



Systeme II

2. Die physikalische Schicht

Christian Schindelhauer

Technische Fakultät

Rechnernetze und Telematik

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Version 14.05.2014

- ISO-Definition
 - Die Bitübertragungsschicht definiert
 - mechanische
 - elektrische
 - funktionale und
 - prozedurale
 - Eigenschaften um eine physikalische Verbindung
 - aufzubauen,
 - aufrecht zu erhalten und
 - zu beenden.

- Information
 - Menschliche Interpretation,
 - z.B. schönes Wetter
- Daten
 - Formale Präsentation,
 - z.B. 8 Grad Celsius, Niederschlagsmenge 0cm, Wolkenbedeckung 40%
- Signal
 - Repräsentation von Daten durch physikalische Variablen,
 - z.B. Stromfluss durch Thermosensor, Videosignale aus Kamera
 - Beispiele für Signale:
 - Strom, Spannung
 - In der digitalen Welt repräsentieren Signale Bits

- Leitungsgebundene Übertragungsmedien
 - Kupferdraht – Twisted Pair
 - Kupferdraht – Koaxialkabel
 - Glasfaser
- Drahtlose Übertragung
 - Funkübertragung
 - Mikrowellenübertragung
 - Infrarot
 - Lichtwellen

Twisted Pair



(a)

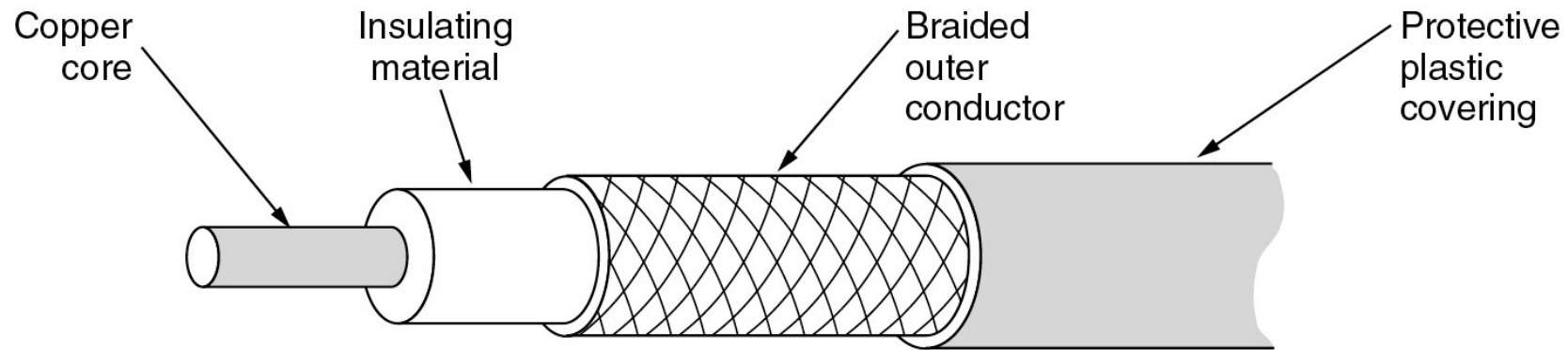


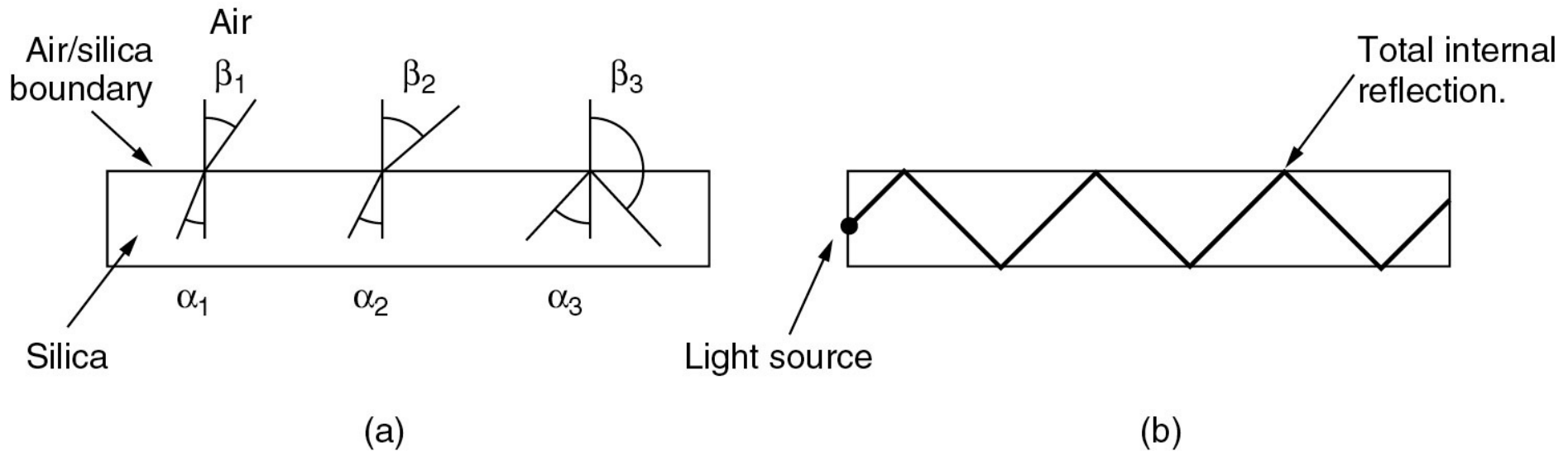
(b)

(a) Category 3 UTP.

(b) Category 5 UTP.

Koaxialkabel

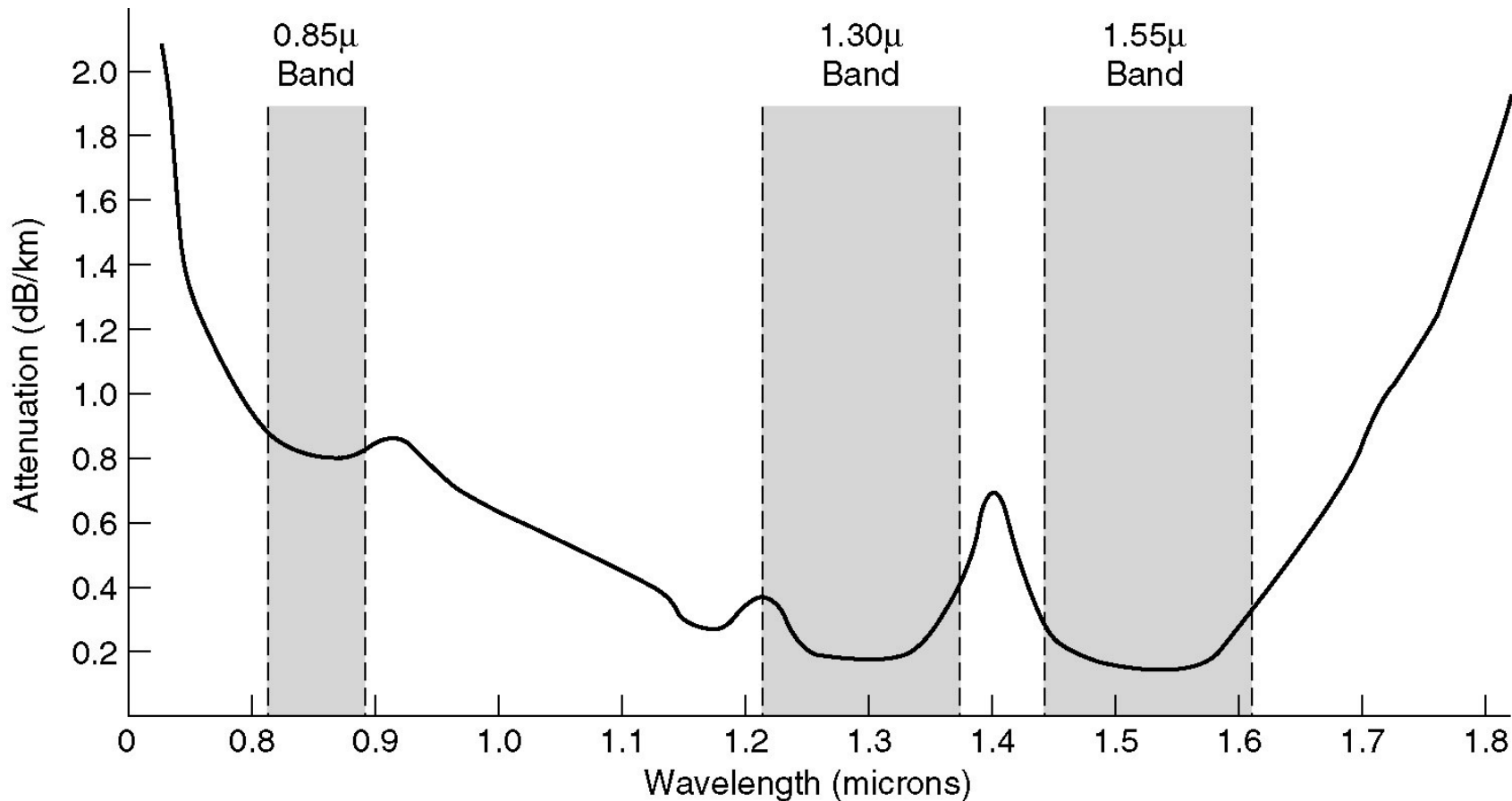




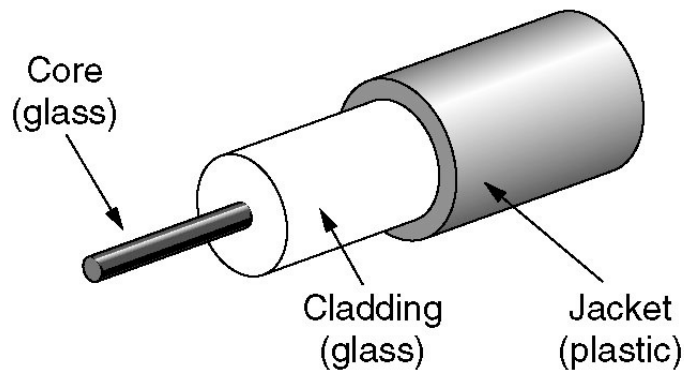
Gesetz von Snellius:
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_{\text{Glas}}}{c_{\text{Luft}}}$$

- (a) Beugung und Reflektion an der Luft/Silizium-Grenze bei unterschiedlichen Winkeln
- (b) Licht gefangen durch die Reflektion

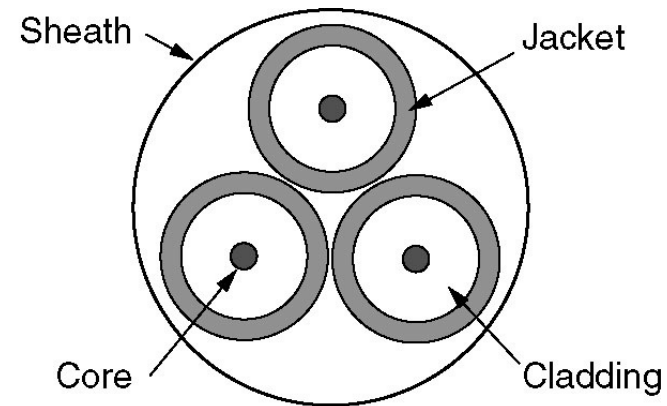
- Dämpfung von Infrarotlicht in Glasfaser



- (a) Seitenansicht einer einfachen Faser
- (b) Schnittansicht eines Dreier-Glasfaserbündels

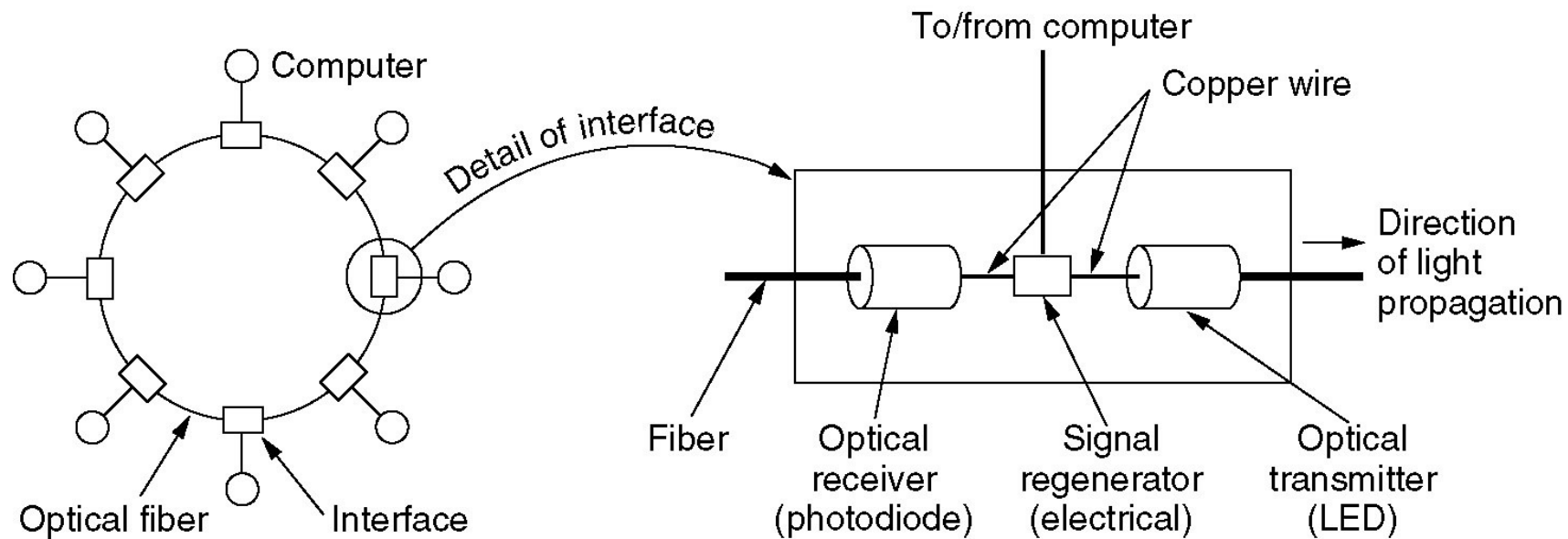


(a)

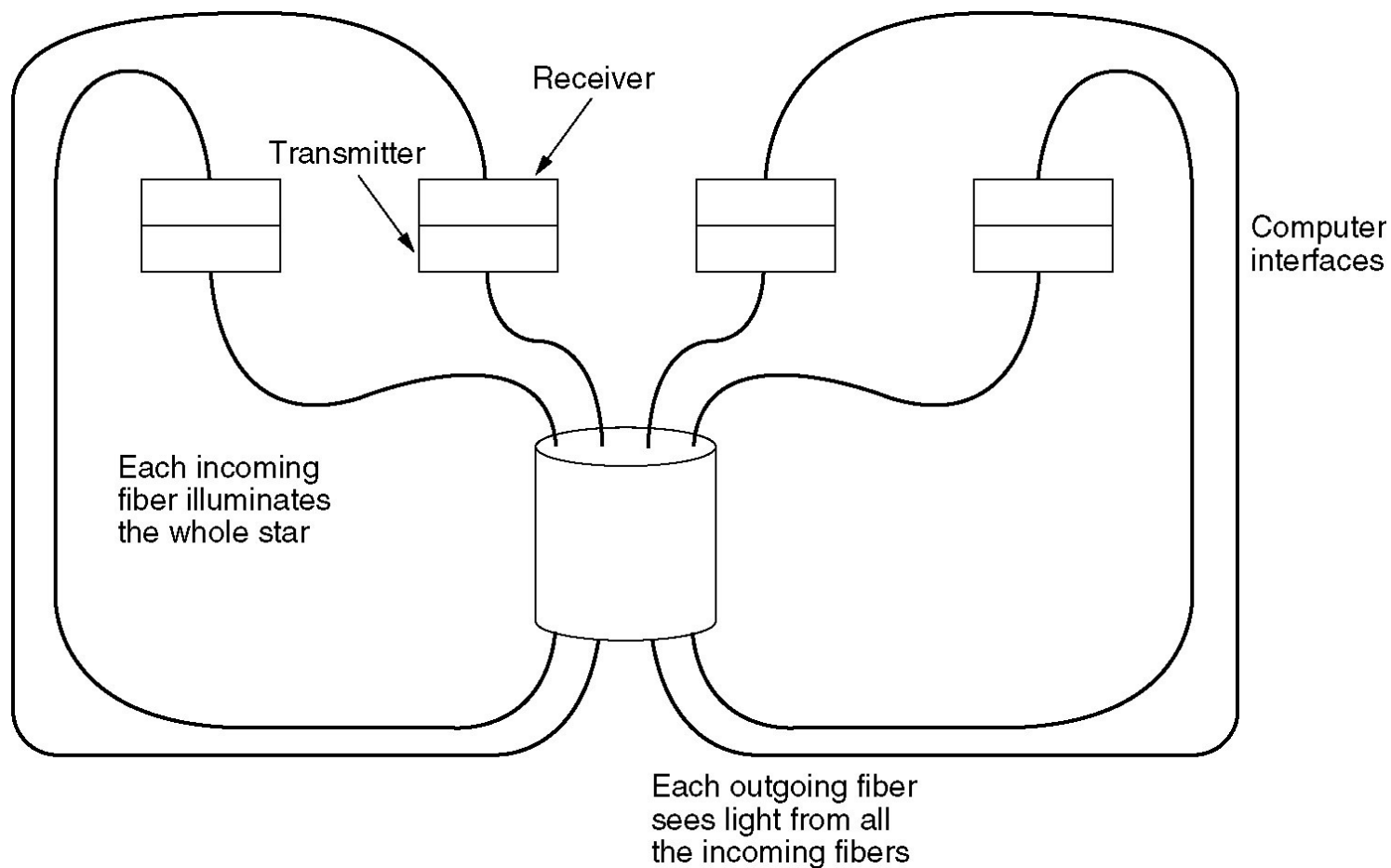


(b)

Glasfaserring mit aktiven Repeatern

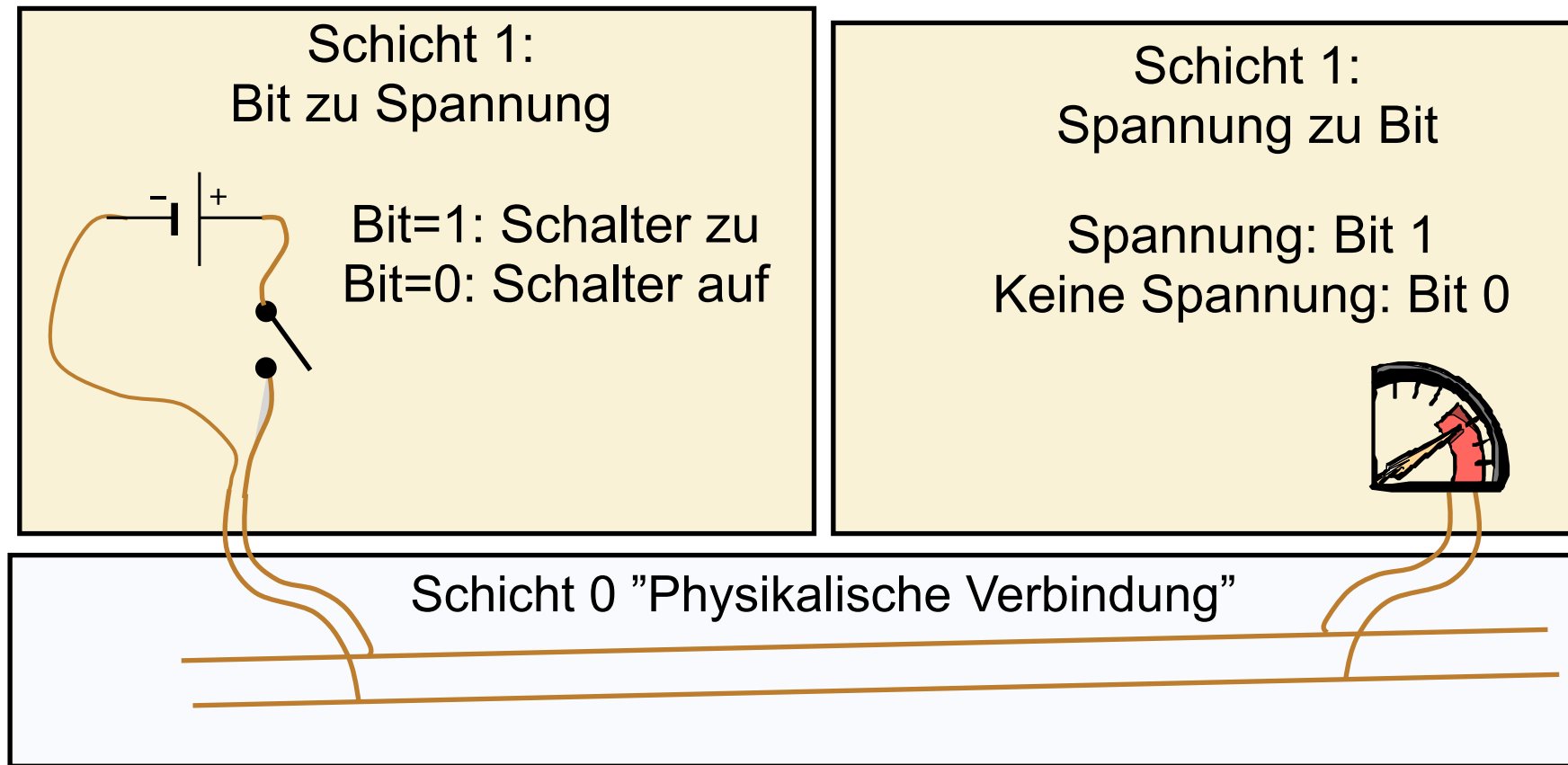


Eine passive Sternverbindung in einem Glasfasernetz



Die einfachste Bitübertragung

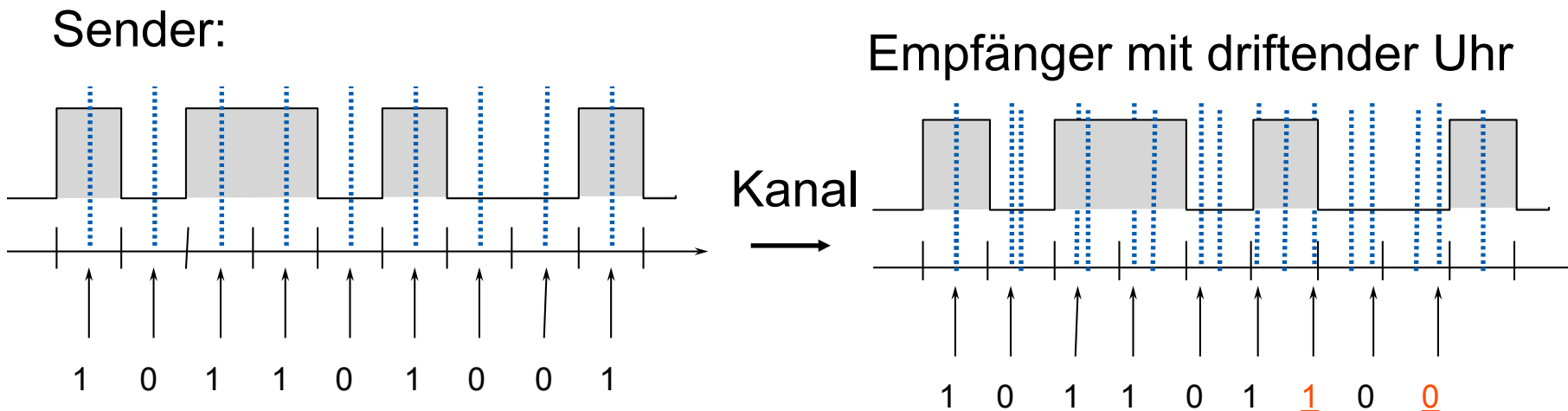
- Bit 1: Strom an
- Bit 0: Strom aus



(aus Vorlesung von Holger Karl)

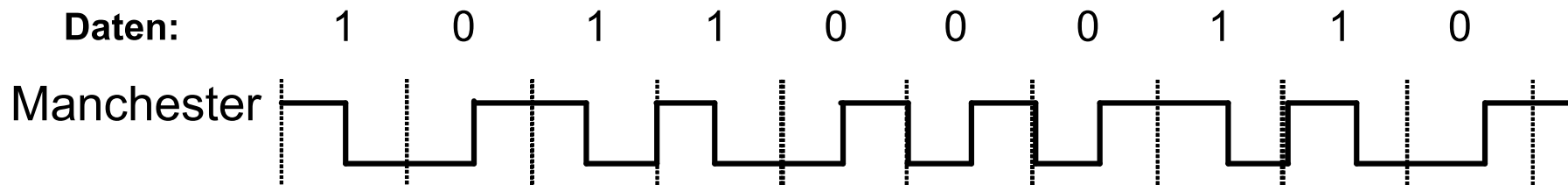
- Wann muss man die Signale messen
 - Typischerweise in der Mitte eines Symbols
 - Wann startet das Symbol?
 - Die Länge des Symbols ist üblicherweise vorher festgelegt.
- Der Empfänger muss auf der Bit-ebene mit dem Sender synchronisiert sein
 - z.B. durch *Frame Synchronization*

- Was passiert wenn man einfach Uhren benutzt
- Problem
 - Die Uhren driften auseinander
 - Keine zwei (bezahlbare Uhren) bleiben perfekt synchron
- Fehler by Synchronisationsverlust (NRZ):



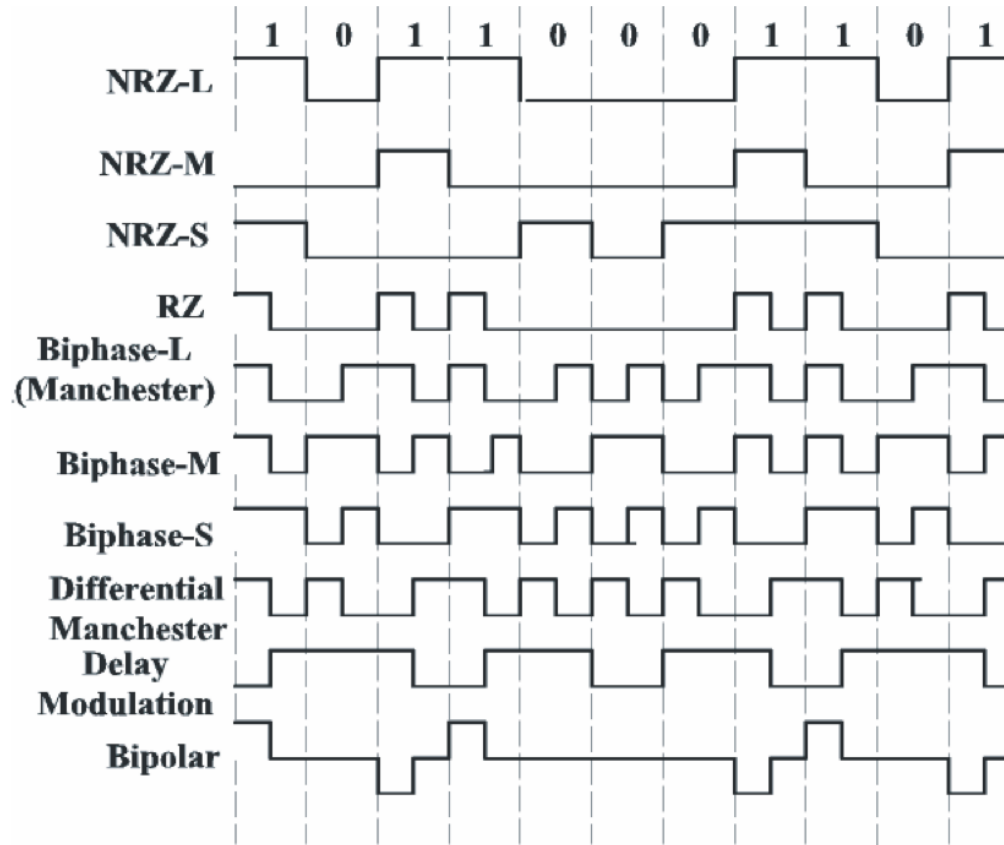
- Ohne Kontrolle keine Synchronisation
- Lösung: explizites Uhrensinal
 - Benötigt parallele Übertragung über Extra-Kanal
 - Muss mit den Daten synchronisiert sein
 - Nur für kurze Übertragungen sinnvoll
- Synchronisation an kritischen Zeitpunkten
 - z.B. Start eines Symbols oder eines Blocks
 - Sonst läuft die Uhr völlig frei
 - Vertraut der kurzzeitig funktionierenden Synchronität der Uhren
- Uhrensinal aus der Zeichenkodierung

- z.B. Manchester Code (Biphase Level)
 - 1 = Wechsel von hoch zu niedrig in der Intervallmitte
 - 0 = Umgekehrter Wechsel

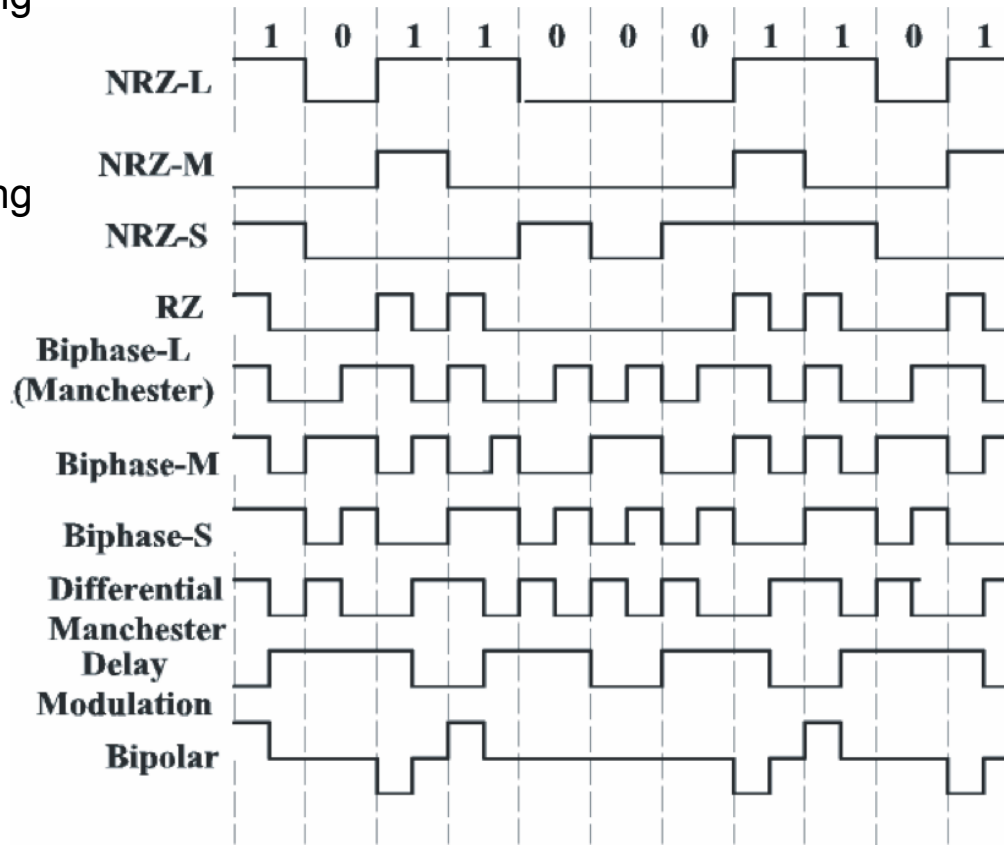


- Das Signal beinhaltet die notwendige Information zur Synchronisation

- Non-Return to Zero-Level (NRZ-L)
 - 1 = hohe Spannung, 0 = niedrig
- Non-Return to Zero-Mark (NRZ-M)
 - 1 = Wechsel am Anfang des Intervalls
 - 0 = Kein Wechsel
- Non-Return to Zero-Space (NRZ-S)
 - 0 = Wechsel am Intervallanfang
 - 1 = Kein Wechsel
- Return to Zero (RZ)
 - 1 = Rechteckpuls am Intervallanfang
 - 0 = Kein Impuls
- Manchester Code (Biphase Level)
 - 1 = Wechsel von hoch zu niedrig in der Intervallmitte
 - 0 = Umgekehrter Wechsel

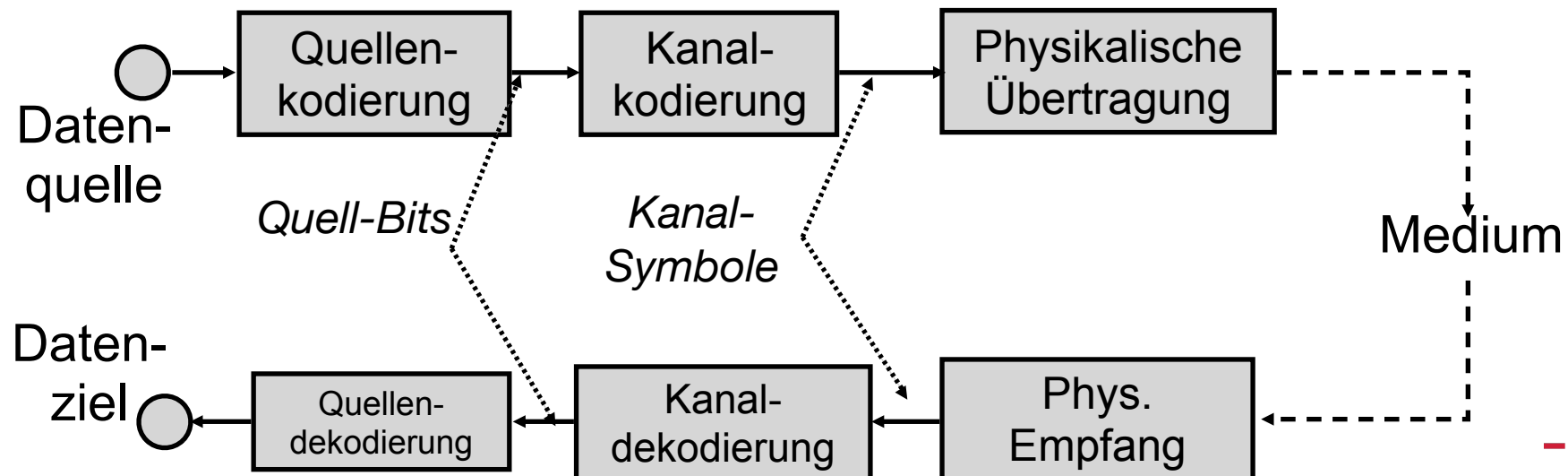


- Biphase-Mark
 - Immer: Übergang am Intervallanfang
 - 1 = zweiter Übergang in der Mitte
 - 0 = kein zweiter Übergang
- Biphase-Space
 - Immer: Übergang am Intervallanfang
 - 1/0 umgekehrt wie Biphase-Mark
- Differential Manchester-Code
 - Immer: Übergang in Intervallmitte
 - 1 = Kein Übergang am Intervallanfang
 - 0 = Zusätzlicher Übergang am Intervallanfang
- Delay Modulation (Miller)
 - Übergang am Ende, falls 0 folgt
 - 1 = Übergang in der Mitte des Intervalls
 - 0 = Kein Übergang falls 1 folgt
- Bipolar
 - 1 = Rechteckpuls in der ersten Hälfte, Richtung alterniert (wechselt)
 - 0 = Kein Rechteckpuls



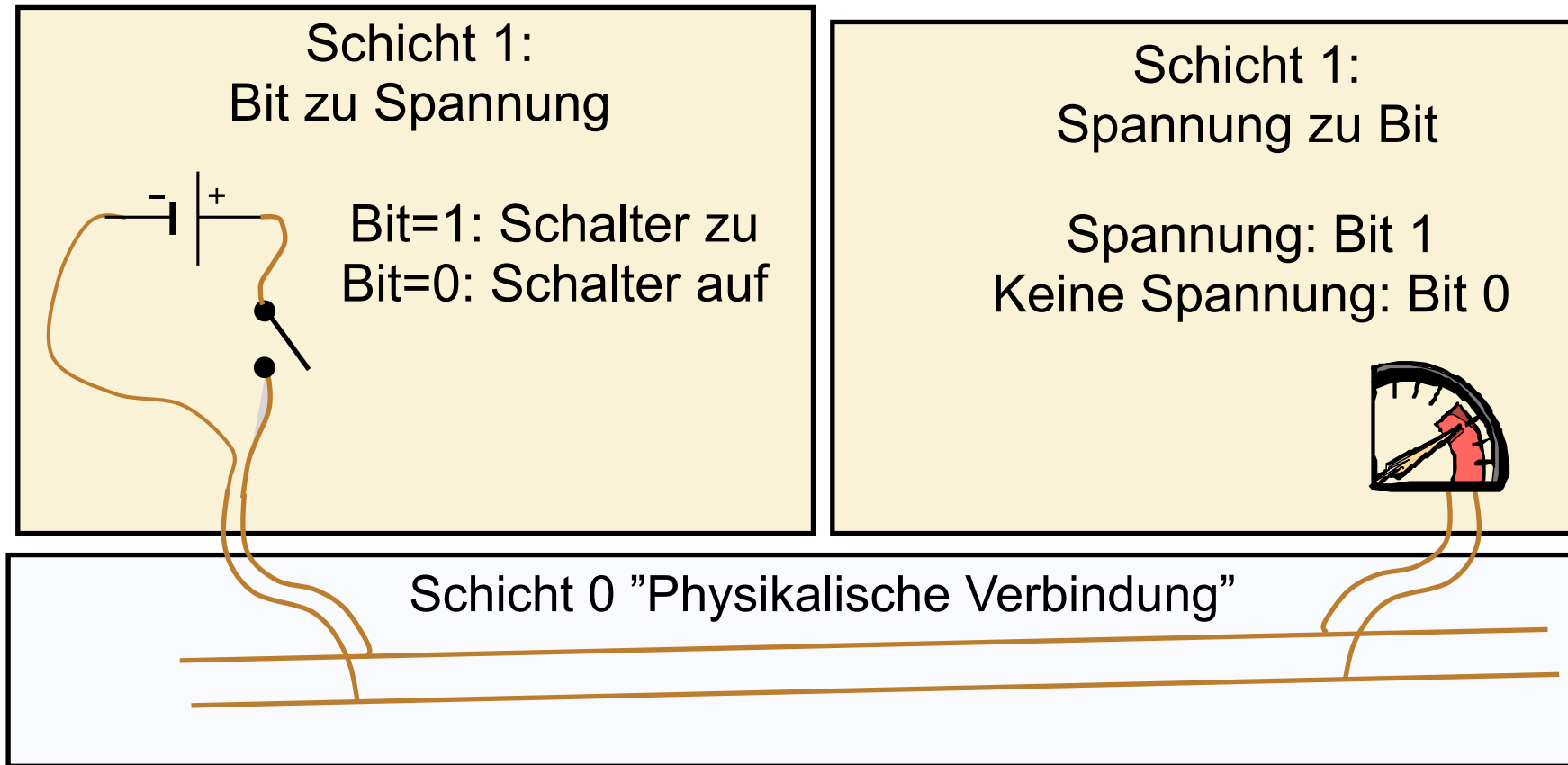
- Basisband (baseband)
 - Das digitale Signal wird direkt in Strom- oder Spannungsveränderungen umgesetzt
 - Das Signal wird mit allen Frequenzen übertragen
 - z.B. Durch NRZ (Spannung hoch = 1, Spannung niedrig = 0)
 - Problem: Übertragungseinschränkungen
- Breitband (broadband)
 - Die Daten werden durch einen weiten Frequenzbereich übertragen
 - Weiter Bereich an Möglichkeiten:
 - Die Daten können auf eine Trägerwelle aufgesetzt werden (Amplitudenmodulation)
 - Die Trägerwelle kann verändert (moduliert) werden (Frequenz/Phasenmodulation)
 - Verschiedene Trägerwellen können gleichzeitig verwendet werden

- Quellkodierung
 - Entfernen redundanter oder irrelevanter Information
 - Z.B. mit verlustbehafteter Komprimierung (MP3, MPEG 4)
 - oder mit verlustloser Komprimierung (Huffman-Code)
- Kanalkodierung
 - Abbildung der Quellbits auf Kanal-Symbole
 - Möglicherweise Hinzufügen von Redundanz angepasst auf die Kanaleigenschaften
- Physikalische Übertragung
 - Umwandlung in physikalische Ereignisse



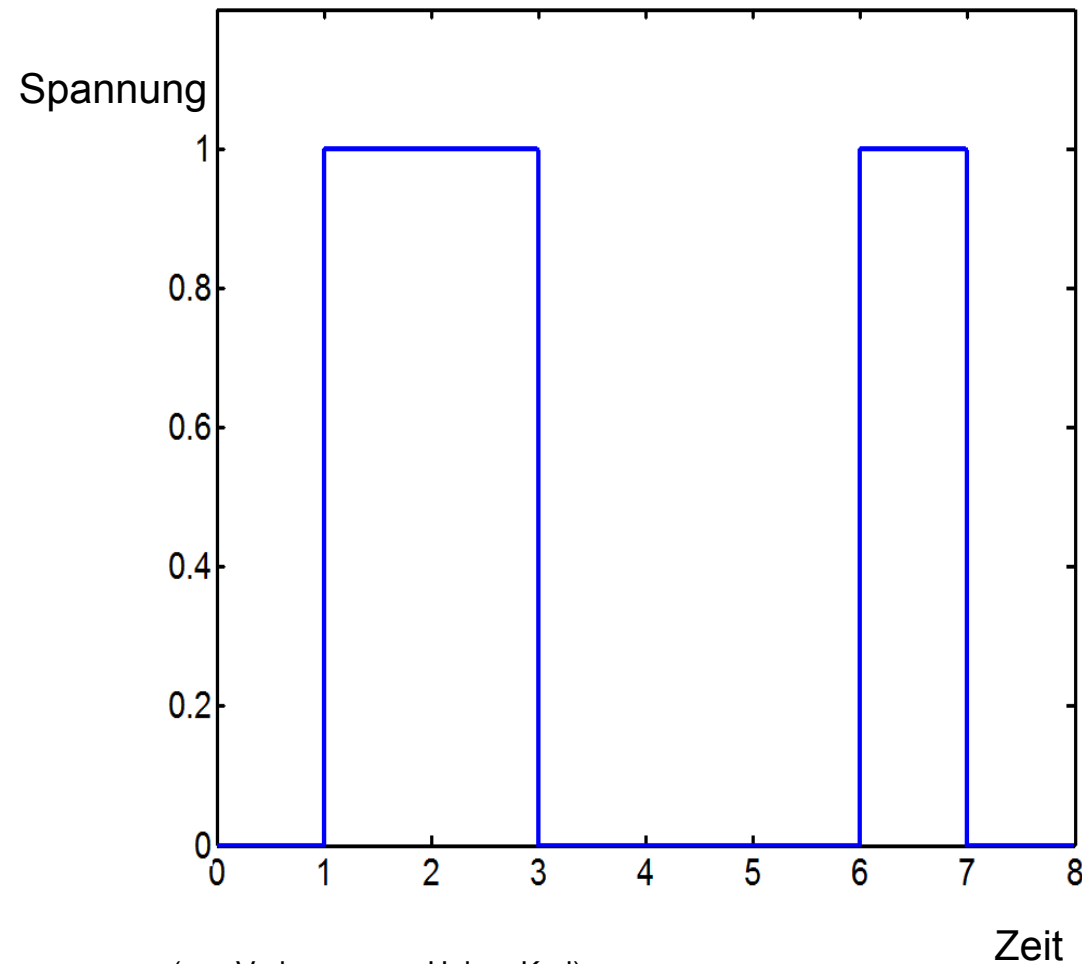
Die einfachste Bitübertragung

- Bit 1: Strom an
- Bit 0: Strom aus



(aus Vorlesung von Holger Karl)

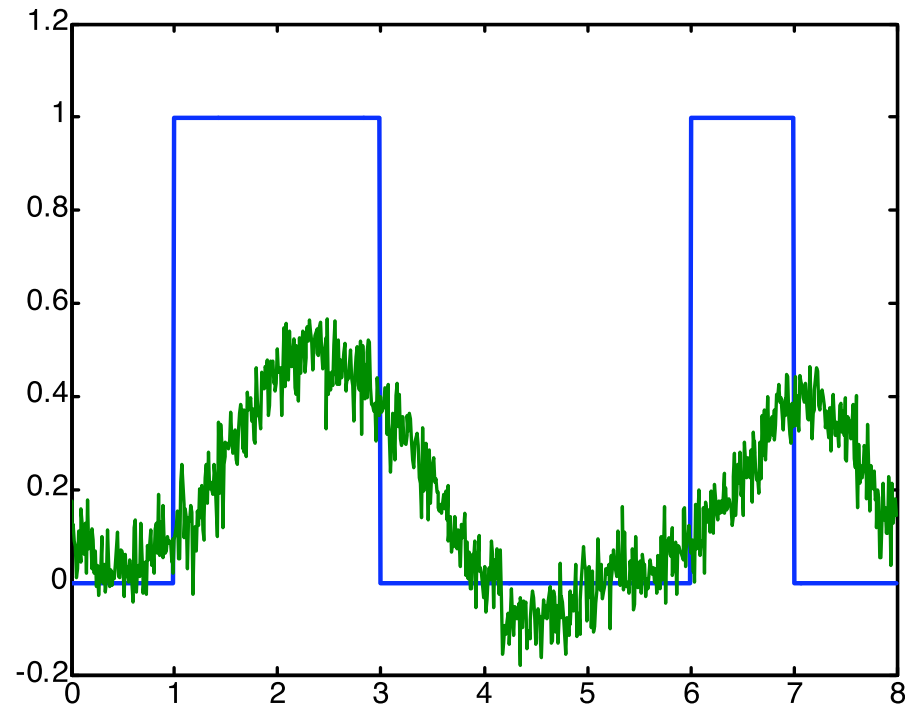
- Zeichen “b” benötigt mehrere Bits
 - z.B. ASCII code of “b” als Binärzahl
01100010
- Spannungsverlauf:



(aus Vorlesung von Holger Karl)

Was kommt an?

- Übertrieben schlechter Empfang
- Was passiert hier?



1. Allgemeine Dämpfung
2. Frequenzverlust
3. Frequenzabhängige Dämpfung
4. Störung und Verzerrung
5. Rauschen

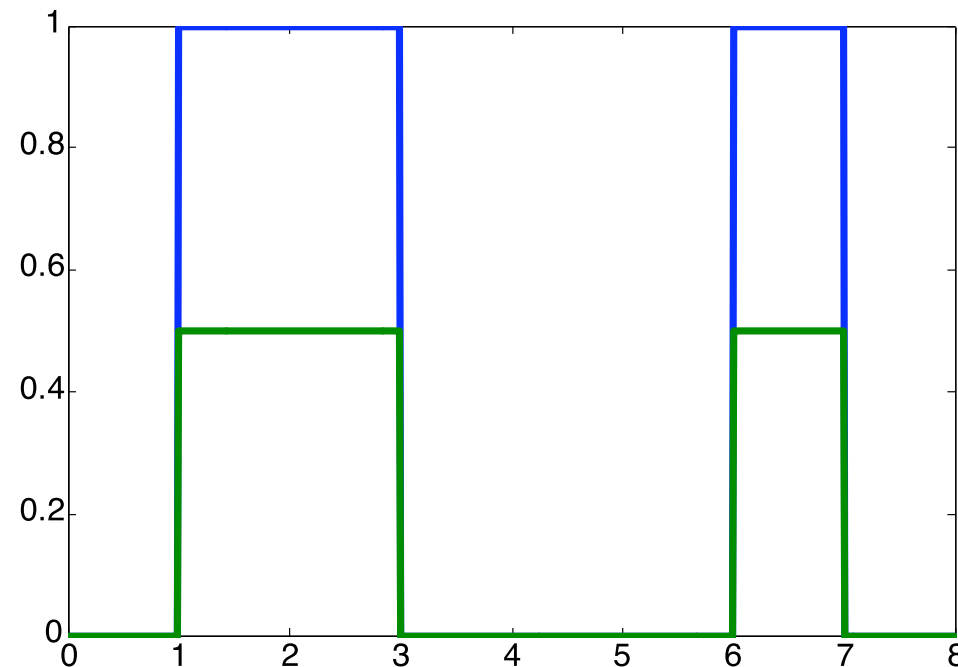
1. Signale werden gedämpft

- Dämpfung α (attenuation)
 - Verhältnis von Sendeenergie P_1 zu Empfangsenergie P_0
 - Bei starker Dämpfung erreicht wenig Energie dem Empfänger
- Dämpfung hängt ab von
 - der Art des Mediums
 - Abstand zwischen Sender und Empfänger
 - ... anderen Faktoren
- Angegeben in deziBel

$$\log_{10} \frac{P_1}{P_0} \quad (\text{in Bel})$$

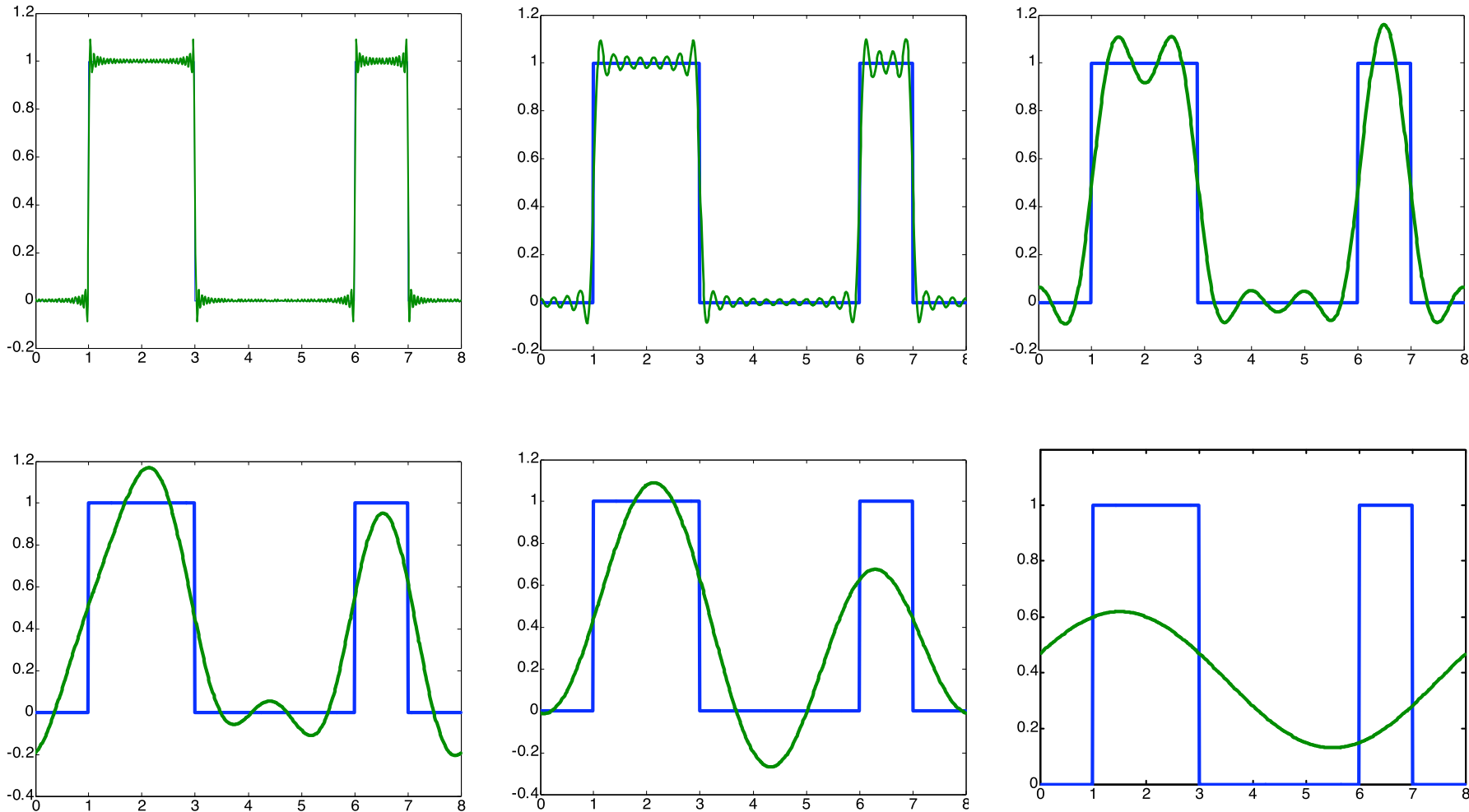
$$= 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_0} \quad (\text{in deziBel [dB]})$$

$$\alpha = \frac{P_1}{P_0}$$



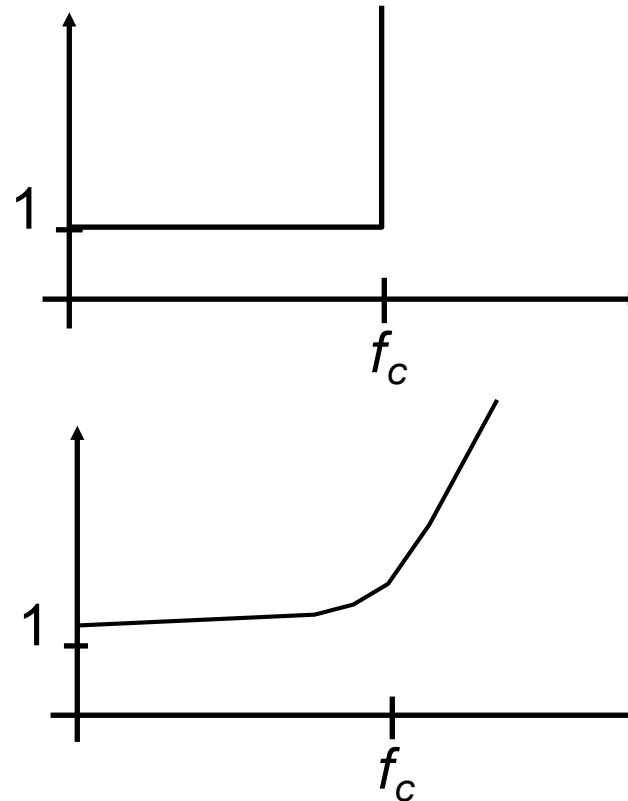
2. Nicht alle Frequenzen passieren das Medium

- Das Signal beim Verlust der hohen Frequenzen



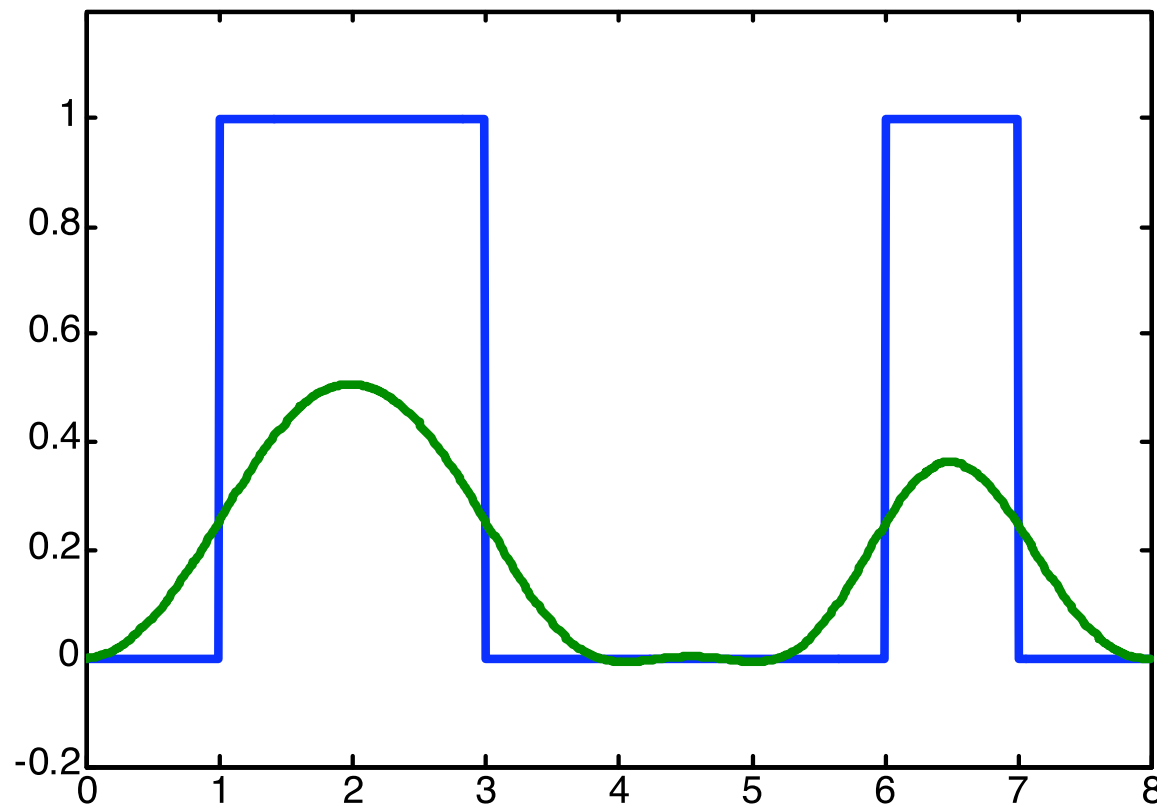
3. Frequenzabhängige Dämpfung

- Vorherige Seite: Cutoff
 - Zuerst ist die Dämpfung 1
 - und dann Unendlich
- Realistischer:
 - Dämpfung steigt kontinuierlich von 1 zu höheren Frequenzen
- Beides:
 - Bandweiten-begrenzter Kanal

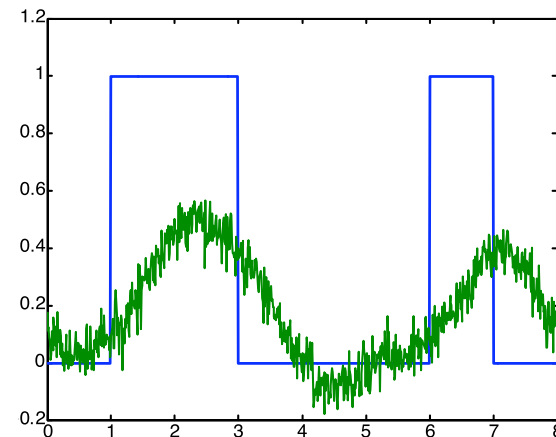


Beispiel mit realistischerer Dämpfung

- Beispiel: Dämpfung ist 2; 2,5, 3,333... , 5, 10, ∞ für den ersten, zweiten, ... Fourier-koeffizienten



Warum passiert das?

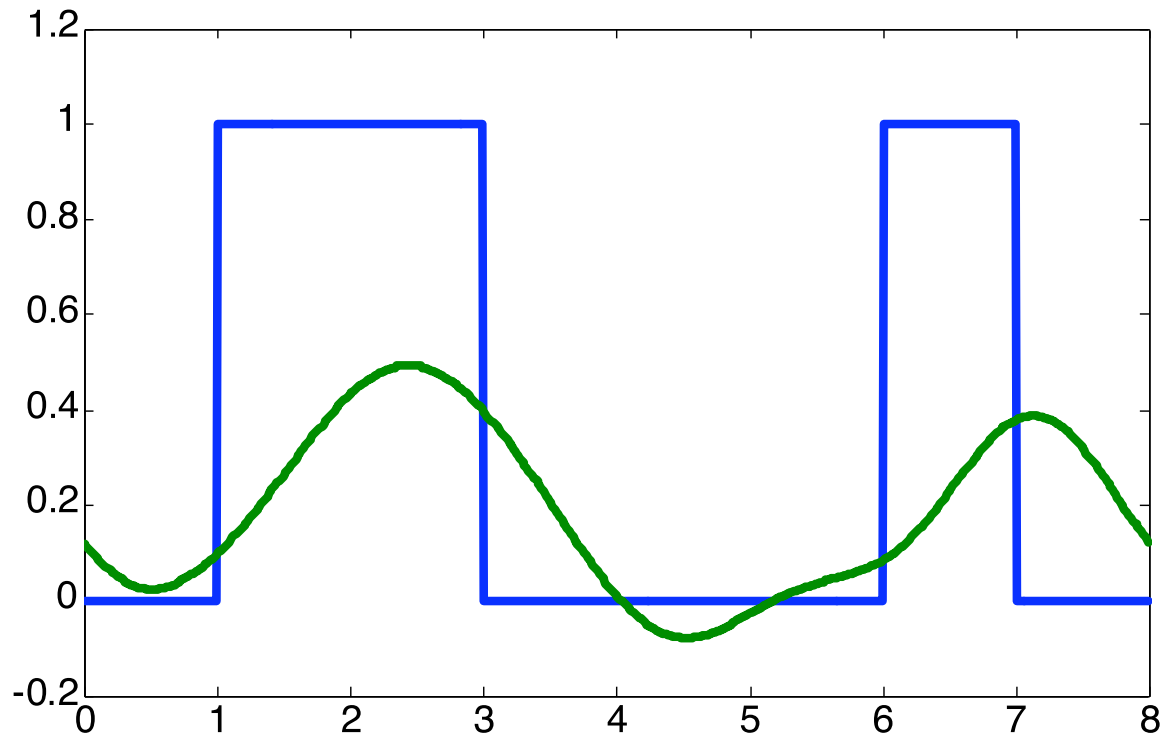


4. Das Medium stört und verzerrt

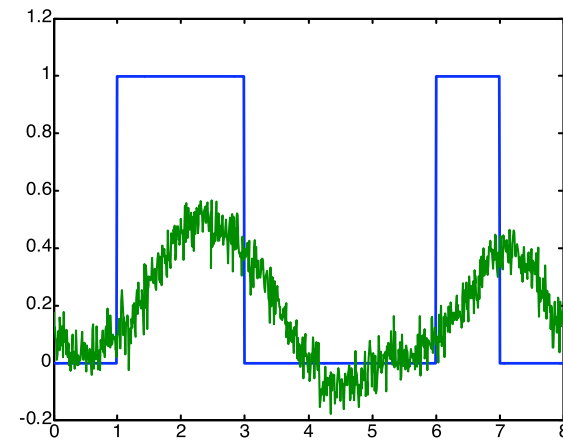
- In jedem Medium (außer dem Vakuum) haben verschiedene Frequenzen verschiedene Ausbreitungsgeschwindigkeit
 - Resultiert in Phasenverschiebung
 - Die zugrunde liegende Sinuskurve ist bestimmt durch Amplitude a , Frequenz f , and Phase ϕ

$$a \sin(2\pi ft + \phi)$$

- Die Größe dieser Phasenverschiebung hängt von der Frequenz ab
 - Dieser Effekt heißt Verzerrung (distortion)



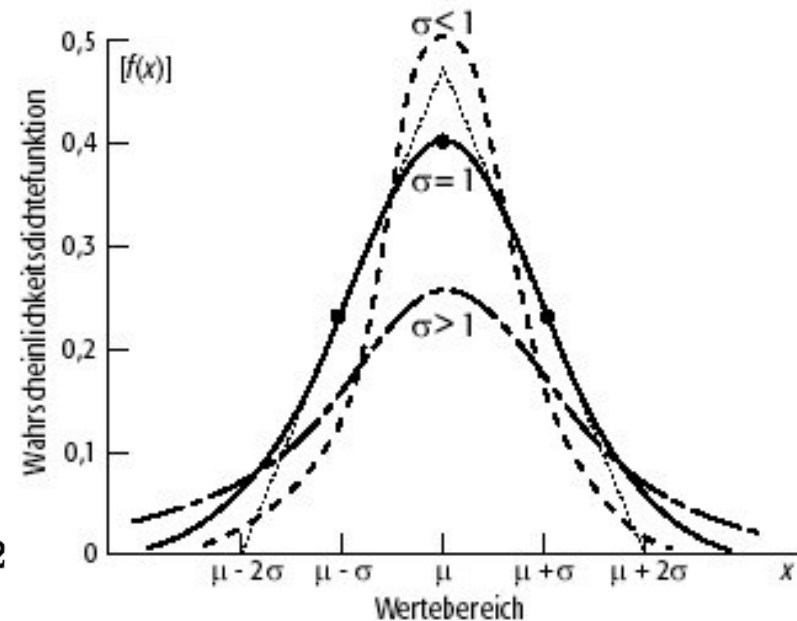
Warum passiert das:



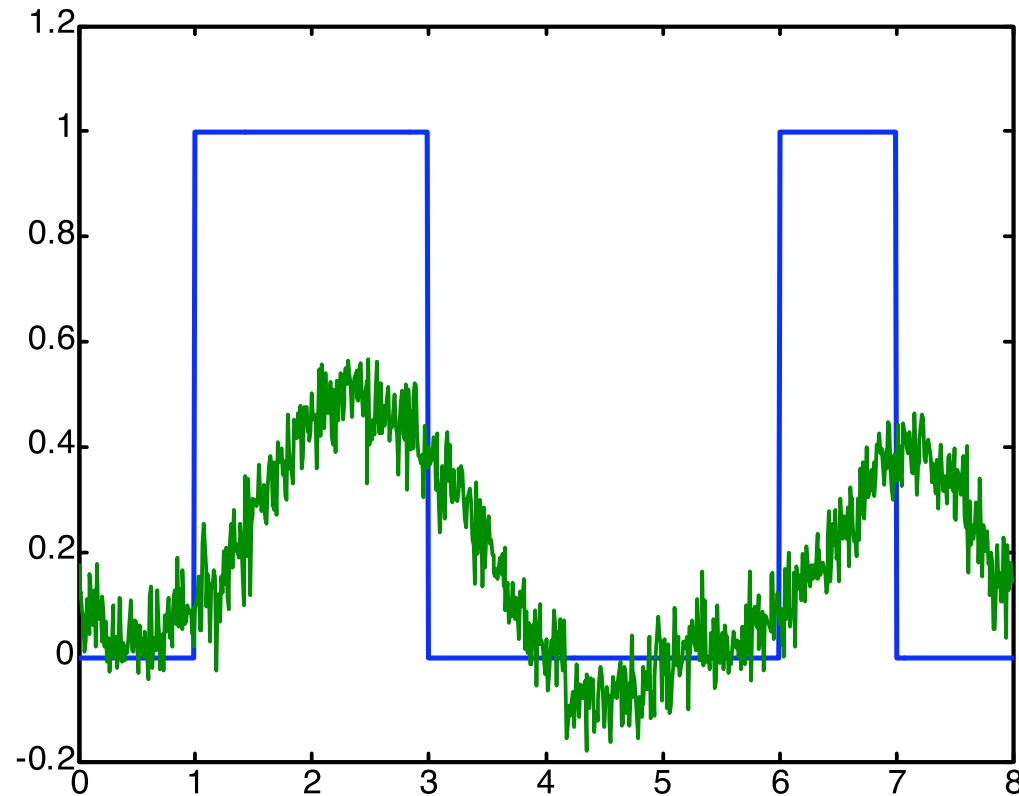
5. Echte Medien rauschen

- Jedes Medium und jeder Sender und Empfänger produzieren Rauschen
 - Verursacht durch Wärme, Störungen anderer Geräte, Signale, Wellen, etc.
- Wird beschrieben durch zufällige Fluktuationen des (störungsfreien) Signals
 - Typische Modellierung: Gauß'sche Normalverteilung

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



- Dies alles kann das Eingangssignal erklären.

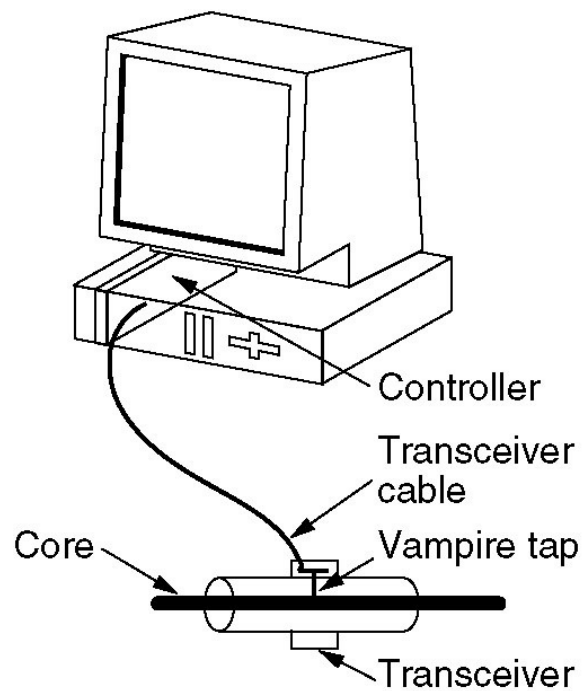


(aus Vorlesung von Holger Karl)

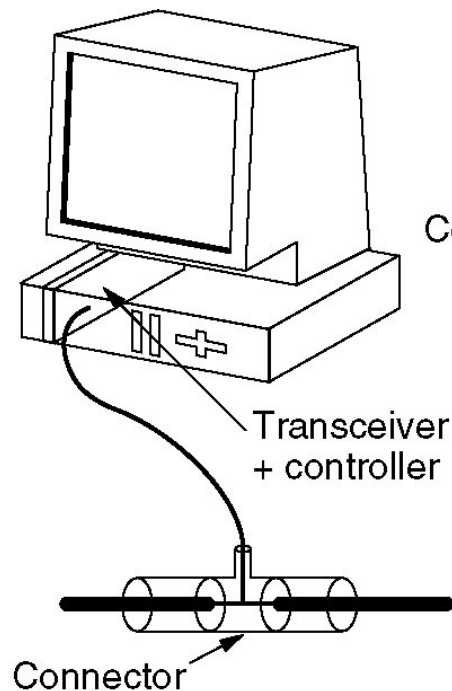
- Beispiel aus der Praxis mit Mediumzugriff:
Ethernet
 - IEEE Standard 802.3
- Punkte im Standard
 - Verkabelung
 - Bitübertragungsschicht
 - Sicherungsschicht mit Mediumzugriff

Ethernet cabling

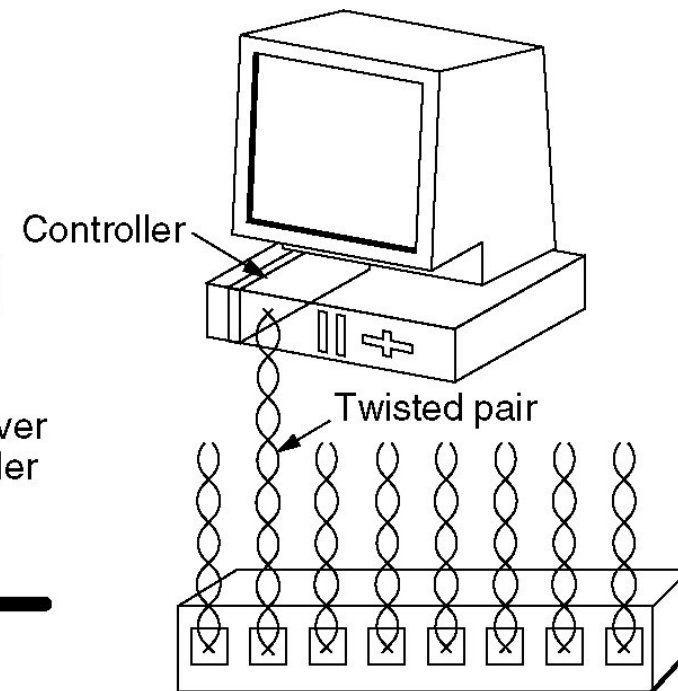
Name	Cable	Max. seg.	Nodes/seg.	Advantages
10Base5	Thick coax	500 m	100	Original cable; now obsolete
10Base2	Thin coax	185 m	30	No hub needed
10Base-T	Twisted pair	100 m	1024	Cheapest system
10Base-F	Fiber optics	2000 m	1024	Best between buildings



10Base5



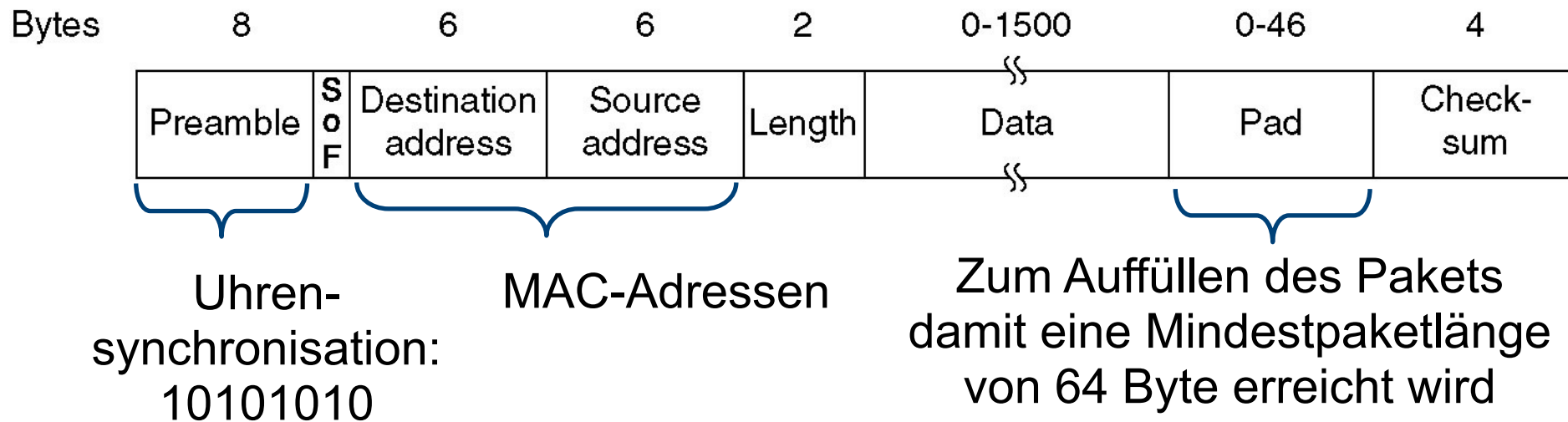
10Base2



10BaseT

- Mediumabhängig
- Typisch: Manchester encoding
 - mit +/- 0.85 V
- Code-Verletzung zeigt Frame-Grenzen auf

- Im wesentlichen: CSMA/CD mit binary exponential backoff
- Frame-Format

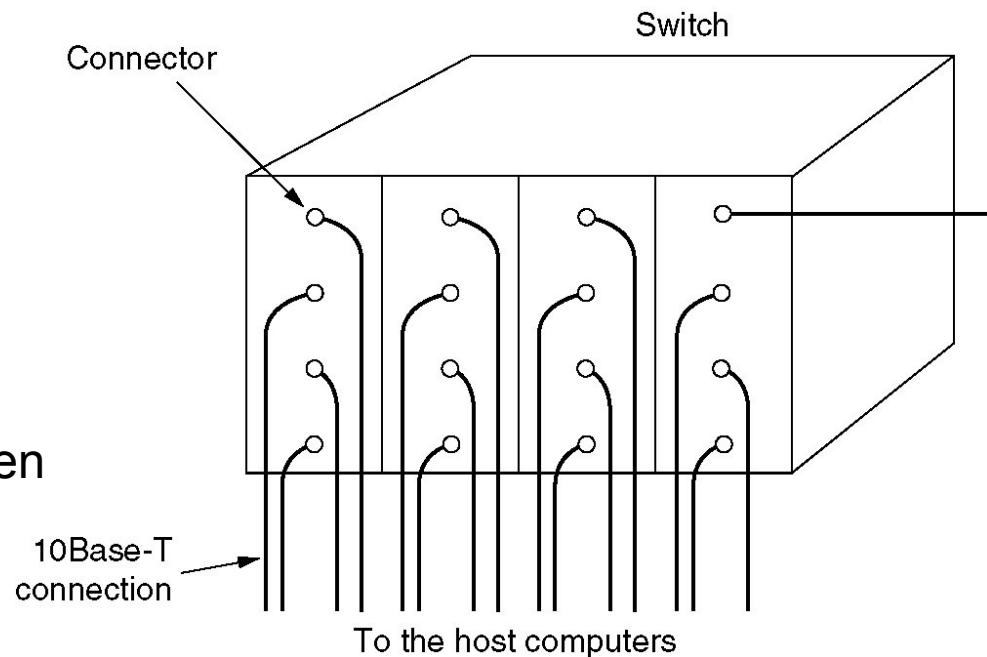


■ Hub

- verknüpft Ethernet-Leitungen nabenförmig
- jede Verbindung hört alles
- Durch CSMA/CD wird die Übertragungsrate reduziert

■ Switch

- unterteilt die eingehenden Verbindungen in kleinere Kollisionsteilmengen
- die Prüfsumme eines eingehenden Pakets wird überprüft
- Kollisionen werden nicht weiter gegeben
- interpretiert die Zieladresse und leitet das Paket nur in diese Richtung weiter

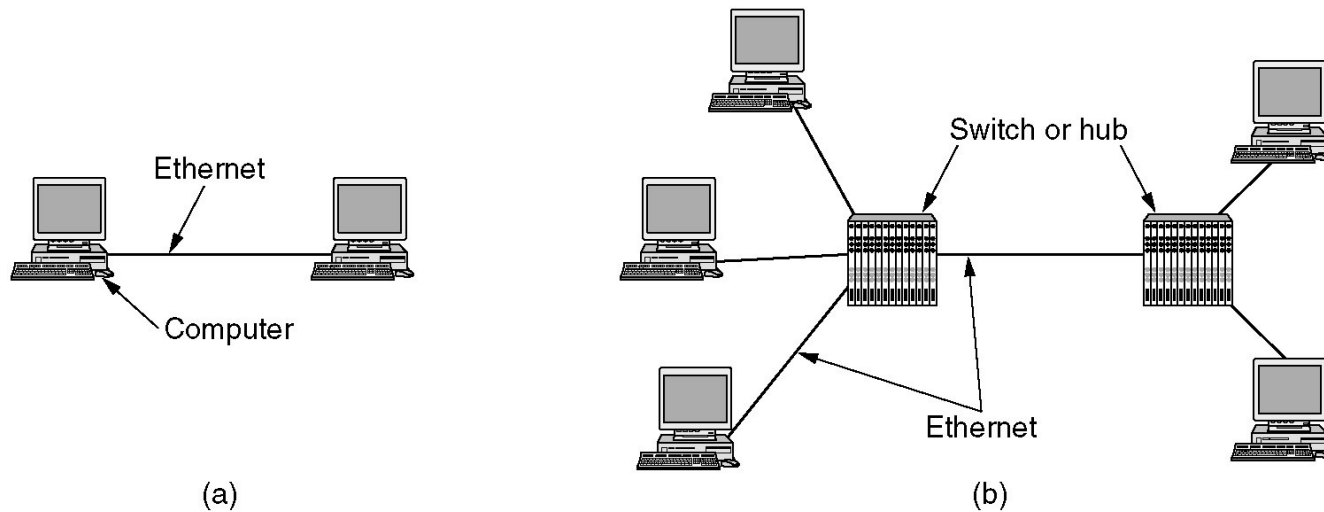


- Ursprünglich erreichte Ethernet 10 MBit/s
- 1992: Fast Ethernet
 - Ziele: Rückwärtskompatibilität
 - Resultat: 802.3u
- Fast Ethernet
 - Frame-Format ist gleichgeblieben
 - Bit-Zeit wurde von 100 ns auf 10 ns reduziert
 - Dadurch verkürzt sich die maximale Kabellänge (und die minimale Paket-Größe steigt).
 - Unvermeidbare Kollisionen CSMA

- Standard Cat-3 twisted pair unterstützt nicht 200 MBaud über 100 m
 - Lösung: Verwendung von 2 Kabelpaaren bei reduzierter Baudrate
- Wechseln von Manchester auf 4B/5B-Kodierung auf Cat-5-Kabeln

Name	Cable	Max. segment	Advantages
100Base-T4	Twisted pair	100 m	Uses category 3 UTP
100Base-TX	Twisted pair	100 m	Full duplex at 100 Mbps
100Base-FX	Fiber optics	2000 m	Full duplex at 100 Mbps; long runs

- Gigabit-Ethernet: 1995
 - Ziel: Weitgehende Übernahme des Ethernet-Standards
- Ziel wurde erreicht durch Einschränkung auf Punkt-zu-Punkt-Verbindungen
 - In Gigabit-Ethernet sind an jedem Kabel genau zwei Maschinen
 - oder zumindestens ein Switch oder Hub



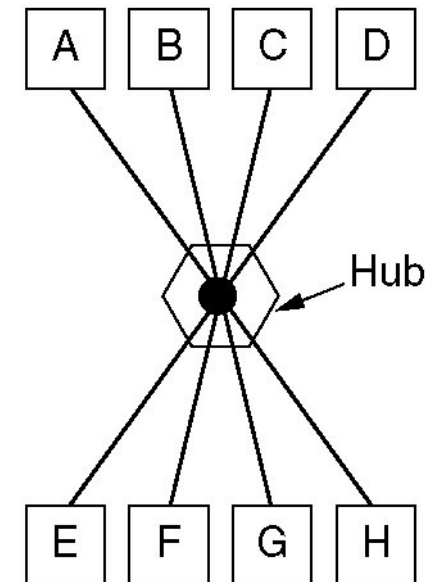
- Mit Switch
 - Keine Kollisionen → CSMA/CD unnötig
 - Erlaubt full-duplex für jeden Link
- Mit Hub
 - Kollisionen, nur Halb-Duplex (d.h. abwechselnd Simplex), CSMA/CD
 - Kabellängen auf 25 m reduziert

Name	Cable	Max. segment	Advantages
1000Base-SX	Fiber optics	550 m	Multimode fiber (50, 62.5 microns)
1000Base-LX	Fiber optics	5000 m	Single (10 μ) or multimode (50, 62.5 μ)
1000Base-CX	2 Pairs of STP	25 m	Shielded twisted pair
1000Base-T	4 Pairs of UTP	100 m	Standard category 5 UTP

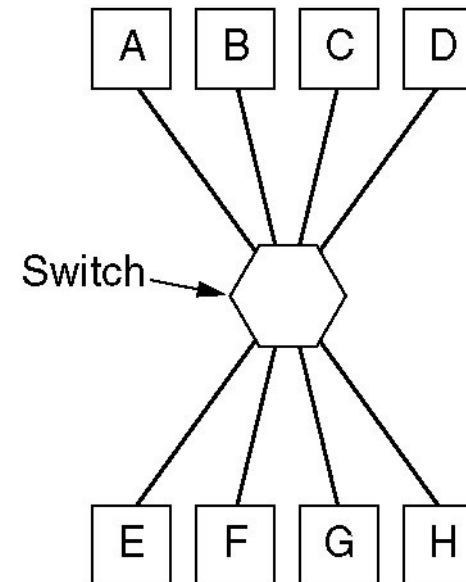
Application layer	Application gateway
Transport layer	Transport gateway
Network layer	Router
Data link layer	Bridge, switch
Physical layer	Repeater, hub

- Signalregenerator
 - Empfängt Signal und bereitet es auf
 - Nur das elektrische und optische Singal wird aufbereitet
 - Information bleibt unbeeinflusst
- Bitübertragungsschicht
- Repeater teilen das Netz in physische Segmente
 - logische Topologien bleiben erhalten

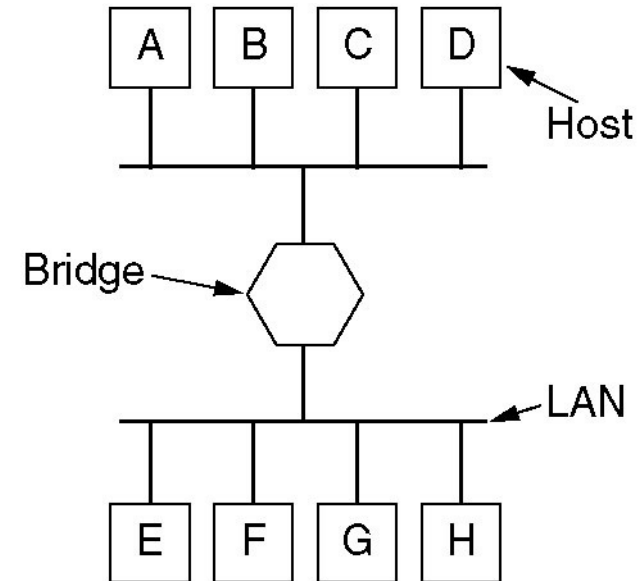
- Verbindet sternförmig Netzsegmente
 - im Prinzip wie ein Repeater
 - Signale werden auf alle angebundenen Leitungen verteilt
- Bitübertragungsschicht
 - Information und Logik der Daten bleibt unberücksichtigt
 - Insbesondere für Kollisionen



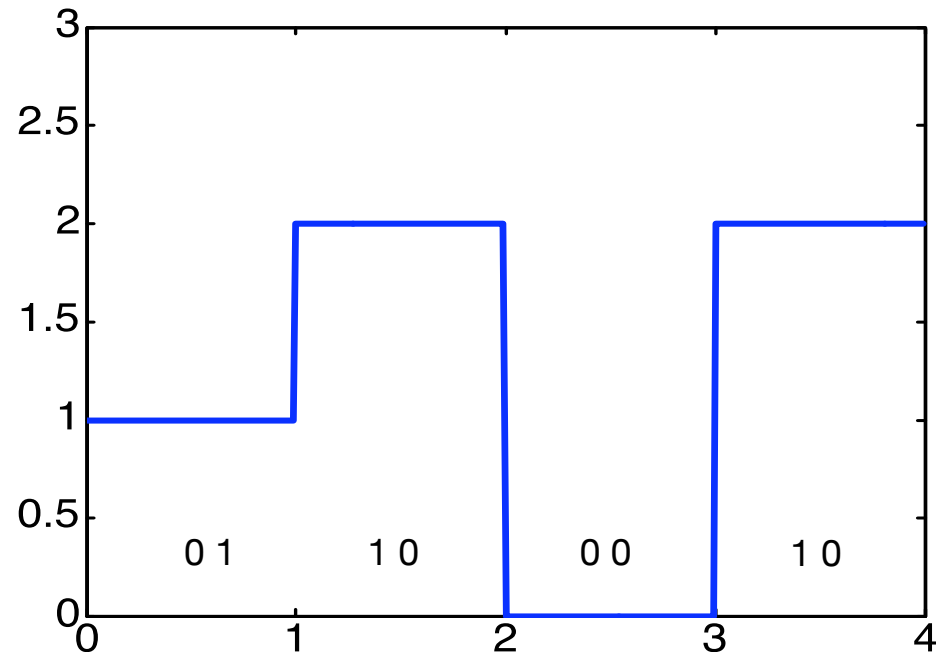
- Verbindet sternförmig Netzsegmente
 - Leitet die Daten nur in die betreffende Verbindung weiter
 - Gibt keine Kollisionen weiter
- Sicherungsschicht
 - Signale werden neu erzeugt
 - Kollisionen abgeschirmt und reduziert
 - Frames aber nicht verwendet
 - Rudimentäre Routingtabelle durch Beobachtung, wo Nachrichten herkommen



- Verbindet zwei lokale Netzwerke
 - im Gegensatz zum Switch (dort nur Terminals)
 - trennt Kollisionen
- Sicherungsschicht
 - Weitergabe an die andere Seite, falls die Ziel-Adresse aus dem anderen Netzwerk bekannt ist oder auf beiden Seiten noch nicht gehört wurde
 - Nur korrekte Frames werden weitergereicht
 - Übergang zwischen Bridge und Switch ist fließend

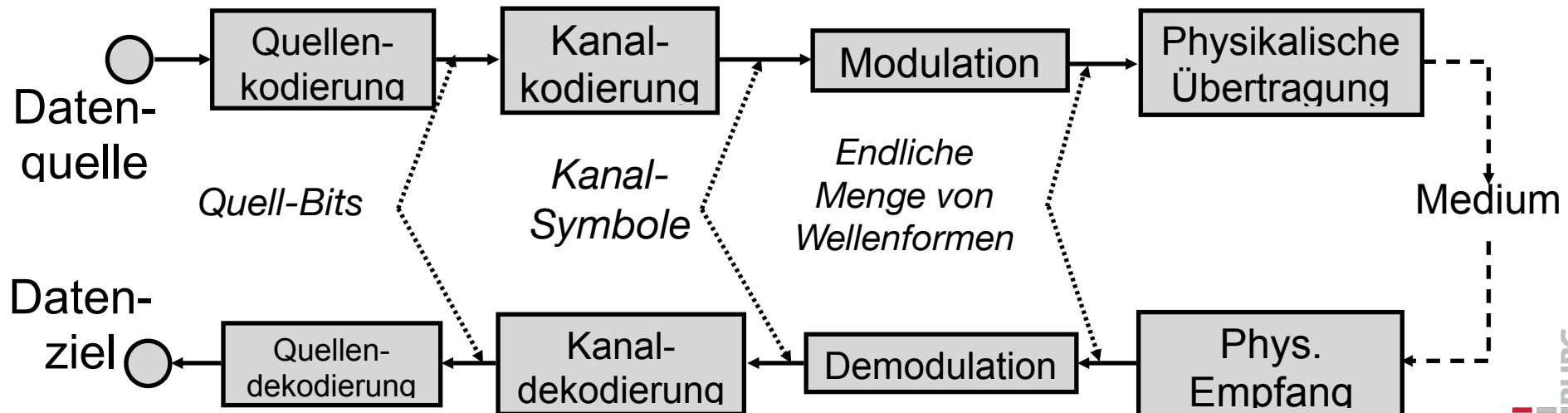


- Für die Datenübertragung können statt Bits auch Symbole verwendet werden
- Z.B. 4 Symbole: A,B,C,D mit
 - A=00, B=01, C=10, D=11
- Symbole
 - Gemessen in Baud
 - Anzahl der Symbole pro Sekunde
- Datenrate
 - Gemessen in Bits pro Sekunde (bit/s)
 - Anzahl der Bits pro Sekunde
- Beispiel
 - 2400 bit/s Modem hat 600 Baud (verwendet 16 Symbole)



■ MOdulation/DEModulation

- Übersetzung der Kanalsymbole durch
 - Amplitudenmodulation
 - Phasenmodulation
 - Frequenzmodulation
 - oder einer Kombination davon



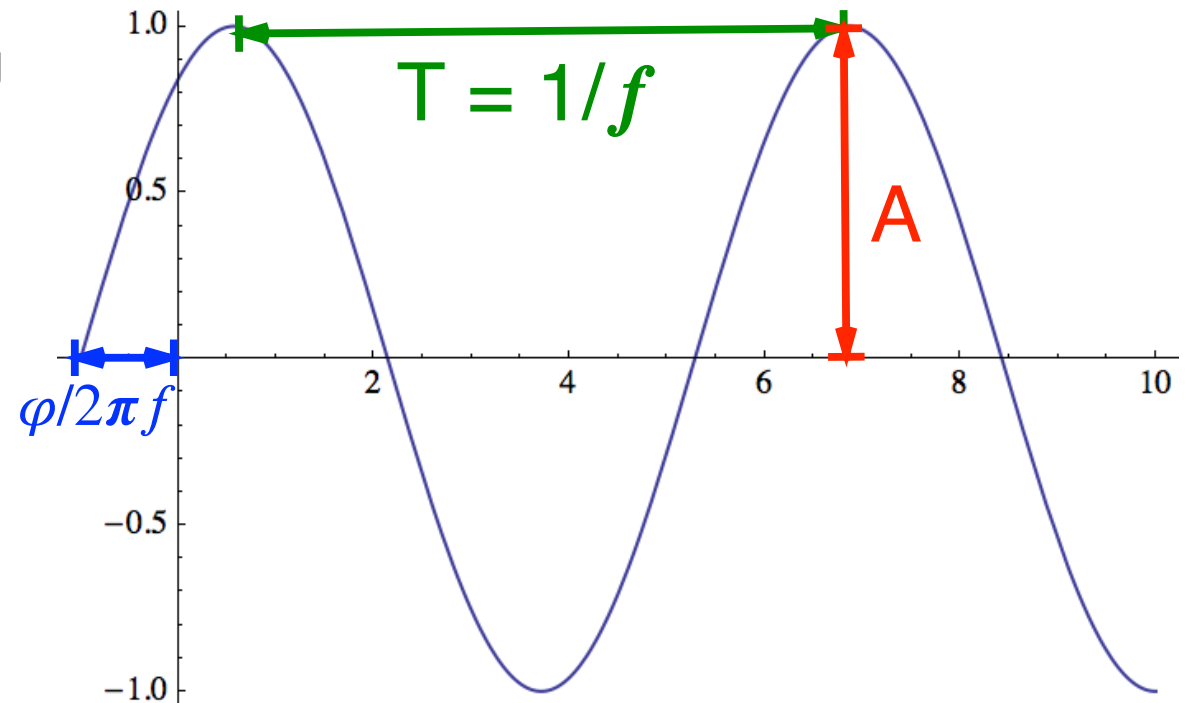
- Bewegte elektrisch geladene Teilchen verursachen elektromagnetische Wellen
 - **Frequenz**
 - f : Anzahl der Oszillationen pro Sekunde
 - Maßeinheit: Hertz
 - **Wellenlänge**
 - λ : Distanz (in Metern) zwischen zwei Wellenmaxima
 - Durch Antennen können elektro-magnetische Wellen erzeugt und empfangen werden
 - Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von elektro-magnetischen Wellen im Vakuum ist konstant:
 - **Lichtgeschwindigkeit** $c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s
- Zusammenhang:

$$\lambda \cdot f = c$$

- Amplitudendarstellung einer Sinusschwingung

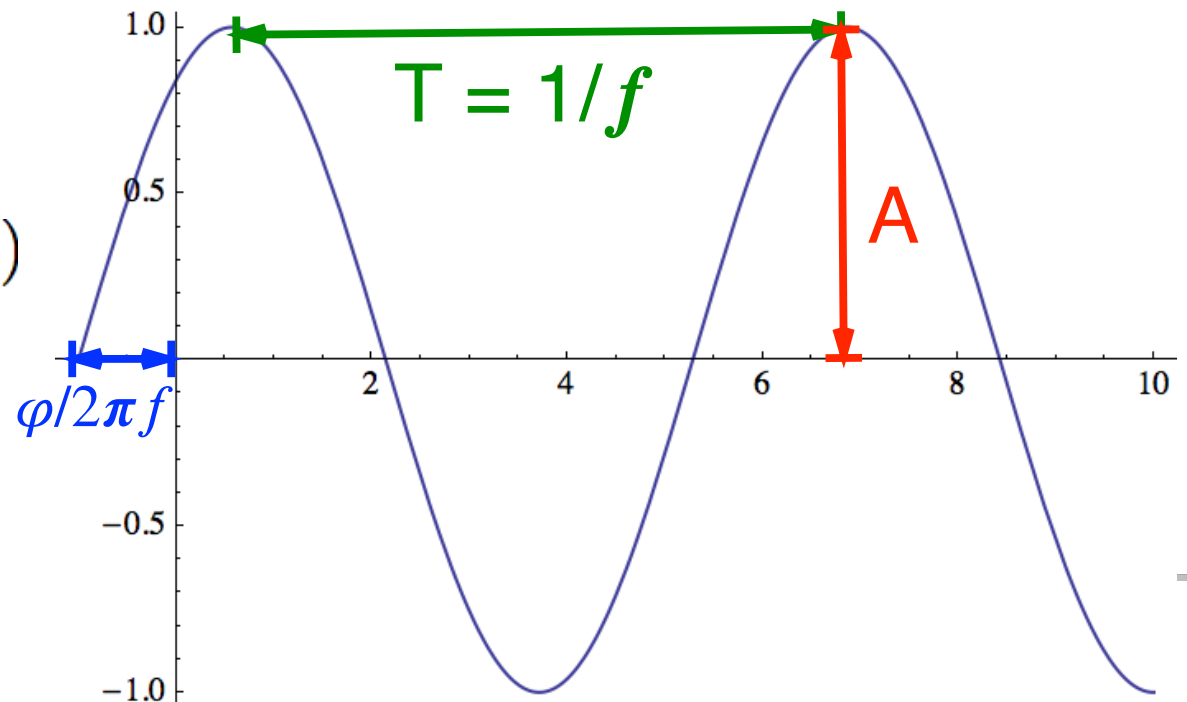
$$s(t) = A \sin(2\pi ft + \phi)$$

- A: Amplitude
- ϕ : Phasenverschiebung
- f: Frequenz = $1/T$
- T: Periode



- Idee:
 - Konzentration auf die idealen Frequenzen des Mediums
 - Benutzung einer Sinuskurve als Trägerwelle der Signale
- Eine Sinuskurve hat keine Information
- Zur Datenübertragung muss die Sinuskurve fortdauernd verändert werden (moduliert)
 - Dadurch Spektralweitung (mehr Frequenzen in der Fourier-Analyse)
- Folgende Parameter können verändert werden:
 - Amplitude A
 - Frequenz $f=1/T$
 - Phase ϕ

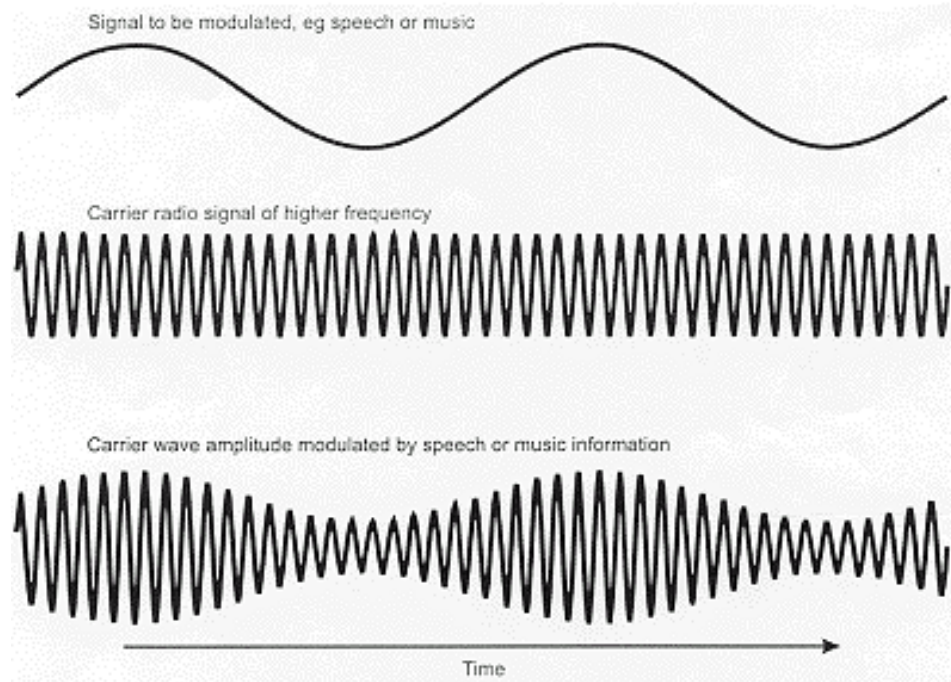
$$s(t) = A \sin(2\pi ft + \phi)$$



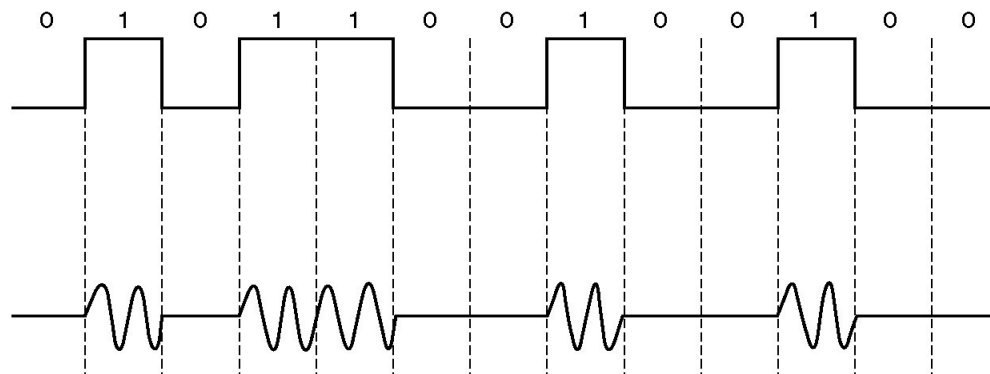
- Das zeitvariable Signal $s(t)$ wird als Amplitude einer Sinuskurve kodiert:

$$f_A(t) = s(t) \sin(2\pi ft + \phi)$$

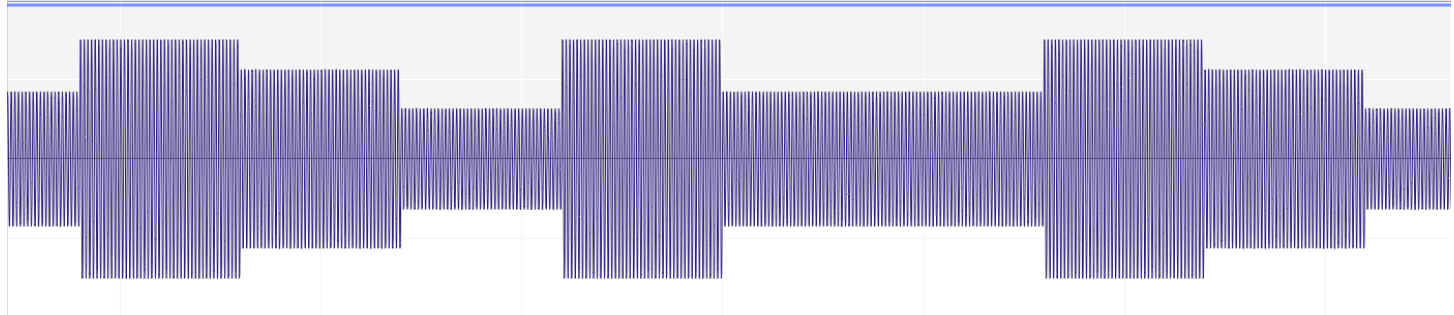
- Analoges Signal
 - Amplitude Modulation
 - Kontinuierliche Funktion in der Zeit
 - z.B. zweites längeres Wellensignal (Schallwellen)



- Digitales Signal
 - Amplitude Keying
 - Z.B. durch Symbole gegeben als Symbolstärken
 - Spezialfall: Symbole 0 oder 1
 - on/off keying



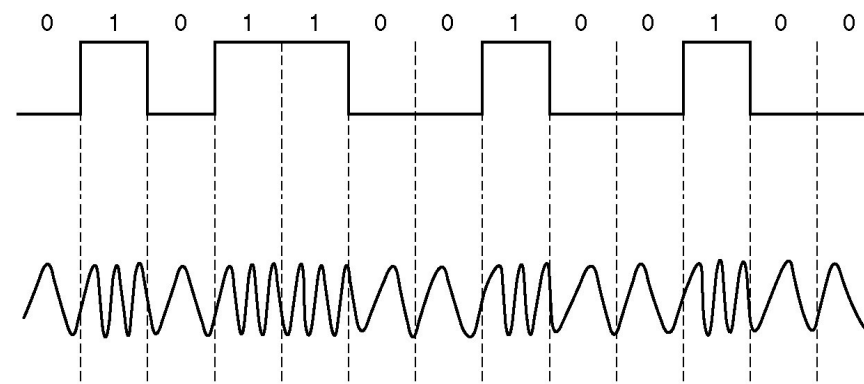
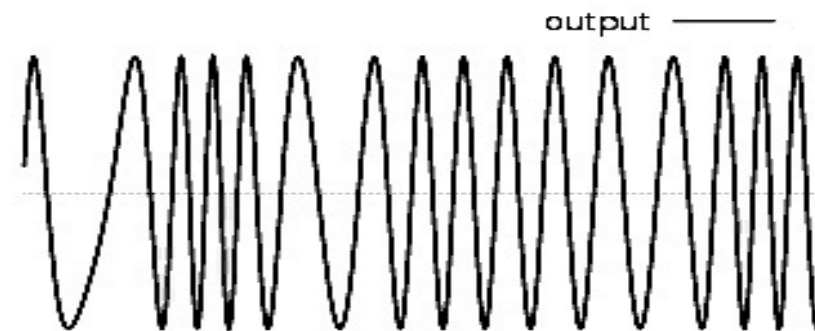
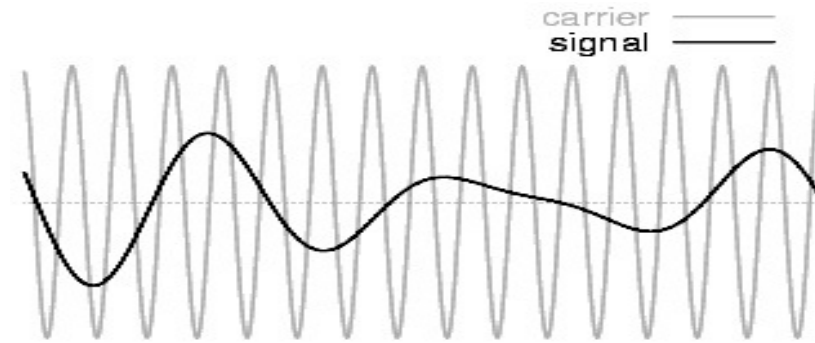
- Amplitudenmodulierte Sinuskurve



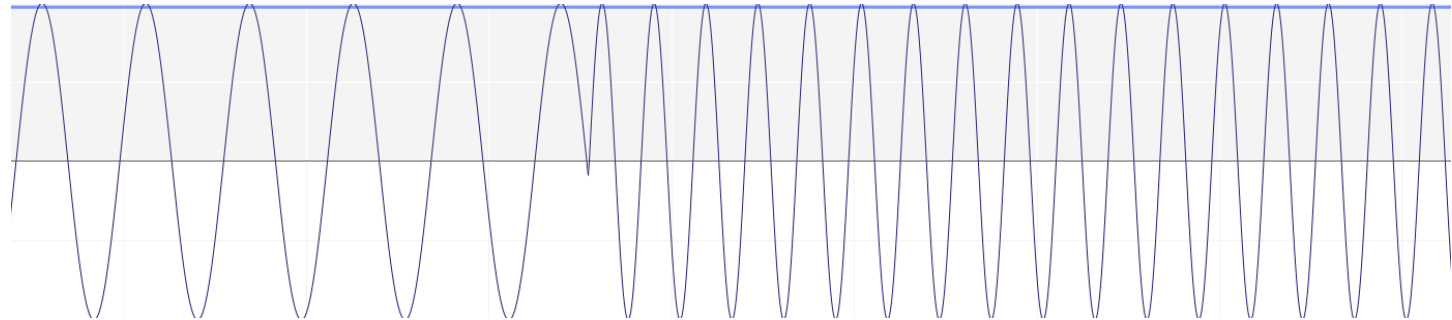
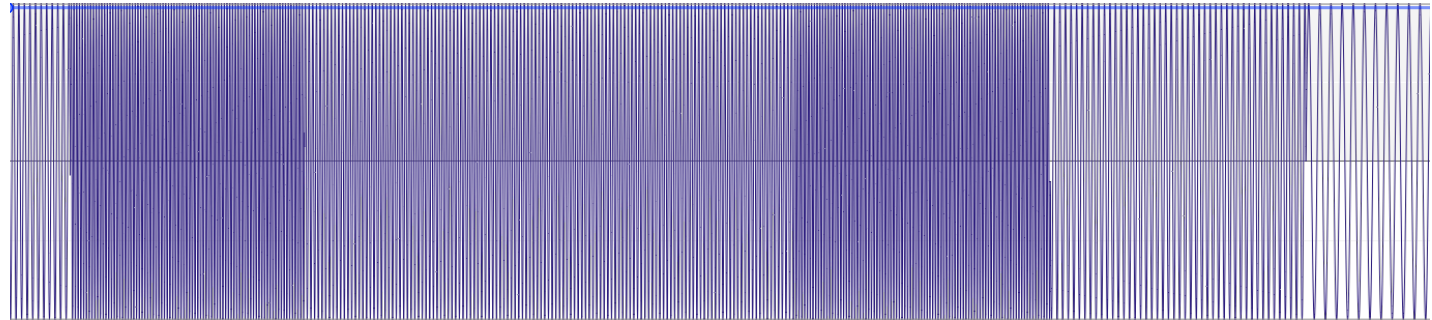
- Das zeitvariable Signal $s(t)$ wird in der Frequenz der Sinuskurve kodiert:

$$f_F(t) = a \sin(2\pi s(t)t + \phi)$$

- Analoges Signal
 - Frequency Modulation (FM)
 - Kontinuierliche Funktion in der Zeit
- Digitales Signal
 - Frequency Shift Keying (FSK)
 - Z.B. durch Symbole gegeben als Frequenzen



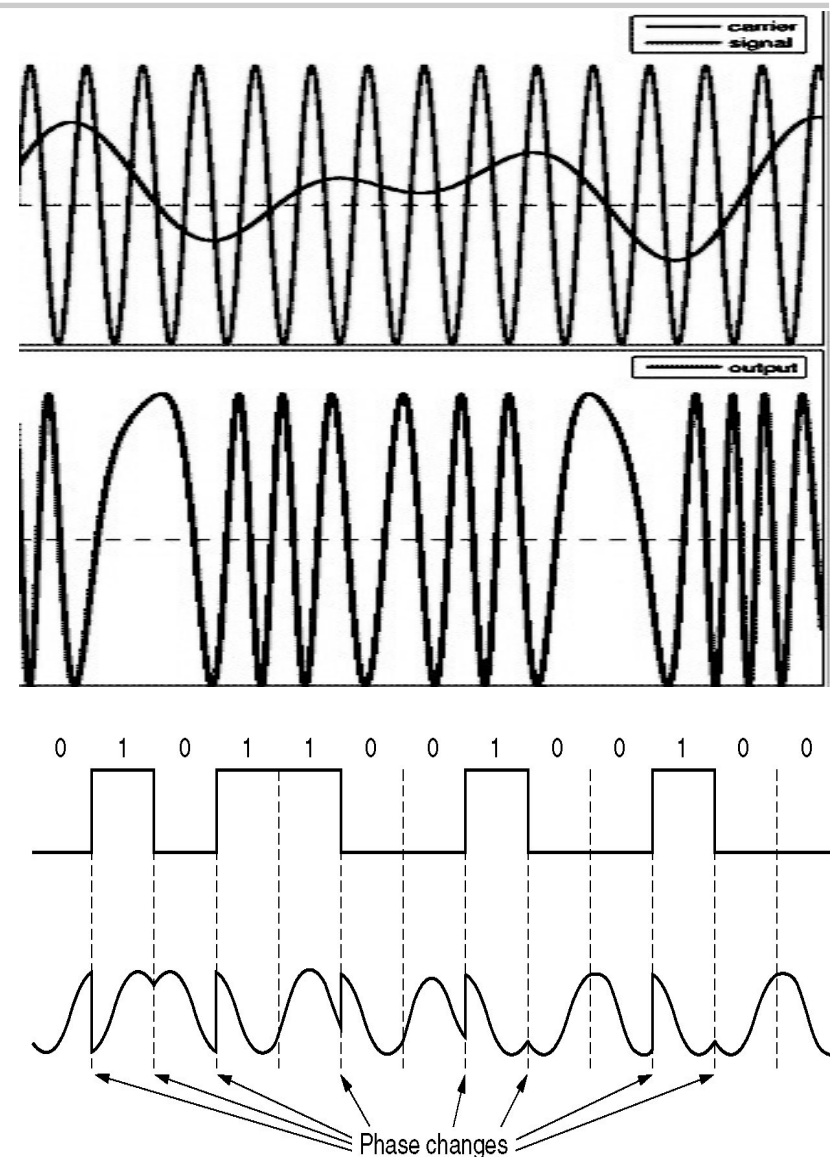
- frequenz-
modulierte
Sinuskurve



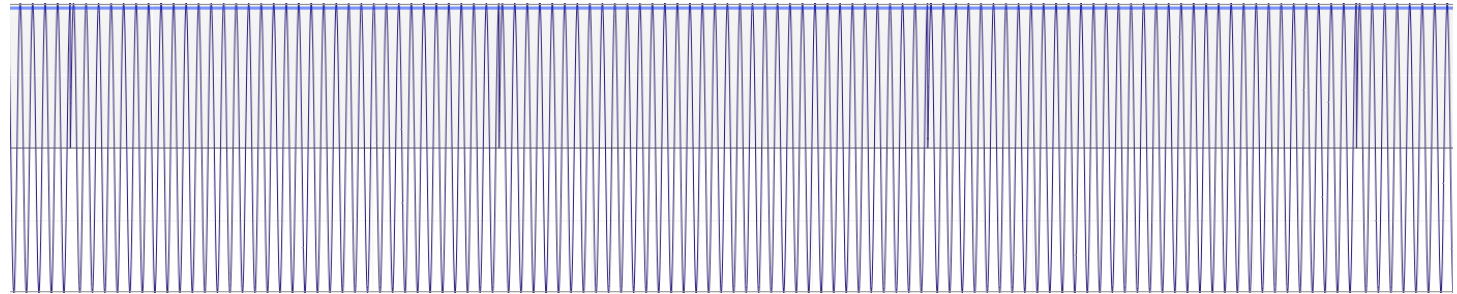
- Das zeitvariable Signal $s(t)$ wird in der Phase der Sinuskurve kodiert:

$$f_P(t) = a \sin(2\pi ft + s(t))$$

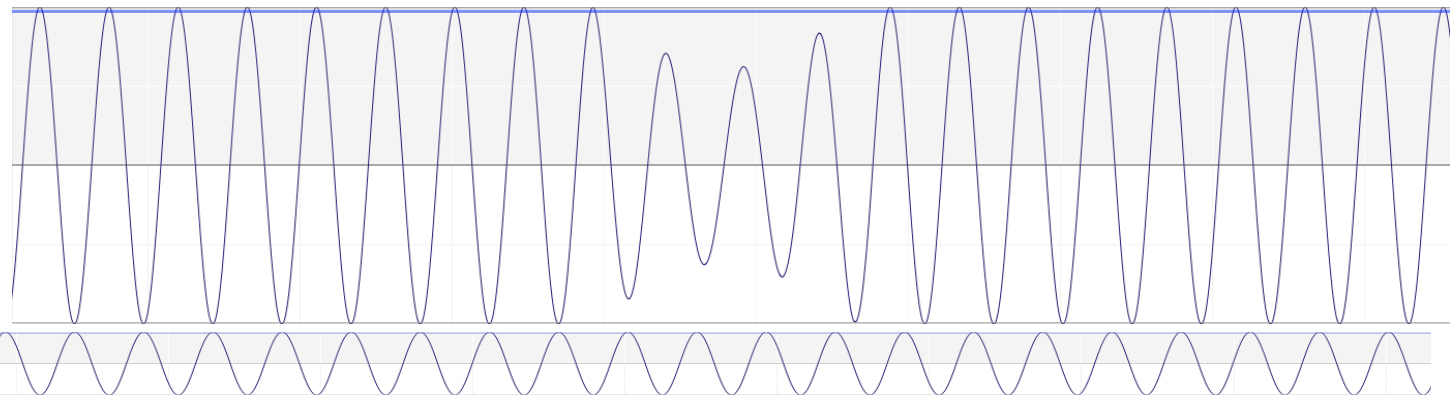
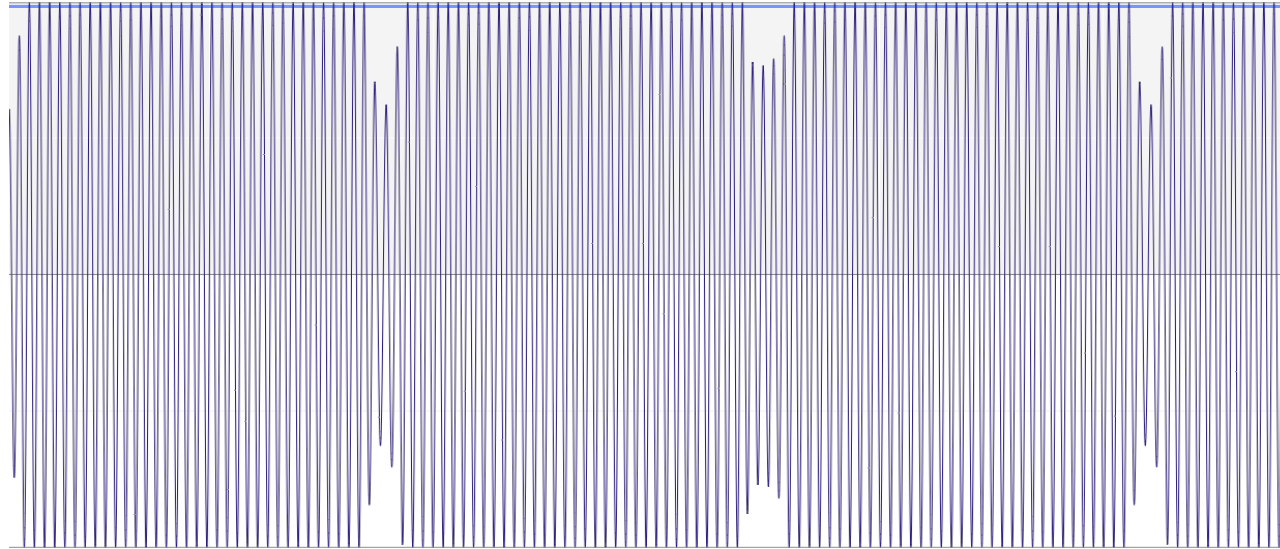
- Analoges Signal
 - Phase Modulation (PM)
 - Sehr ungünstige Eigenschaften
 - Wird nicht eingesetzt
- Digitales Signal
 - Phase-Shift Keying (PSK)
 - Z.B. durch Symbole gegeben als Phasen



- phasen-
modulierte
Sinuskurve

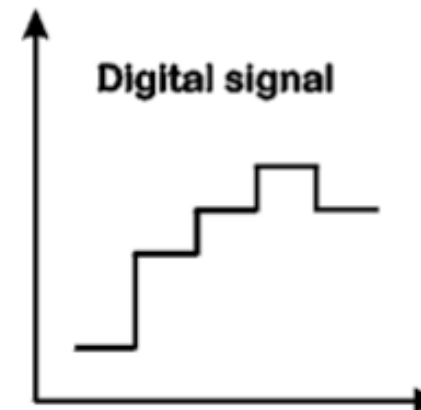
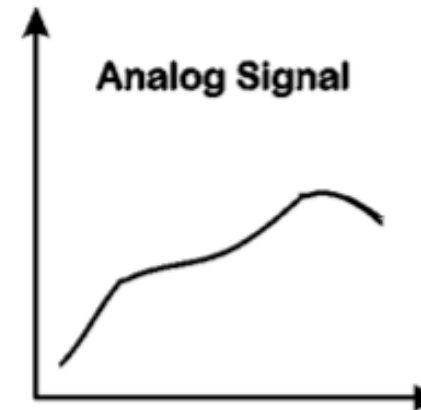


- phasen-
modulierte
Sinuskurve
- mit glatten
Übergang



zum Vergleich

- Für einen Sender gibt es zwei Optionen
 - Digitale Übertragung
 - Endliche Menge von diskreten Signalen
 - Z.B. endliche Menge von Spannungsgrößen/Stromstärken
 - Analoge Übertragung
 - Unendliche (kontinuierliche) Menge von Signalen
 - Z.B. Signal entspricht Strom oder Spannung im Draht
- Vorteil der digitalen Signale:
 - Es gibt die Möglichkeit Empfangsungenauigkeiten zu reparieren und das ursprüngliche Signal zu rekonstruieren
 - Auftretende Fehler in der analogen Übertragung können sich weiter verstärken



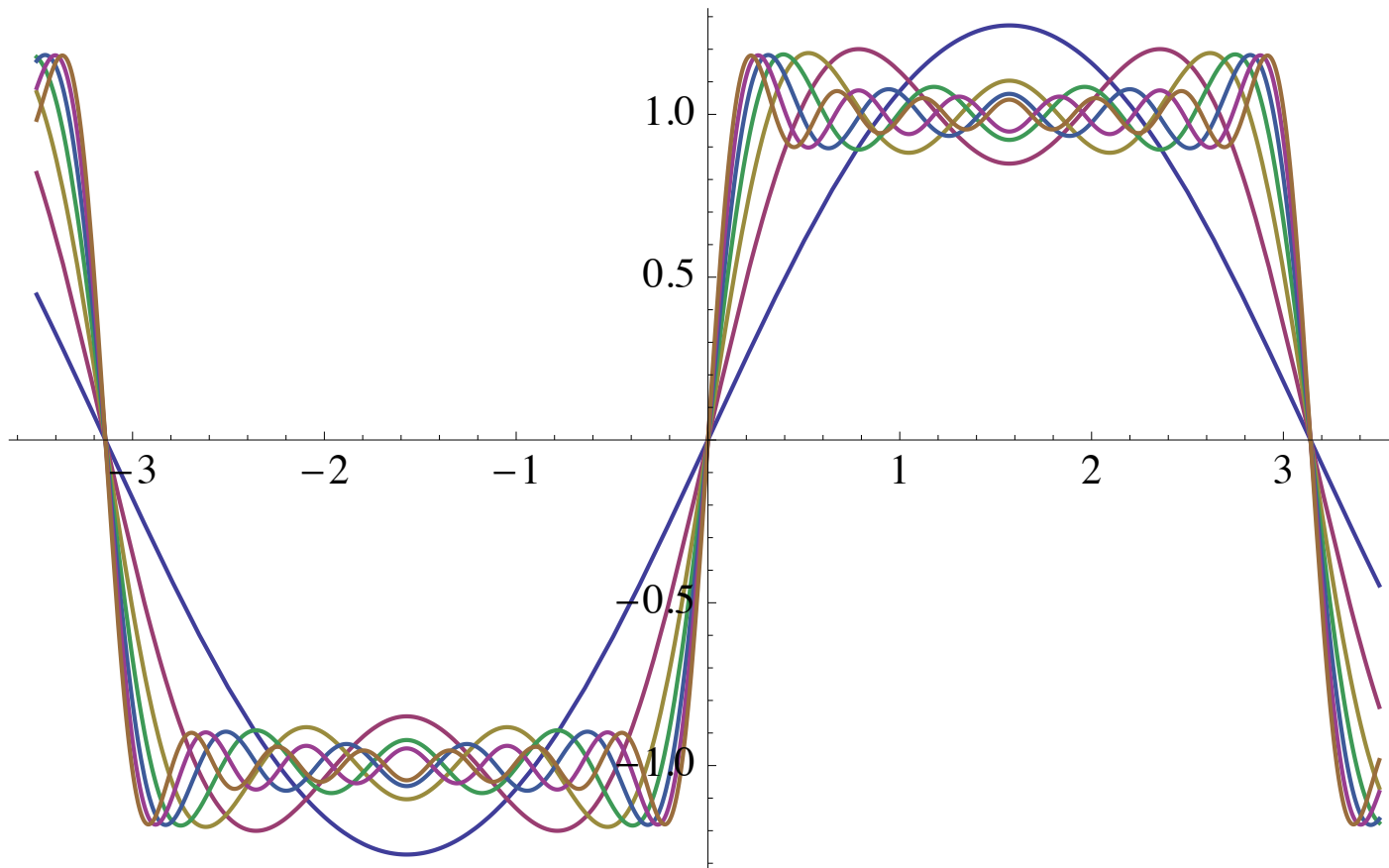
- Fouriertransformation einer periodischen Funktion:
 - Zerlegung in verschiedene
 - Sinus/Cosinus-Funktionen
- Dirichletsche Bedingungen einer periodischen Funktion f :
 - $f(x) = f(x+2\pi)$
 - $f(x)$ ist in $(-\pi, \pi)$ in endlich vielen Intervallen stetig und monoton
 - Falls f nicht stetig in x_0 , dann ist $f(x_0) = (f(x_0-0) + f(x_0+0))/2$
- Satz von Dirichlet:
 - $f(x)$ genüge in $(-\pi, \pi)$ den Dirichletschen Bedingungen. Dann existieren Fourierkoeffizienten $a_0, a_1, a_2, \dots, b_1, b_2, \dots$ so dass gilt:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n a_k \cos kx + b_k \sin kx = f(x)$$

■ Fouriertransformation einer periodischen Funktion:

- Zerlegung in verschiedene
- Sinus/Cosinus-Funktionen

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n a_k \cos kx + b_k \sin kx = f(x)$$



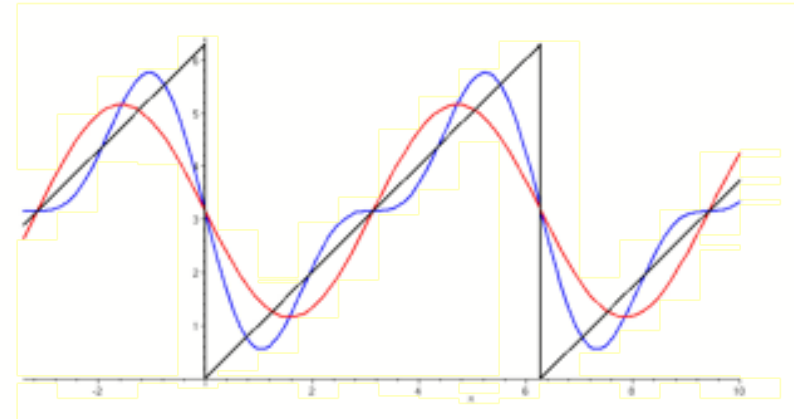
- Die Fourierkoeffizienten a_i , b_i können wie folgt berechnet werden:

- Für $k = 0, 1, 2, \dots$

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos kx \, dx$$

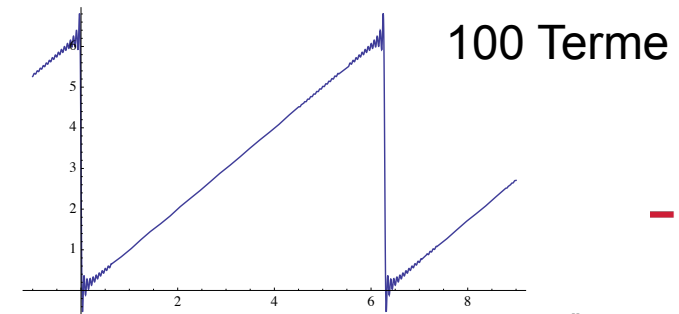
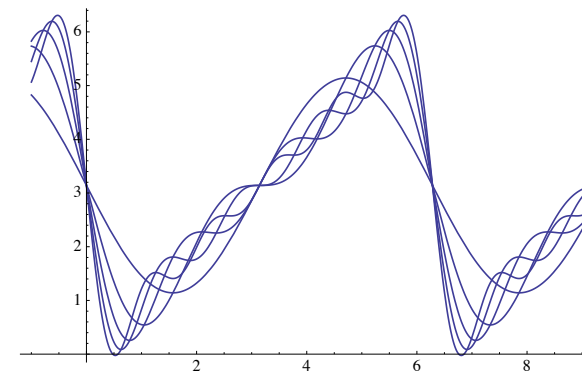
- Für $k = 1, 2, 3, \dots$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin kx \, dx$$



- Beispiel: Sägezahnkurve

$$f(x) = x, \text{ für } 0 < x < 2\pi$$



$$f(x) = \pi - 2 \left(\frac{\sin x}{1} + \frac{\sin 2x}{2} + \frac{\sin 3x}{3} + \dots \right)$$

- Der Satz von Fourier für Periode $T=1/f$:
 - Die Koeffizienten c , a_n , b_n ergeben sich dann wie folgt

$$g(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos(2\pi k f t) + b_k \sin(2\pi k f t)$$

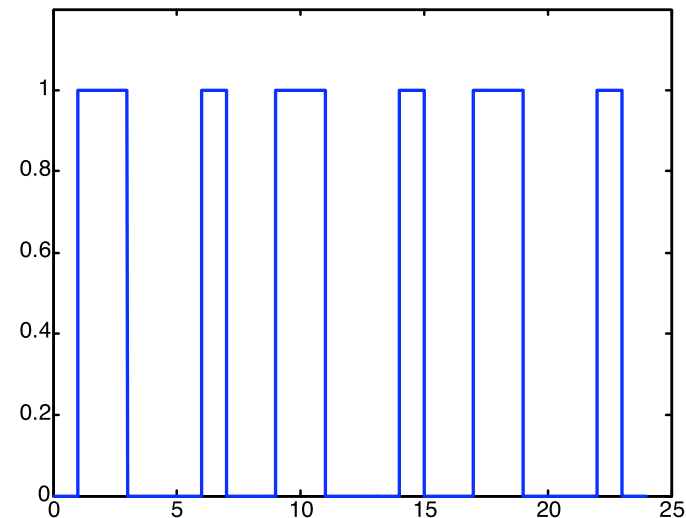
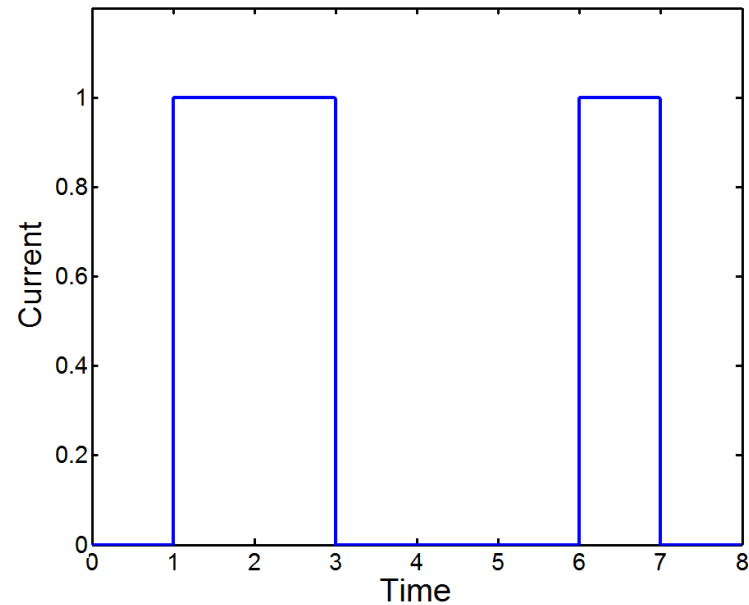
$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \cos(2\pi n f t) dt$$

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

- Die Quadratsumme der k -ten Terme ist proportional zu der Energie, die in dieser Frequenz verbraucht wird:

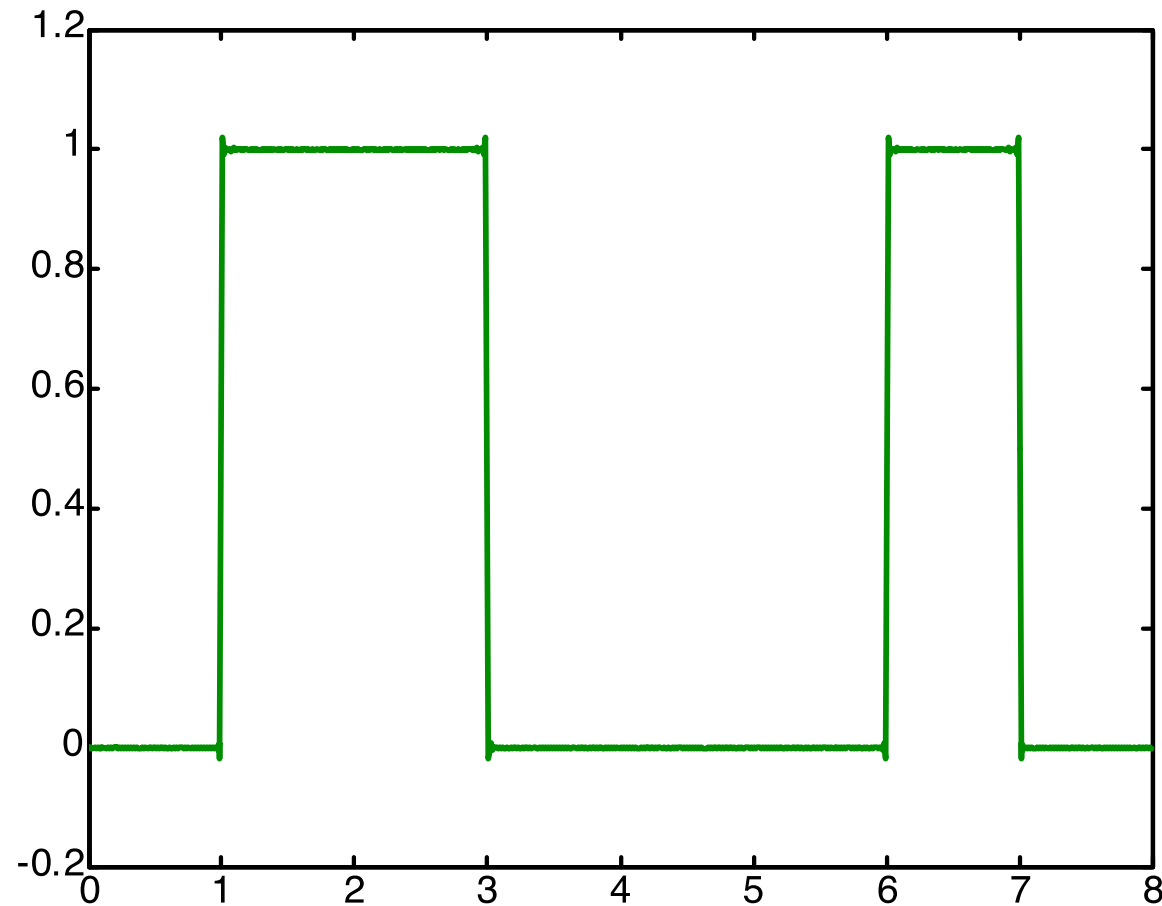
$$(a_k)^2 + (b_k)^2$$

- Problem:
 - Signal ist nicht periodisch
- Lösung:
 - Wiederholung des Signals mit Periode 8



(aus Vorlesung von Holger Karl)

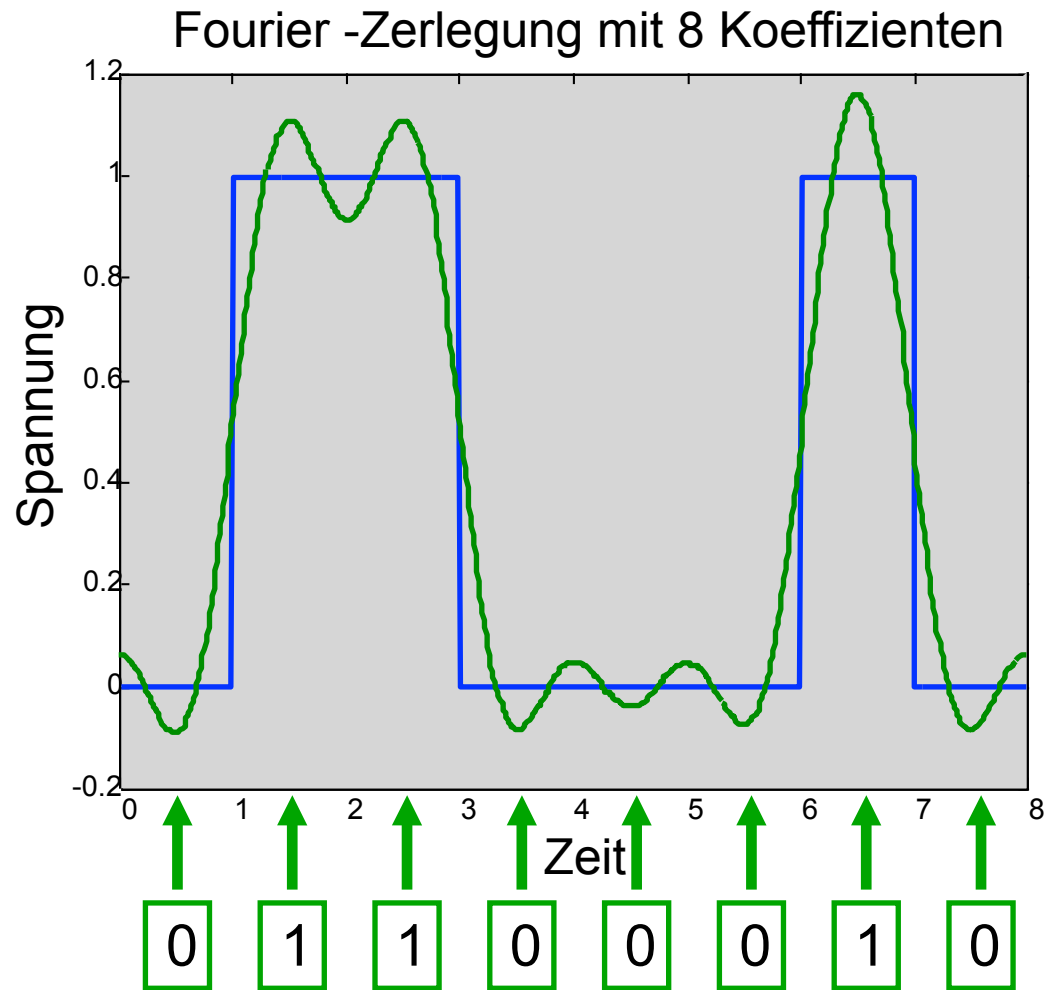
- Fourier-Analyse mit 512 Termen:



(aus Vorlesung von Holger Karl)

Wie oft muss man messen?

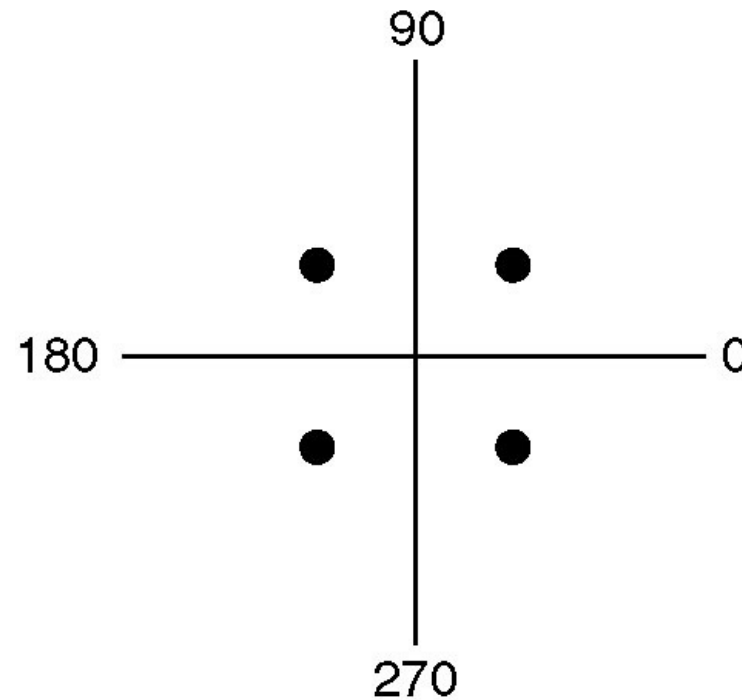
- Wie viele Messwerte sind notwendig, um eine Fouriertransformation bis zur k -ten Komponente genau zu bestimmen?
- Nyquist-Shannon-Abtasttheorem
 - Um ein kontinuierliches bandbegrenzte Signal mit einer Maximalfrequenz f_{\max} zu rekonstruieren, braucht man mindestens eine Abtastfrequenz von $2 f_{\max}$.



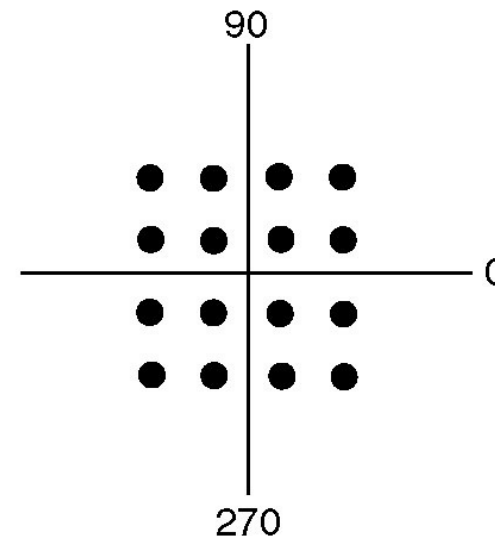
- Definition
 - Die Bandweite H ist die Maximalfrequenz in der Fourier-Zerlegung
- Angenommen:
 - Die maximale Frequenz des empfangenen Signals ist $f=H$ in der Fouriertransformation
 - (Komplette Absorption [unendliche Dämpfung] aller höheren Frequenzen)
 - Die Anzahl der verschiedenen verwendeten Symbole 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.

- 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

- 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)



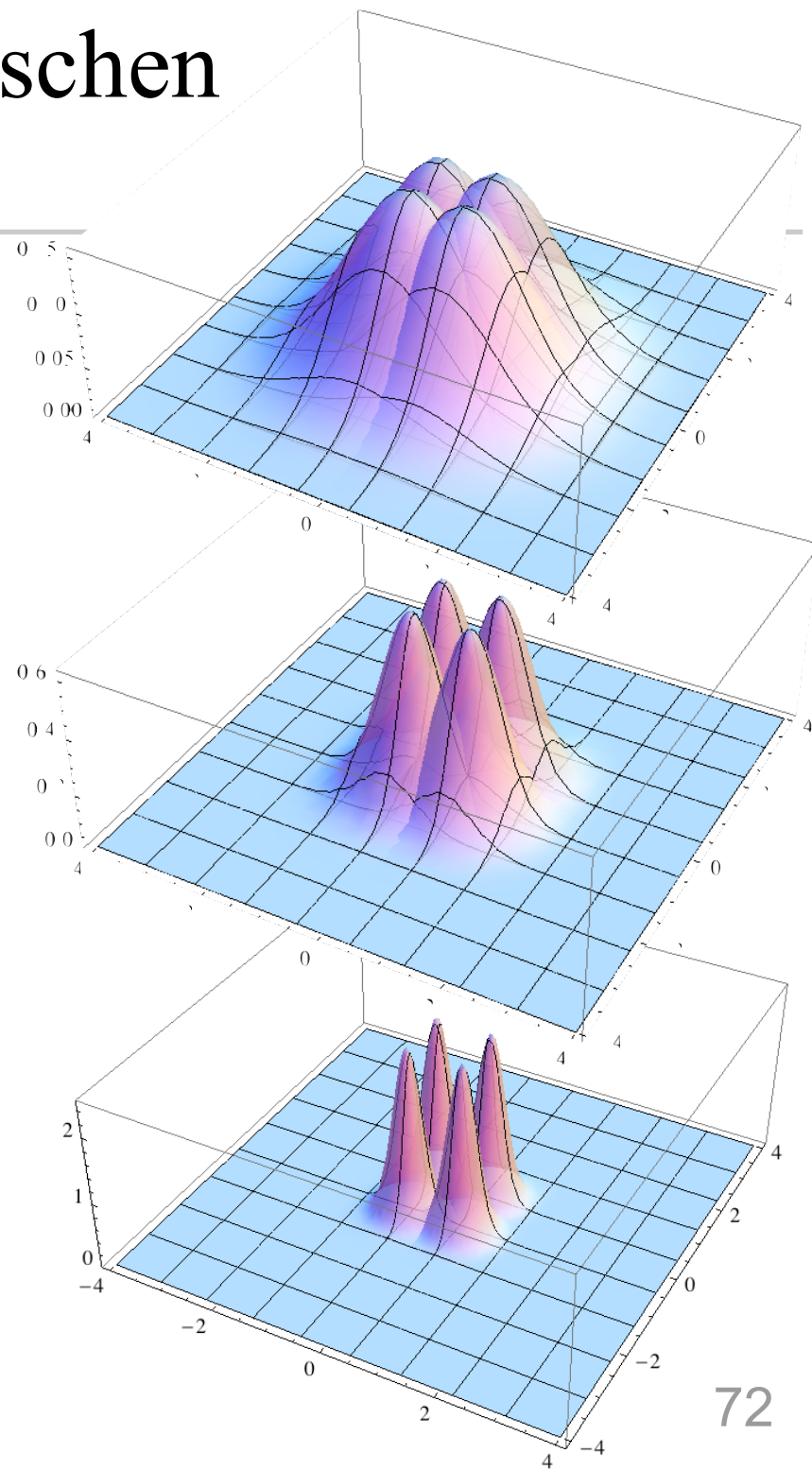
- Amplituden- und Phasenmodulation können erfolgreich kombiniert werden
- Beispiel: 16-QAM (Quadrature Amplitude Modulation)
 - Man verwendet 16 verschiedene Kombinationen von Phasen und Amplituden für jedes Symbol
 - Jedes Symbol kodiert vier Bits ($2^4 = 16$)
 - Die Datenrate ist also viermal so groß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



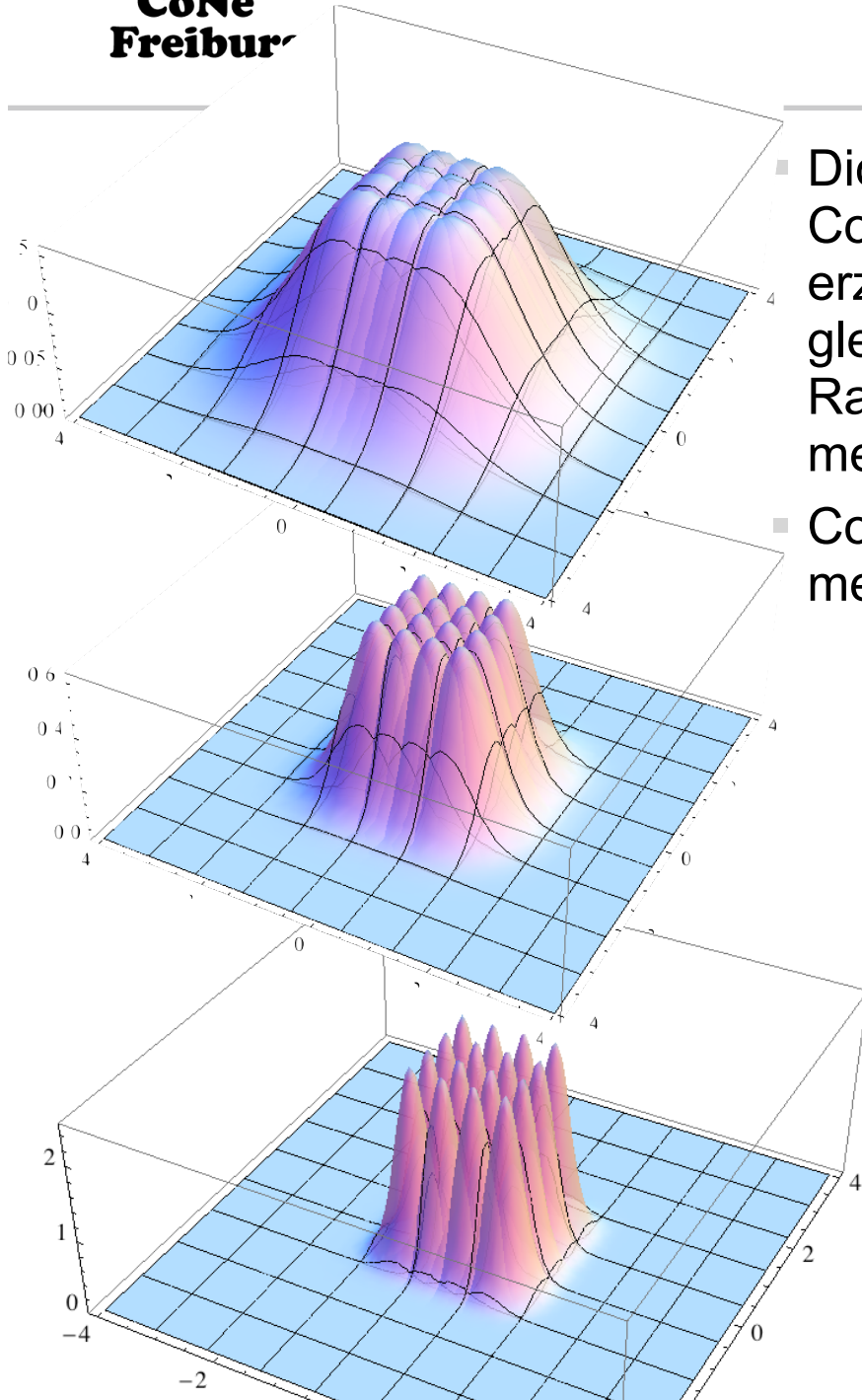
- Rauschen wird mit der Normalverteilung beschrieben

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

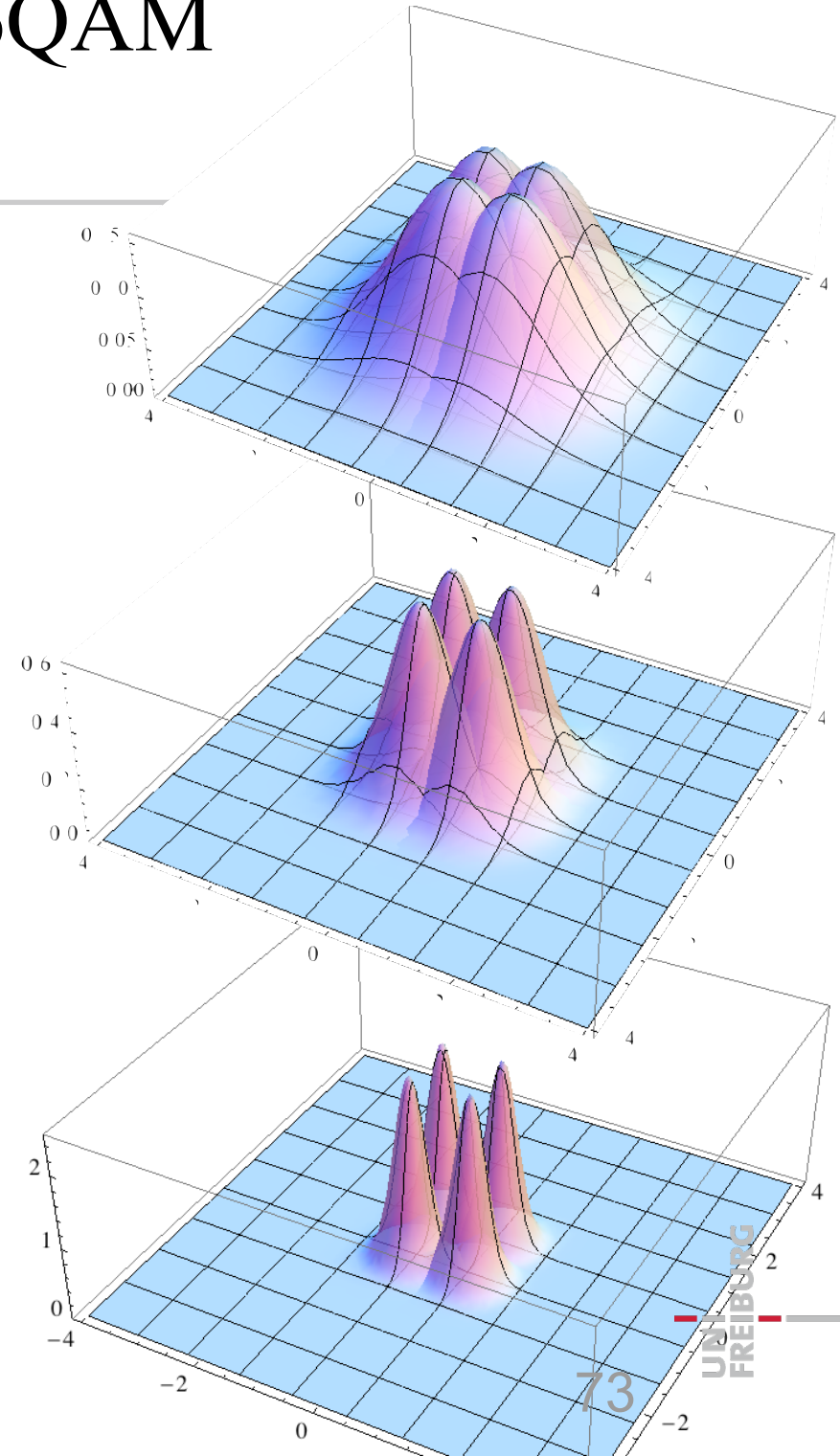
- Bitfehler entstehen, wenn das dekodierte Signal zu stark abweicht
- Das Signal/Rauschverhältnis korreliert mit der Standardabweichung σ



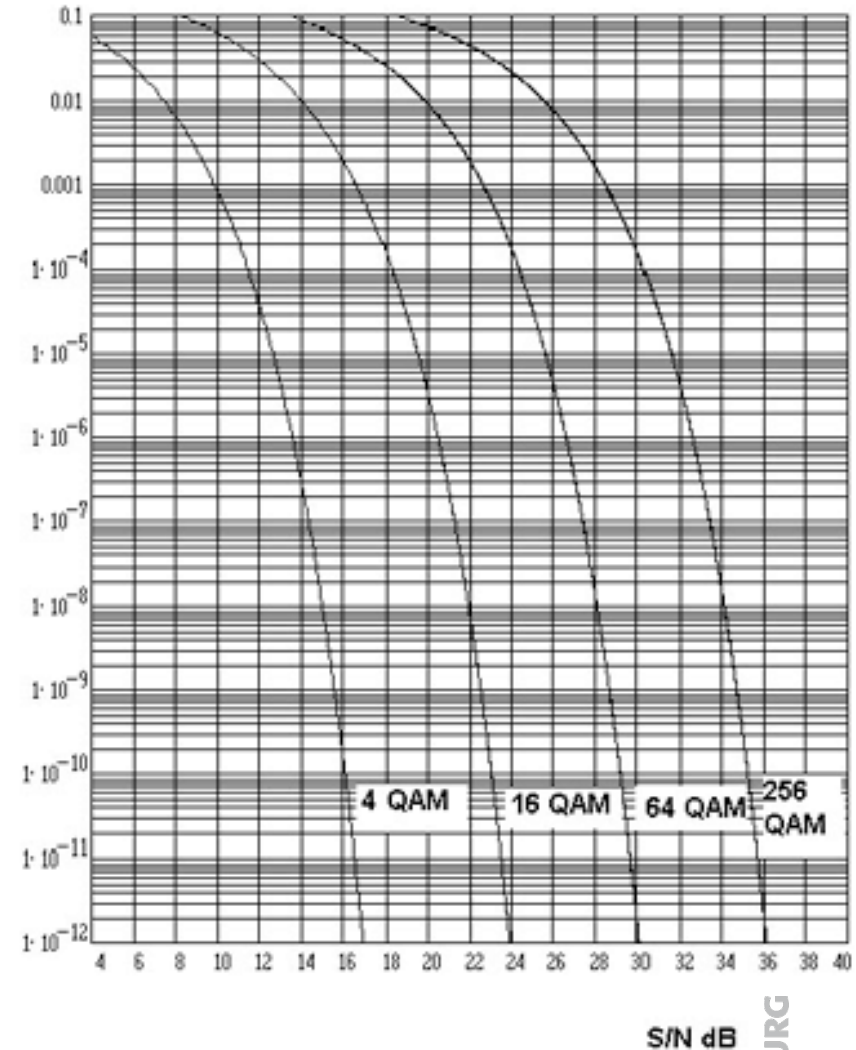
QAM versus 16QAM



- 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

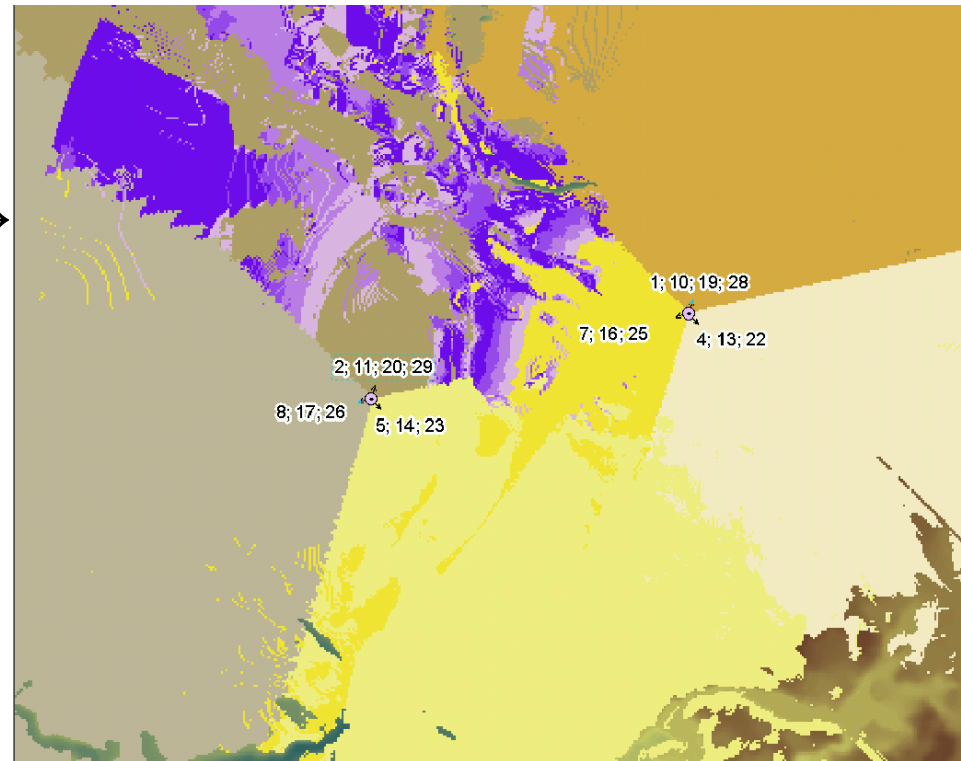


- Tatsächlich ist der Einfluss des Rauschens fundamental
 - Betrachte das Verhältnis zwischen Sendestärke S zur Stärke des Rauschens N
 - Je weniger Rauschen desto besser können Signale erkannt werden
- Theorem von Shannon
 - Die maximale mögliche Datenrate ist $H \log_2 (1+S/N)$ bit/s
 - bei Bandweite 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

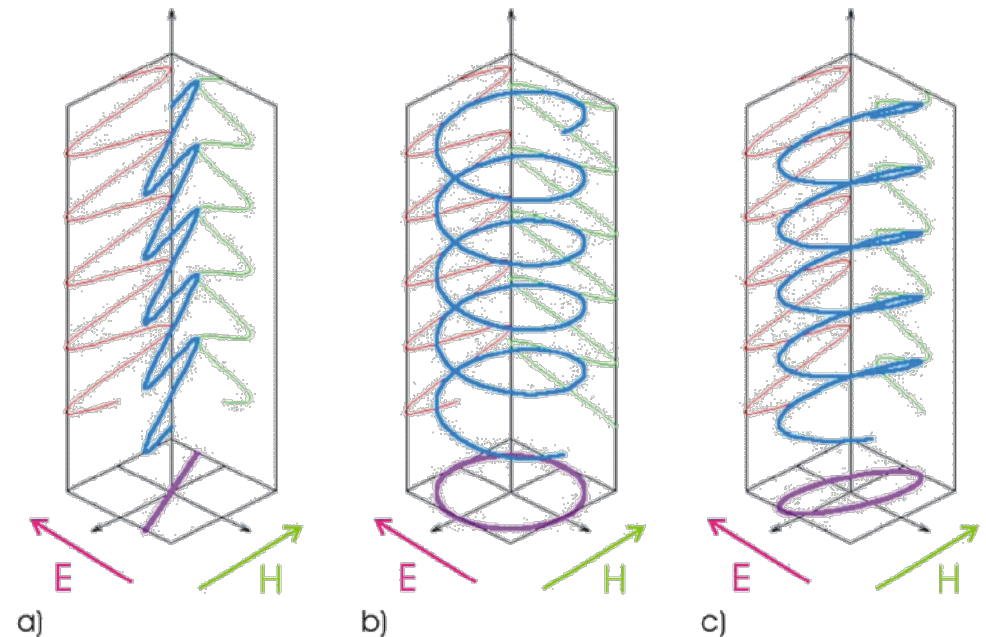


■ Frequenzmultiplex

- 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 $(-1,-1)$
 - 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)

- 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>

- 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

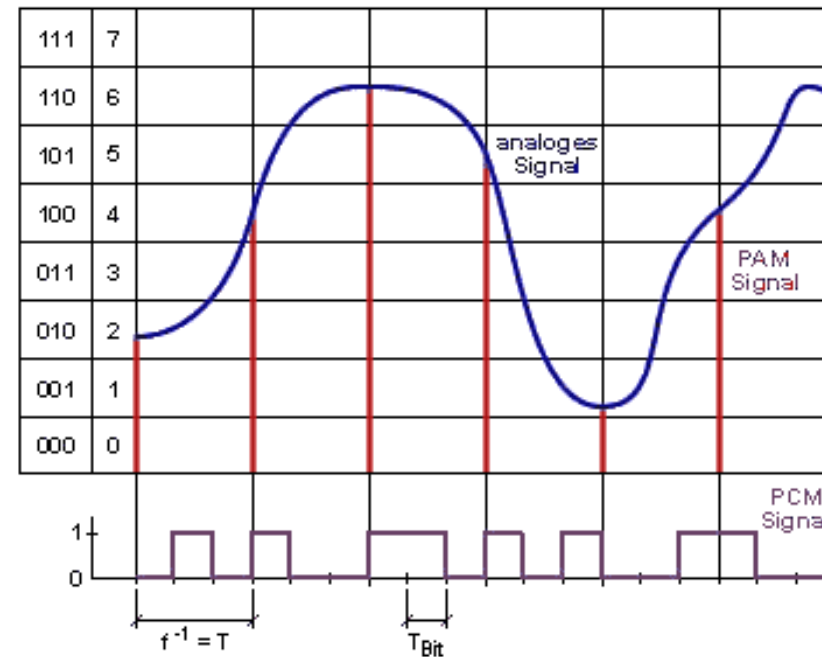
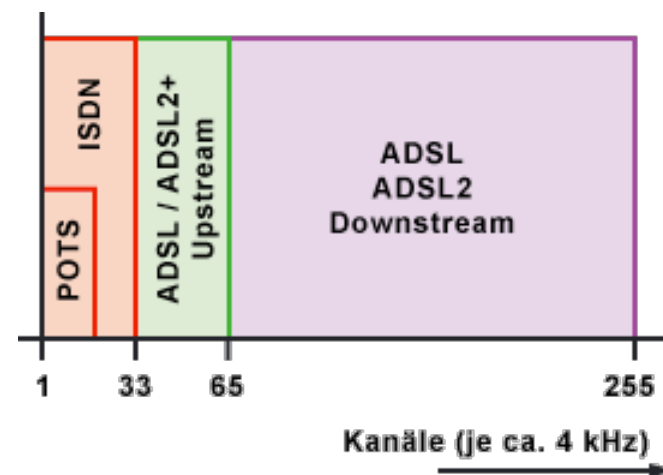
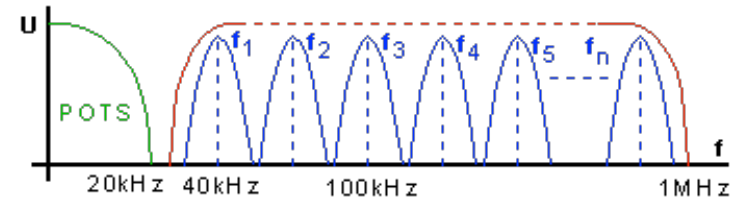
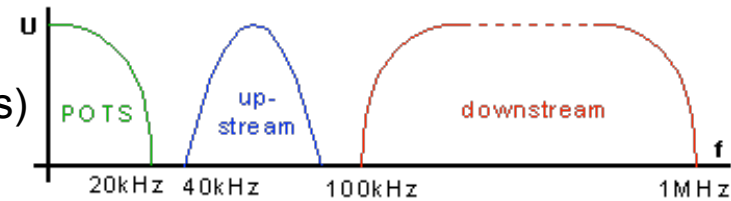
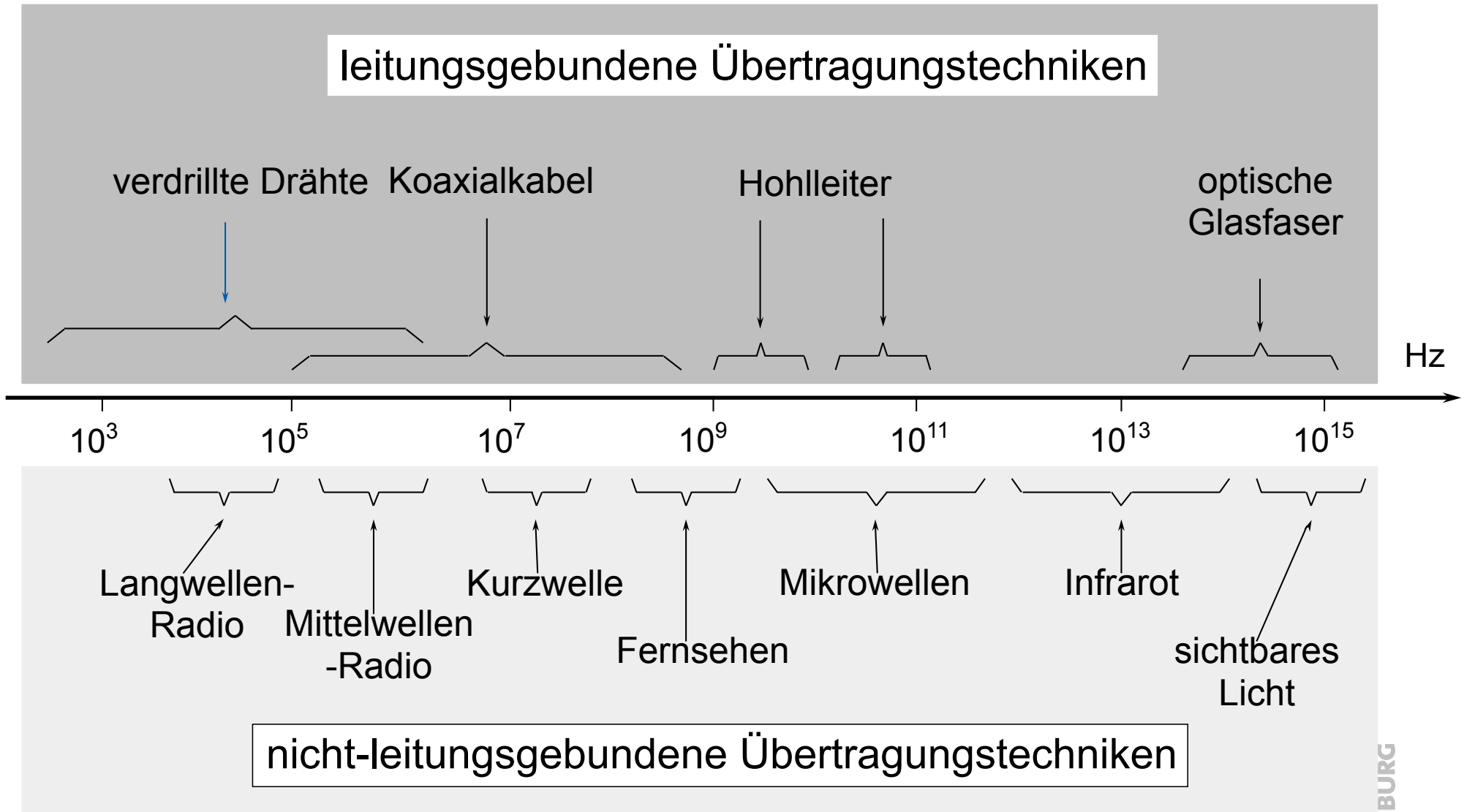


Abb. aus <http://de.wikipedia.org/wiki/Puls-Code-Modulation>

- 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

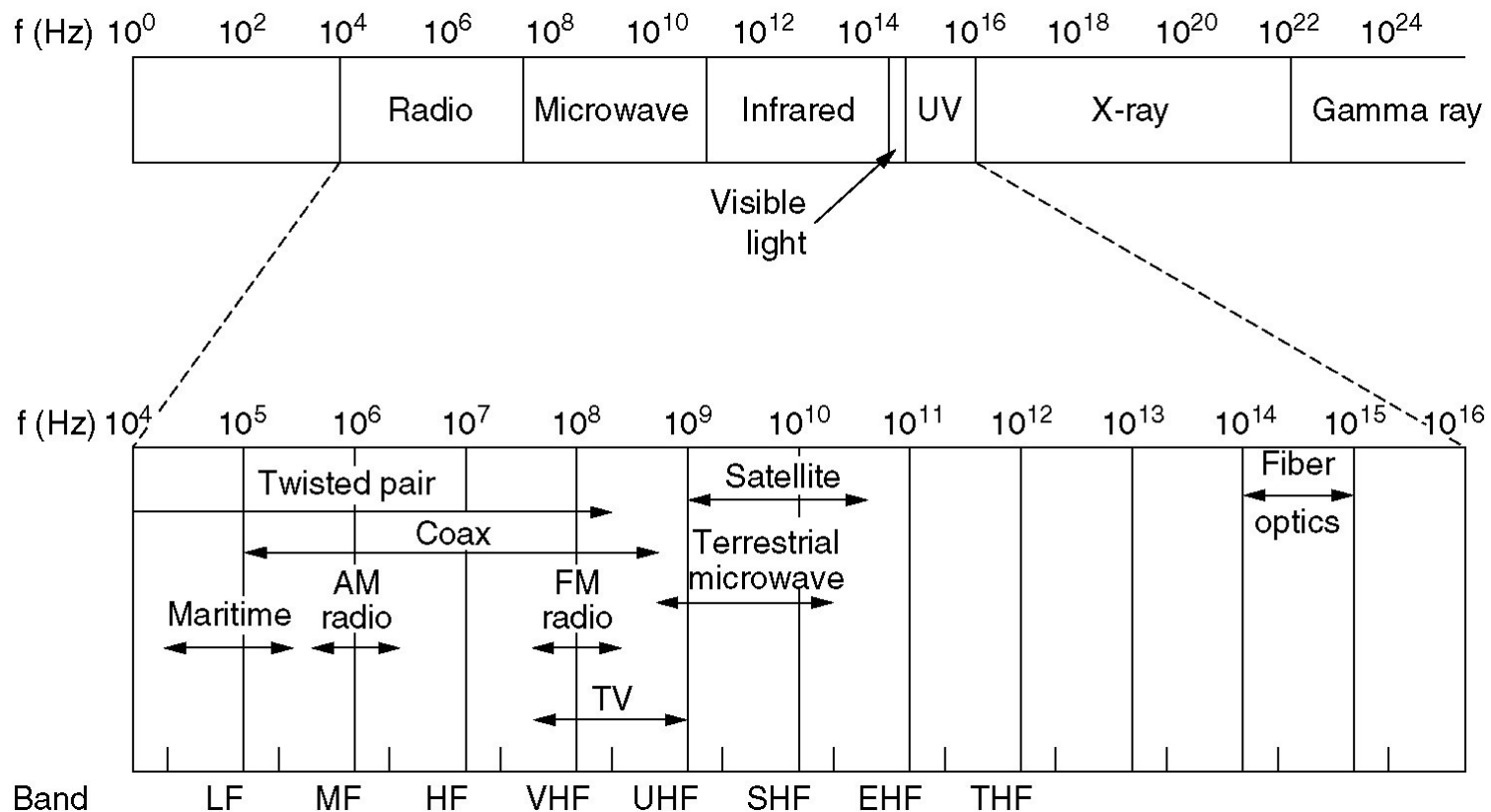


Das elektromagnetische Spektrum



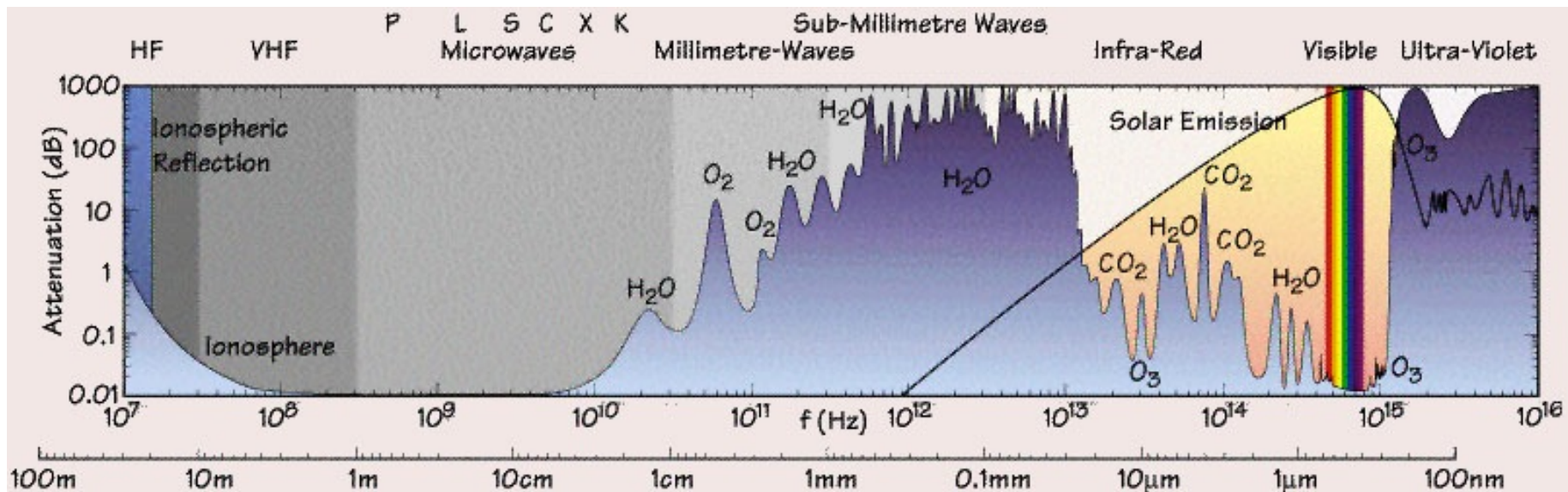
Frequenzbereiche

- 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

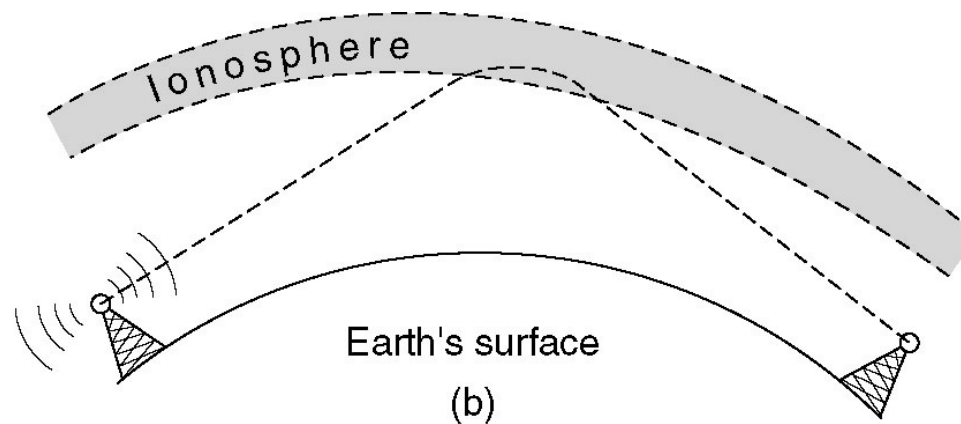
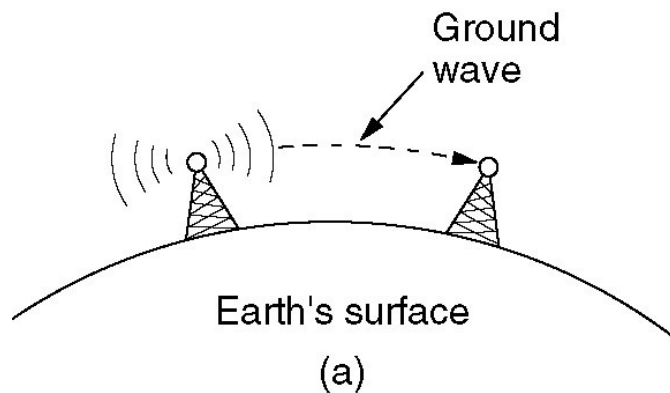


http://www.geographie.uni-muenchen.de/iggf/Multimedia/Klimatologie/physik_arbeit.htm

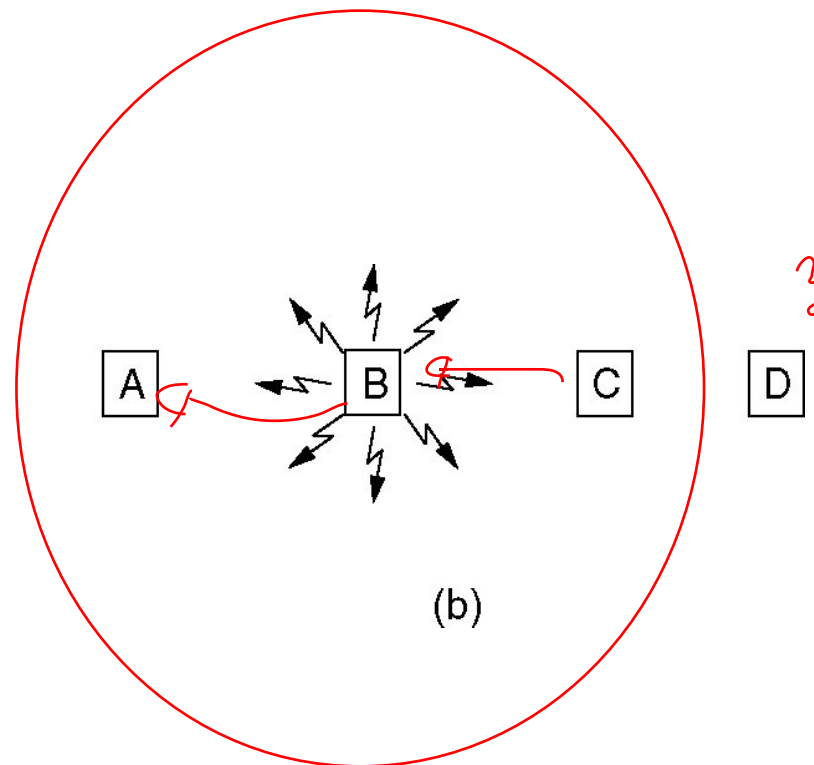
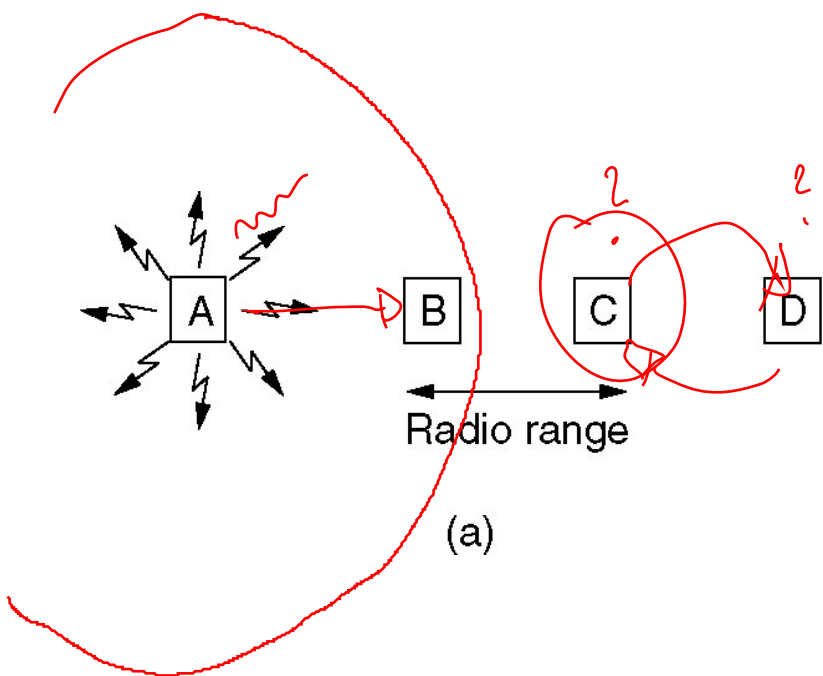
- VHF/UHF für Mobilfunk
 - Antennenlänge
- SHF für Richtfunkstrecken, Satellitenkommunikation
- Drahtloses (Wireless) LAN: UHF bis SHF
 - Geplant: EHF
- Sichtbares Licht
 - Kommunikation durch Laser
- Infrarot
 - Fernsteuerungen
 - Lokales LAN in geschlossenen Räumen

- 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

- 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



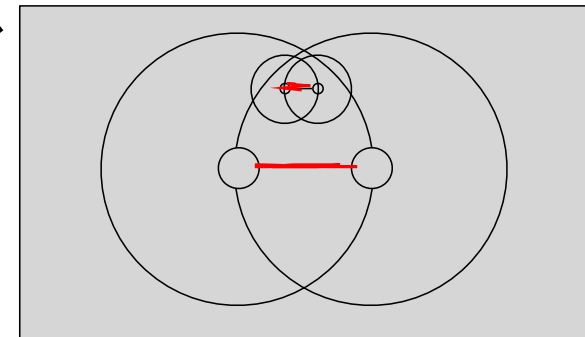
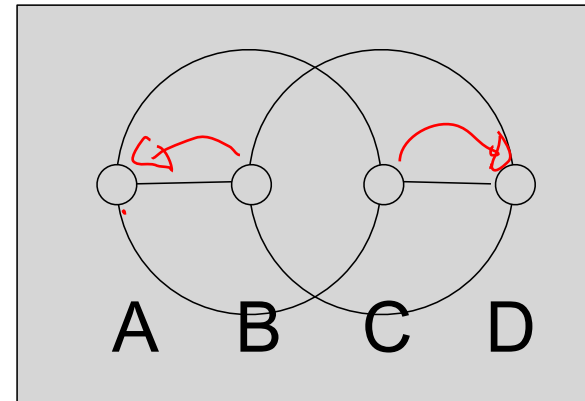
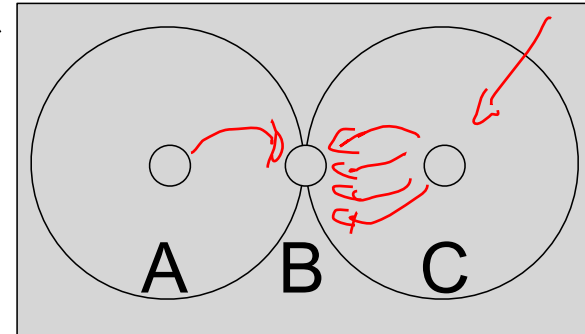
- Mehrwegeausbreitung (Multiple Path Fading)
 - Signal kommt aufgrund von Reflektion, Streuung und Beugung auf mehreren Wegen beim Empfänger an
 - Zeitliche Streuung führt zu Interferenzen
 - Fehlerhafter Dekodierung
 - Abschwächung
- Probleme durch Mobilität
 - Kurzzeitige Einbrüche (schnelles Fading)
 - Andere Übertragungswege
 - Unterschiedliche Phasenlage
 - Langsame Veränderung der Empfangsleistung (langsames Fading)
 - Durch Verkürzen, Verlängern der Entfernung Sender-Empfänger



versteckt

■ Interferenzen

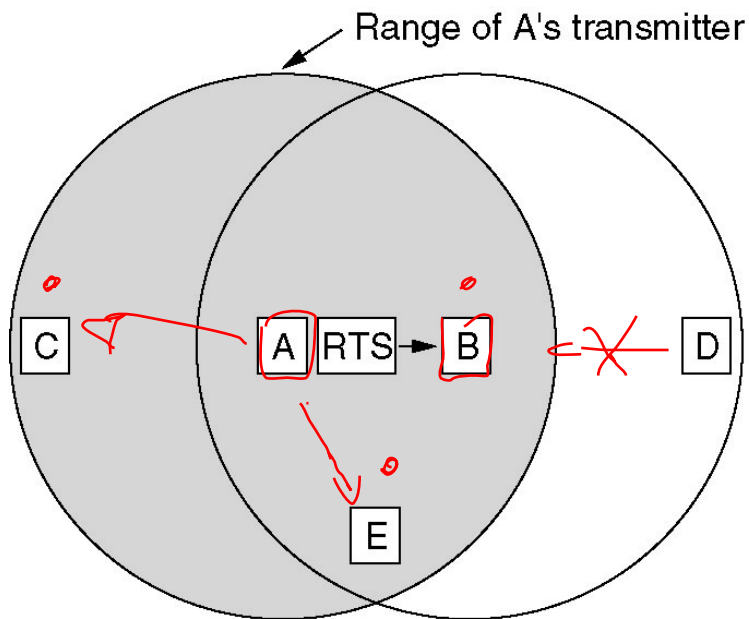
- Hidden Terminal Problem
- Exposed Terminal Problem
- Asymmetrie (var. Reichweite)



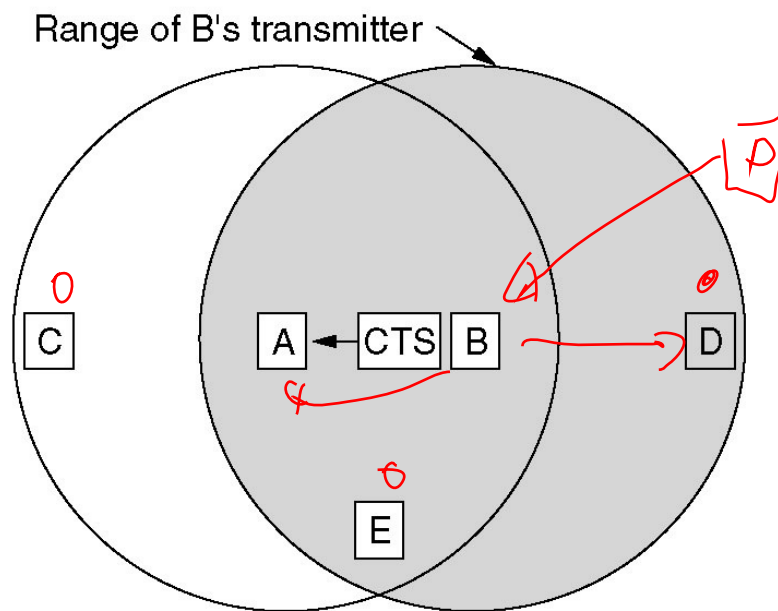
Multiple Access with Collision Avoidance

MACA

↳ Sicherung
Schritt



(a)

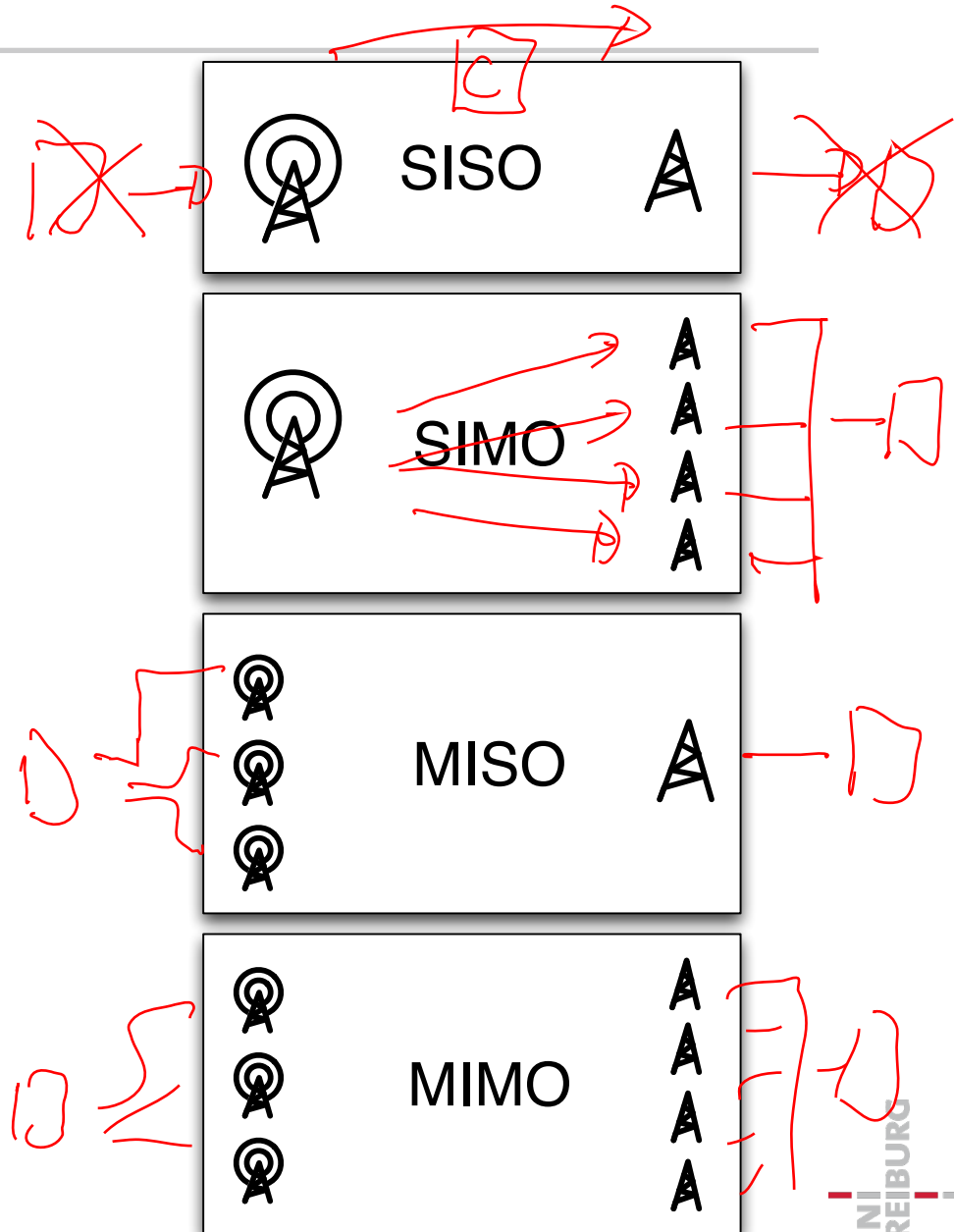


(b)

[A] → [B]

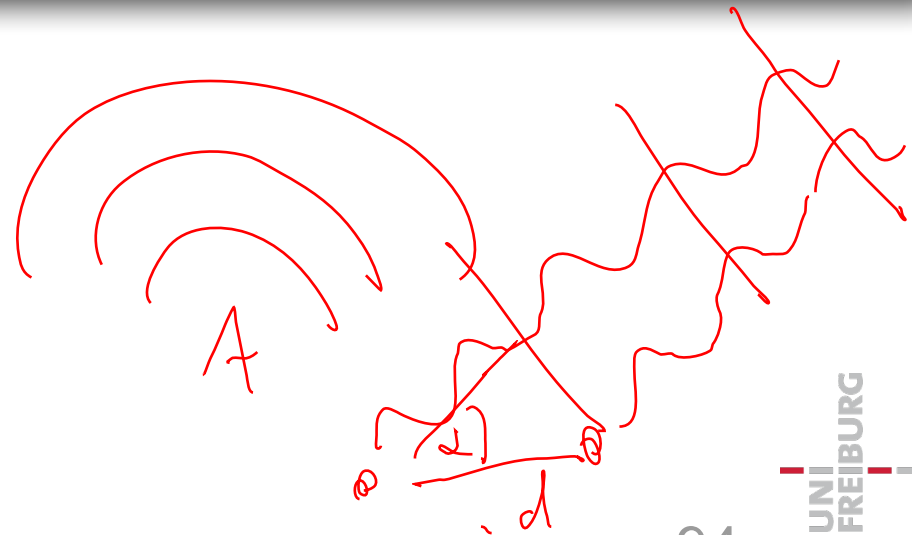
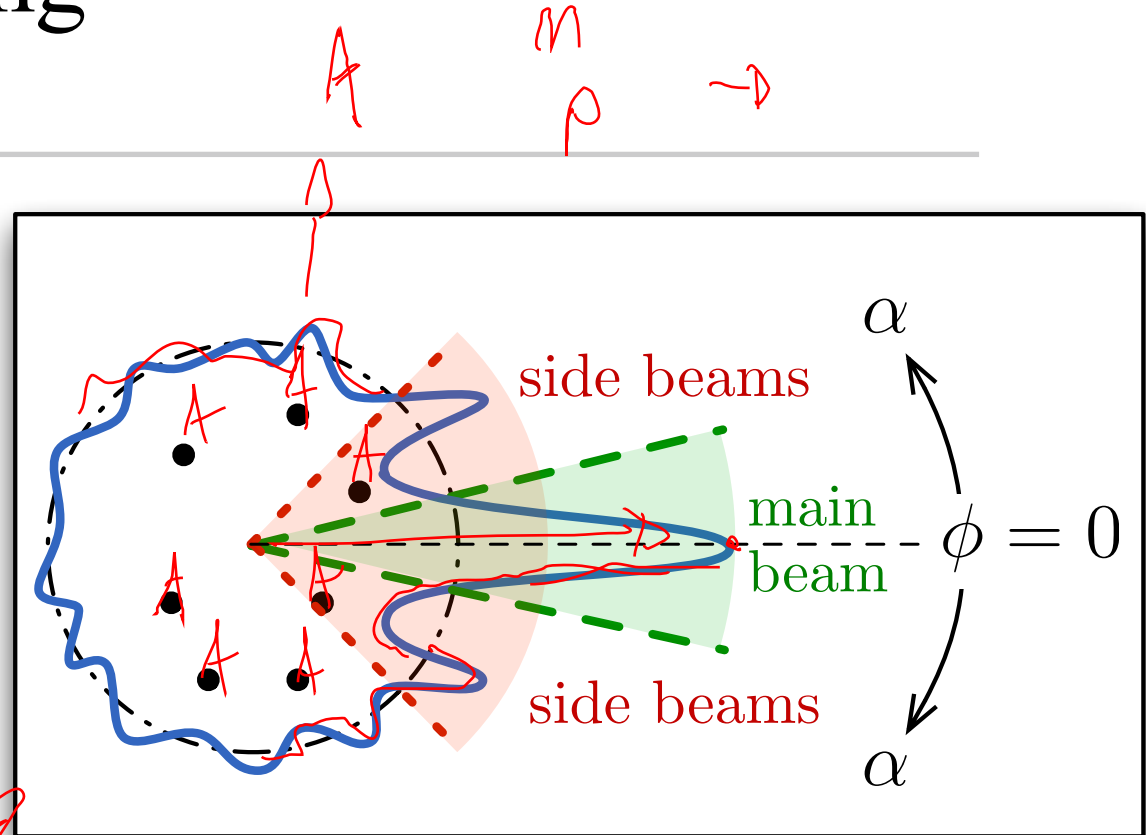
- (a) A sendet Request to Send (RTS) an B.
- (b) B antwortet mit Clear to Send (CTS) an A.

- Smart antennas
 - MIMO (multiple input/multiple output)
 - SIMO (single input/multiple output)
 - MISO, SISO
 - sind mehrere Antennen, welche koordiniert Signale übertragen und empfangen
- Vorteile
 - Beam forming
 - Power gain
 - Diversity gain
- Anwendungen
 - IEEE-802.11n-WLAN



Beamforming

- Durch geschickte Phasenverschiebung kann ein gerichteter Sendestrahl gesendet werden
 - oder symmetrisch auch empfangen werden

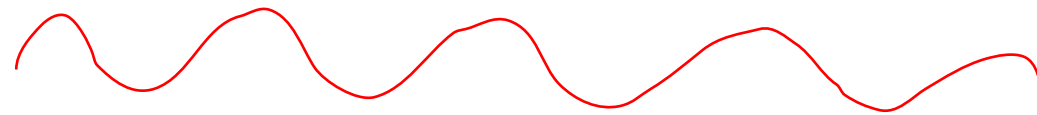
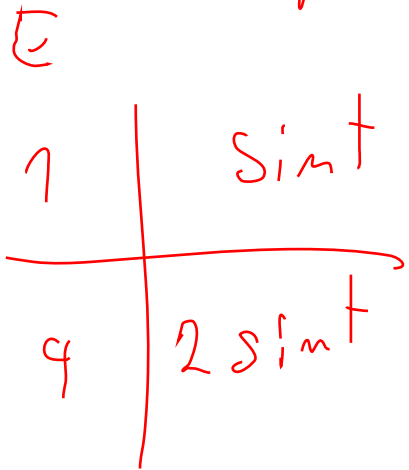
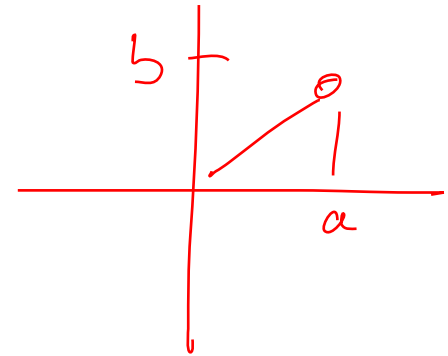


$$a \cdot \sin t + b \cdot \cos t$$

$$\sqrt{a^2 + b^2}$$

$$E_{\text{max}} \sim a^2 + b^2$$

$$\text{Amplitude} \sim \sqrt{a^2 + b^2}$$



1

2

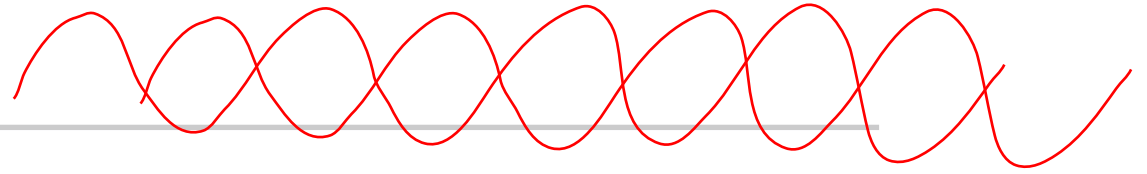
2 sin t

$$\left(n \cdot \sqrt{\frac{P}{n}} \right)^2 = P \cdot n$$

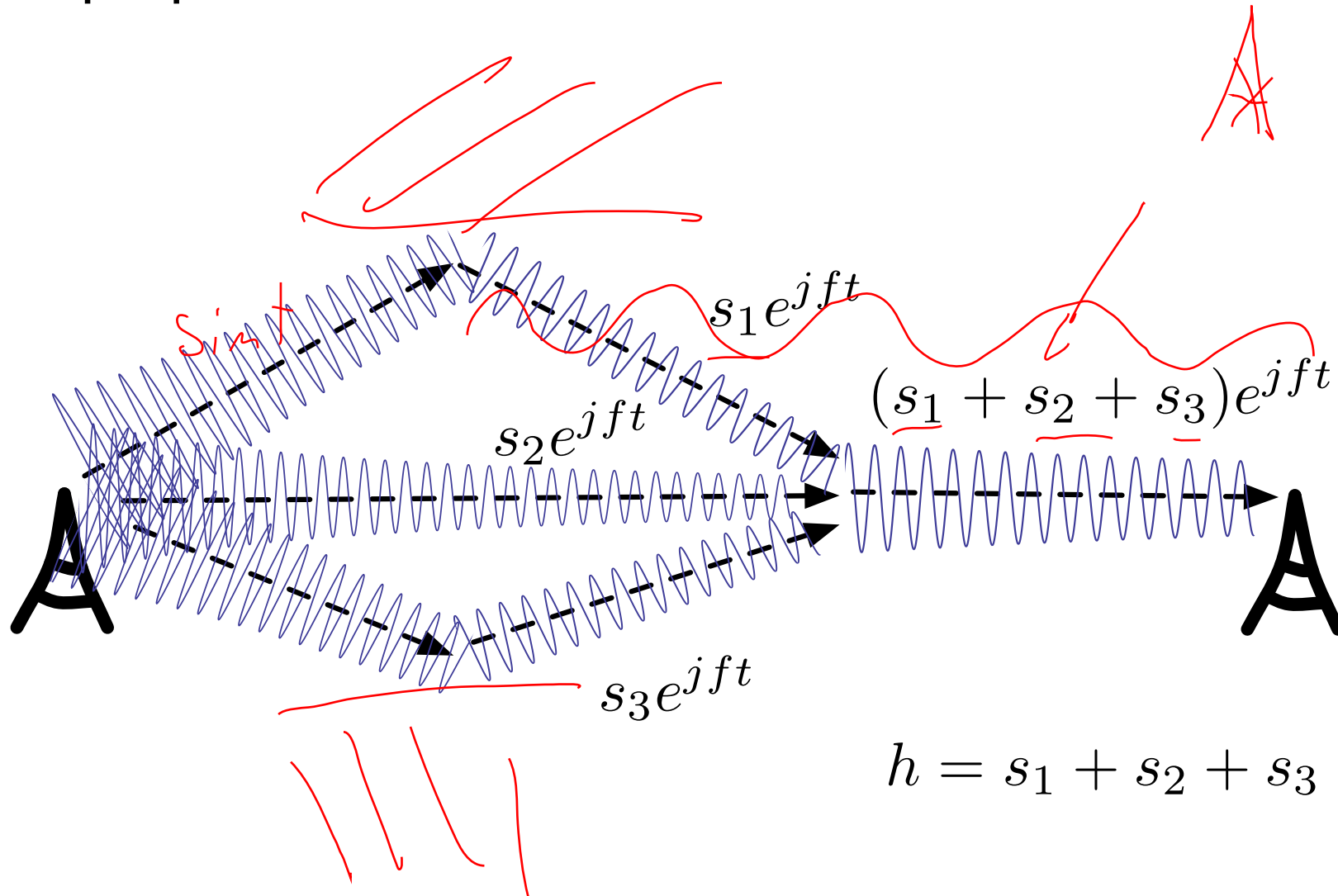
- Wieso können n Sender oder n Empfänger weiterreichen als 1 Sender und Empfänger?
 - mit gleichen Antennen
 - mit gleicher Energie
- Superposition:
 - Die elektrischen Felder überlagern sich (nicht die Energie)
 - Energy = P ~ E² = (el. Feld)²
 - El. Feldstärke = D ~ 1/d

$$H \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

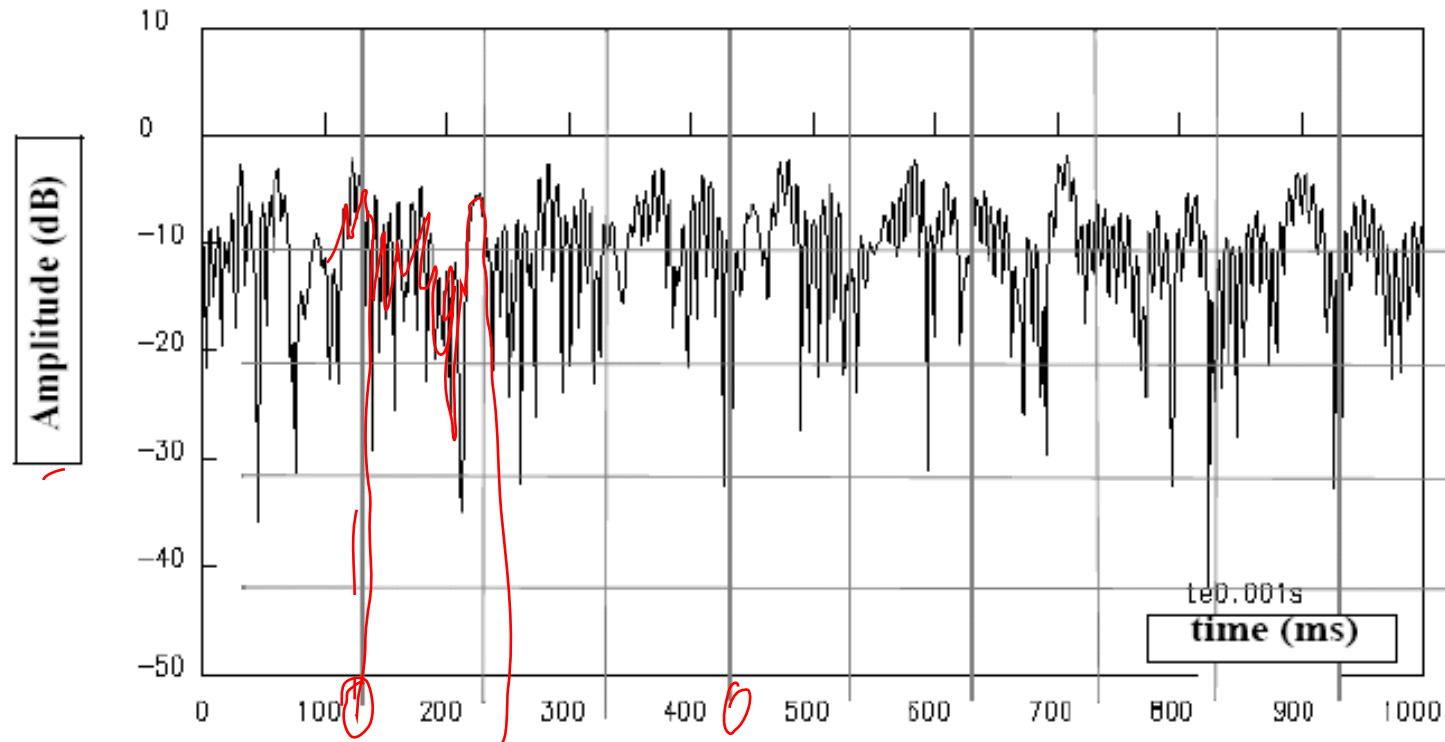
- 1 Sender
 - Energie: P
 - Energie im Abstand d: P/d²
- n Sender
 - Energie von n Sendern: P
 - Feldstärke eines von n Sendern: $\sqrt{\frac{P}{n}}$
 - Feldstärke im Abstand d von n Sendern: $\frac{n}{d} \sqrt{\frac{P}{n}} = \frac{\sqrt{Pn}}{d}$
 - Gesamtenergie im Abstand d: $n \cdot \frac{P}{d^2}$
- Der selbe Effekt funktioniert auch beim Empfänger
 - führt zu einem Power Gain von Faktor n für n Sender und n Empfänger



- Superposition von Reflektionen



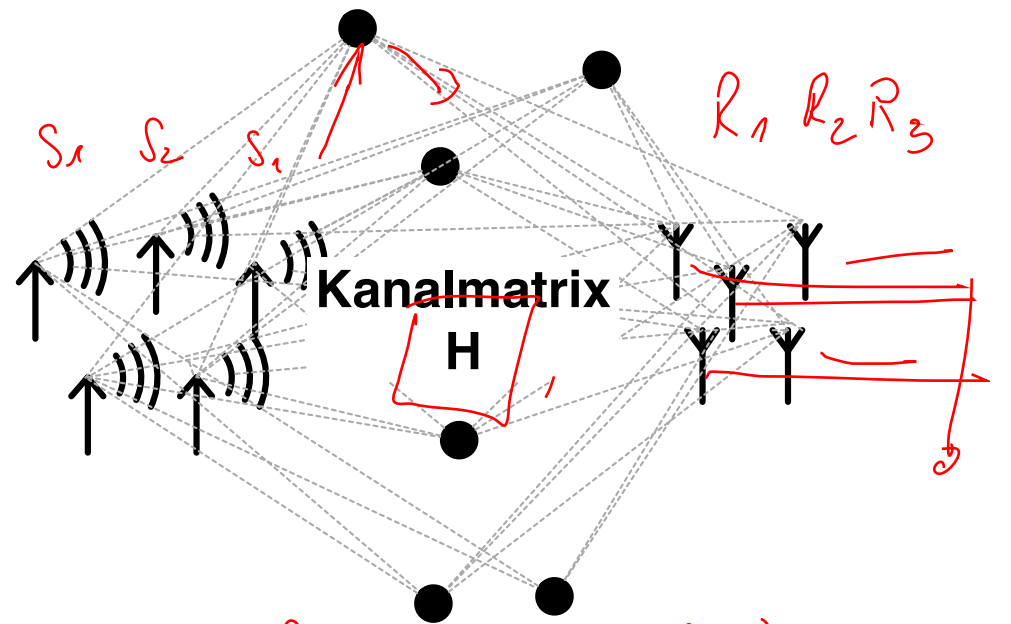
- Superposition führt zu drastischen Einbrüchen



Introduction to Wireless MIMO – Theory and Applications
Jacob Sharony IEEE LI 2006

- Wenn in der Umgebung viele Reflektoren (scatterers) vorhanden sind,
 - dann ergibt sich für die Beschreibung der Sender-/Empfänger-Beziehung eine Kanalmatrix H
- $H_{i,j} =$
 - resultierende Dämpfung und Phasenverschiebung zwischen Sender i und Empfänger j
- Für geeignete Kanalmatrizen
 - mit „guter“ Singulärwertzerlegung
 - können bis zu $\max\{\#\text{Sender}, \#\text{Empfänger}\}$ parallele Kommunikationskanäle verwendet werden
- Dadurch können mehr Daten übertragen werden, als Shannons Theorem für SISO zulässt

$$\begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} & \dots & H_{1n} \\ H_{21} & H_{22} & \dots & H_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{m1} & H_{m2} & \dots & H_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_m \end{pmatrix}$$



$$H^{-1} \begin{pmatrix} R_1 \\ \vdots \\ R_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_1 \\ \vdots \\ S_m \end{pmatrix}$$

Systeme II

2. Die physikalische Schicht

Christian Schindelhauer

Technische Fakultät

Rechnernetze und Telematik

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Version 29.04.2014