

# Systeme II

## 2. Die physikalische Schicht

Christian Schindelhauer

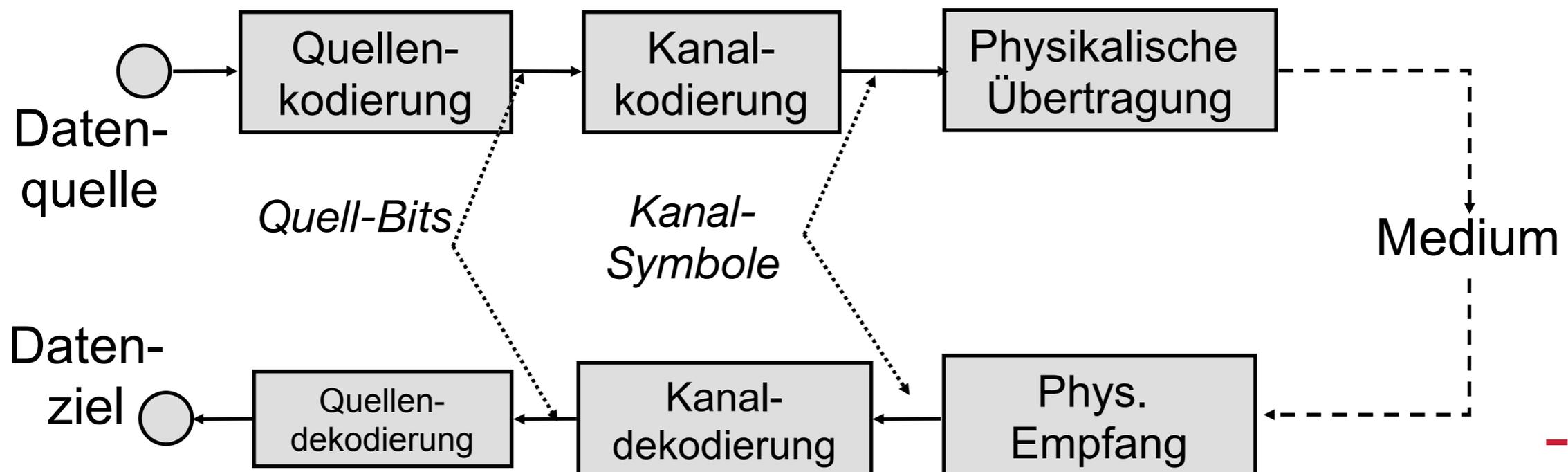
Technische Fakultät

Rechnernetze und Telematik

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

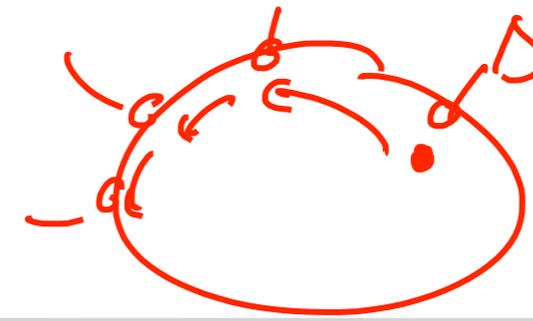
Version 14.05.2014

- 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

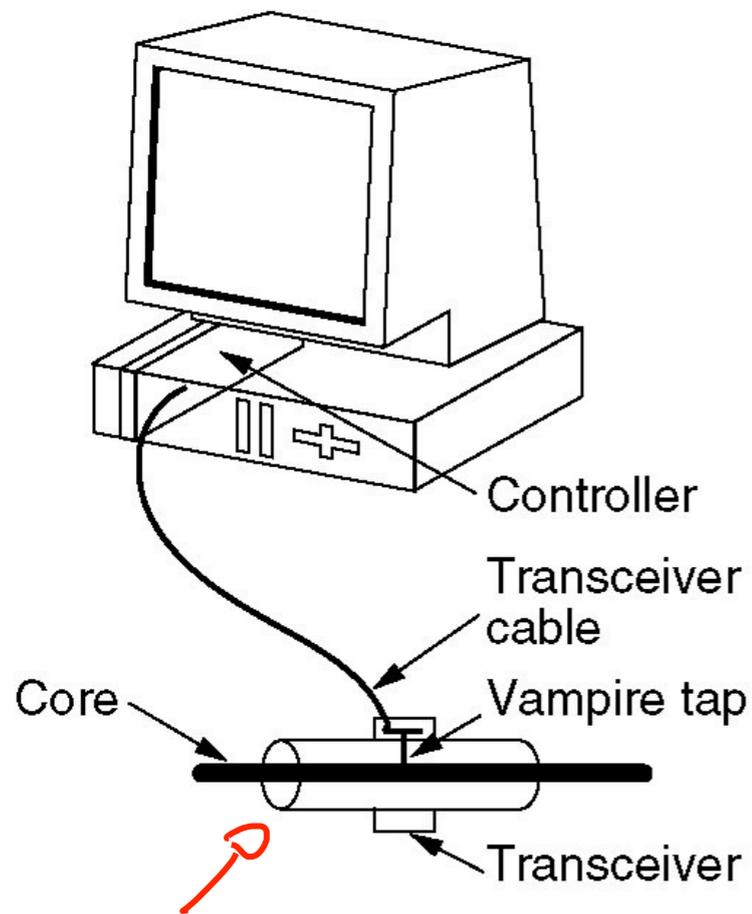


- Beispiel aus der Praxis mit Mediumzugriff:  
Ethernet
  - IEEE Standard 802.3
- Punkte im Standard
  - Verkabelung
  - Bitübertragungsschicht
  - Sicherungsschicht mit Mediumzugriff

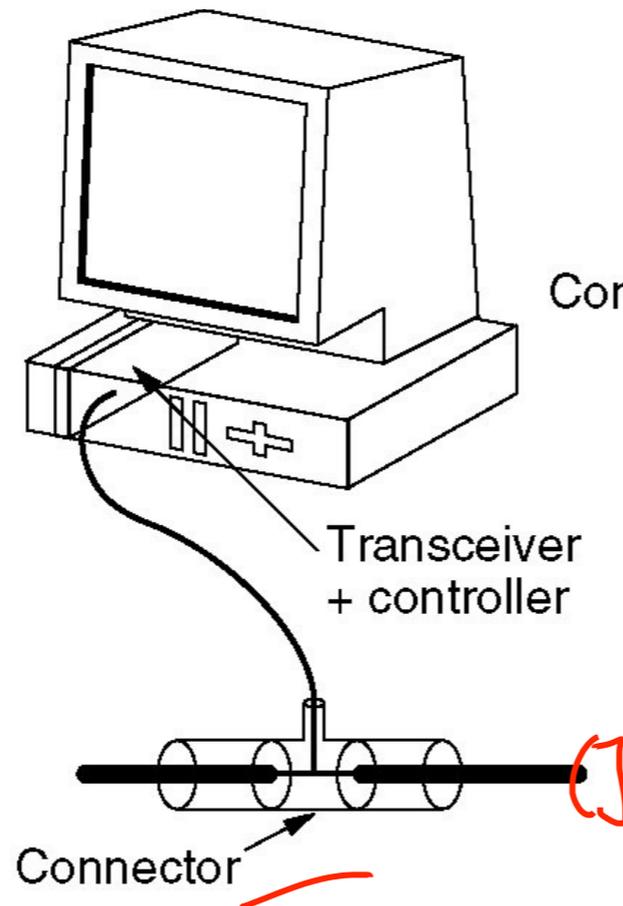
# Ethernet cabling



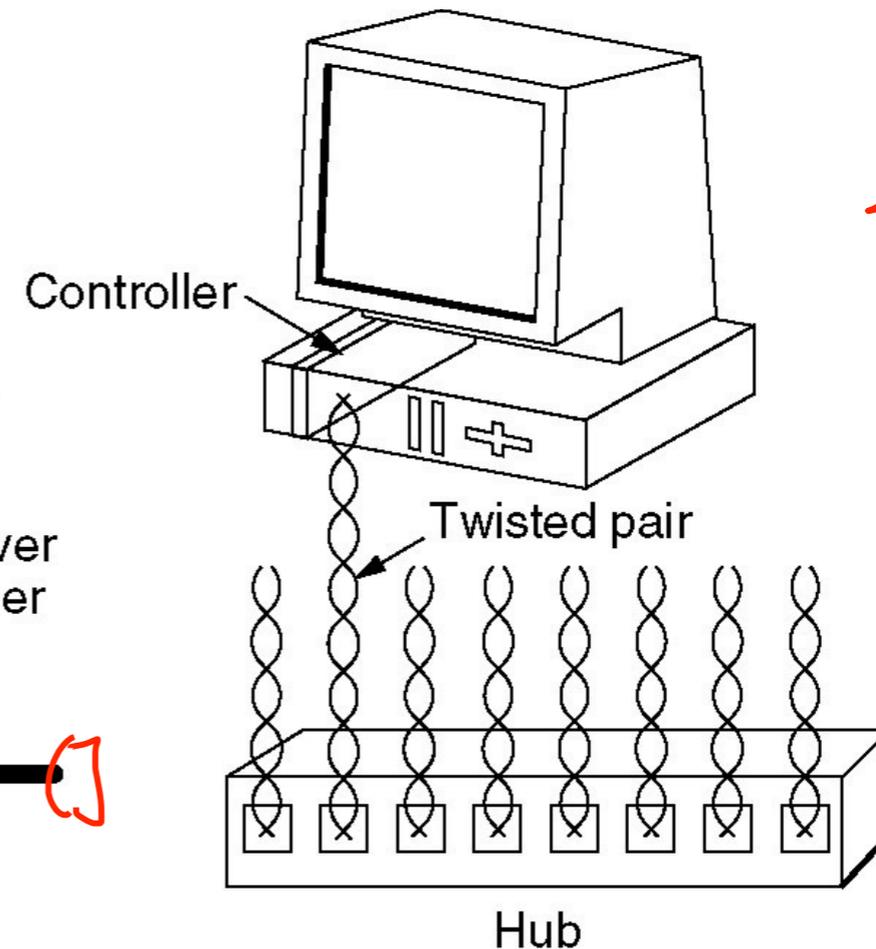
Name	Cable	Max. seg.	Nodes/seg.	Advantages
10Base5	Thick coax	500 m	100	Original cable; now obsolete
10Base2	Thin coax	185 m	30	No hub needed
10Base-T	Twisted pair	100 m	1024	Cheapest system
10Base-F	Fiber optics	2000 m	1024	Best between buildings



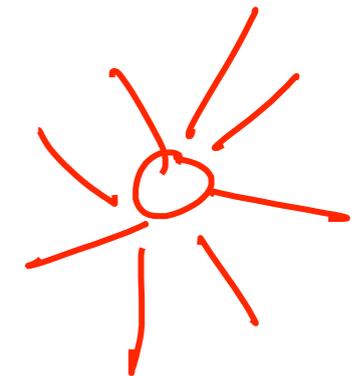
10Base5



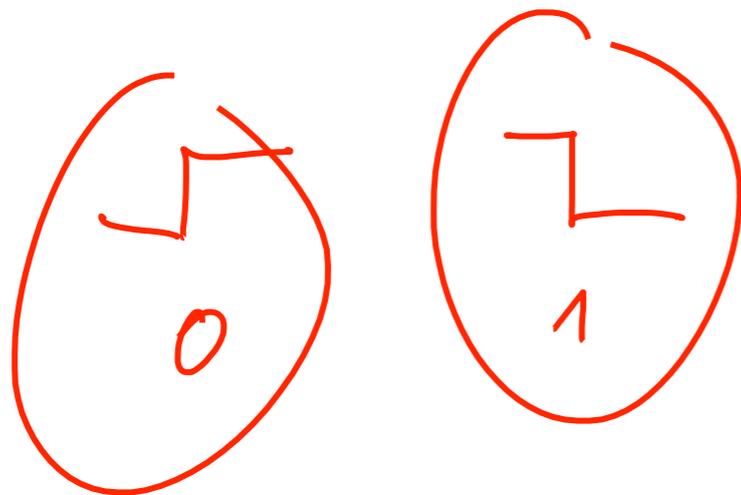
10Base2



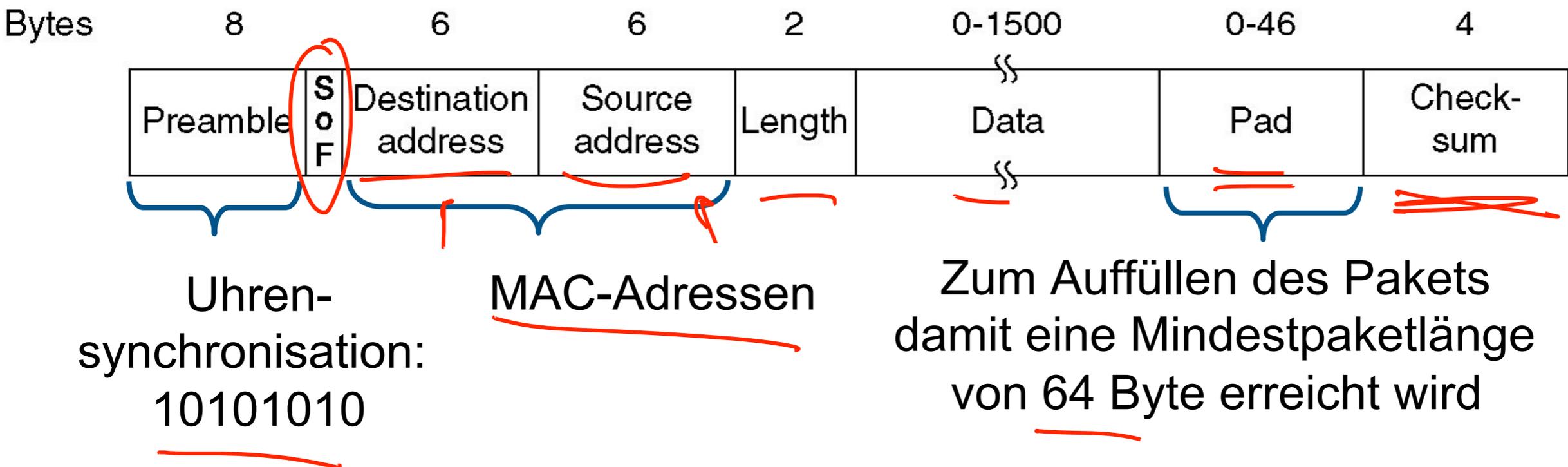
10BaseT



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



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



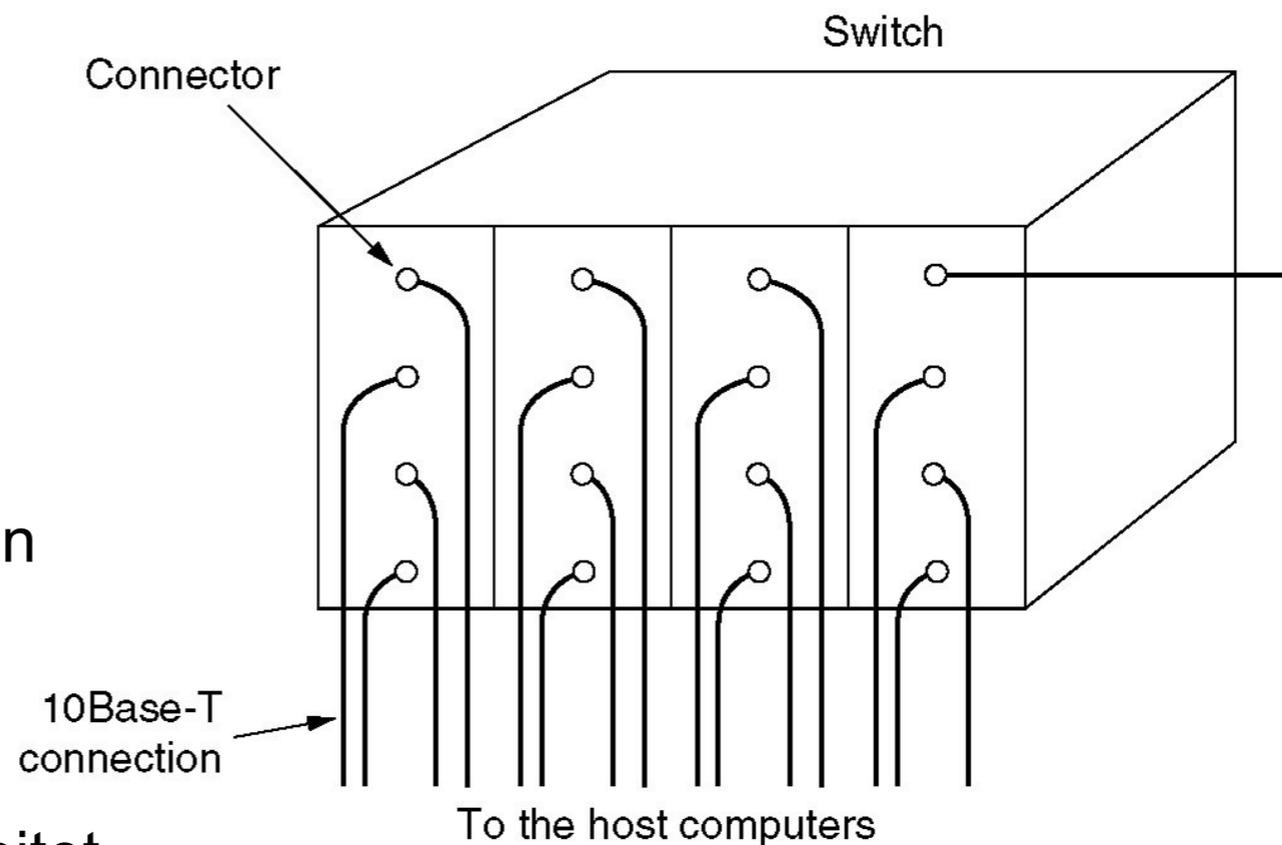
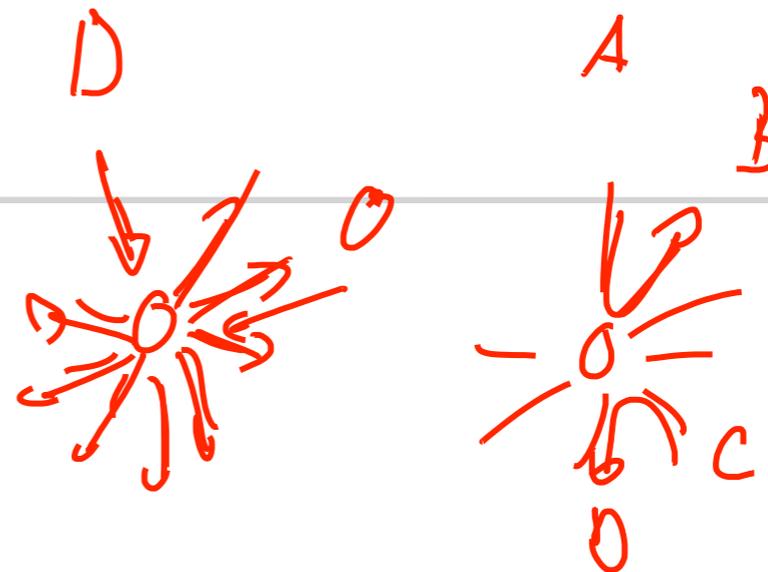
# Switch versus Hub

## Hub

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

## Switch

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

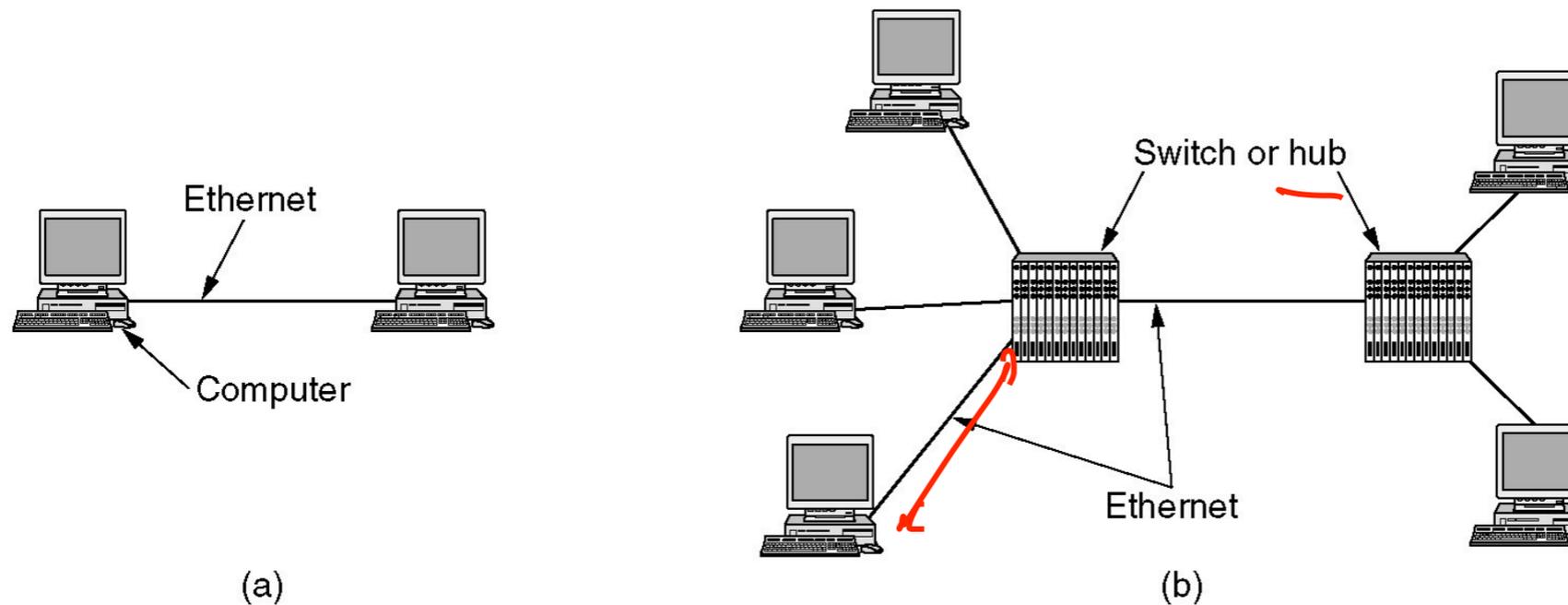


- Ursprünglich erreichte Ethernet 10 MBit/s
- 1992: Fast Ethernet
  - Ziele: Rückwärtskompatibilität
  - Resultat: 802.3u
- Fast Ethernet
  - Frame-Format ist gleichgeblieben
  - Bit-Zeit wurde von 100 ns auf 10 ns reduziert
  - Dadurch verkürzt sich die maximale Kabellänge (und die minimale Paket-Größe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

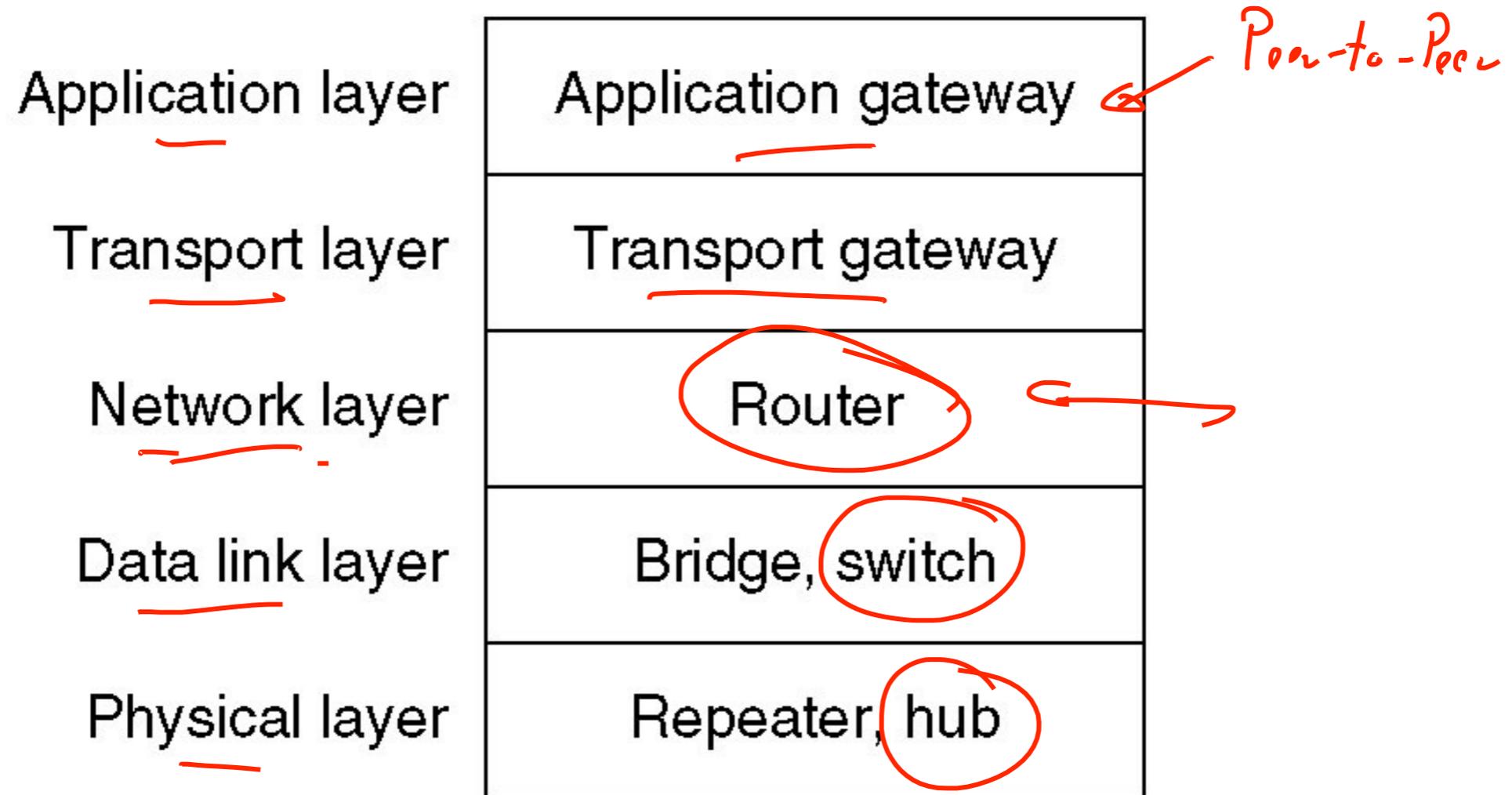


- Mit Switch
  - Keine Kollisionen! CSMA/CD unnötig
  - Erlaubt full-duplex für jeden Link
- Mit Hub
  - Kollisionen, nur Halb-Duplex (d.h. abwechselnd Simplex), CSMA/CD
  - Kabellängen auf 25 m reduziert

# Gigabit Ethernet – Cabling

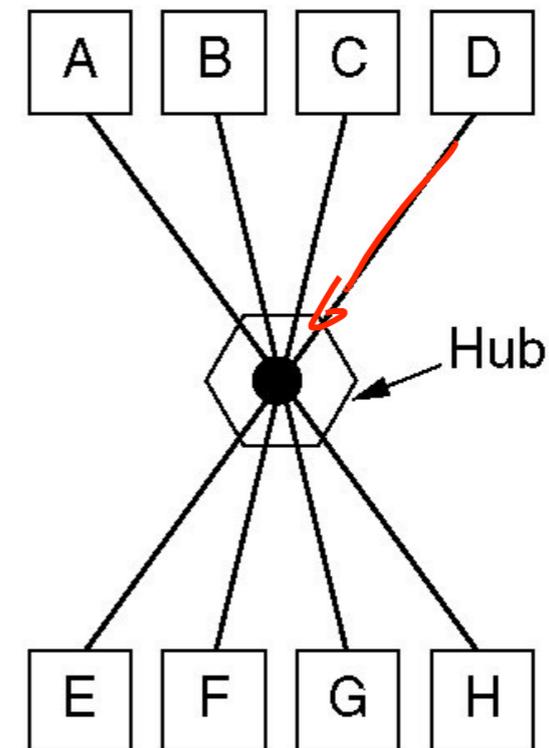
Name	Cable	Max. segment	Advantages
1000Base-SX	Fiber optics ↪	550 m	Multimode fiber (50, 62.5 microns)
1000Base-LX	Fiber optics ↪	5000 m	Single (10 μ) or multimode (50, 62.5 μ)
1000Base-CX	2 Pairs of STP	25 m	Shielded twisted pair
1000Base-T	4 Pairs of UTP	100 m	Standard category 5 UTP

# Verbinden von LANs

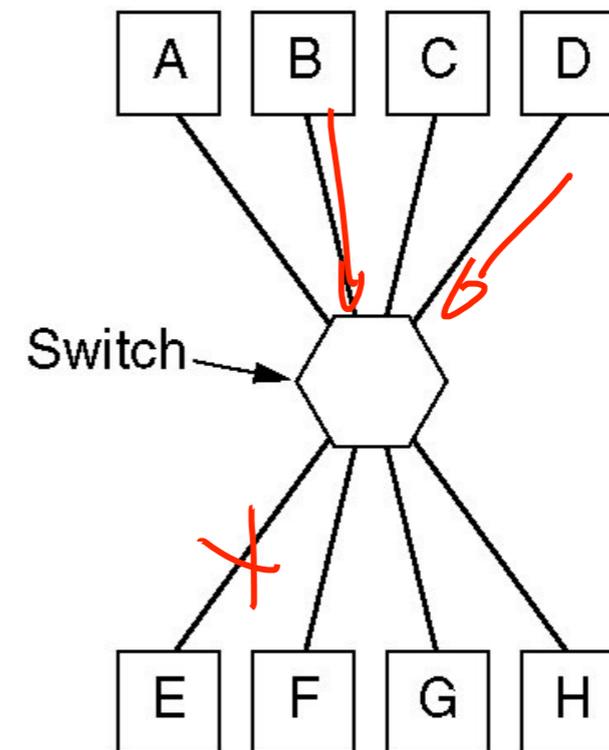


- Signalregenerator
  - Empfängt Signal und bereitet es auf
  - Nur das elektrische und optische Singal wird aufbereitet
  - Information bleibt unbeeinflusst
- Bitübertragungsschicht
- Repeater teilen das Netz in physische Segmente
  - logische Topologieen bleiben erhalten

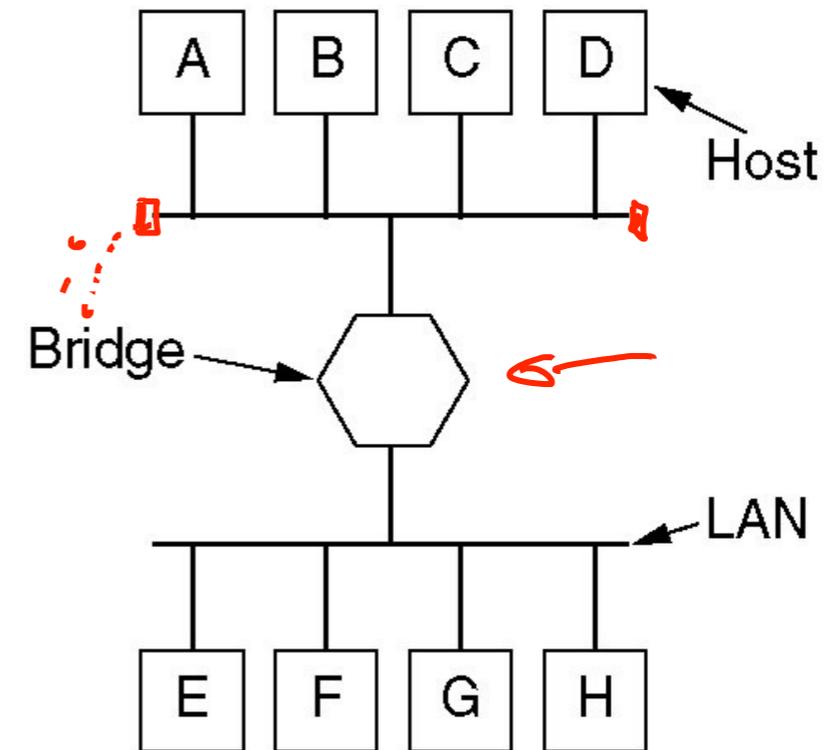
- Verbindet sternförmig Netzsegmente
  - im Prinzip wie ein Repeater
  - Signale werden auf alle angebundenen Leitungen verteilt
- Bitübertragungsschicht
  - Information und Logik der Daten bleibt unberücksichtigt
  - Insbesondere für Kollisionen



- 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

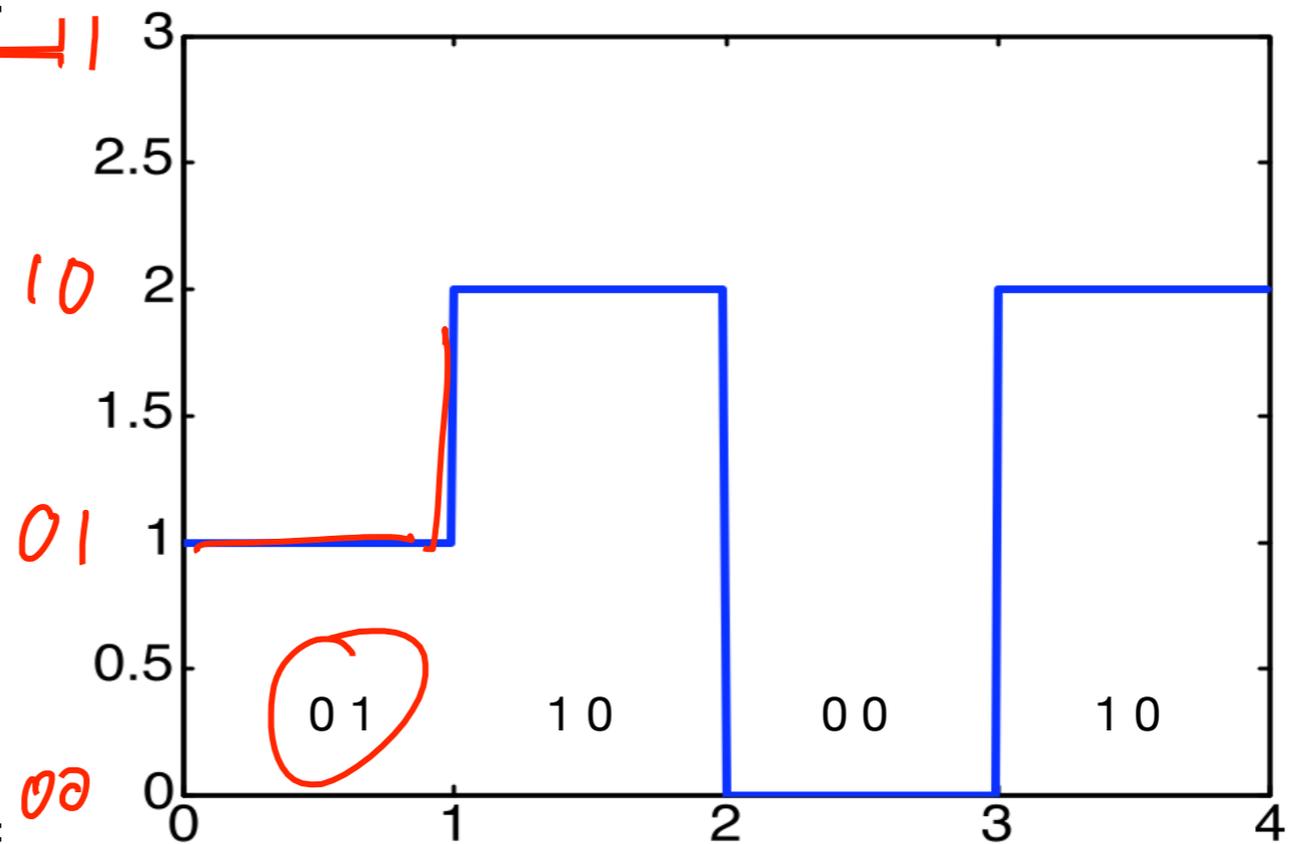


- Verbindet zwei lokale Netzwerke
  - im Gegensatz zum Switch (dort nur Terminals)
  - trennt Kollisionen
- Sicherungsschicht
  - Weitergabe an die andere Seite, falls die Ziel-Adresse aus dem anderen Netzwerk bekannt ist oder auf beiden Seiten noch nicht gehört wurde
  - Nur korrekte Frames werden weitergereicht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



# Symbole und Bits

- 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)



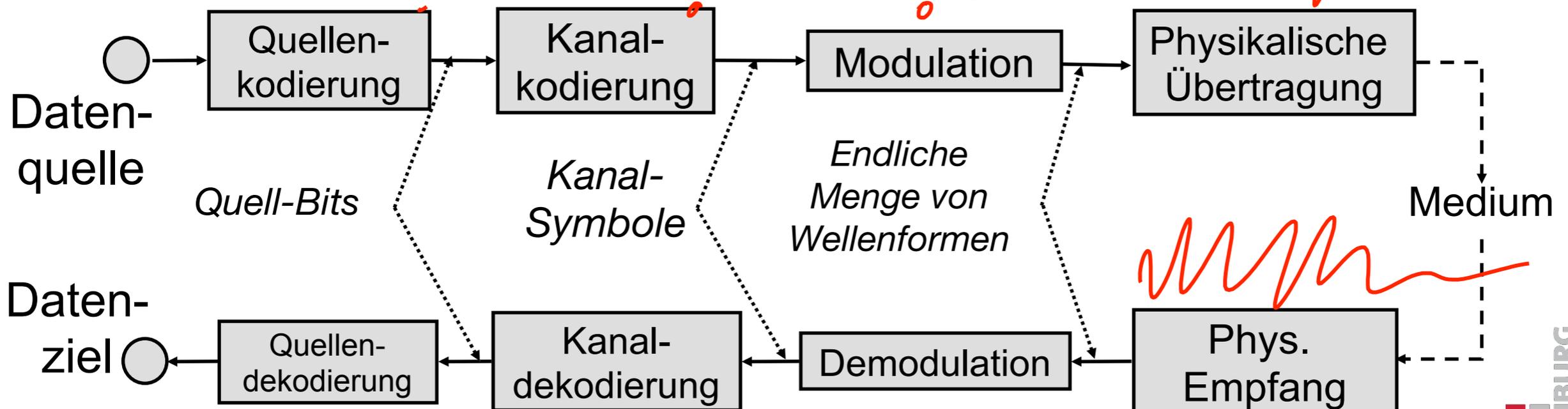
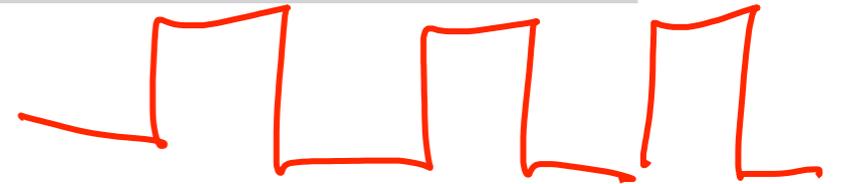
$$16 = 2^4$$

*Basis-*

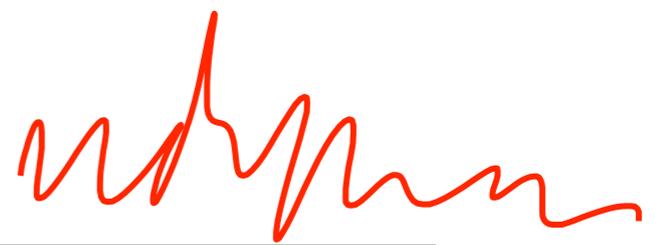
## ■ MOfulation/DEModulation

- Übersetzung der Kanalsymbole durch

- Amplitudenmodulation
- Phasenmodulation
- Frequenzmodulation
- oder einer Kombination davon



*? ↙*



*↻*

- Bewegte elektrisch geladene Teilchen verursachen elektromagnetische Wellen

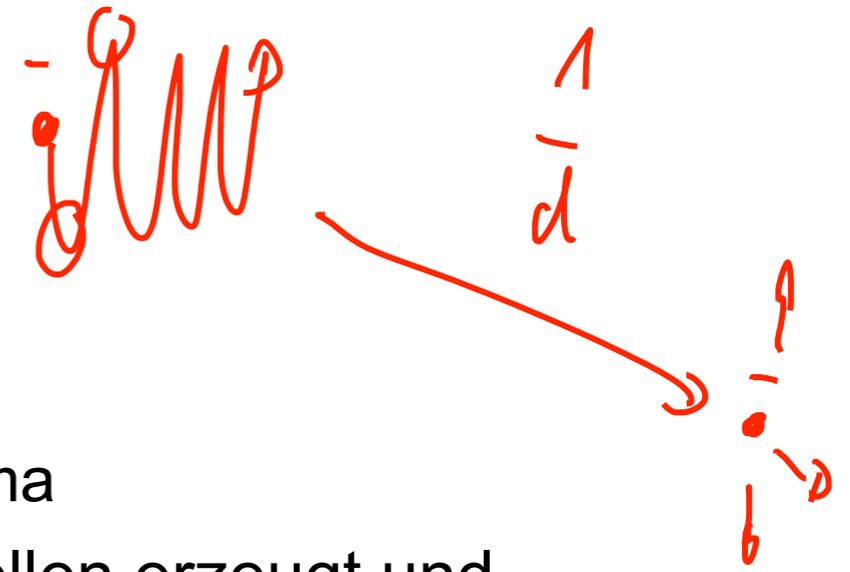
- **Frequenz**

- $f$  : Anzahl der Oszillationen pro Sekunde
  - Maßeinheit: Hertz

- **Wellenlänge**

- $\lambda$ : 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:

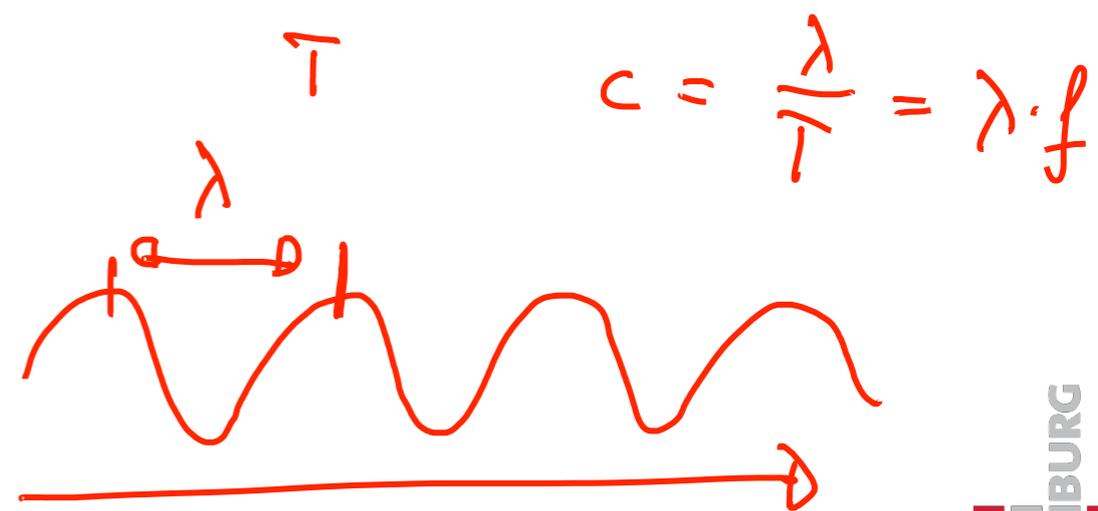
- **Lichtgeschwindigkeit**  $c \approx 3 \cdot 10^8$  m/s



- Zusammenhang:

$$f = \frac{1}{T}$$

$$\lambda \cdot f = c$$



*sin(t)*

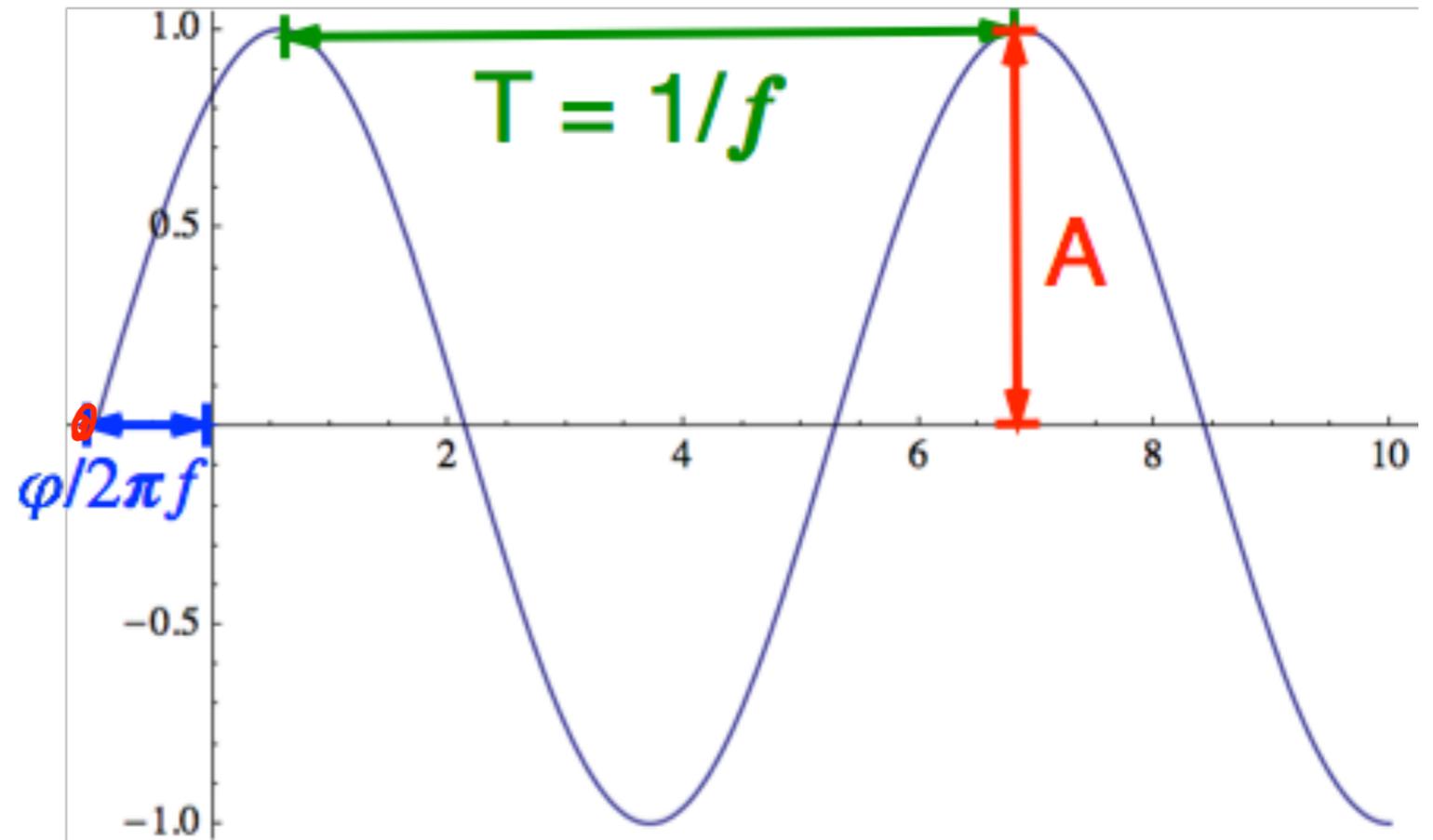
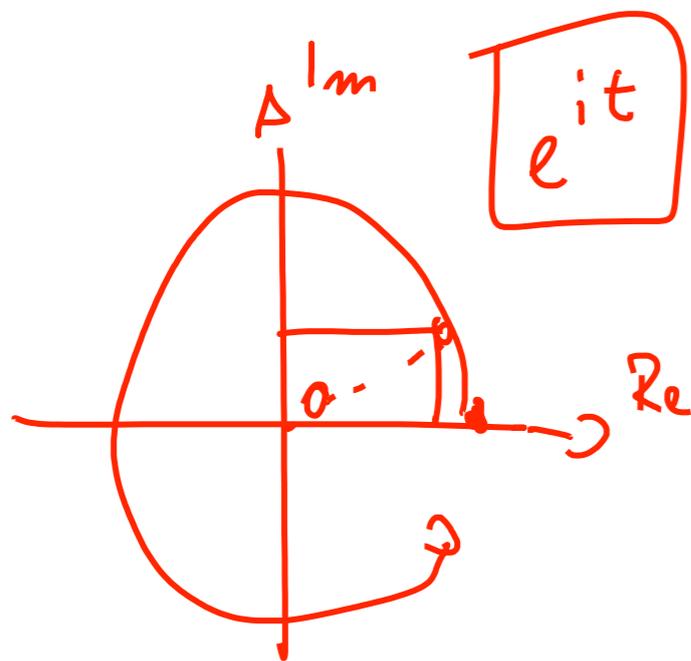
*cos<sup>2</sup>t + sin<sup>2</sup>t = 1*

*Re(e<sup>it</sup>) = cost*  
*Im(e<sup>it</sup>) = sint*

## Amplitudendarstellung einer Sinusschwingung

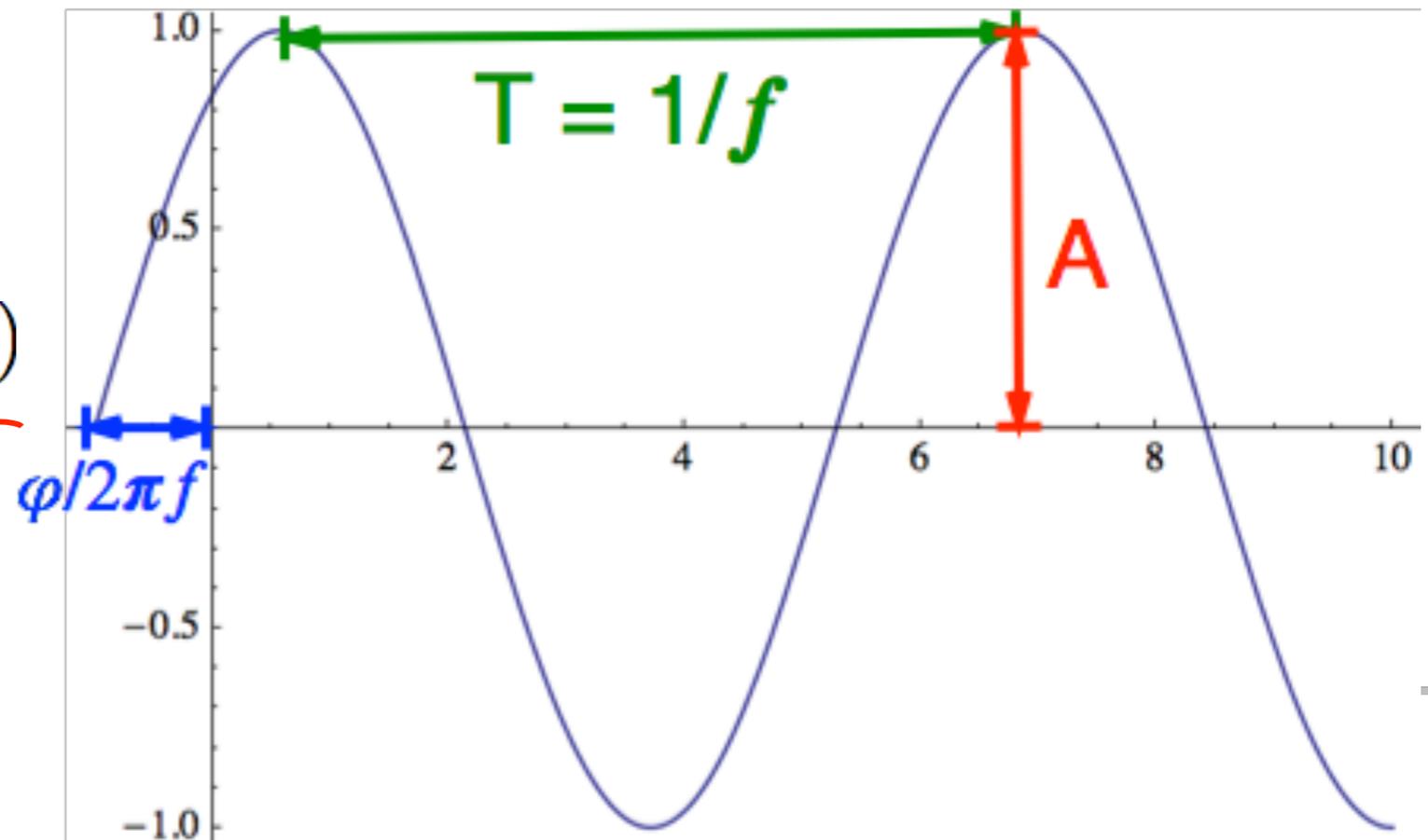
$$s(t) = A \sin(2\pi ft + \phi)$$

- A: Amplitude
- $\phi$ : 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  $\phi$

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

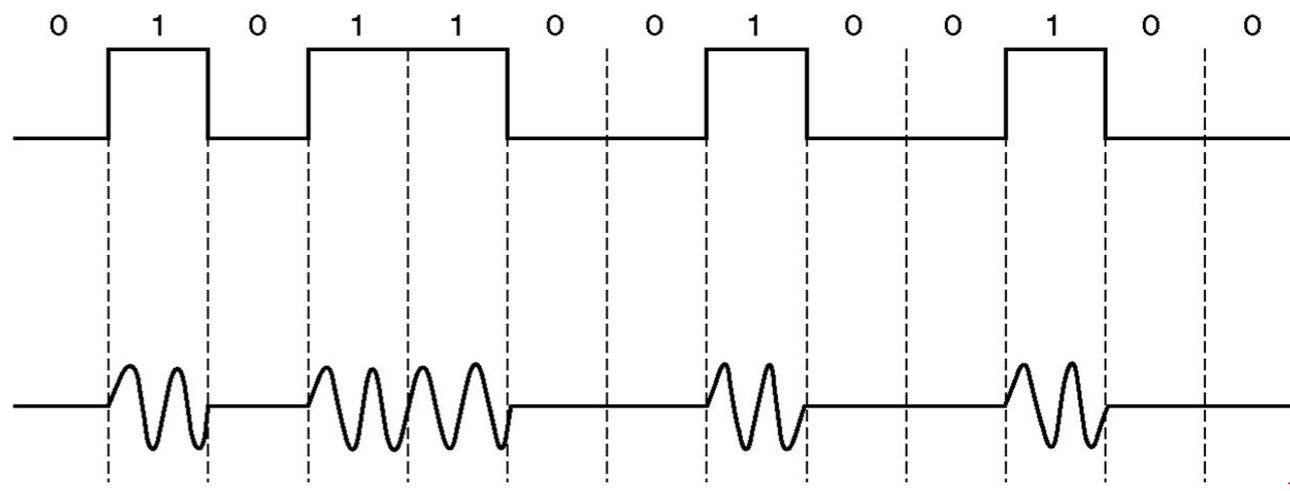
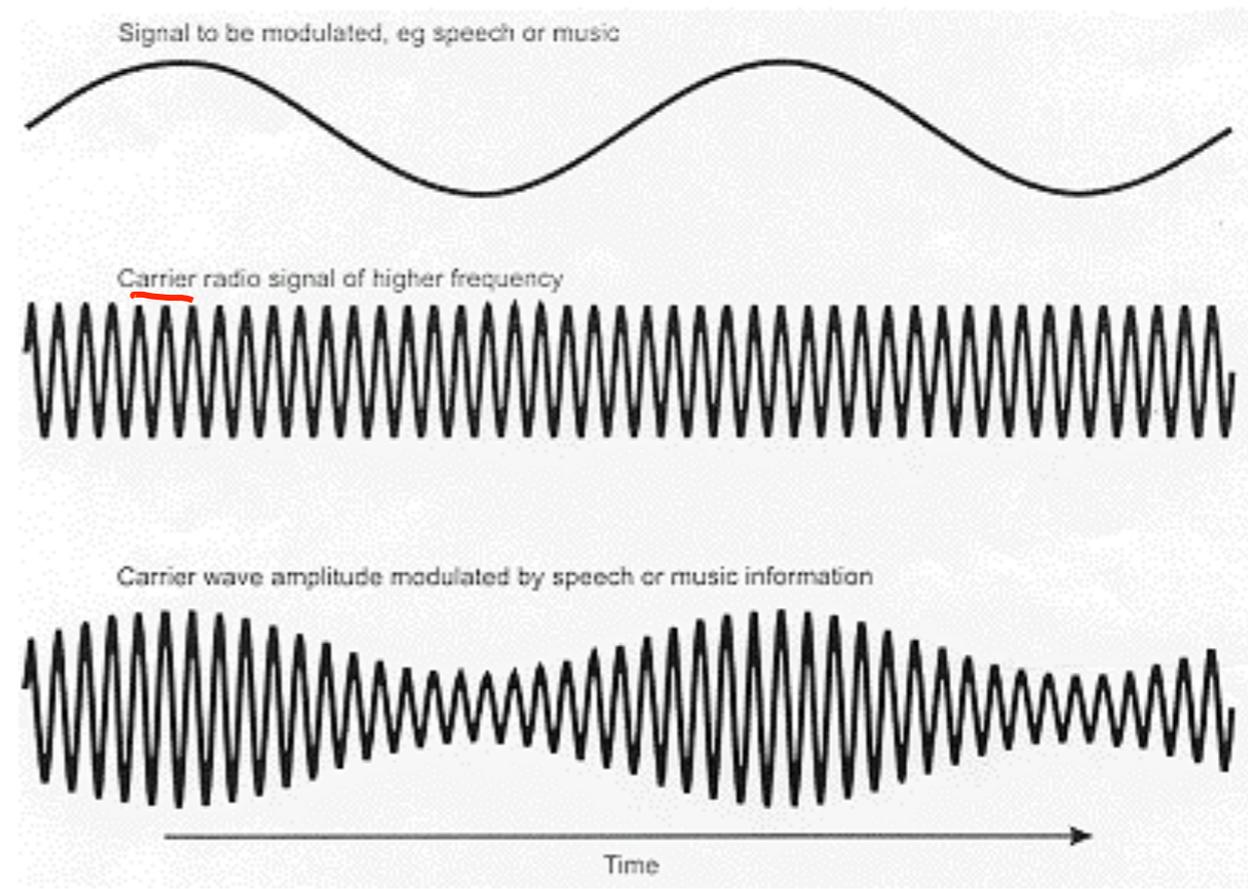


- Das zeitvariable Signal  $s(t)$  wird als Amplitude einer Sinuskurve kodiert:

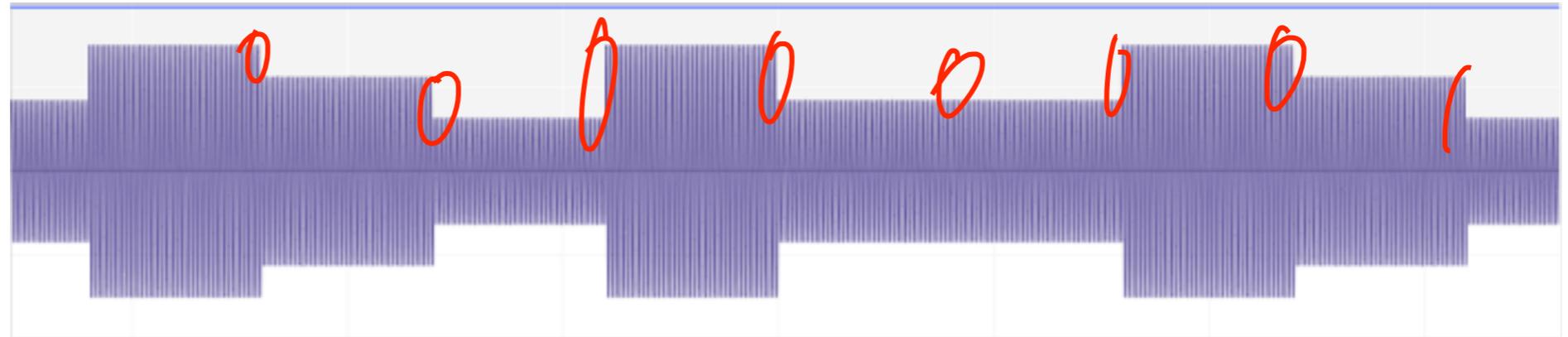
$$f_A(t) = s(t) \sin(2\pi ft + \phi)$$

- 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



# Frequenzmodulation

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

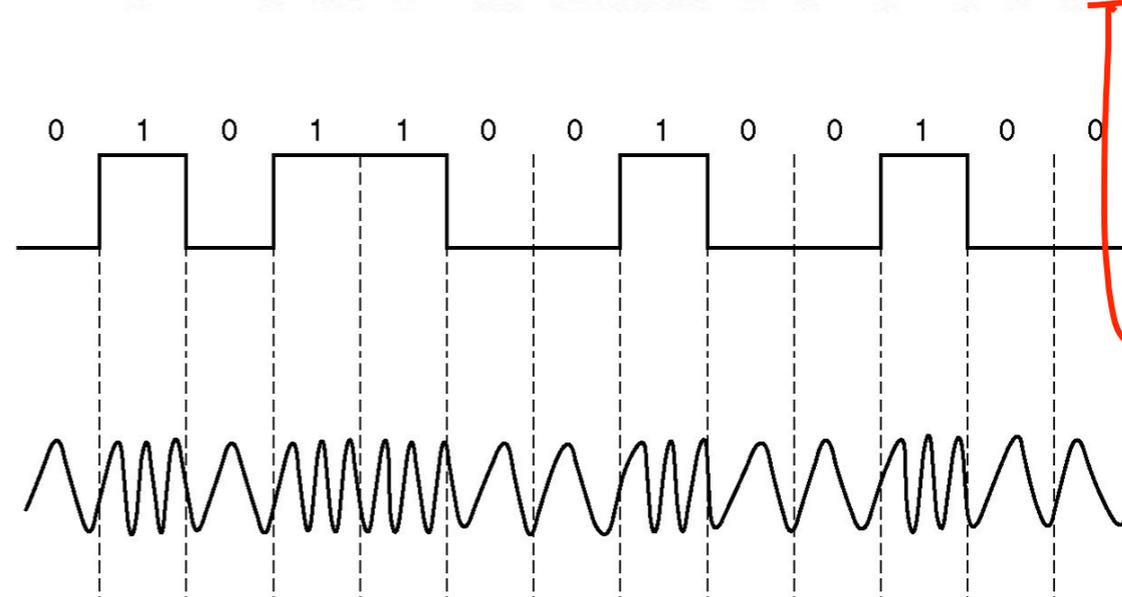
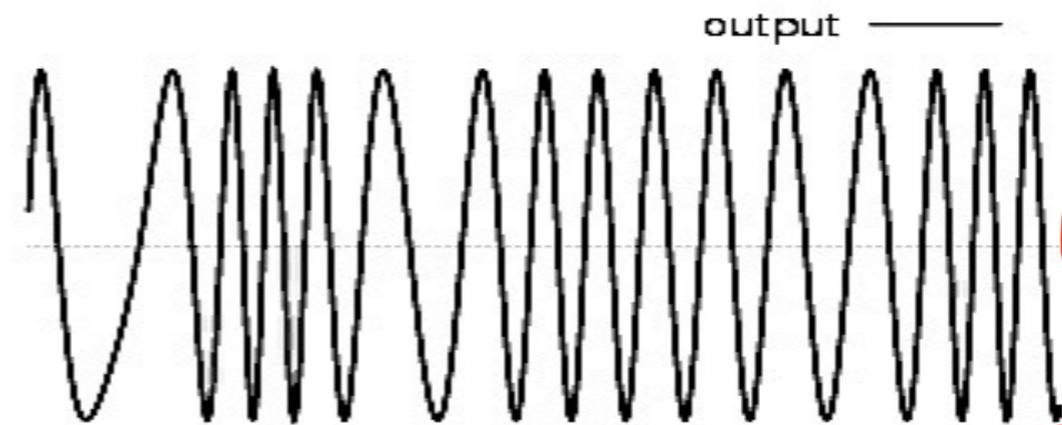
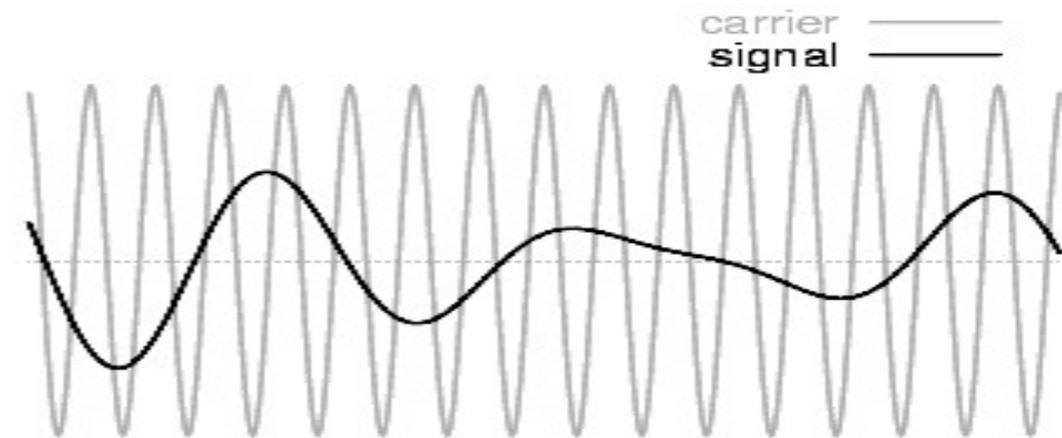
$$f_F(t) = a \sin(2\pi s(t)t + \phi)$$

- Analoges Signal

- Frequency Modulation (FM)
- Kontinuierliche Funktion in der Zeit

- Digitales Signal

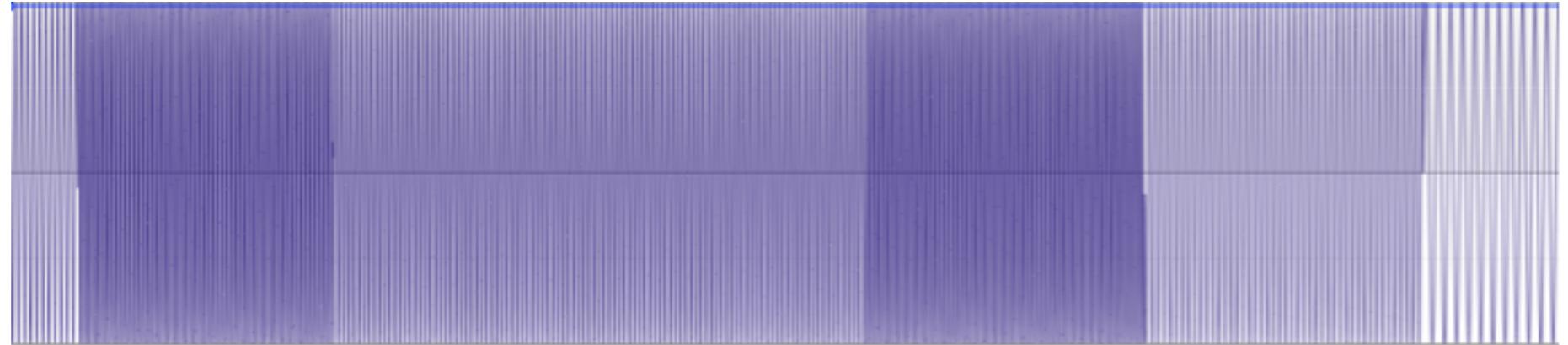
- Frequency Shift Keying (FSK)
- Z.B. durch Symbole gegeben als Frequenzen



2  
0

Bluetooth  
ULE

- frequenz-  
modulierte  
Sinuskurve

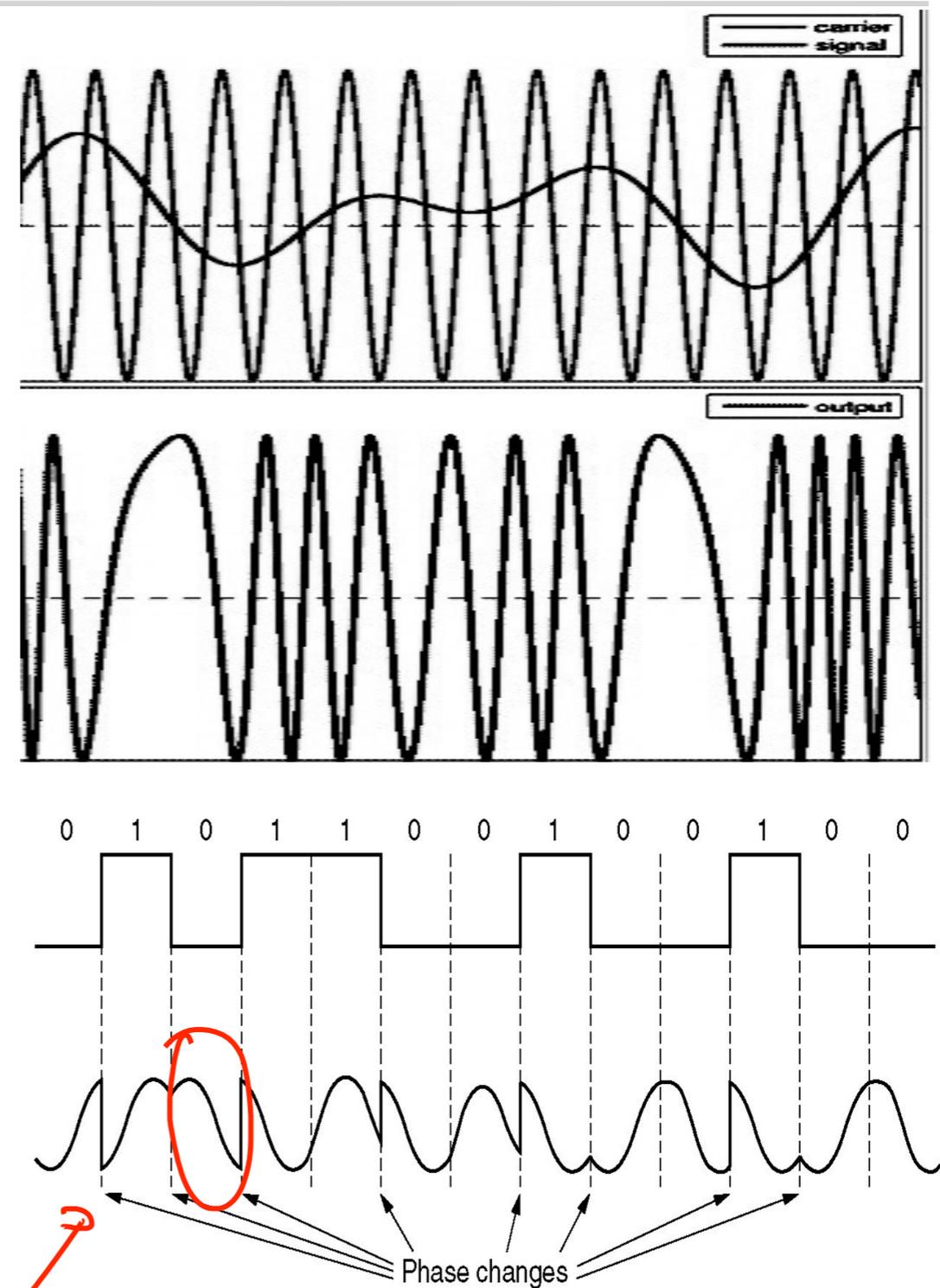




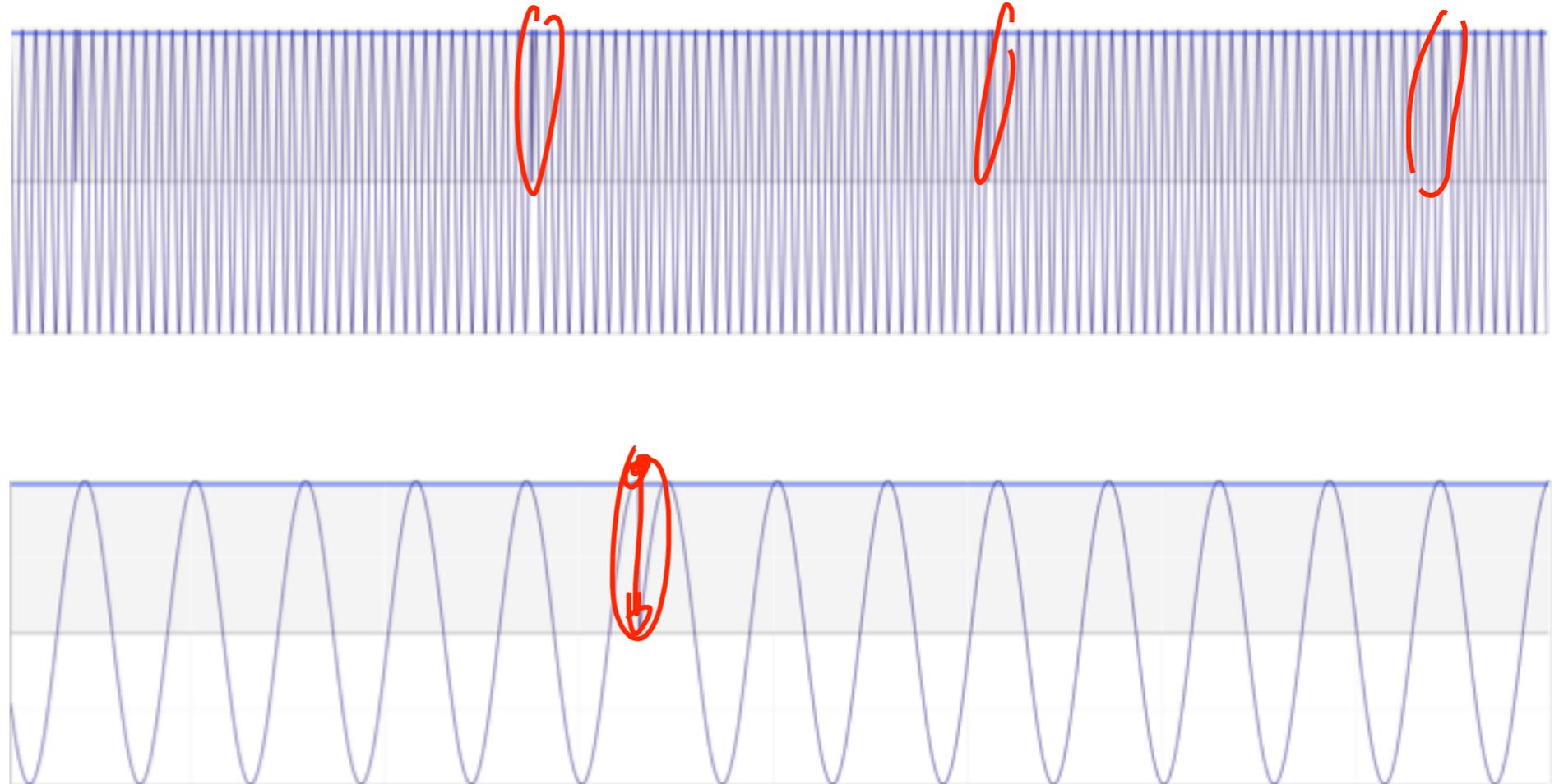
- Das zeitvariable Signal  $s(t)$  wird in der Phase der Sinuskurve kodiert:

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

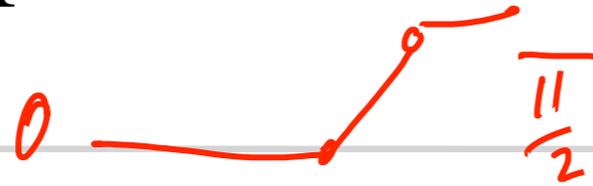
- Analoges Signal
  - Phase Modulation (PM)
  - Sehr ungünstige Eigenschaften
  - Wird nicht eingesetzt
- Digitales Signal
  - Phase-Shift Keying (PSK)
  - Z.B. durch Symbole gegeben als Phasen



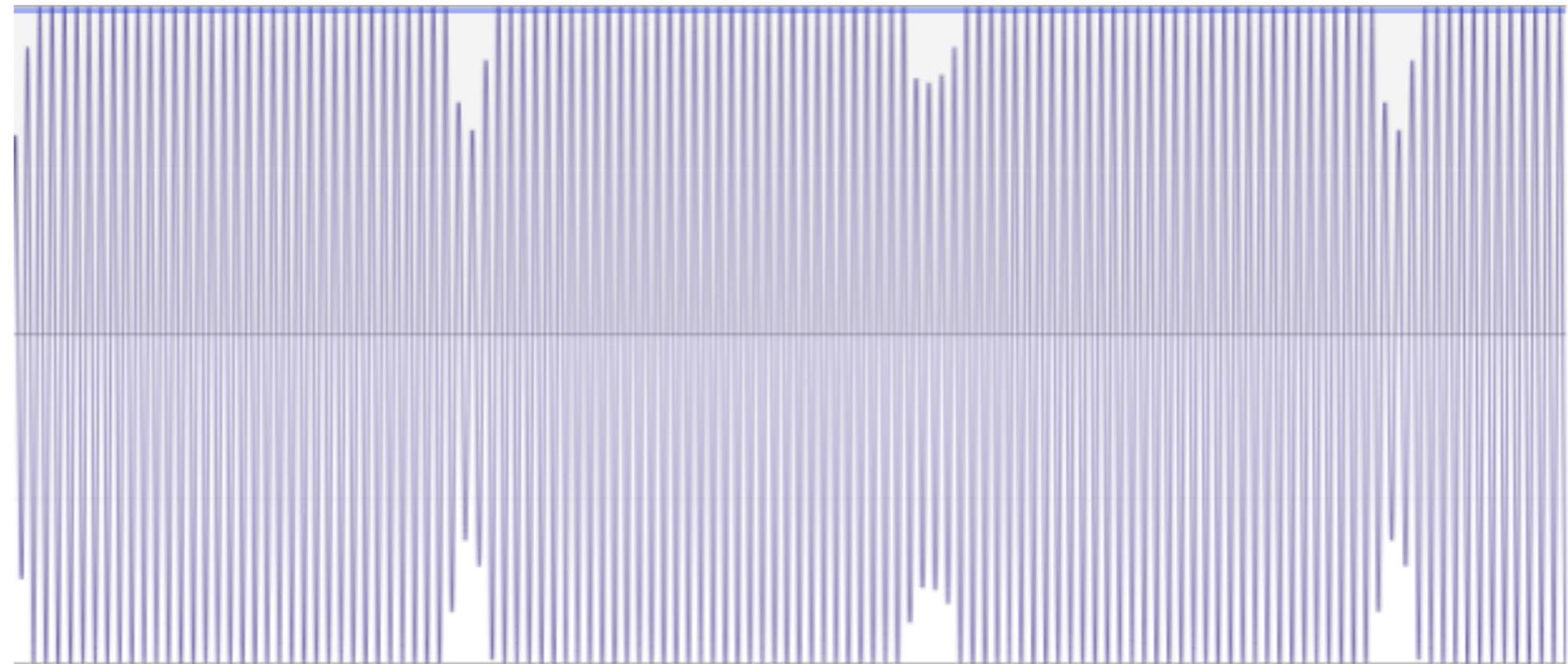
- phasen-  
modulierte  
Sinuskurve



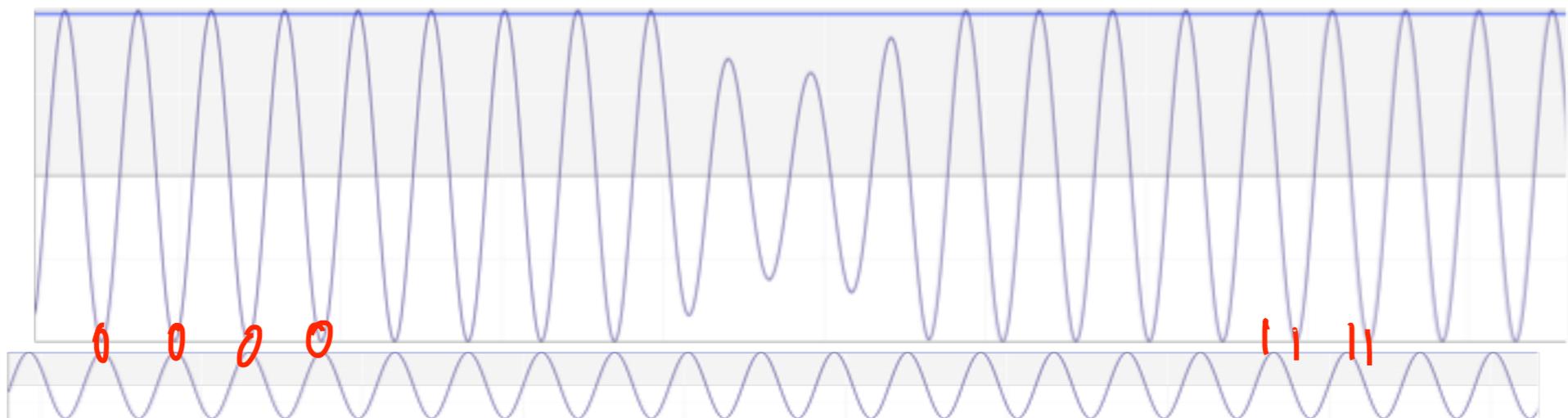
# Hörbeispiel



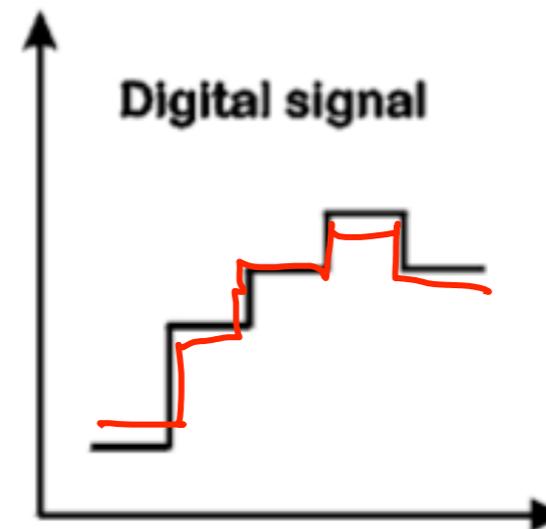
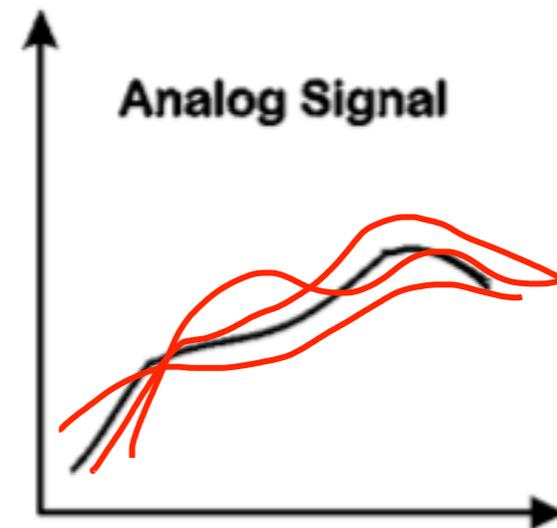
- phasen-  
modulierte  
Sinuskurve
- mit glatten  
Übergang



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 Empfangungenauigkeiten 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

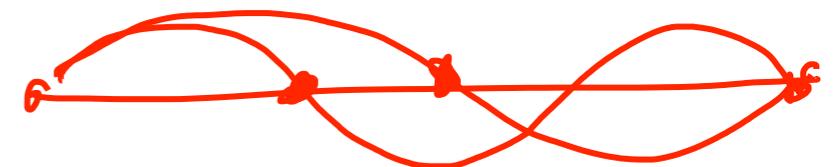
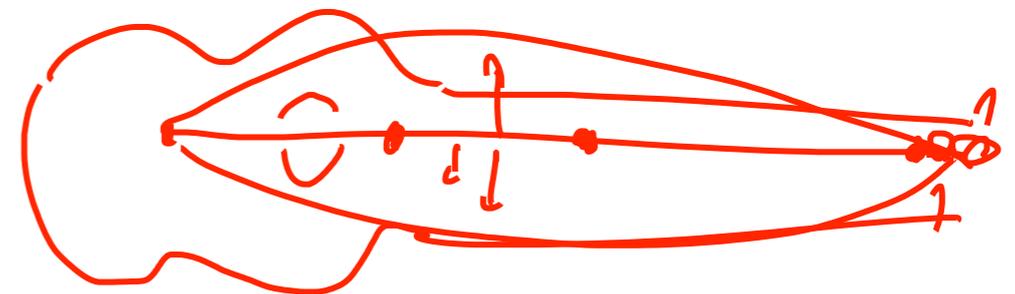
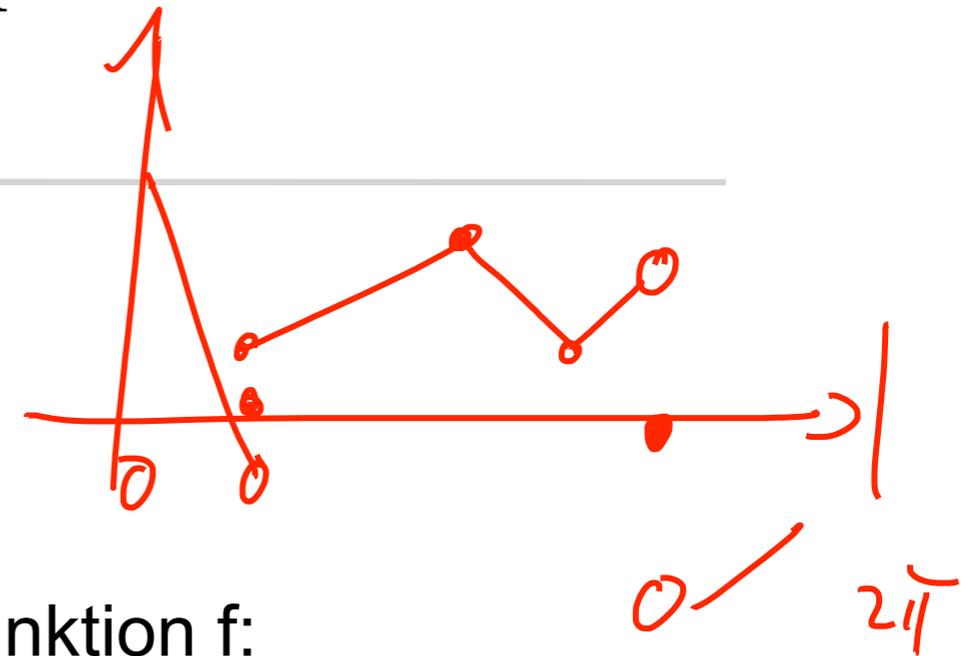
- Dirichletsche Bedingungen einer periodischen Funktion  $f$ :

- $f(x) = f(x+2\pi)$
- $f(x)$  is 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:

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



Octave  $\times 2$

Quint  $\times 3/2$

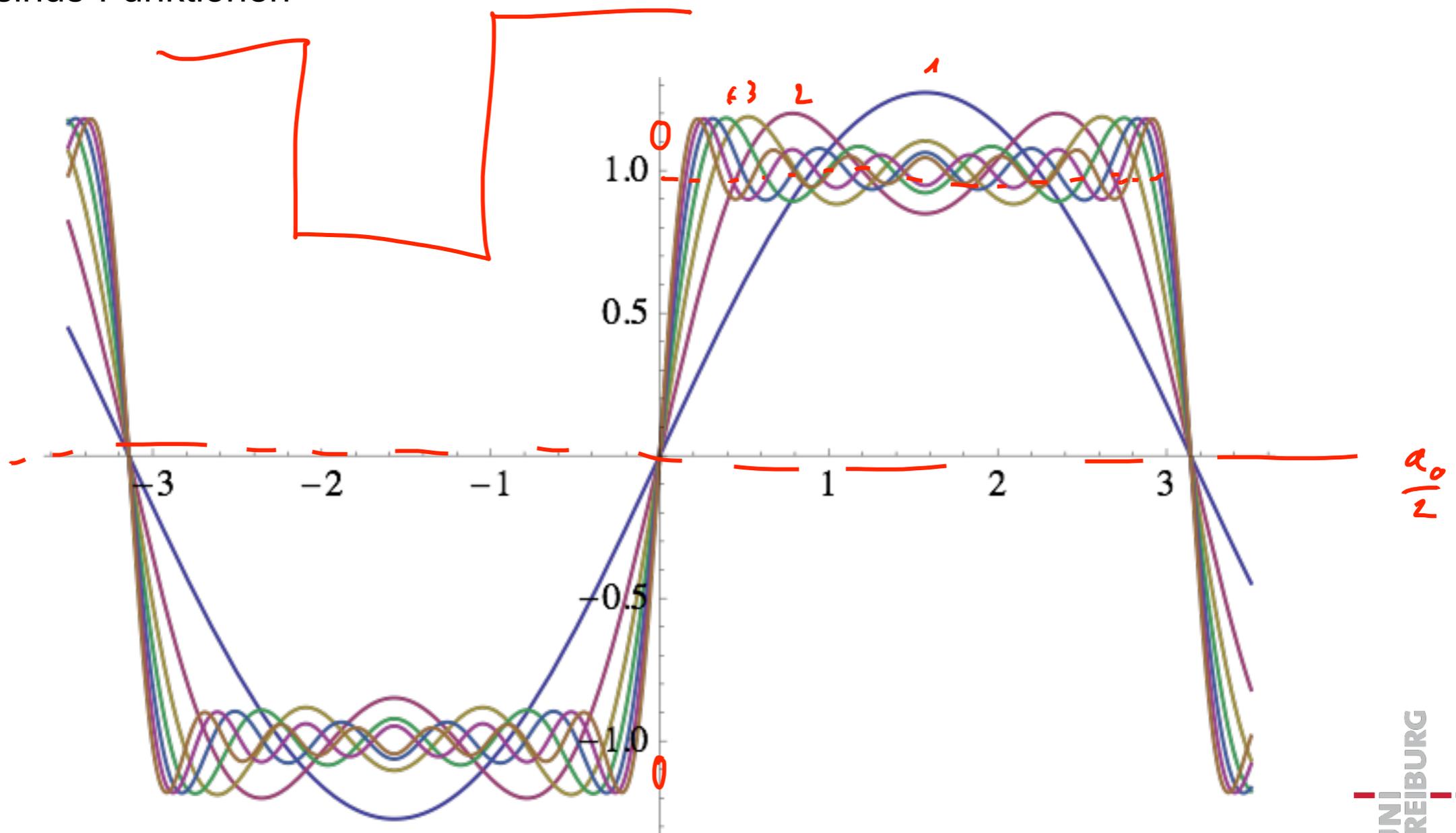
Terz  $\times 5/4$

# Fouriertransformation

Fouriertransformation einer periodischen Funktion:

- Zerlegung in verschiedene
- Sinus/Cosinus-Funktionen

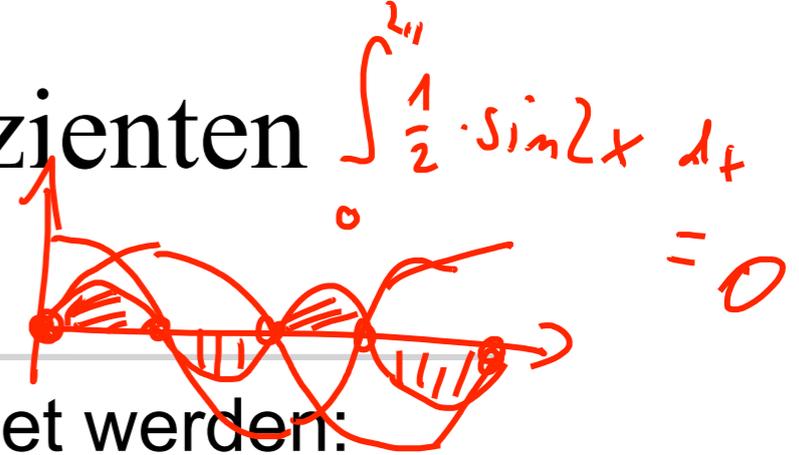
$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n a_k \cos kx + b_k \sin kx = f(x)$$



# Berechnung der Fourierkoeffizienten



$\cos x \cdot \sin x$



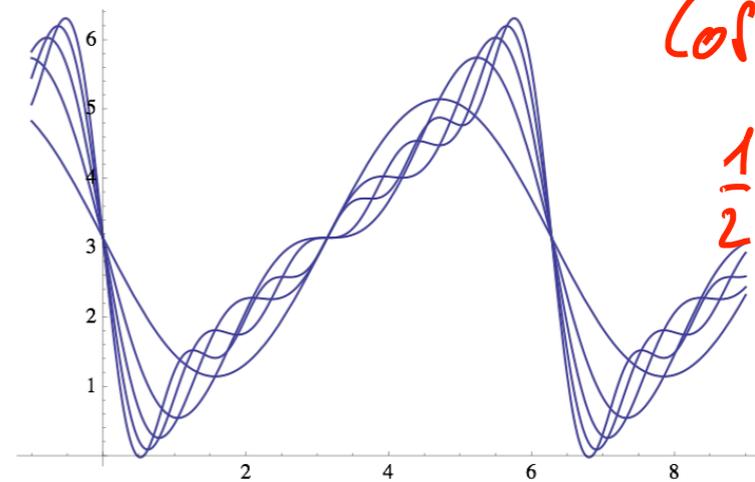
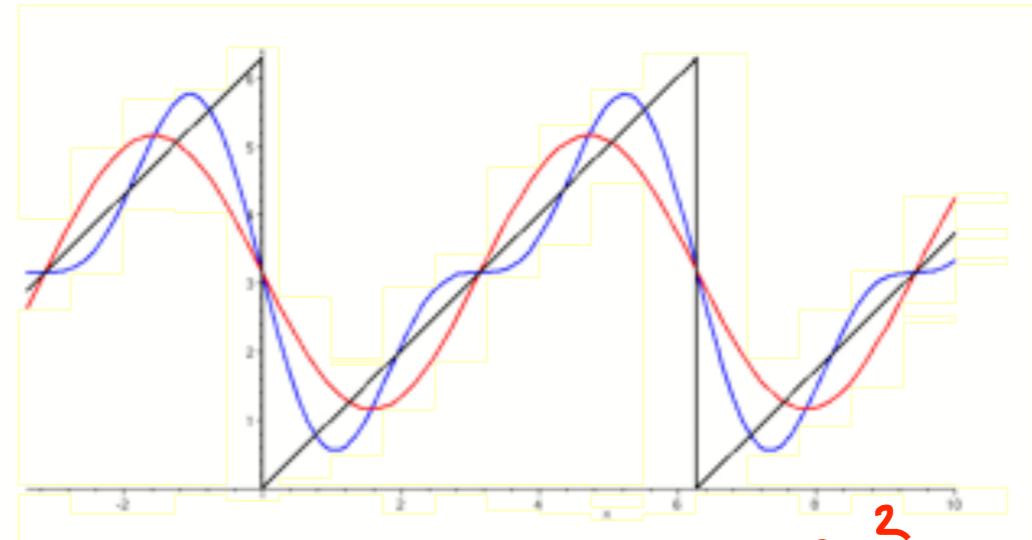
Die Fourierkoeffizienten  $a_i, b_i$  können wie folgt berechnet werden:

- Für  $k = 0, 1, 2, \dots$

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

- Für  $k = 1, 2, 3, \dots$

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



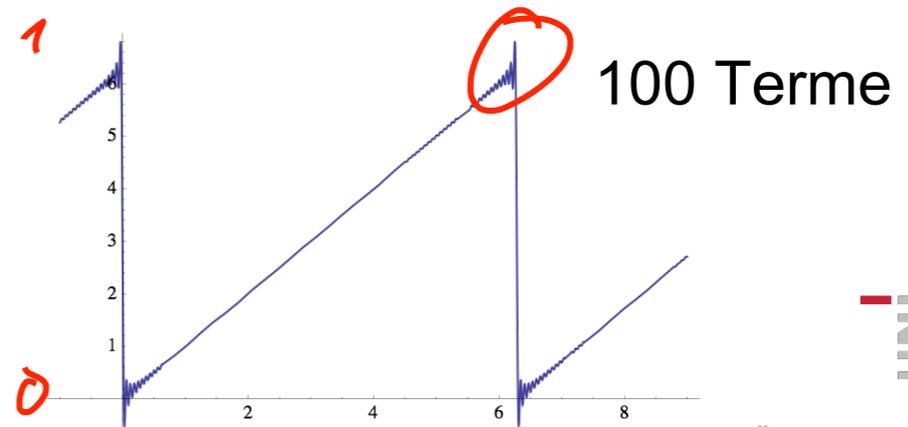
$\cos^2 x =$

$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2x$

Beispiel: Sägezahnkurve

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

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

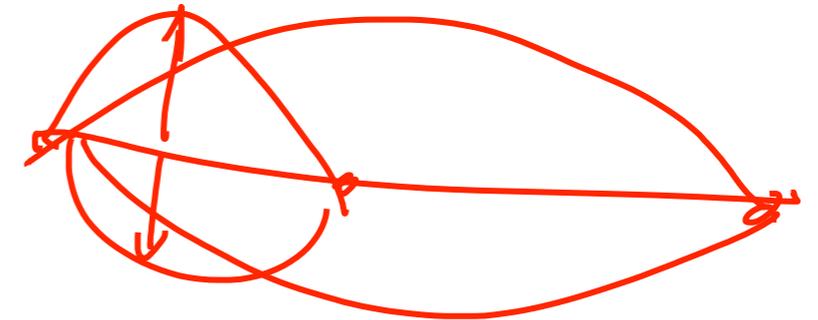


- Der Satz von Fourier für Periode  $T=1/f$ :
  - Die Koeffizienten  $c$ ,  $a_n$ ,  $b_n$  ergeben sich dann wie folgt

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

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

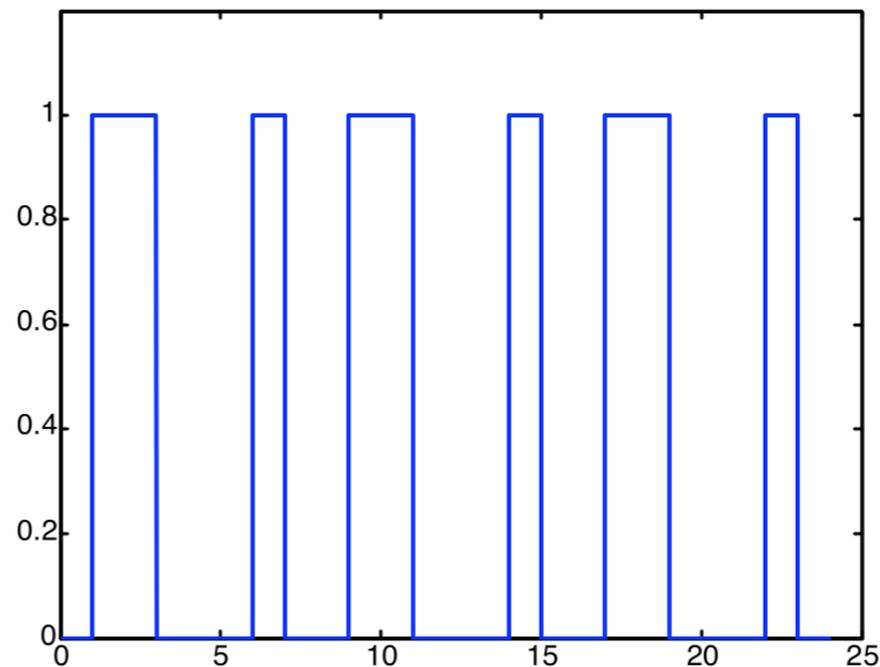
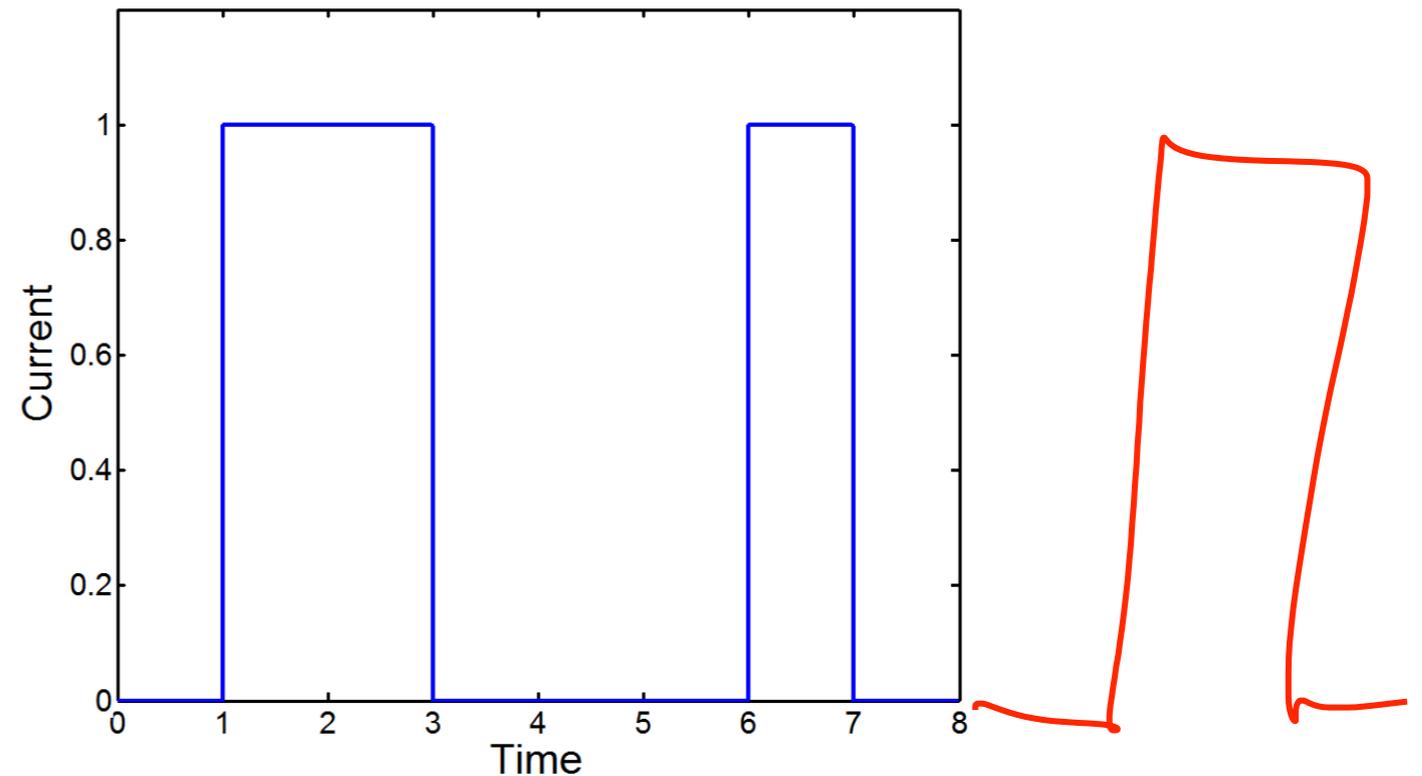
$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \sin(2\pi k f t) dt$$



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

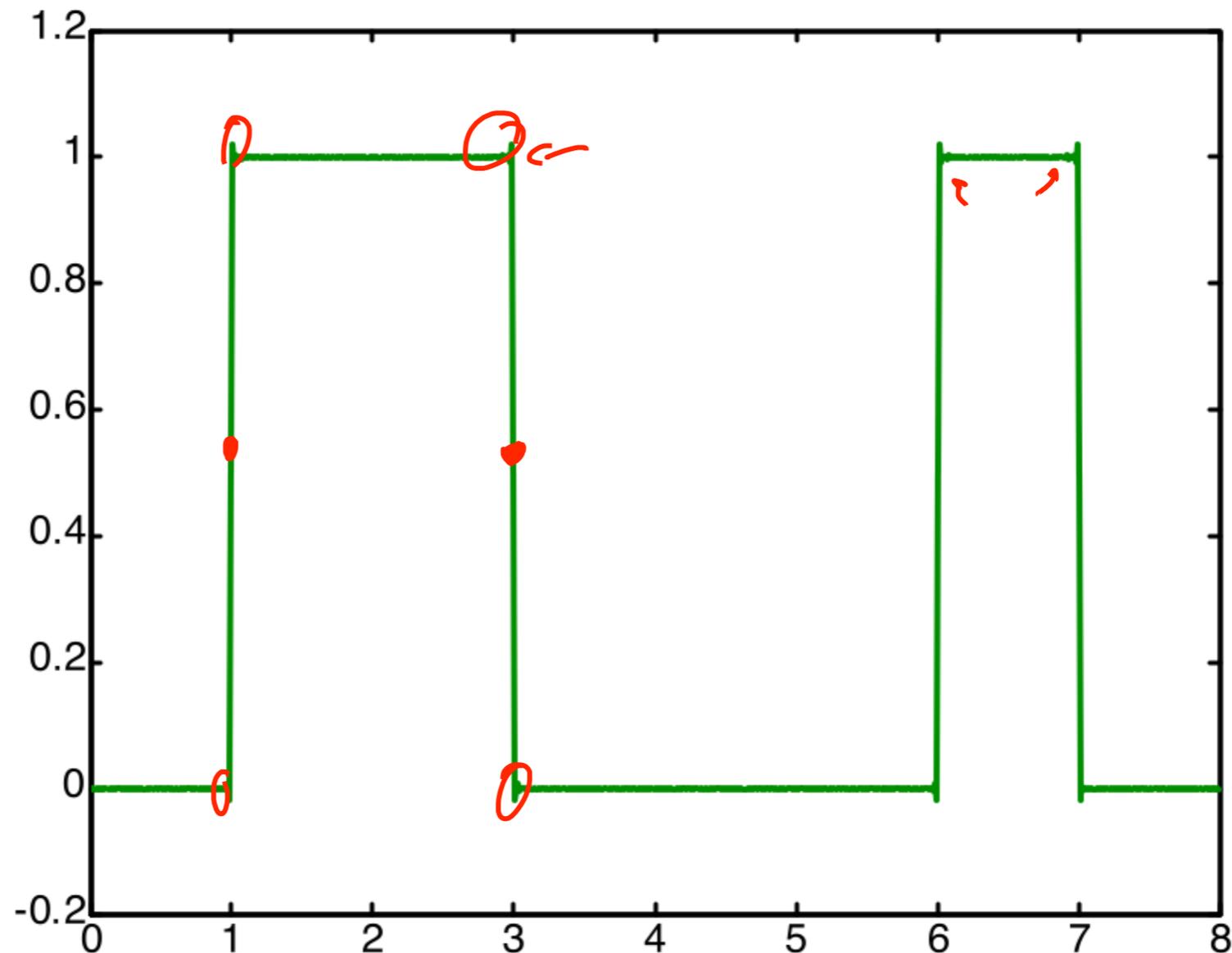
$$(a_k)^2 + (b_k)^2$$

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



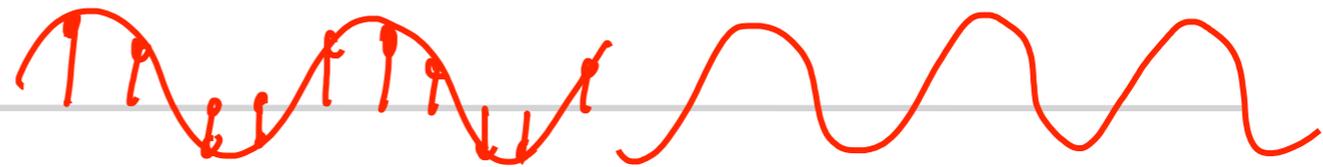
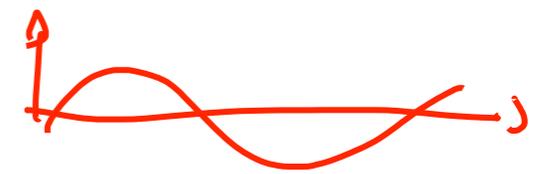
(aus Vorlesung von Holger Karl)

- Fourier-Analyse mit 512 Termen:

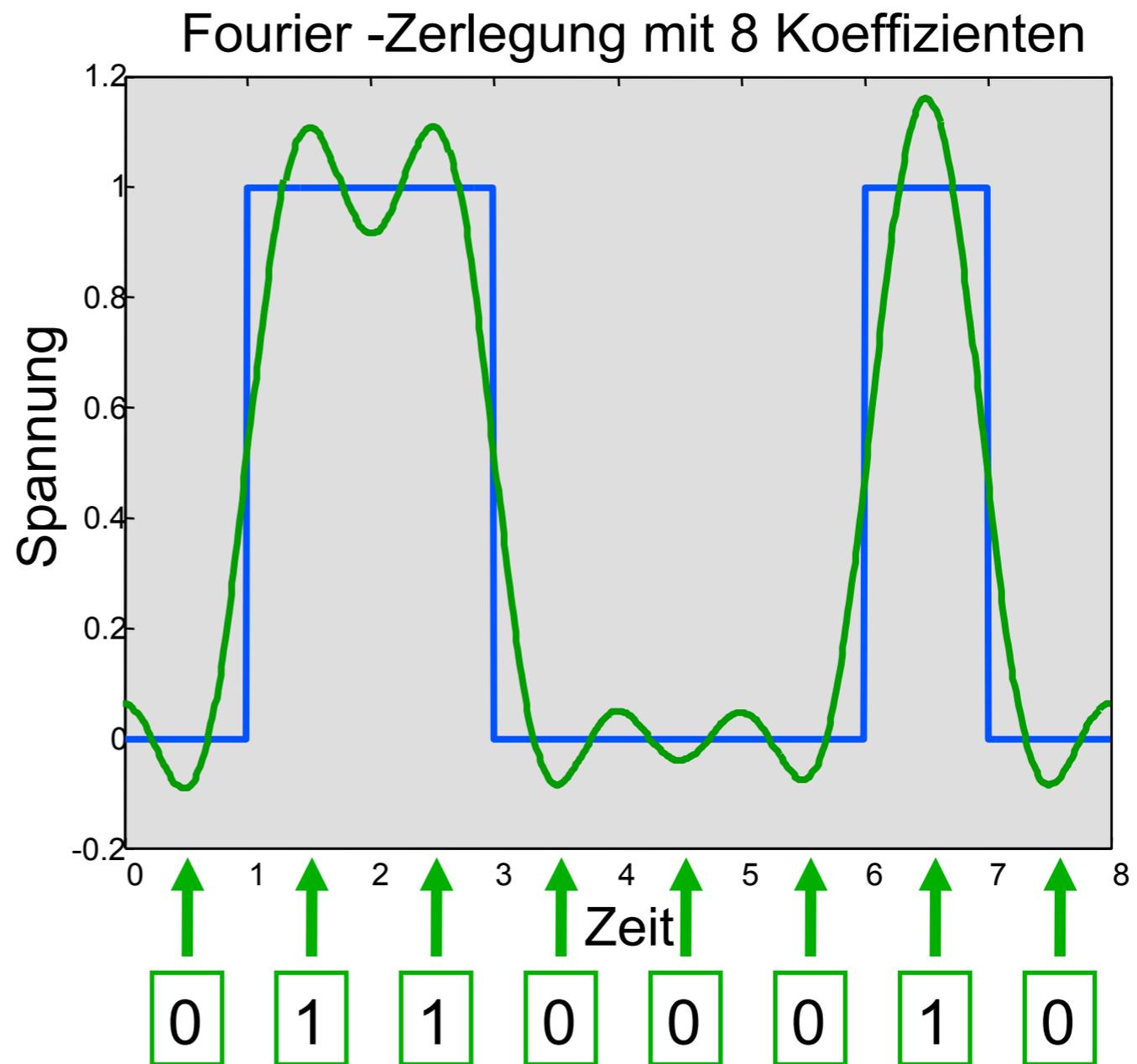


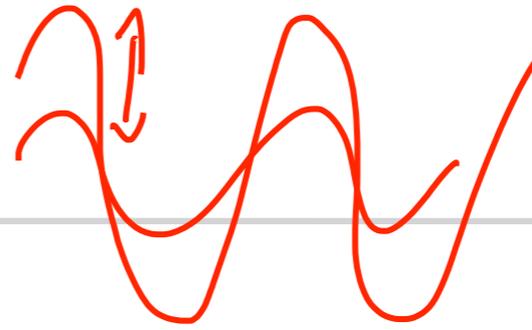
(aus Vorlesung von Holger Karl)

# 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 bandbegrenztes 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

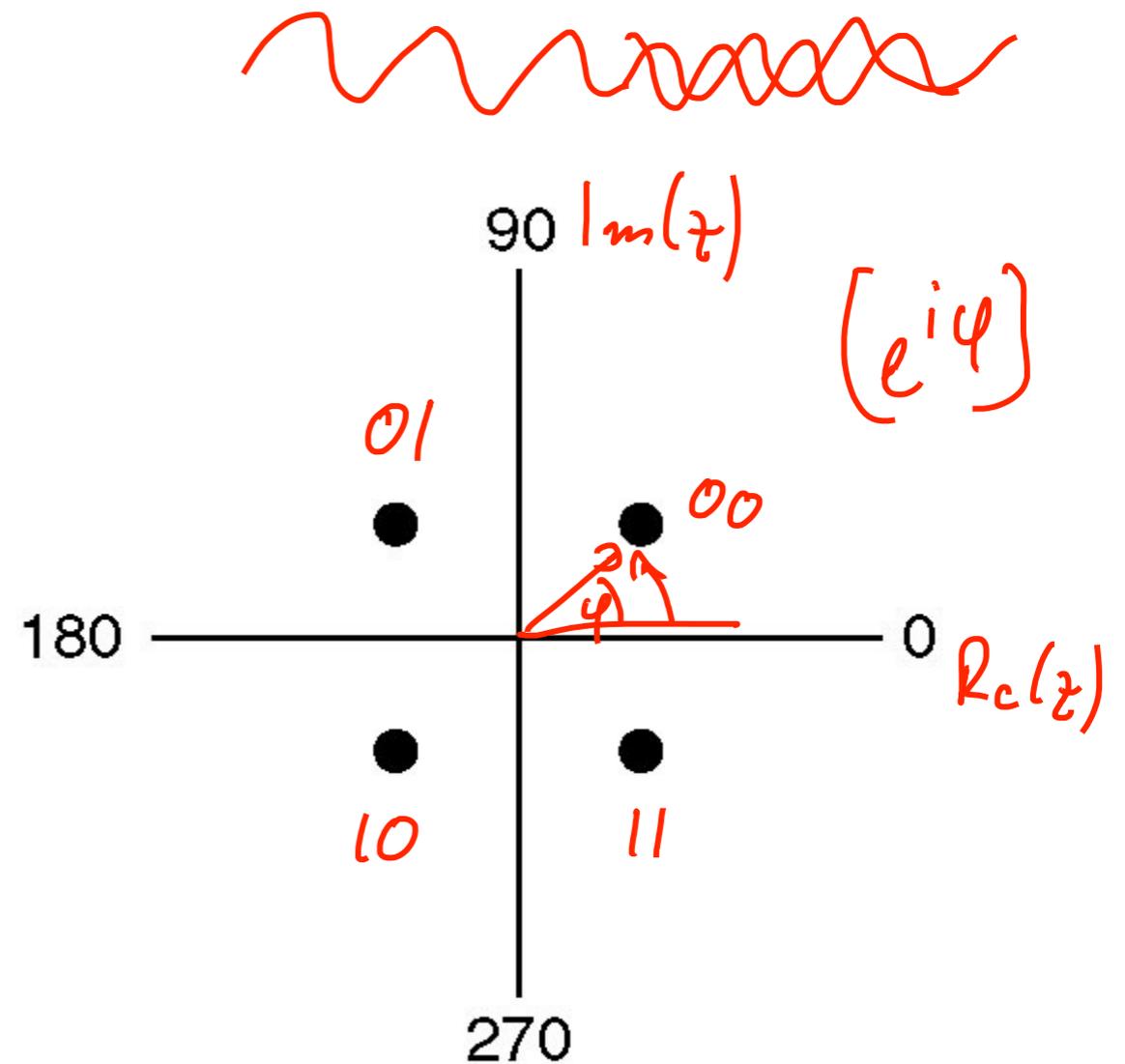
- Die maximal mögliche Symbolrate ist höchstens  $2 H$  baud.
- Die maximal mögliche Datenrate ist höchstens  $2 H \log_2 V$  bit/s.

# 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

