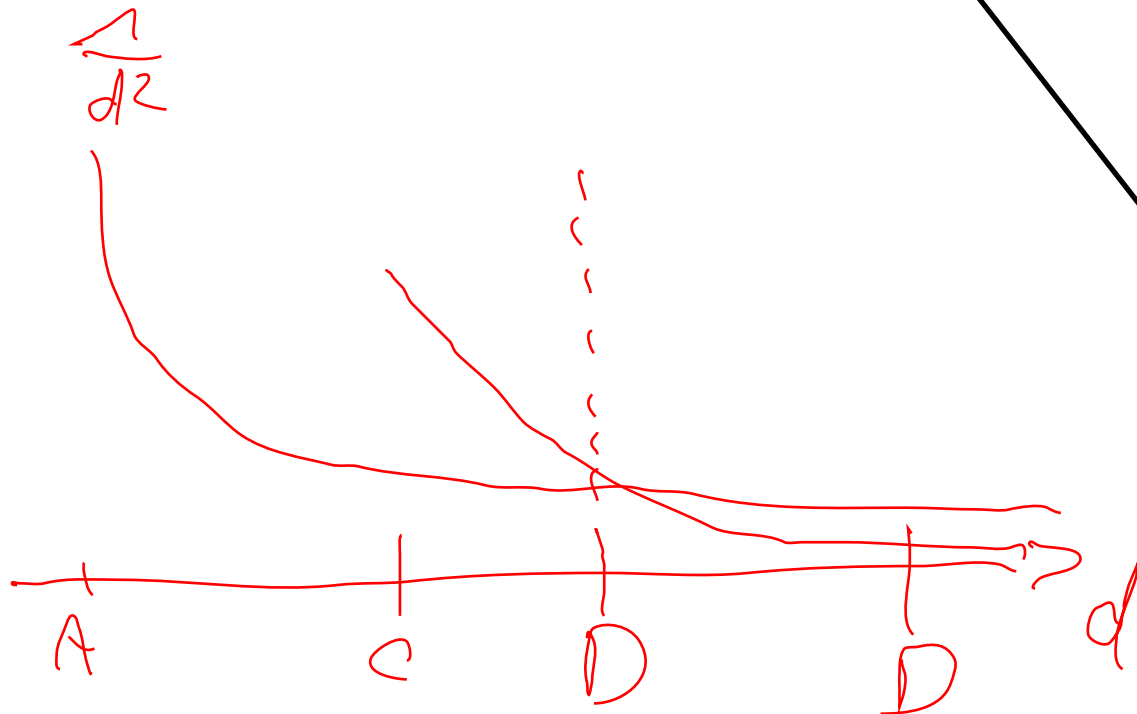




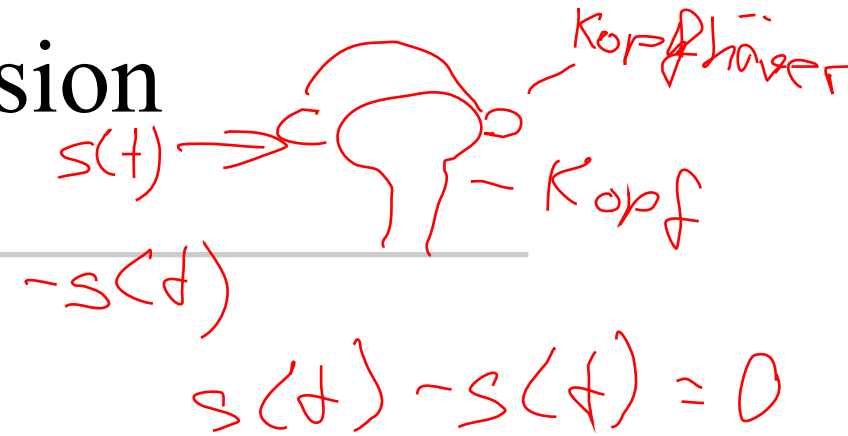
CSMA

## ■ Interferenzen

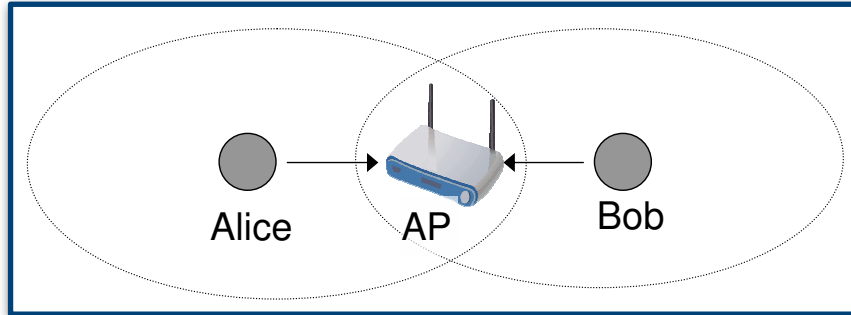
- Hidden Terminal Problem
- Exposed Terminal Problem
- Asymmetrie (var. Reichweite)



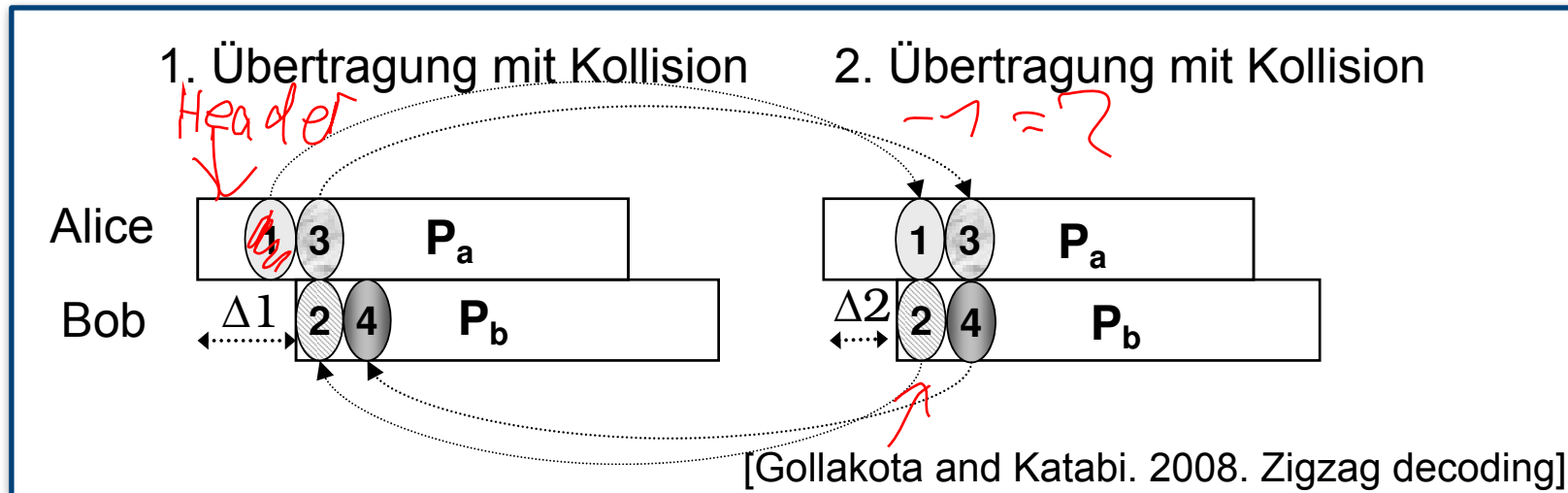
# Dekodierung bei Kollision



- Hidden Terminal Problem

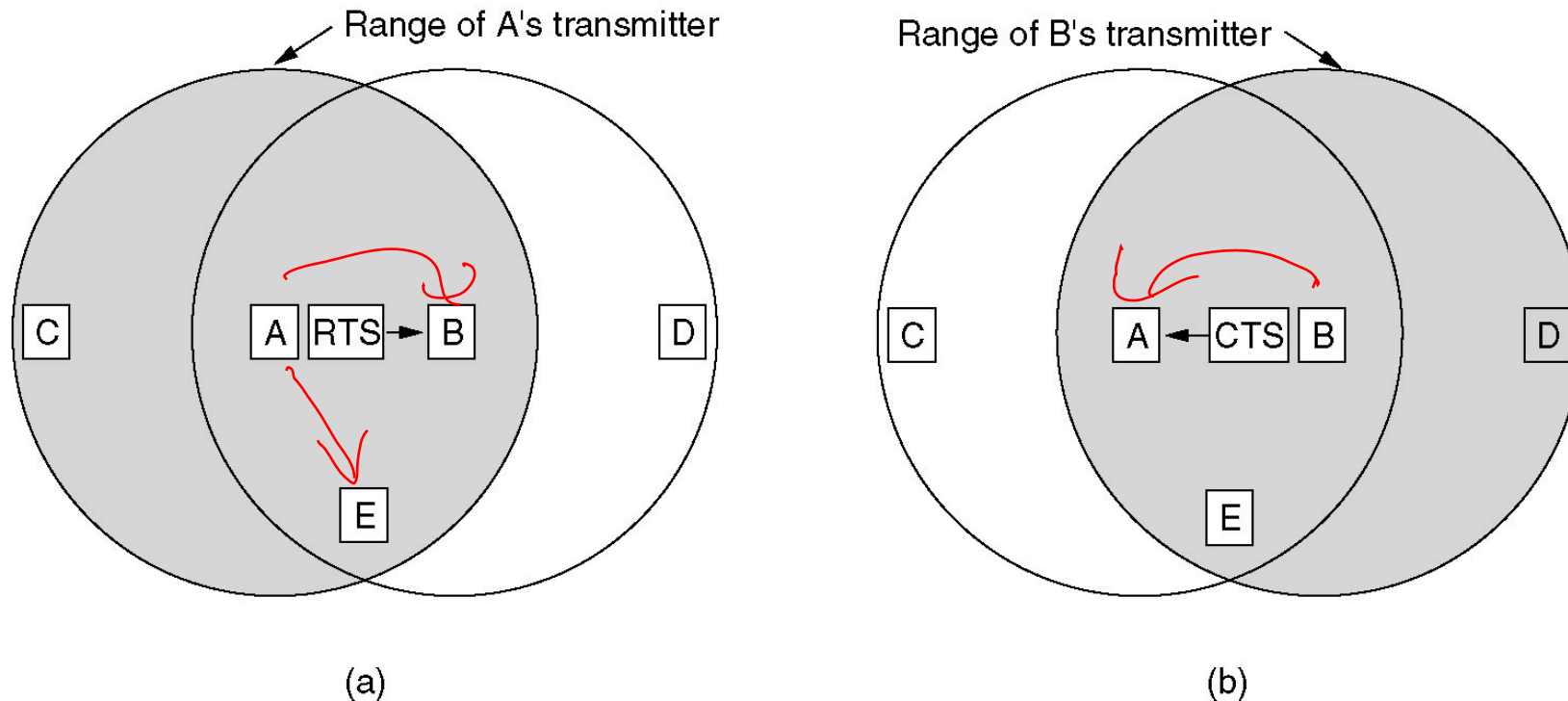


- Decodierung mit Zigzag Decoding:



- darauf aufbauendes MAC Protokoll: *MAC Design for Analog Network Coding*, Kuhn et al.

# Multiple Access with Collision Avoidance



- (a) A sendet Request to Send (RTS) an B.
- (b) B antwortet mit Clear to Send (CTS) an A.