

Systeme II

2. Die physikalische Schicht

Christian Schindelhauer

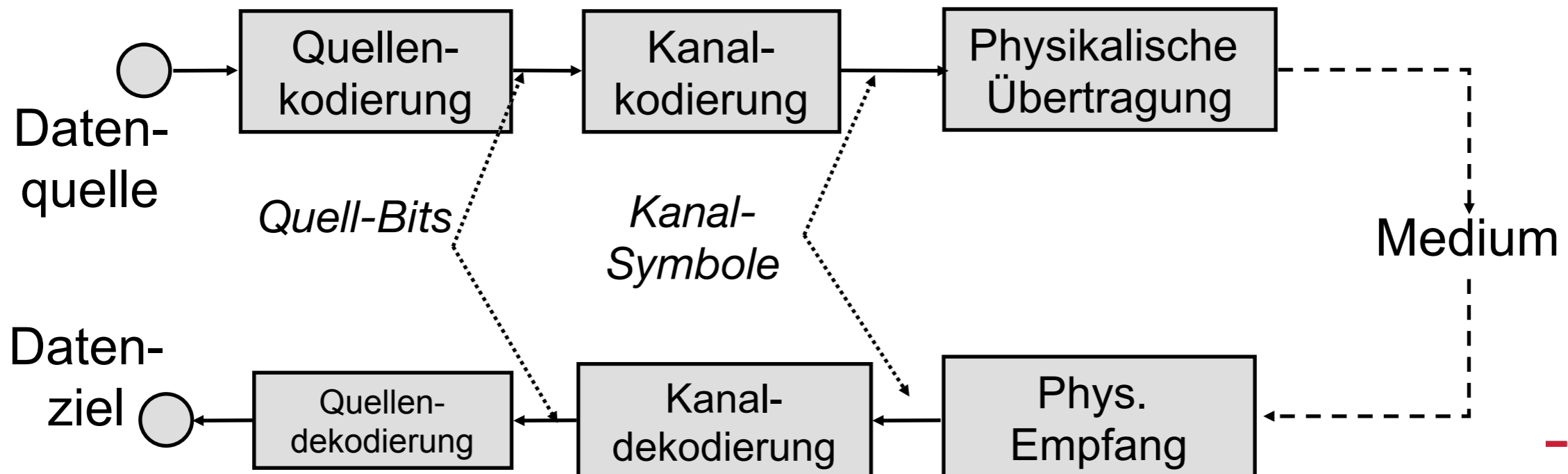
Technische Fakultät

Rechnernetze und Telematik

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

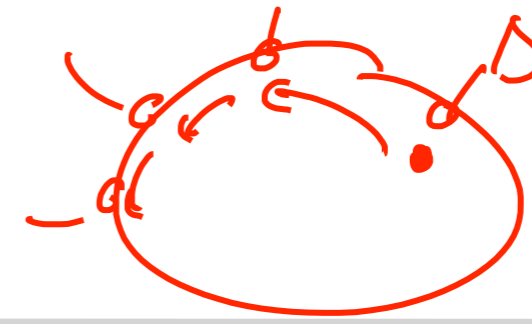
Version 14.05.2014

- 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

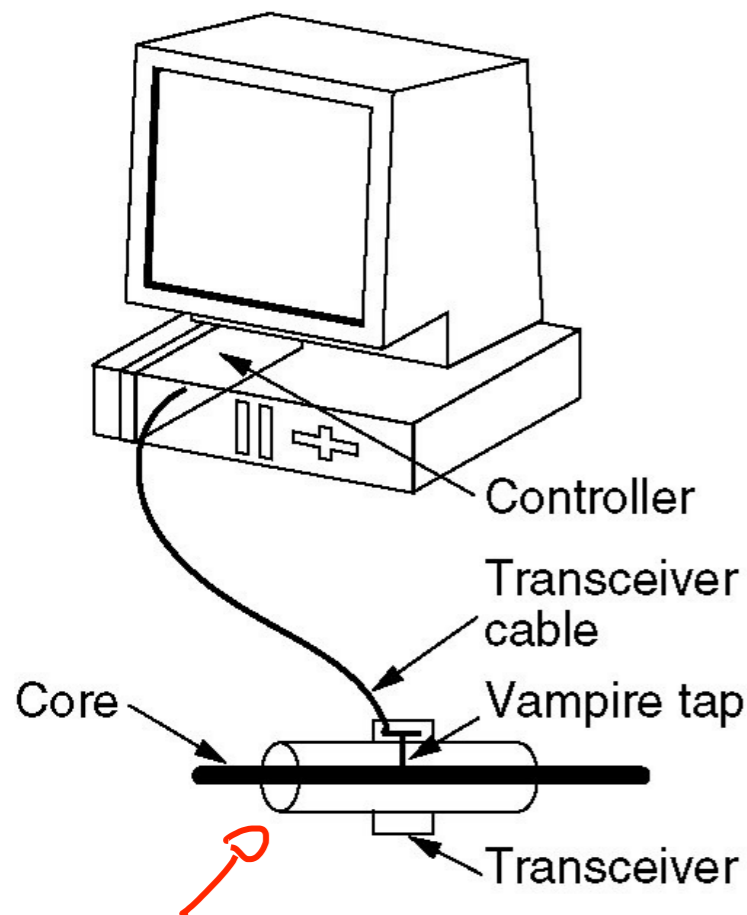


- Beispiel aus der Praxis mit Mediumzugriff:
Ethernet
 - IEEE Standard 802.3
- Punkte im Standard
 - Verkabelung
 - Bitübertragungsschicht
 - Sicherungsschicht mit Mediumzugriff

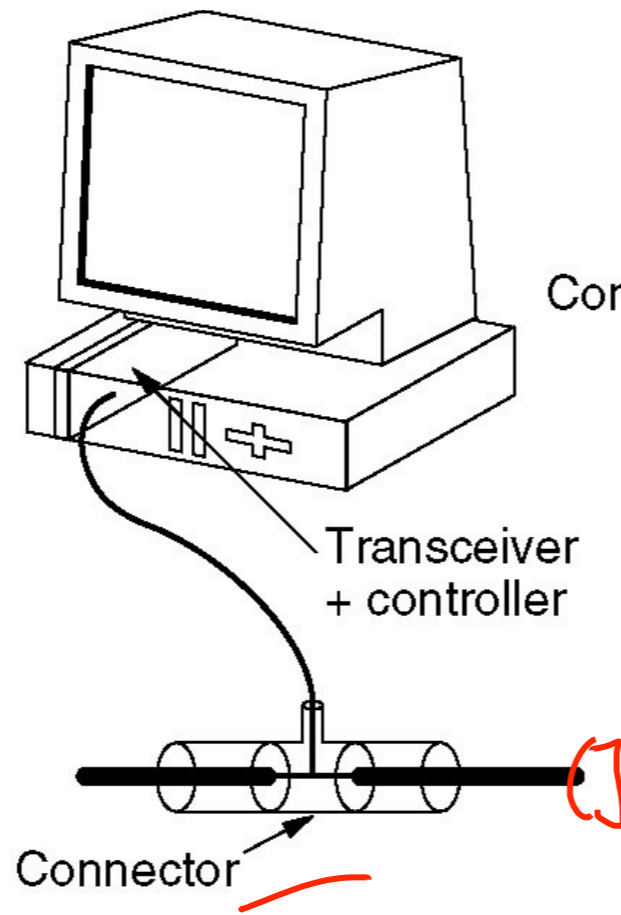
Ethernet cabling



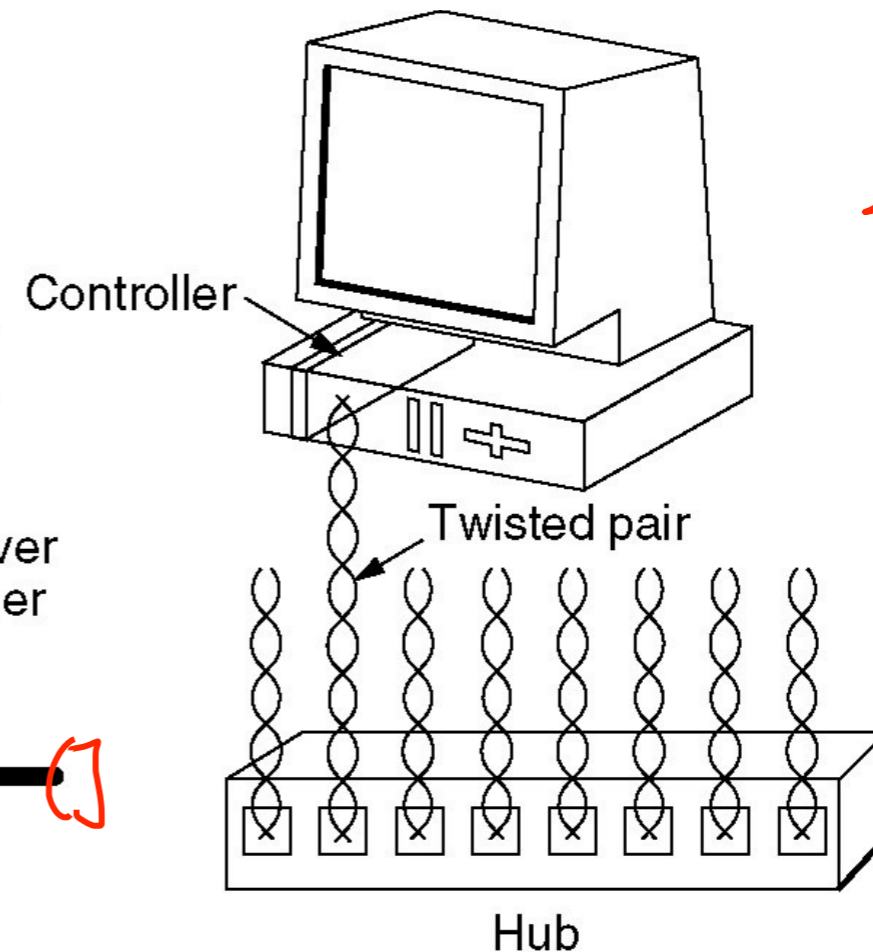
Name	Cable	Max. seg.	Nodes/seg.	Advantages
10Base5	Thick coax	500 m	100	Original cable; now obsolete
10Base2	Thin coax	185 m	30	No hub needed
10Base-T	Twisted pair	100 m	1024	Cheapest system
10Base-F	Fiber optics	2000 m	1024	Best between buildings



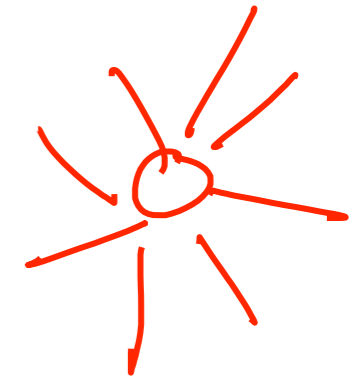
10Base5



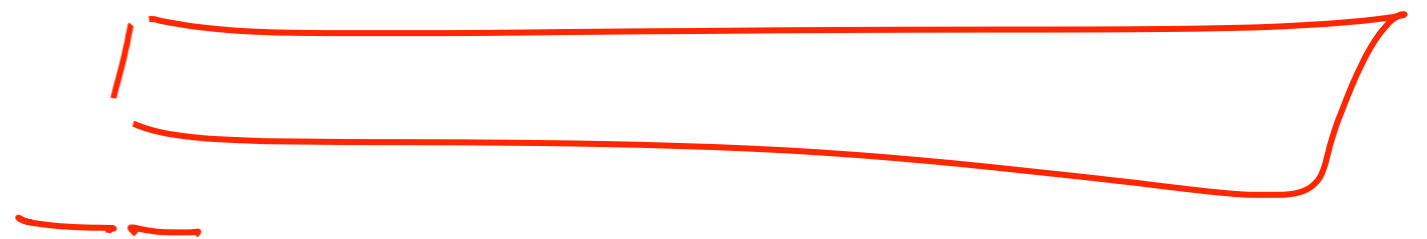
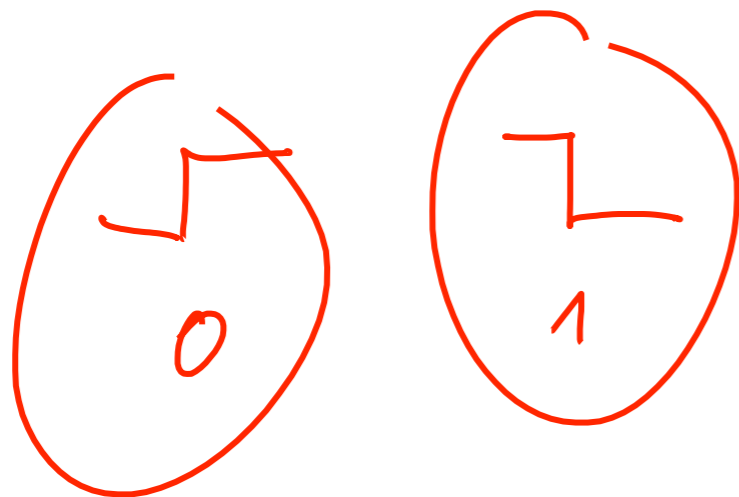
10Base2



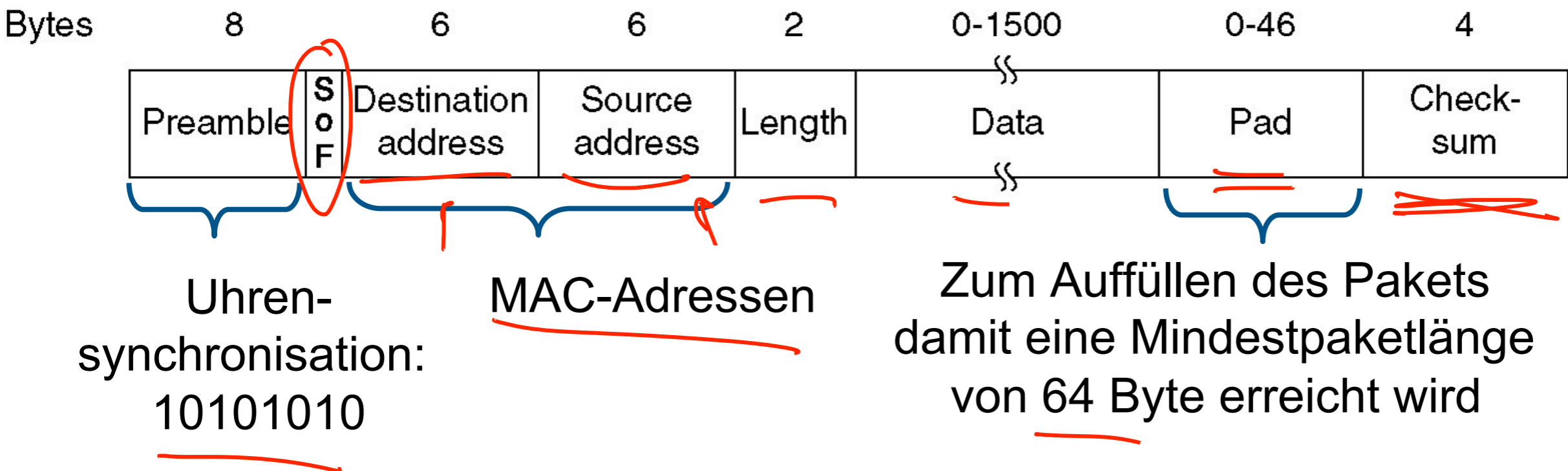
10BaseT



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



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



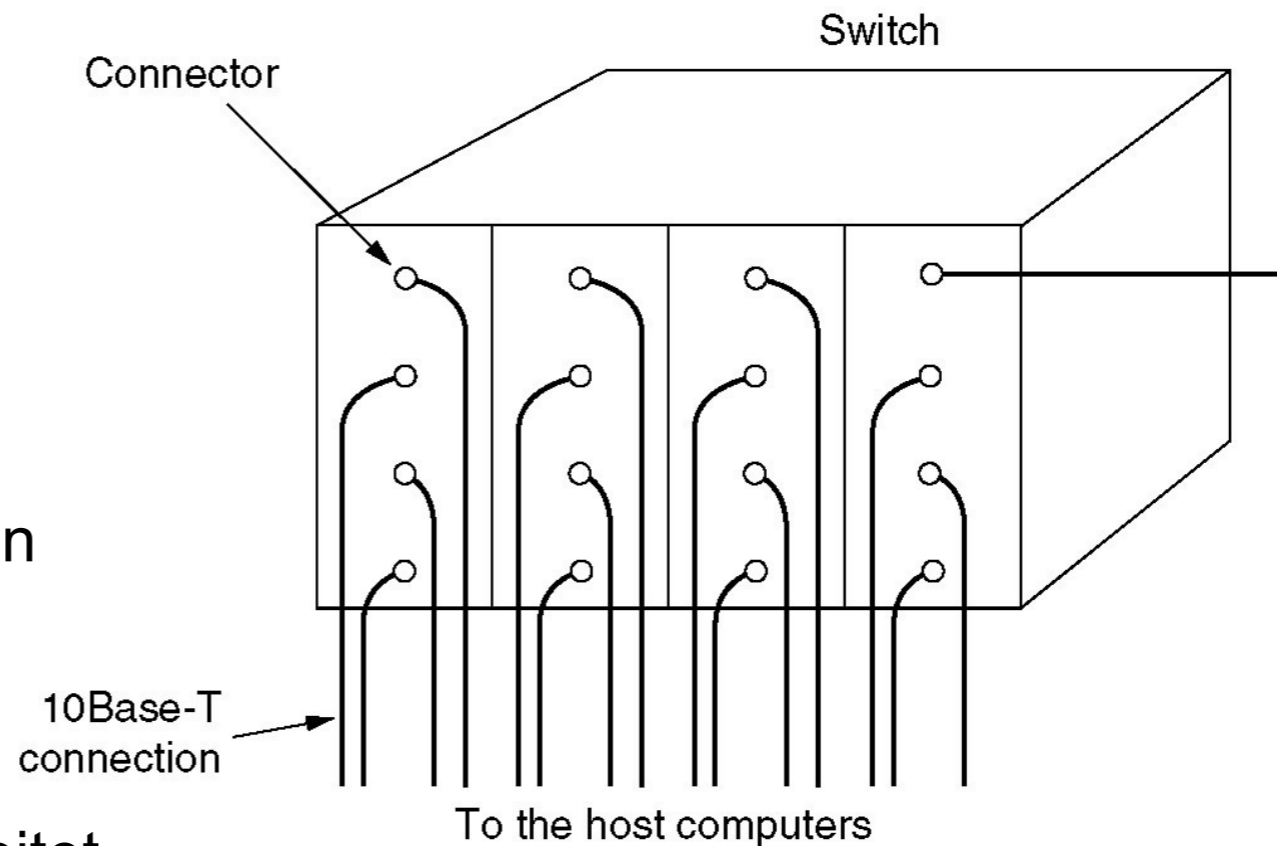
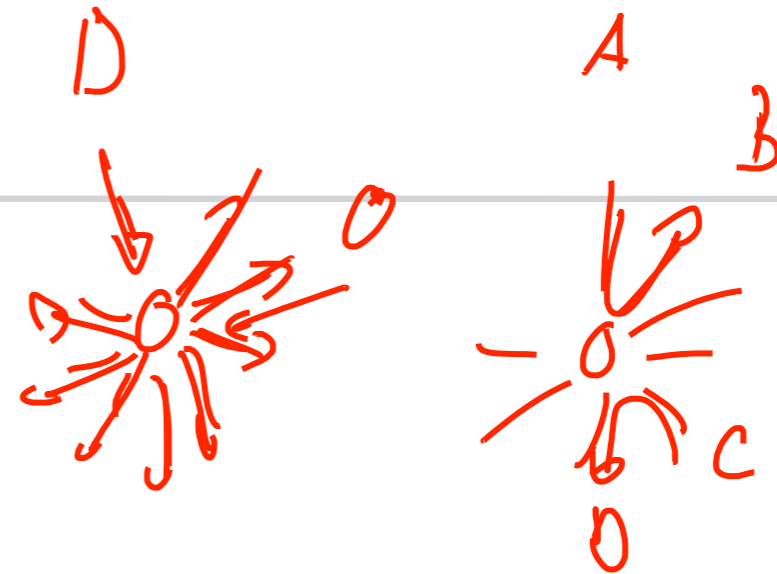
Switch versus Hub

■ 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

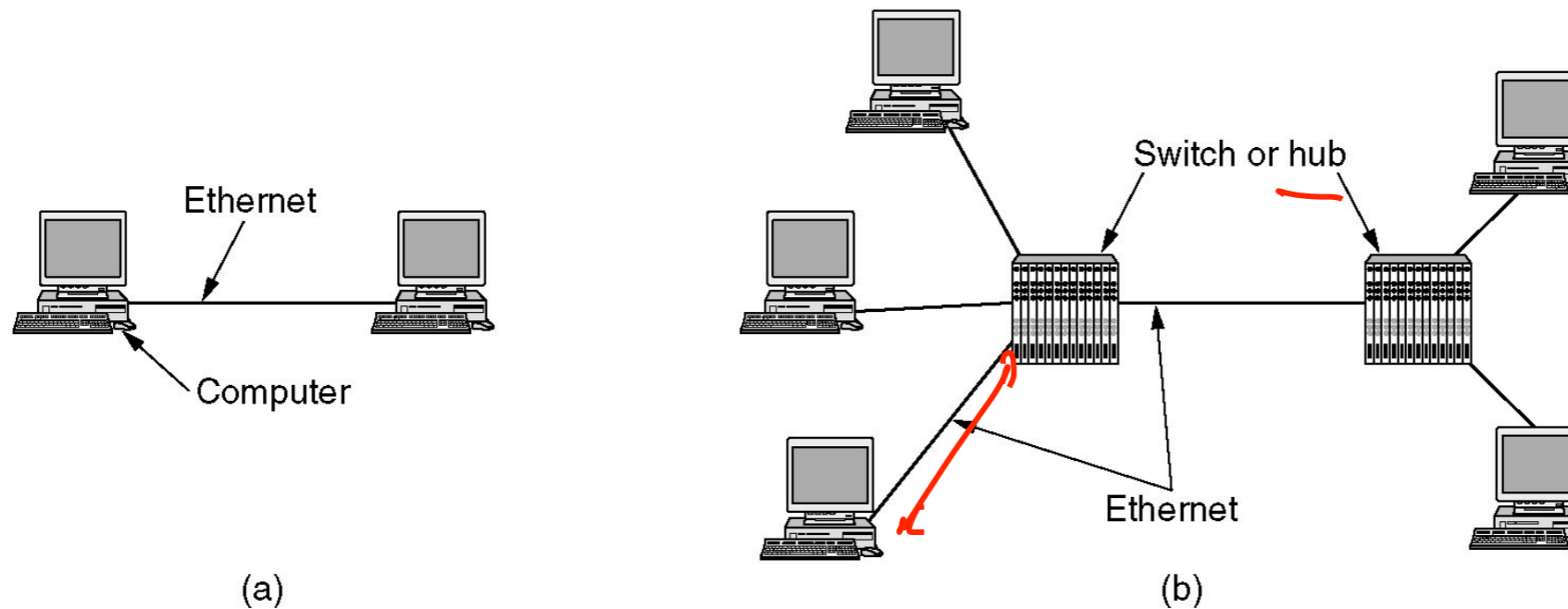


- Ursprünglich erreichte Ethernet 10 MBit/s
- 1992: Fast Ethernet
 - Ziele: Rückwärtskompatibilität
 - Resultat: 802.3u
- Fast Ethernet
 - Frame-Format ist gleichgeblieben
 - Bit-Zeit wurde von 100 ns auf 10 ns reduziert
 - Dadurch verkürzt sich die maximale Kabellänge (und die minimale Paket-Größe steigt).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

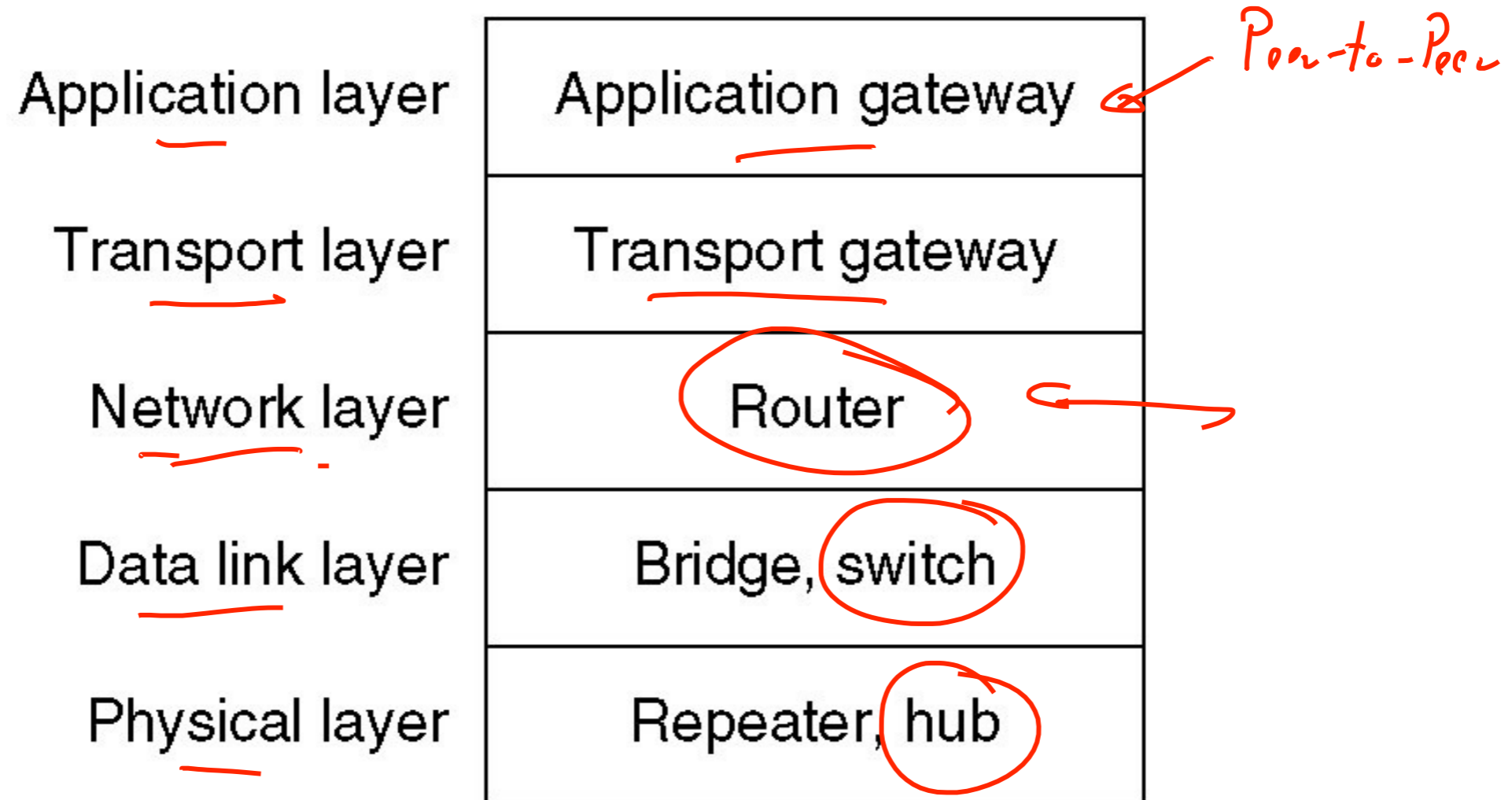


- Mit Switch
 - Keine Kollisionen! CSMA/CD unnötig
 - Erlaubt full-duplex für jeden Link
- Mit Hub
 - Kollisionen, nur Halb-Duplex (d.h. abwechselnd Simplex), CSMA/CD
 - Kabellängen auf 25 m reduziert

Gigabit Ethernet – Cabling

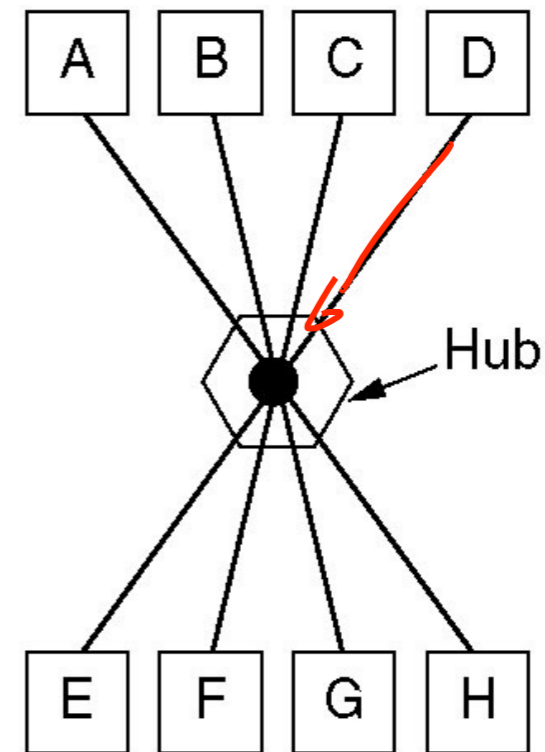
Name	Cable	Max. segment	Advantages
1000Base-SX	Fiber optics ↪	550 m	Multimode fiber (50, 62.5 microns)
1000Base-LX	Fiber optics ↪	5000 m	Single (10 μ) or multimode (50, 62.5 μ)
1000Base-CX	2 Pairs of STP	25 m	Shielded twisted pair
1000Base-T	4 Pairs of UTP	100 m	Standard category 5 UTP

Verbinden von LANs

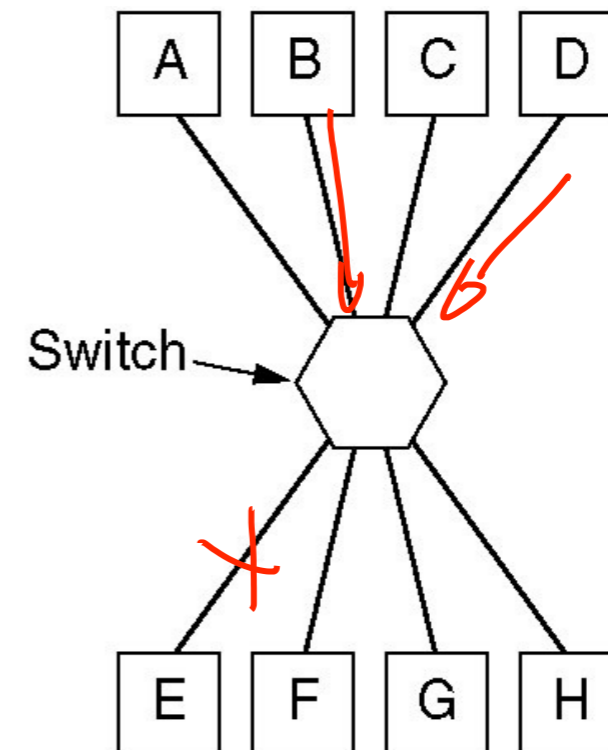


- Signalregenerator
 - Empfängt Signal und bereitet es auf
 - Nur das elektrische und optische Singal wird aufbereitet
 - Information bleibt unbeeinflusst
- Bitübertragungsschicht
- Repeater teilen das Netz in physische Segmente
 - logische Topologieen bleiben erhalten

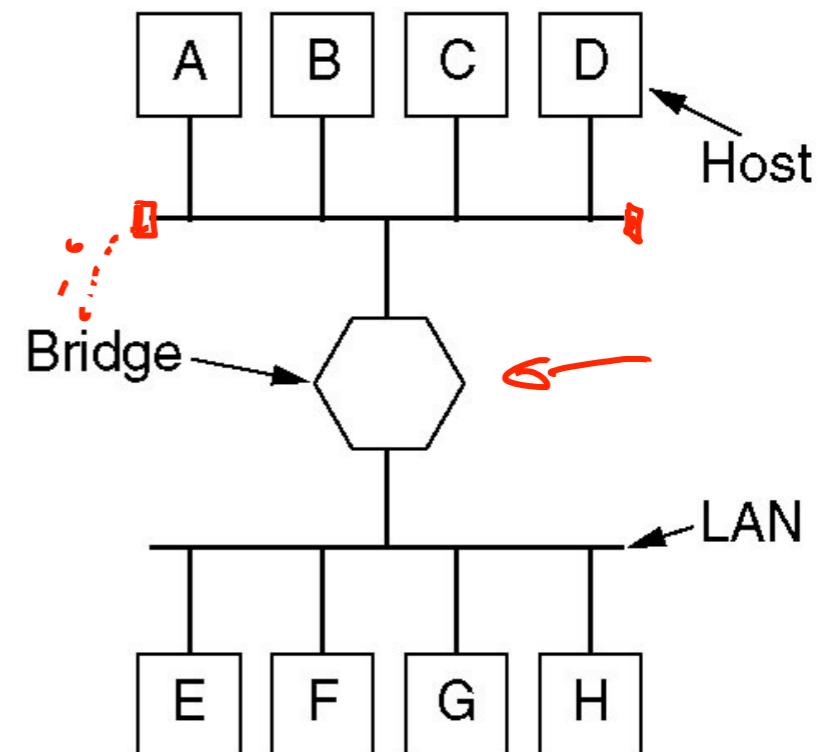
- Verbindet sternförmig Netzsegmente
 - im Prinzip wie ein Repeater
 - Signale werden auf alle angebundenen Leitungen verteilt
- Bitübertragungsschicht
 - Information und Logik der Daten bleibt unberücksichtigt
 - Insbesondere für Kollisionen



- 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

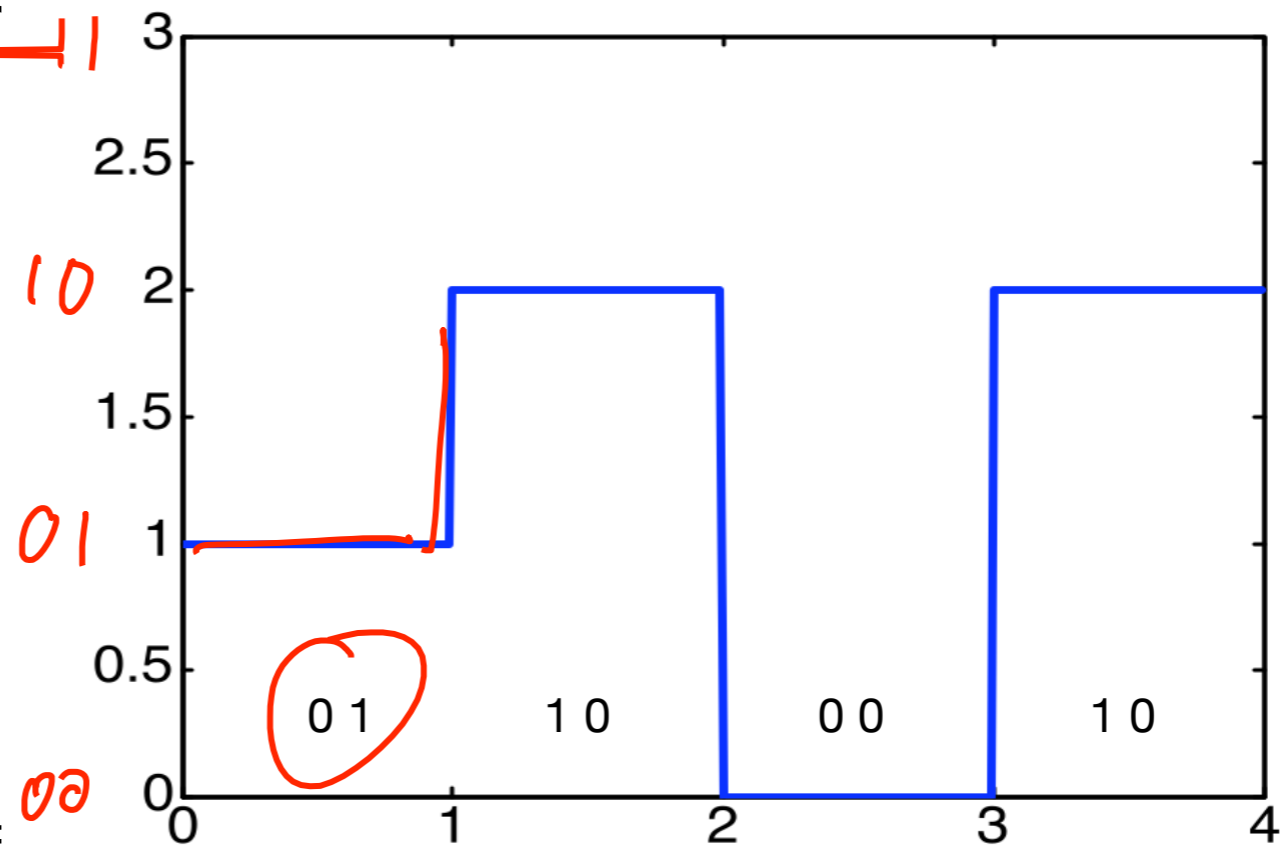


- Verbindet zwei lokale Netzwerke
 - im Gegensatz zum Switch (dort nur Terminals)
 - trennt Kollisionen
- Sicherungsschicht
 - Weitergabe an die andere Seite, falls die Ziel-Adresse aus dem anderen Netzwerk bekannt ist oder auf beiden Seiten noch nicht gehört wurde
 - Nur korrekte Frames werden weitergereicht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



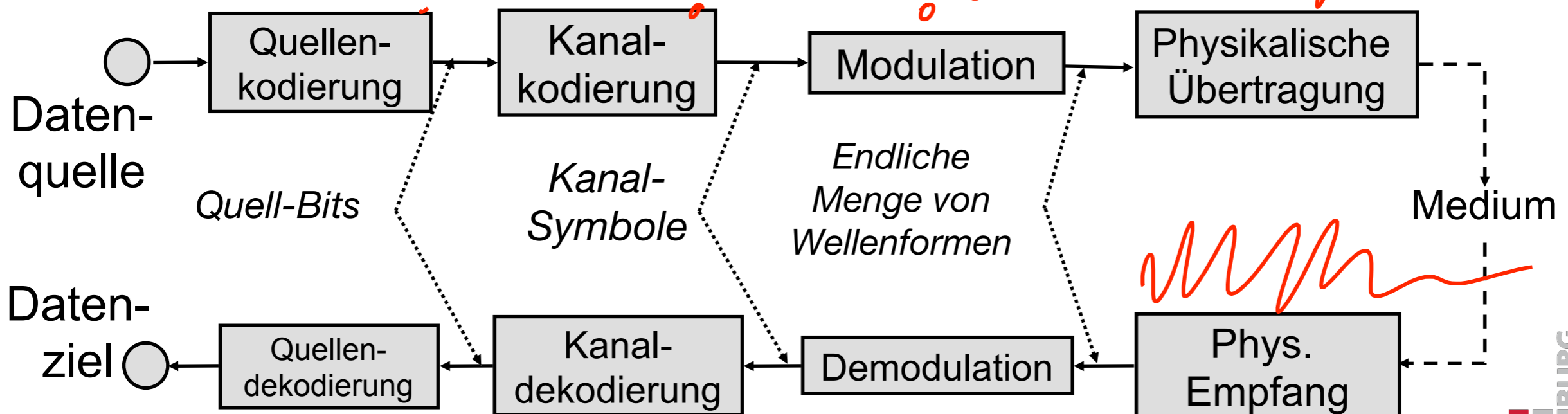
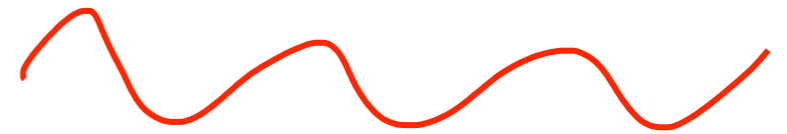
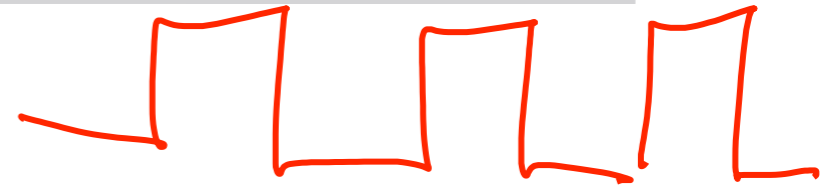
$$16 = 2^4$$

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**

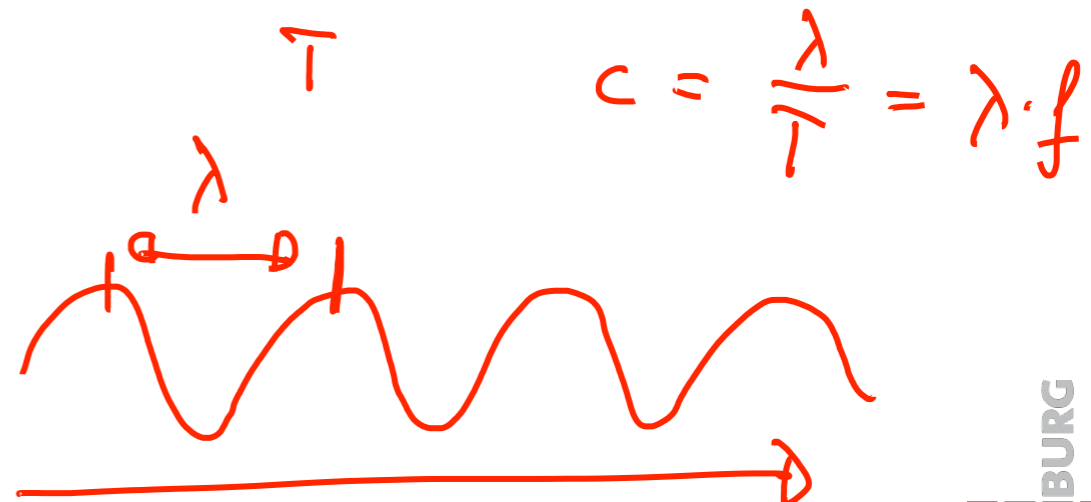
- λ : Distanz (in Metern) zwischen zwei Wellenmaxima
- Durch Antennen können elektro-magnetische Wellen erzeugt und empfangen werden
- Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von elektro-magnetischen Wellen im Vakuum ist konstant:

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

- Zusammenhang:

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

$$\lambda \cdot f = c$$



$\sin(t)$

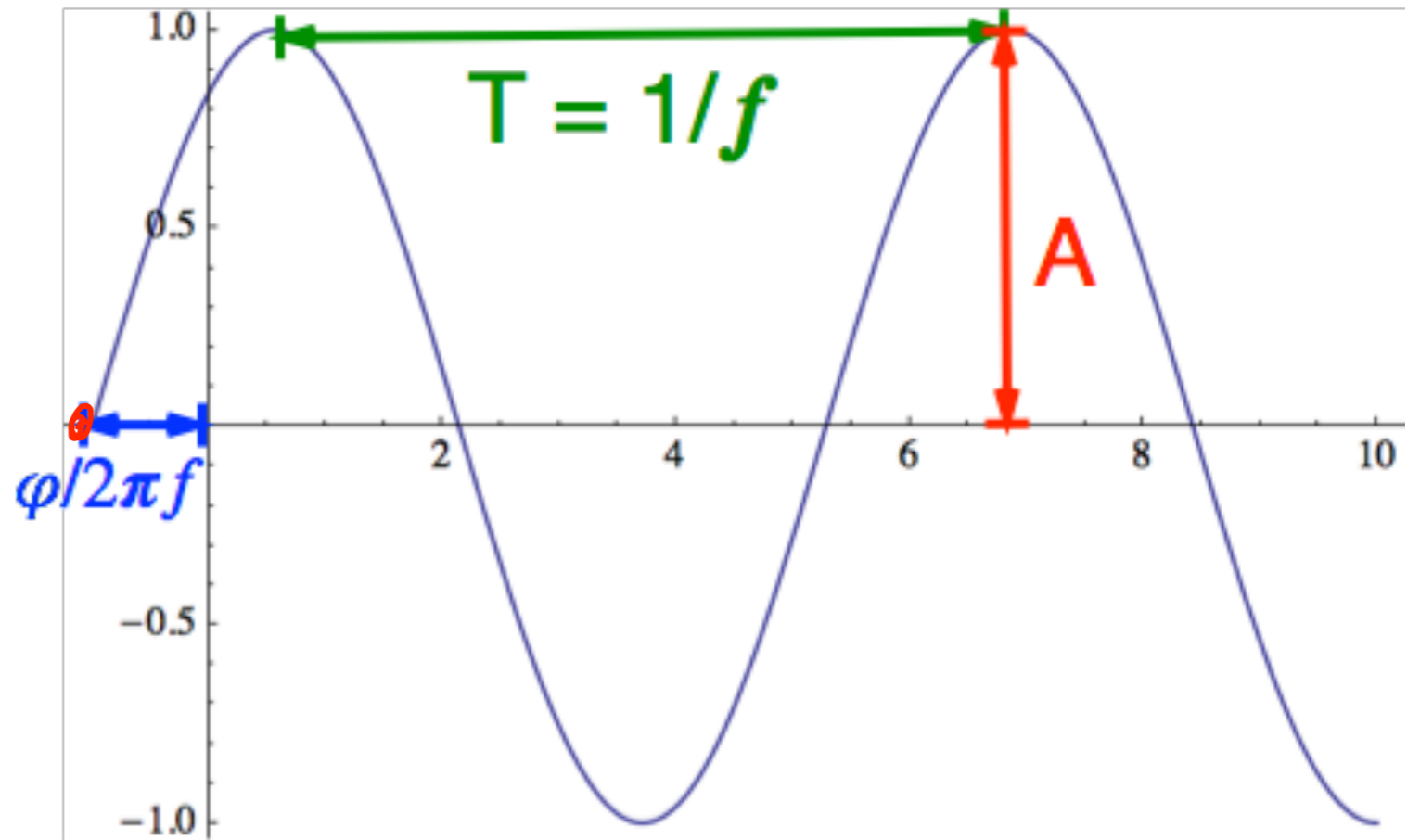
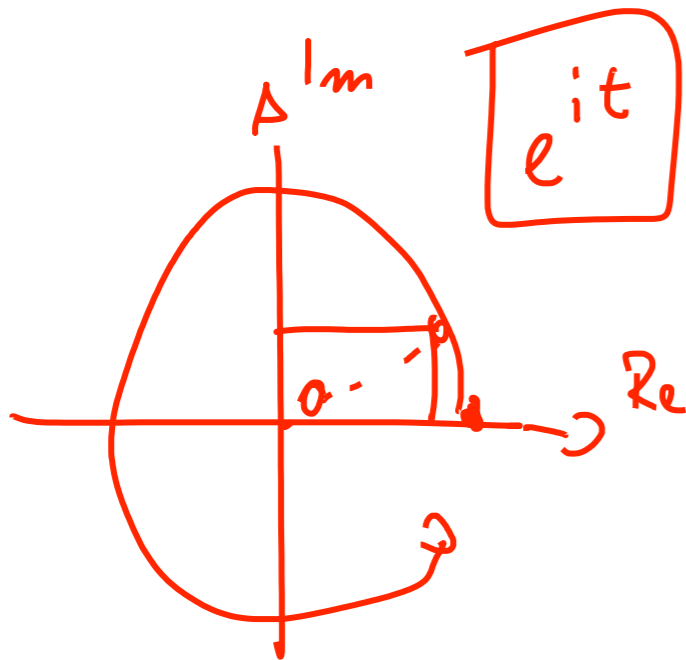
$\cos^2 t + \sin^2 t = 1$

$\operatorname{Re}(e^{it}) = \cos t$
 $\operatorname{Im}(e^{it}) = \sin t$

Amplitudendarstellung einer Sinusschwingung

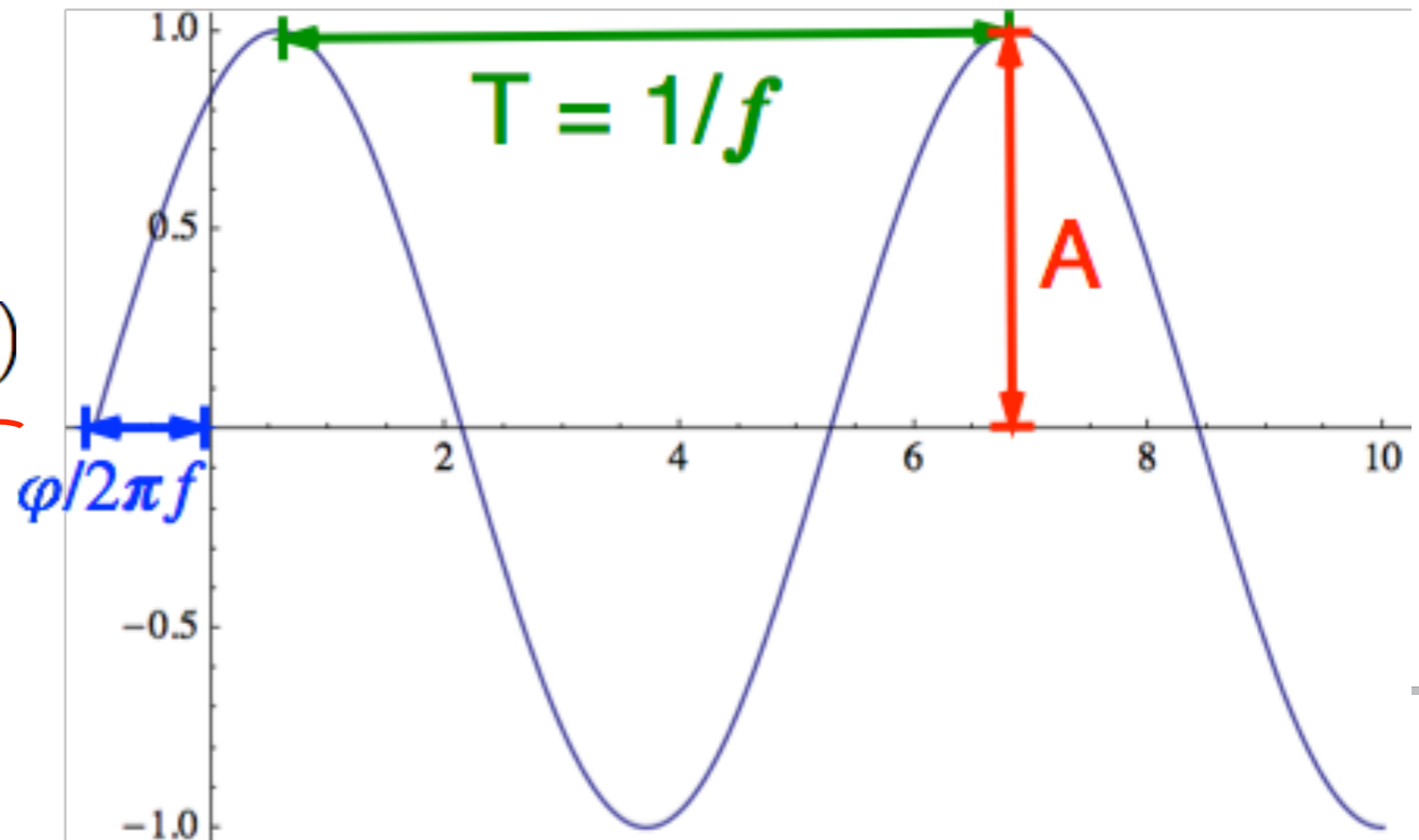
$$s(t) = A \sin(2\pi f t + \phi)$$

- 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

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

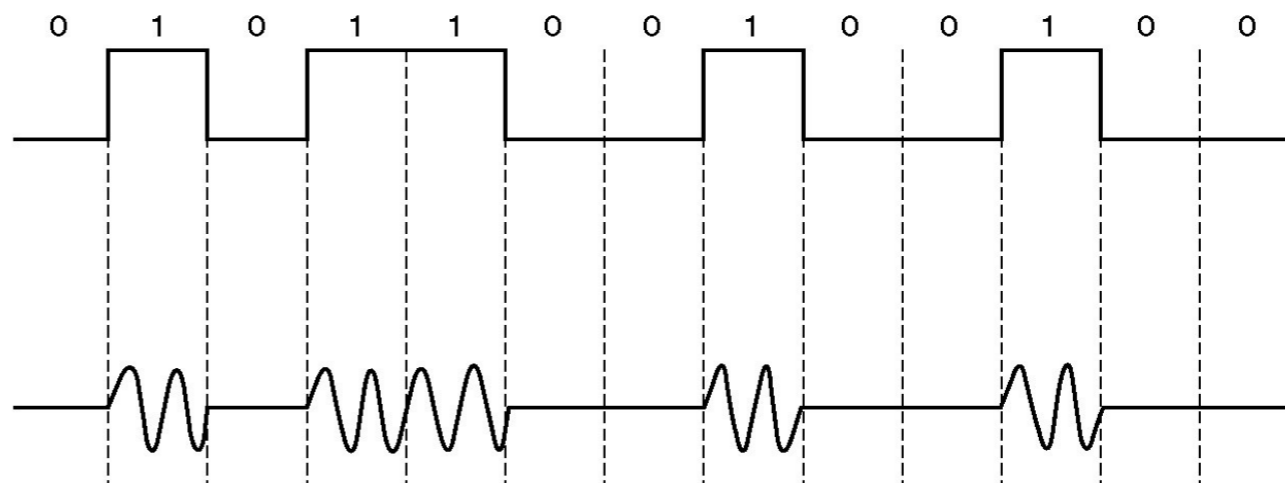
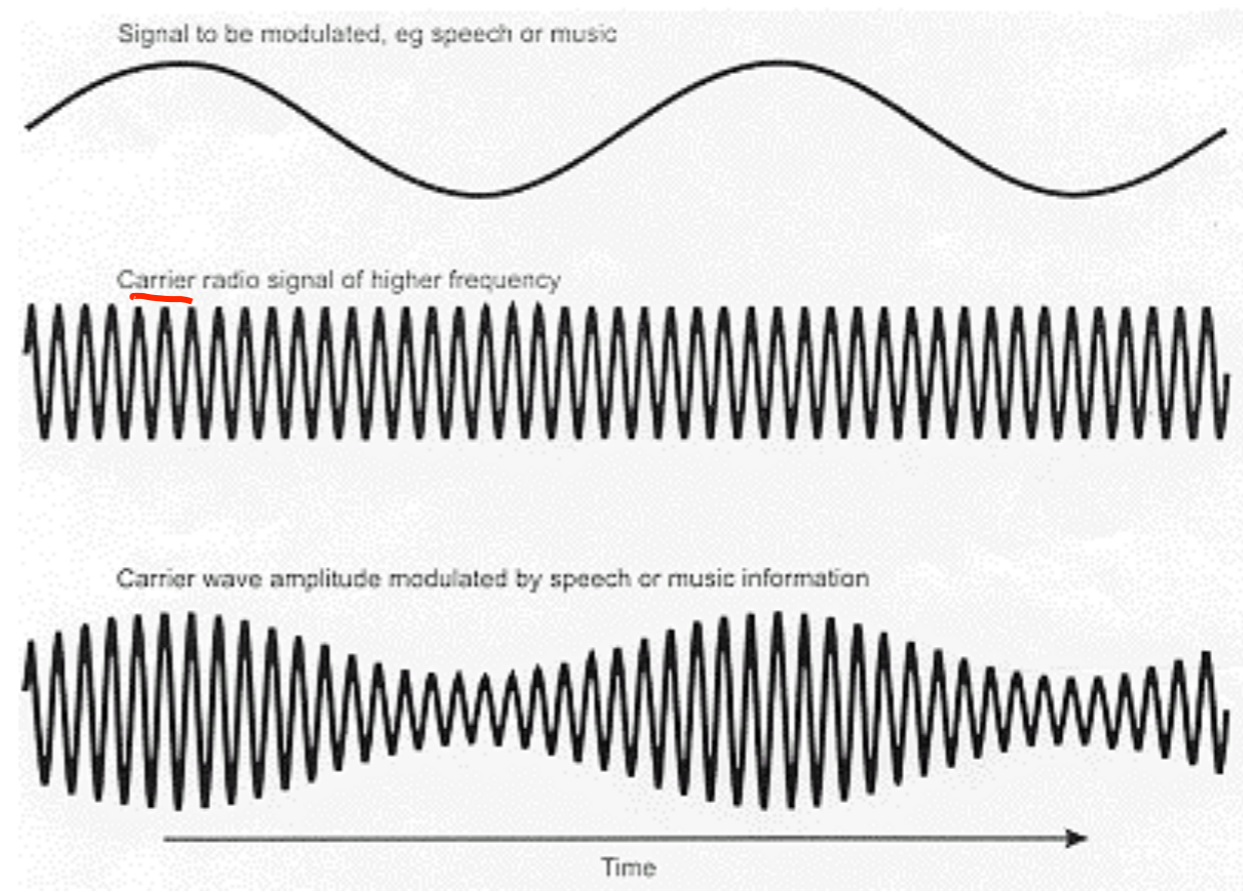


- Das zeitvariable Signal $s(t)$ wird als Amplitude einer Sinuskurve kodiert:

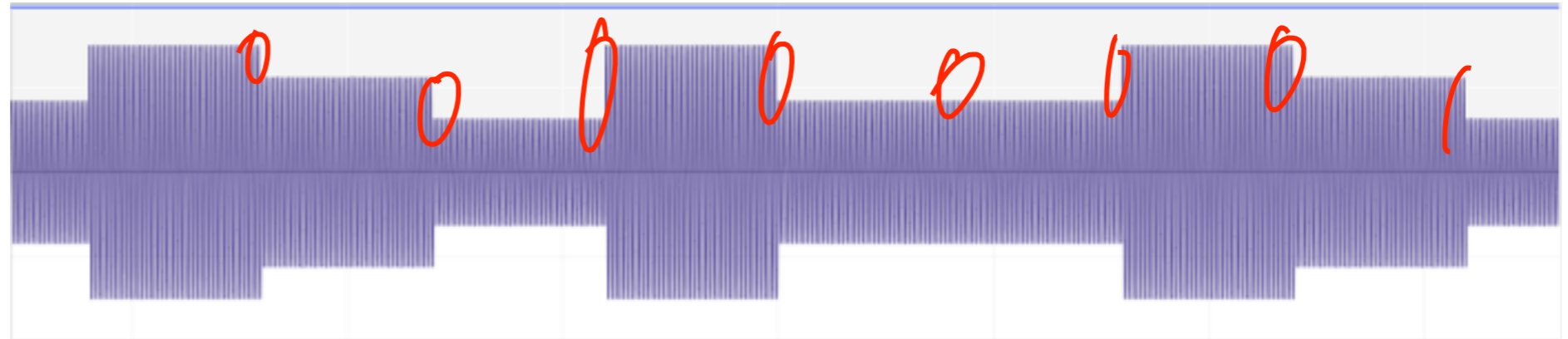
$$f_A(t) = s(t) \sin(2\pi ft + \phi)$$

- 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



Frequenzmodulation

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

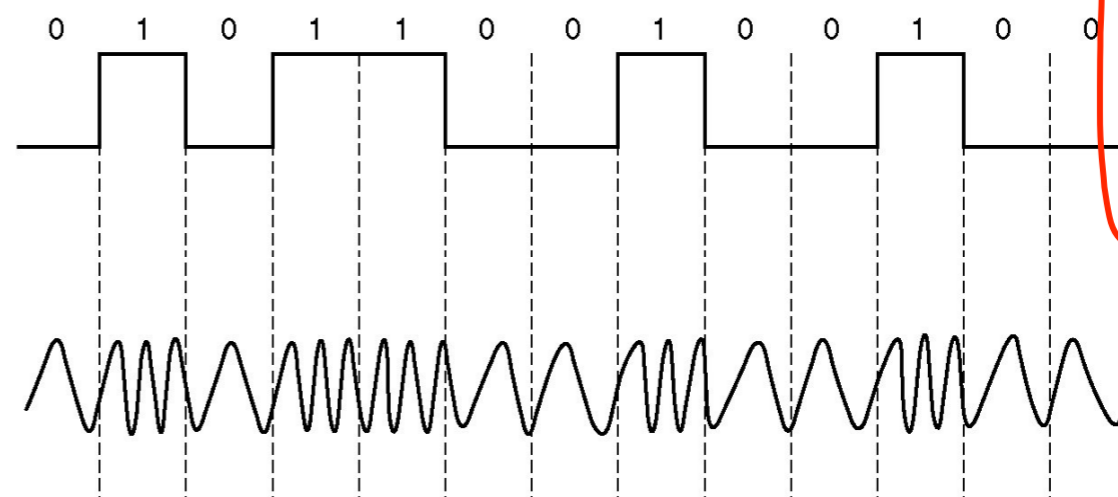
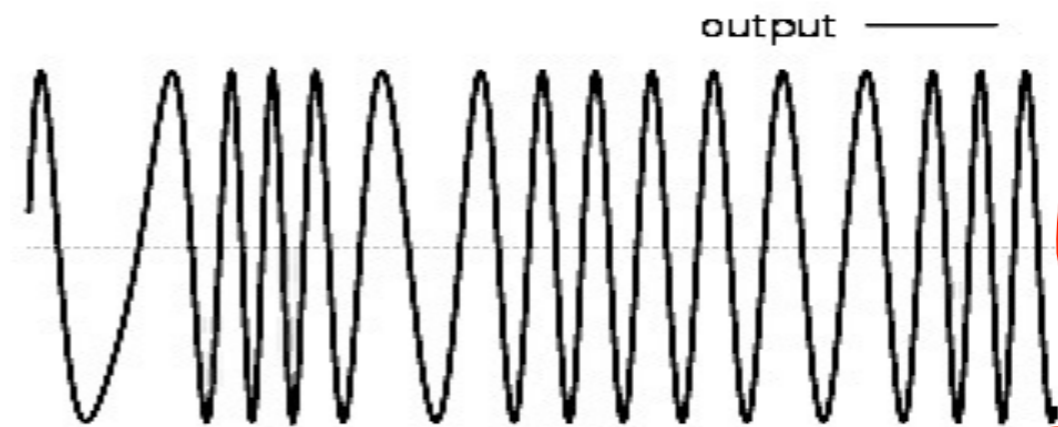
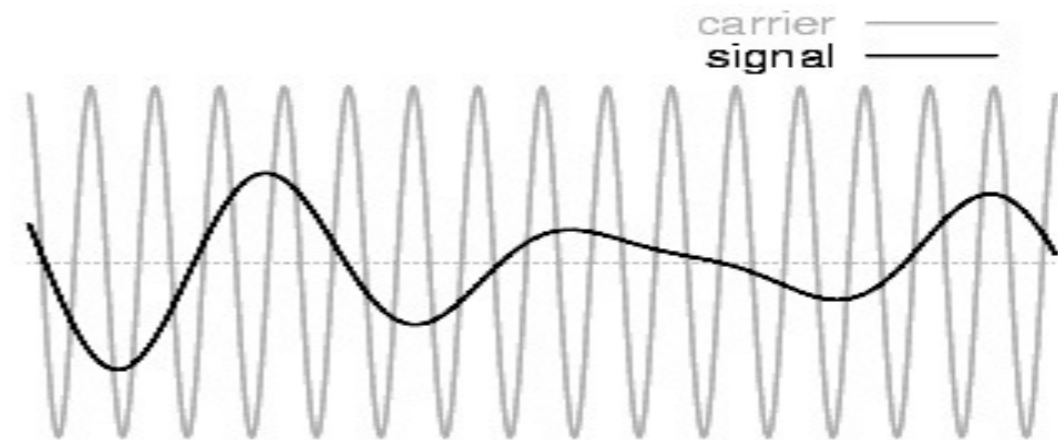
$$f_F(t) = a \sin(2\pi s(t)t + \phi)$$

- Analoges Signal

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

- Digitales Signal

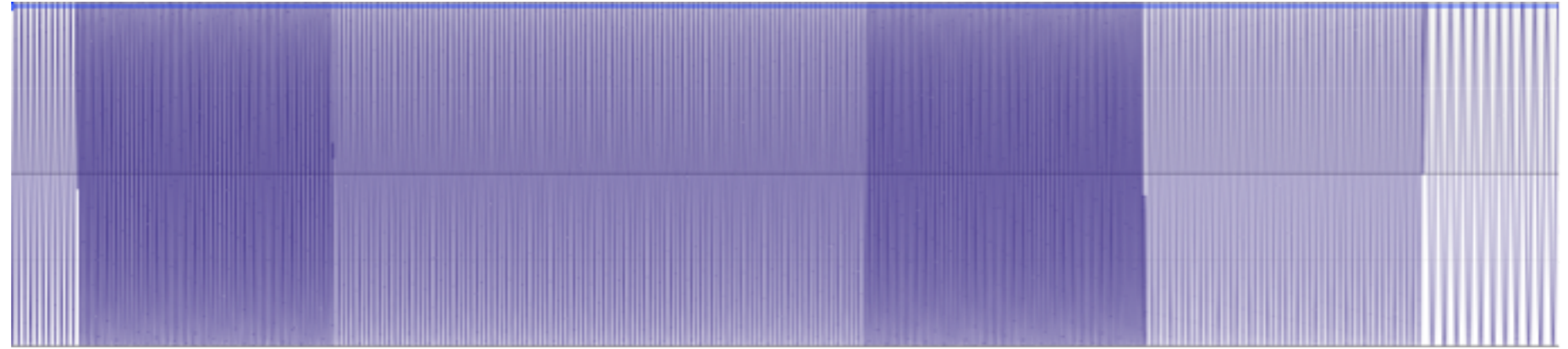
- Frequency Shift Keying (FSK)
- Z.B. durch Symbole gegeben als Frequenzen



2
0

Bluetooth
ULE

- frequenz-
modulierte
Sinuskurve

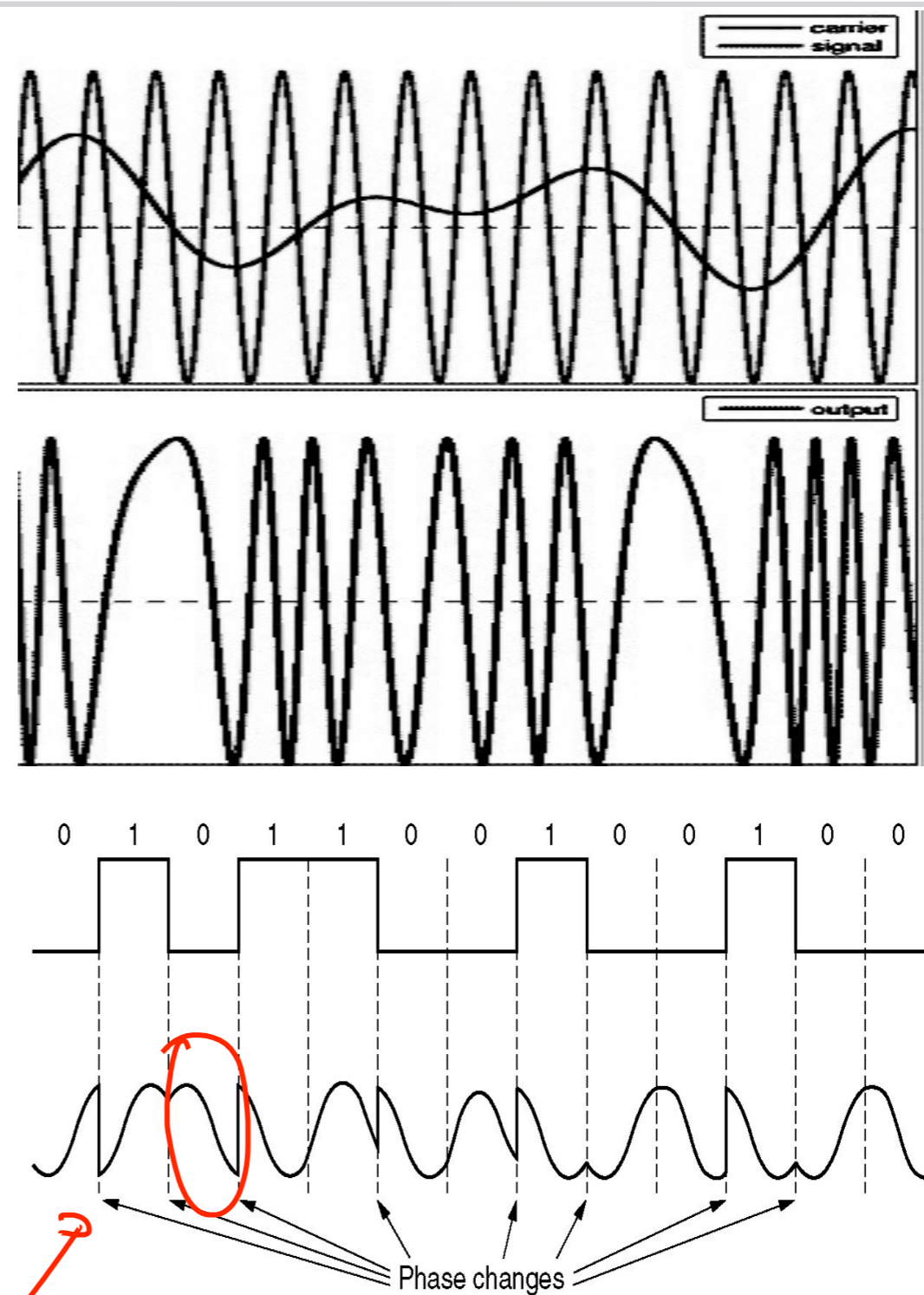




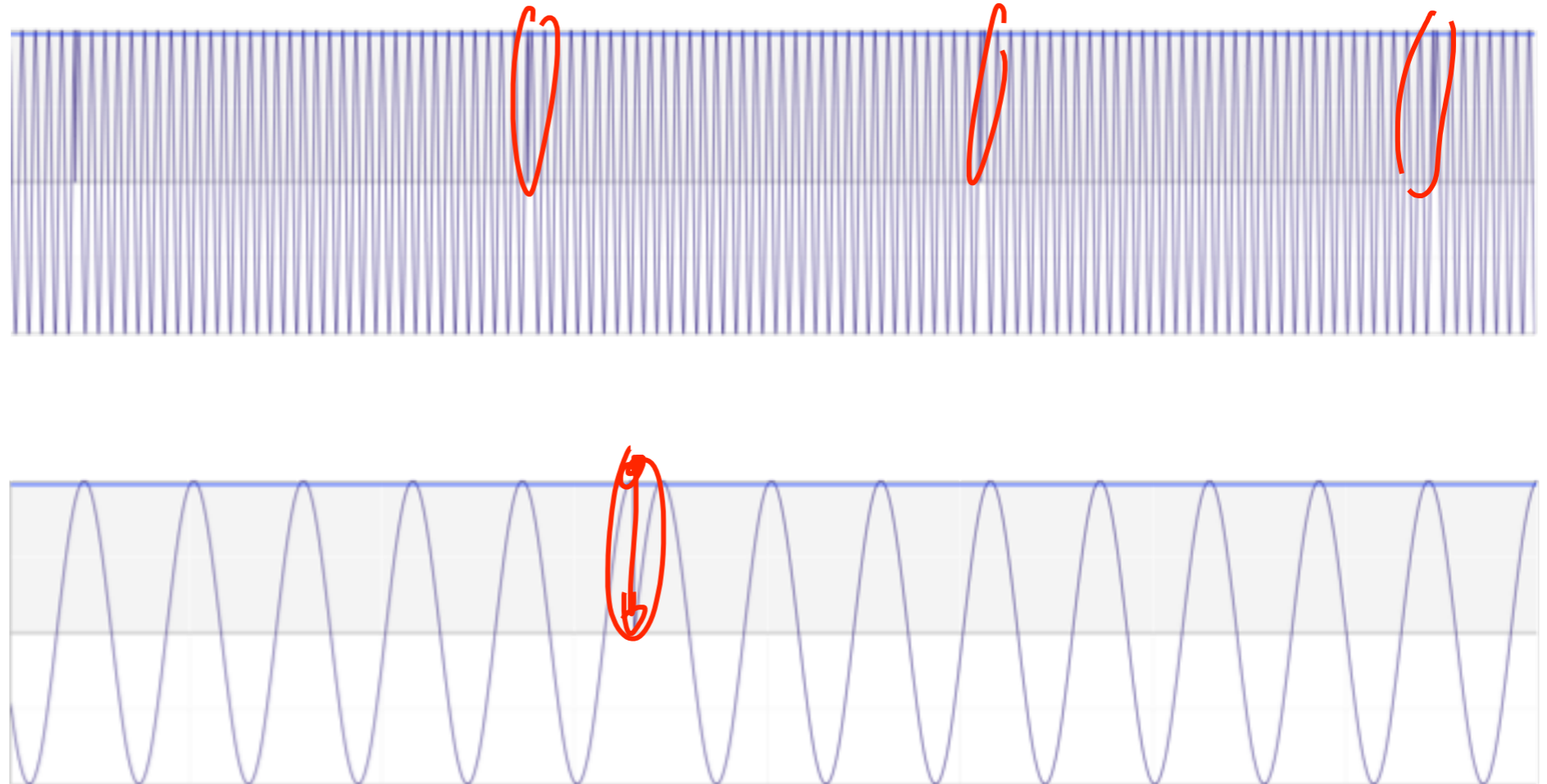
- Das zeitvariable Signal $s(t)$ wird in der Phase der Sinuskurve kodiert:

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

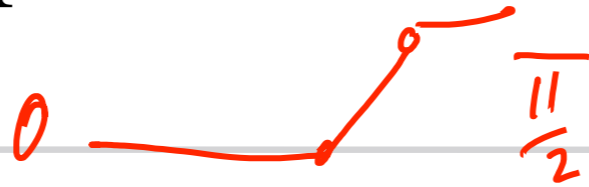
- Analoges Signal
 - Phase Modulation (PM)
 - Sehr ungünstige Eigenschaften
 - Wird nicht eingesetzt
- Digitales Signal
 - Phase-Shift Keying (PSK)
 - Z.B. durch Symbole gegeben als Phasen



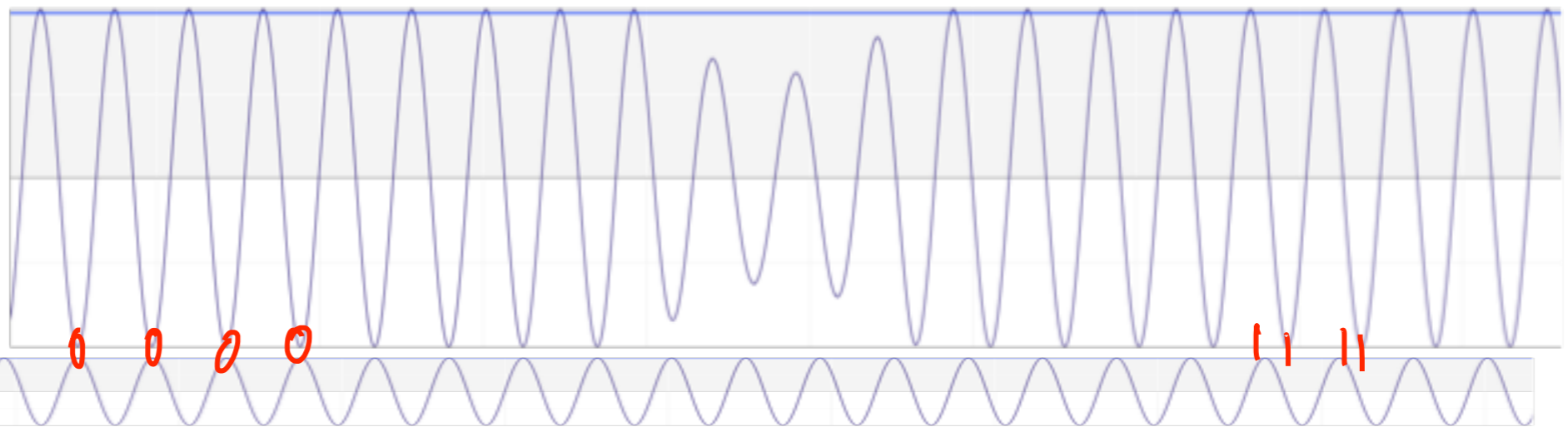
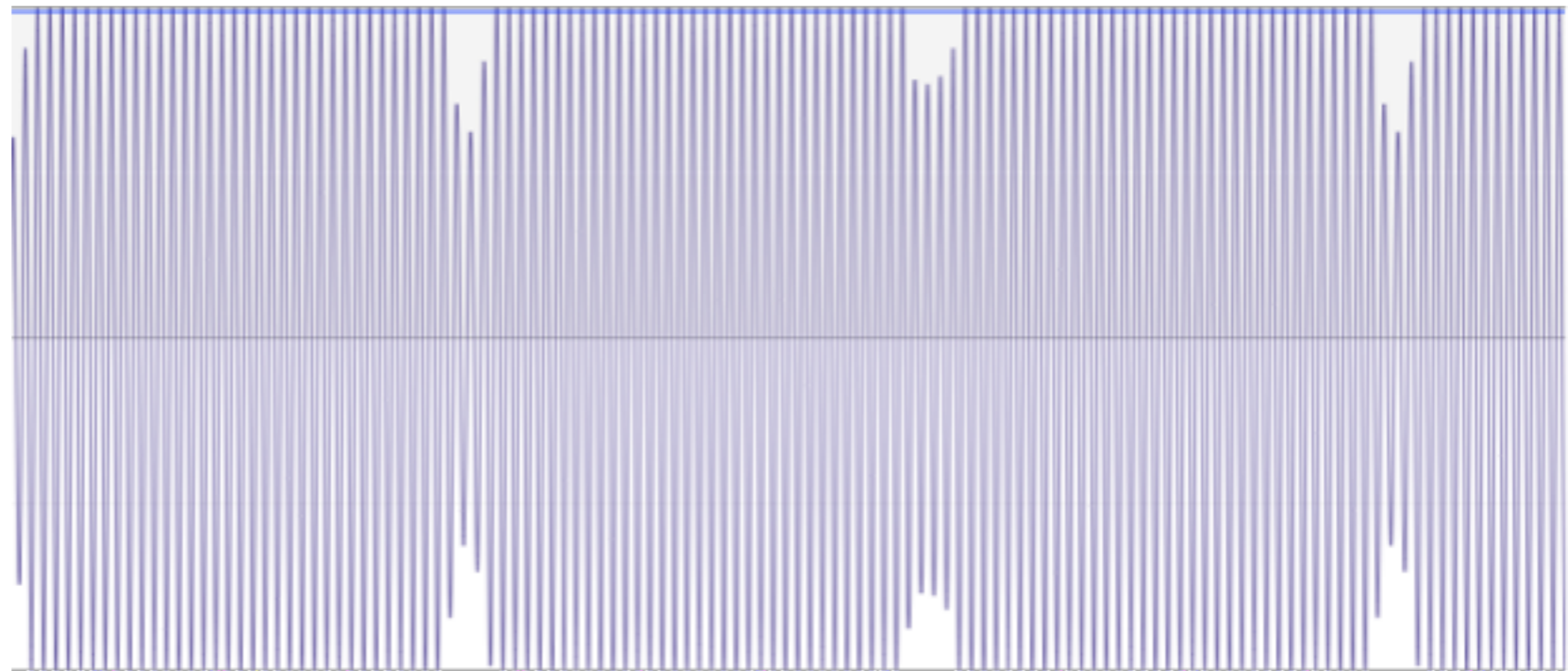
- phasen-
modulierte
Sinuskurve



Hörbeispiel

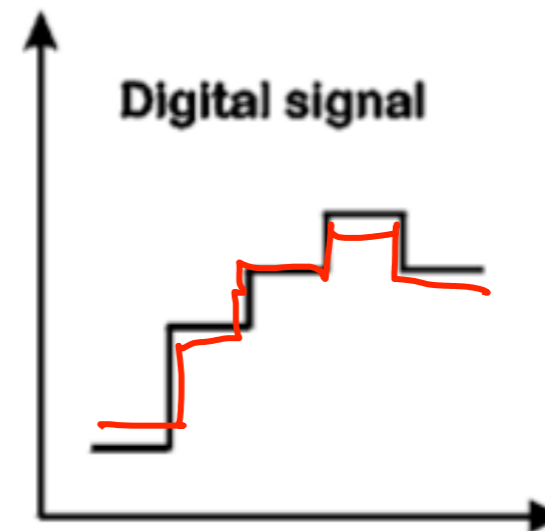
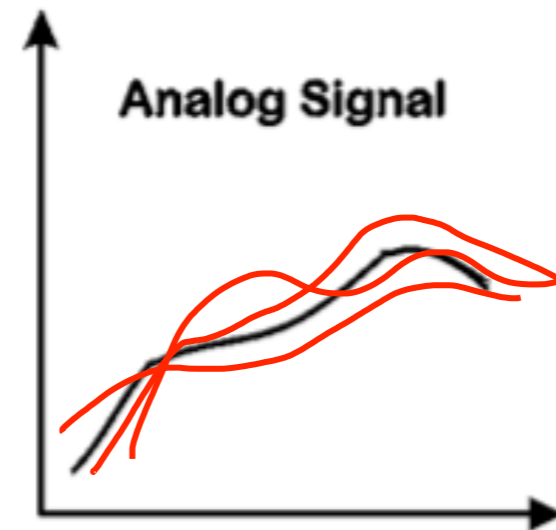


- phasen-
modulierte
Sinuskurve
- mit glatten
Übergang



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

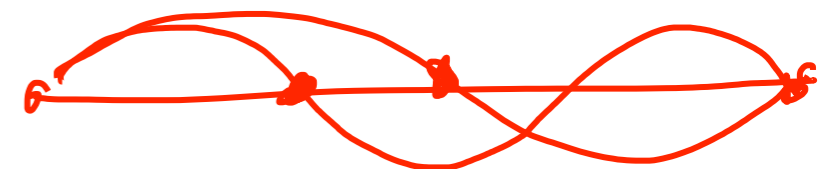
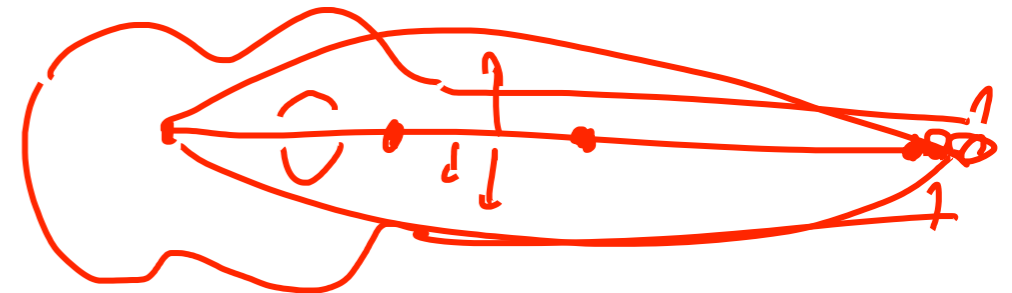
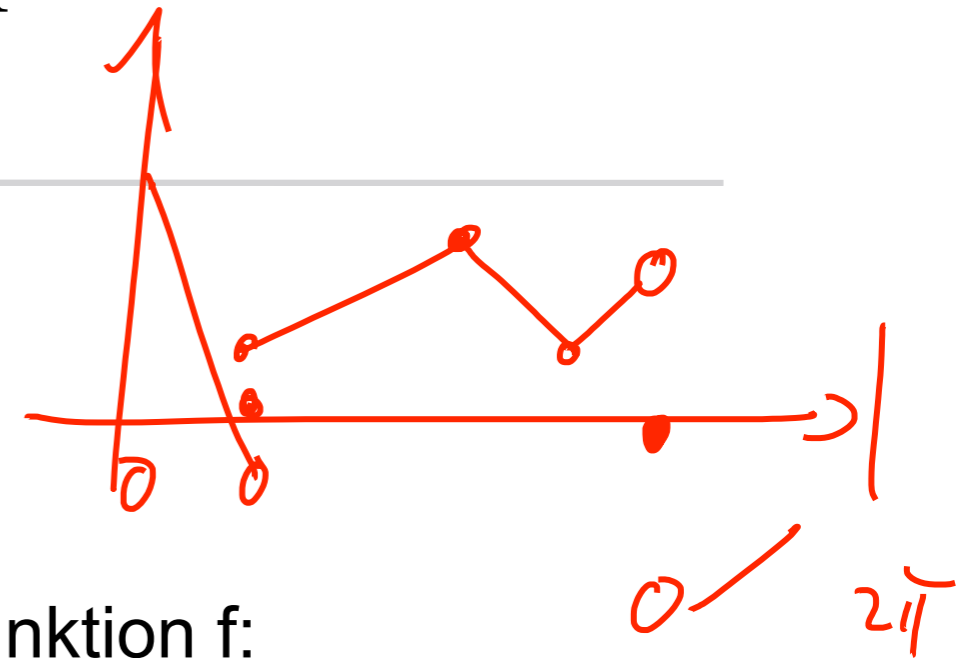
■ Dirichletsche Bedingungen einer periodischen Funktion f :

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

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



Quarte $\times 2$

Quint $\times 3/2$

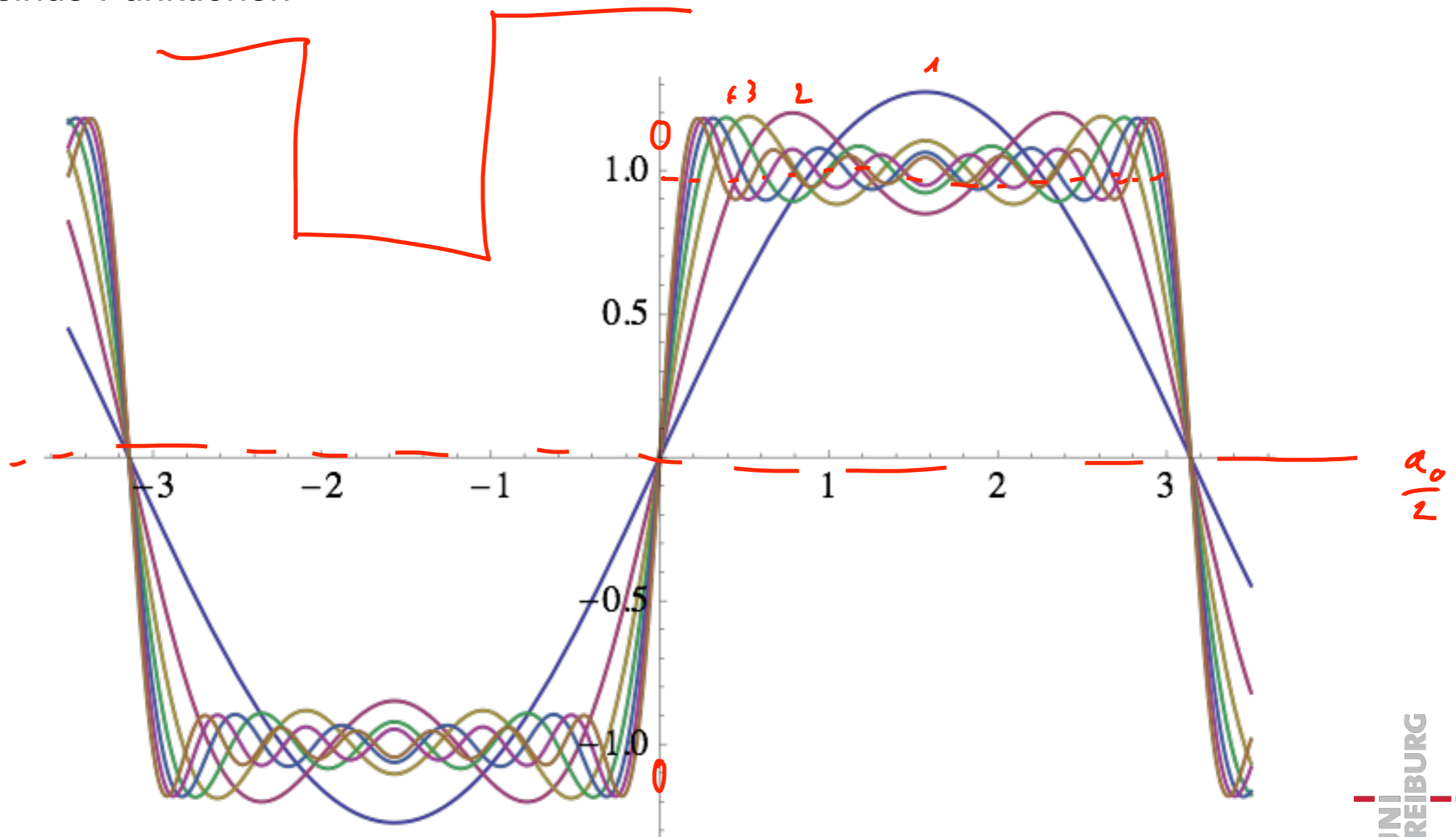
Terz $\times 5/4$

Fouriertransformation

Fouriertransformation einer periodischen Funktion:

- Zerlegung in verschiedene
- Sinus/Cosinus-Funktionen

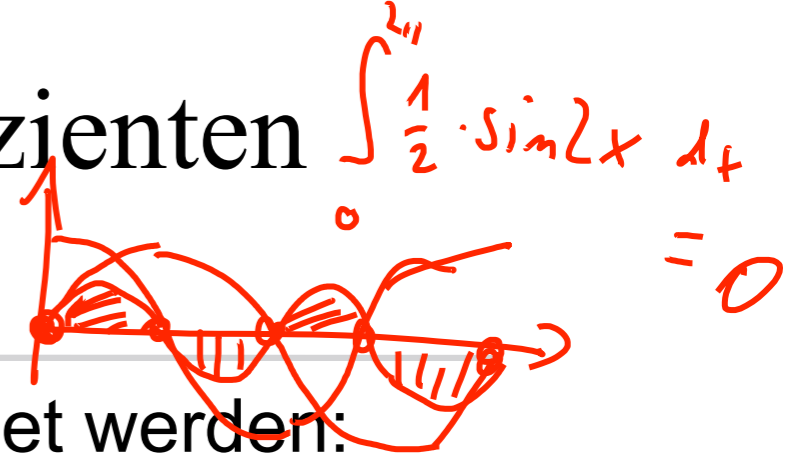
$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n a_k \cos kx + b_k \sin kx = f(x)$$



Berechnung der Fourierkoeffizienten



$\cos x \cdot \sin x$



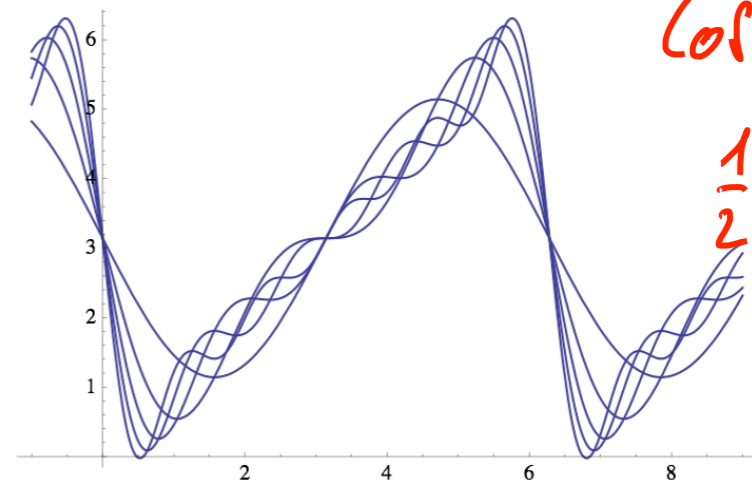
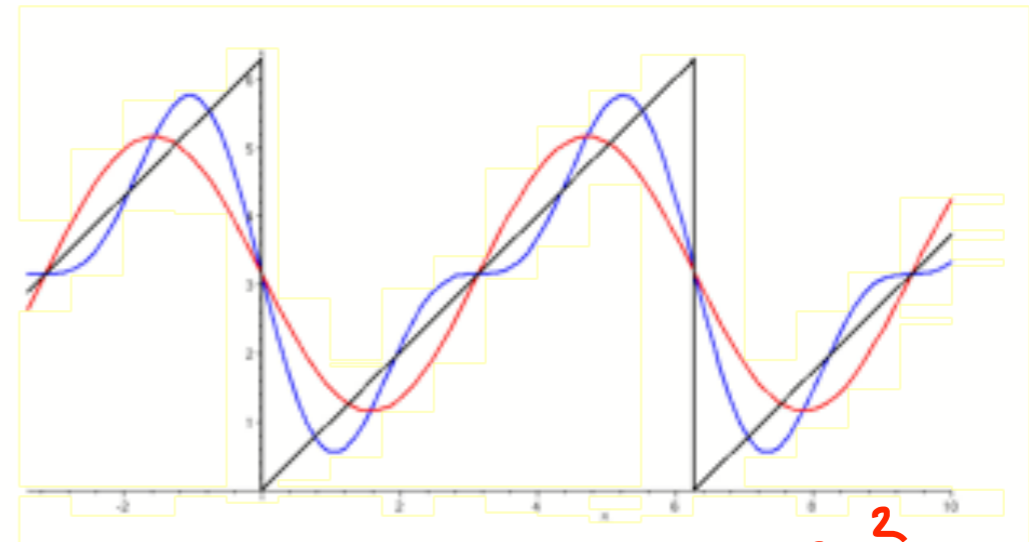
Die Fourierkoeffizienten a_i, b_i können wie folgt berechnet werden:

- Für $k = 0, 1, 2, \dots$

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

- Für $k = 1, 2, 3, \dots$

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



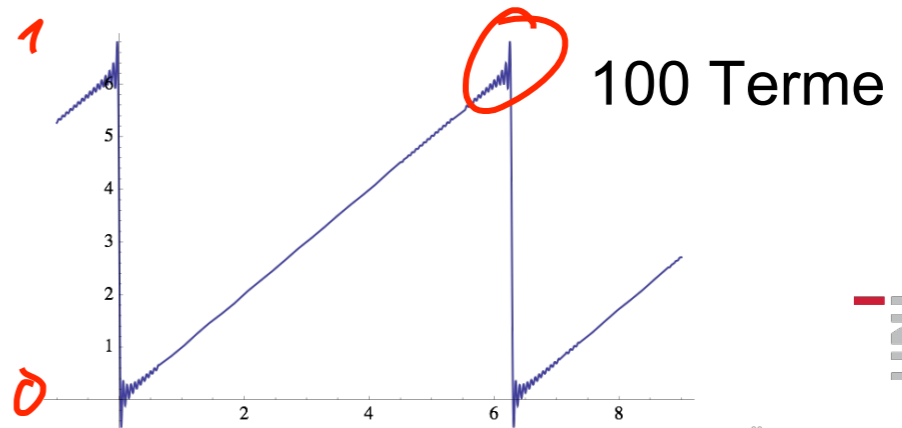
$\cos^2 x =$

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

Beispiel: Sägezahnkurve

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

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

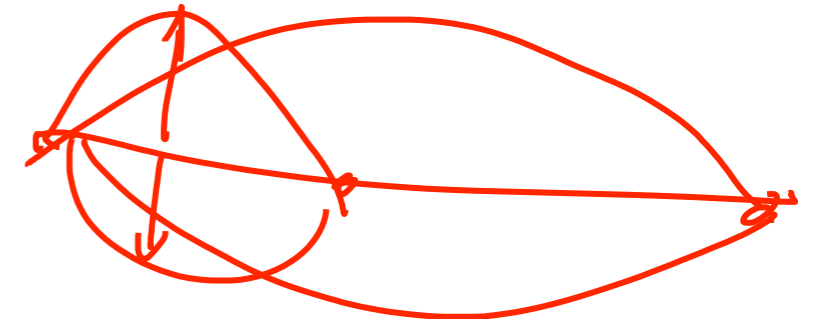


- Der Satz von Fourier für Periode $T=1/f$:
 - Die Koeffizienten c , a_n , b_n ergeben sich dann wie folgt

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

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

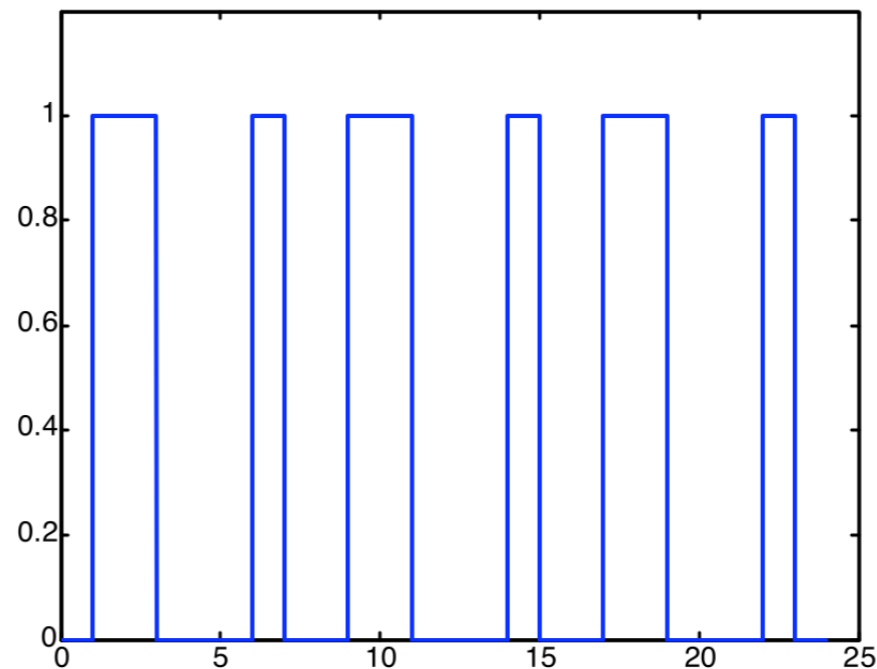
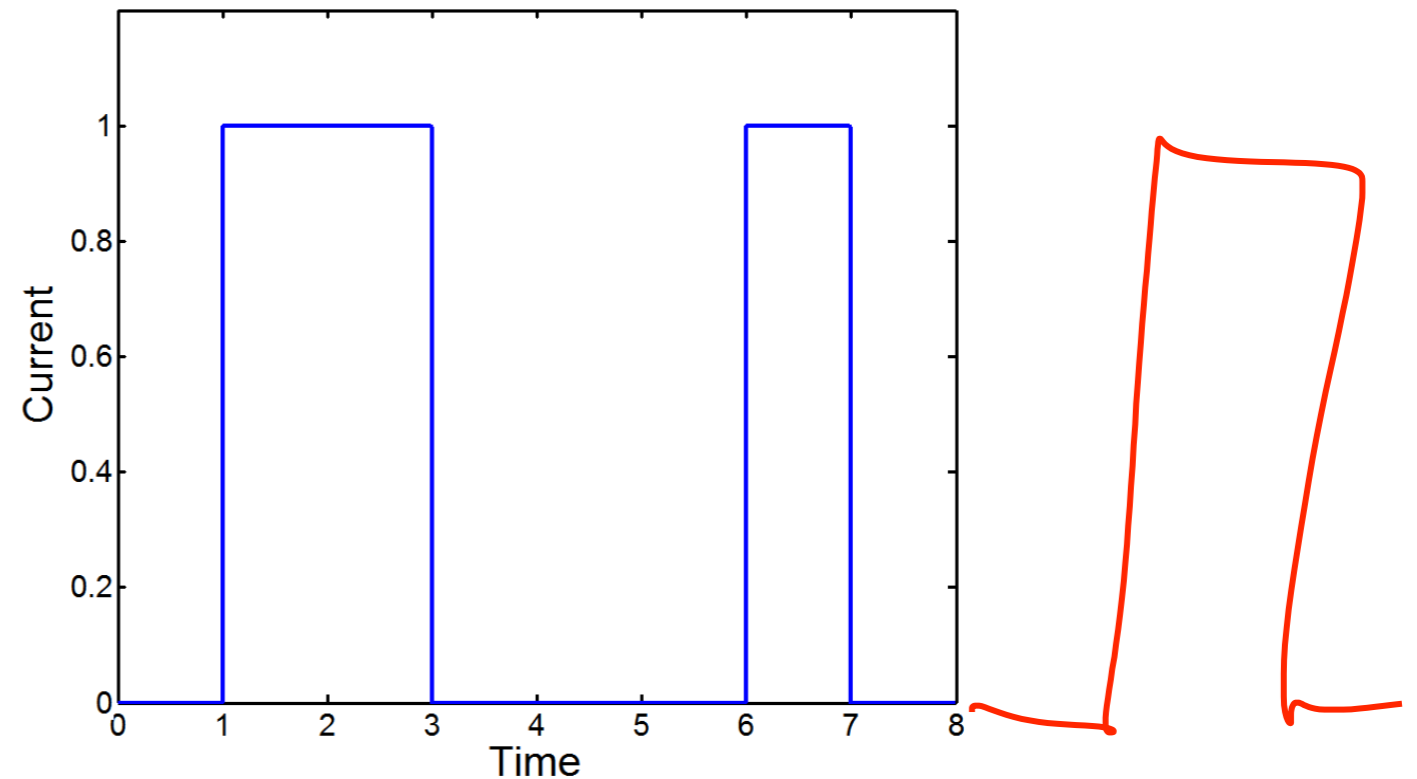
$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \sin(2\pi k f t) dt$$



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

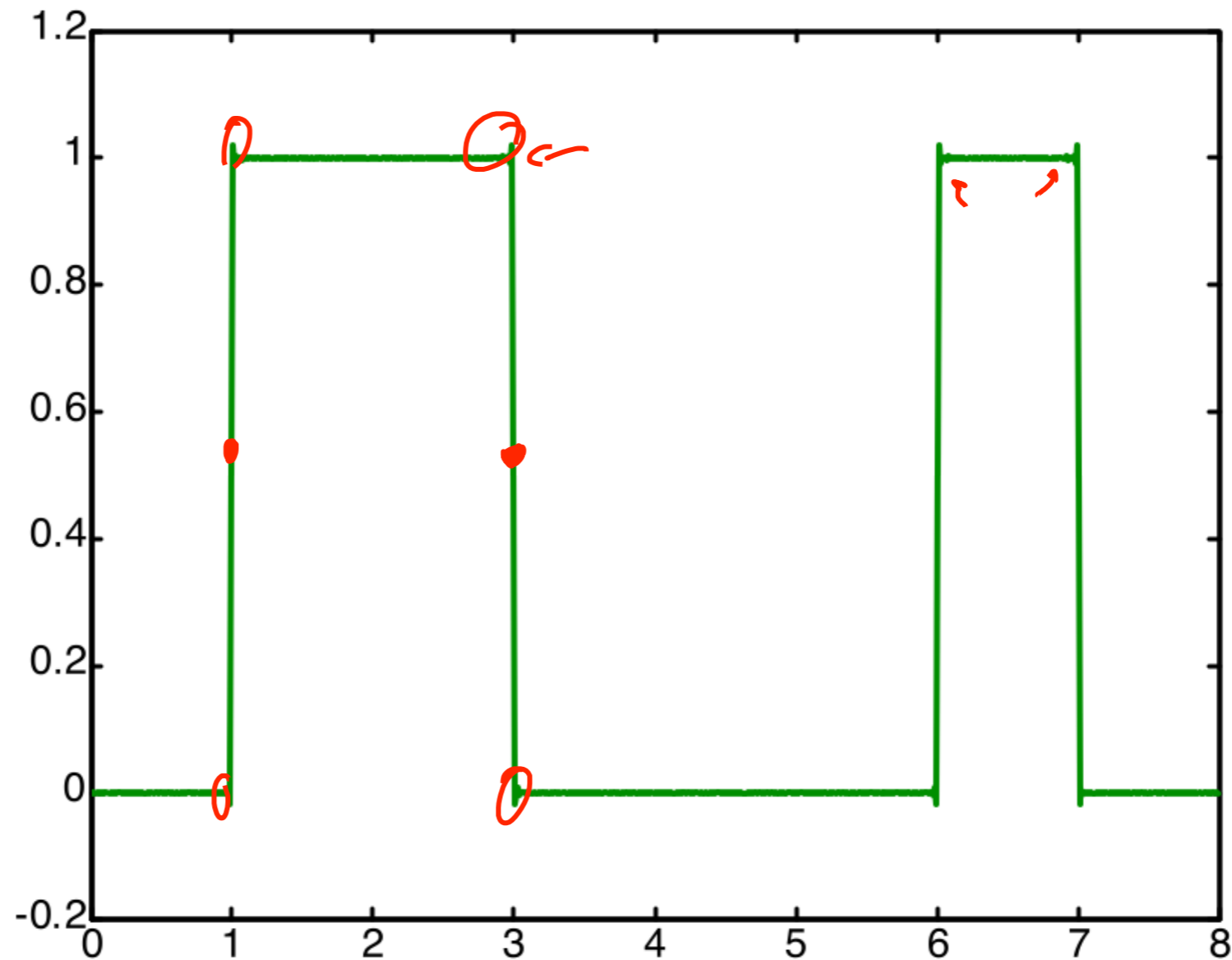
$$(a_k)^2 + (b_k)^2$$

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



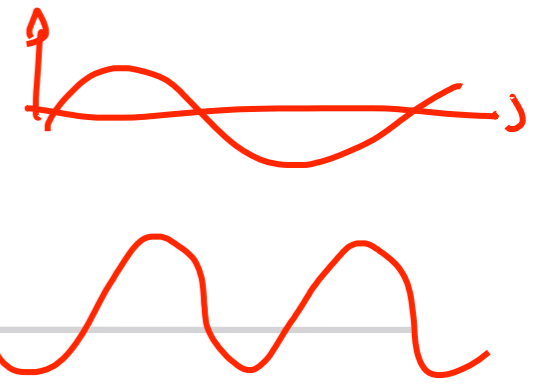
(aus Vorlesung von Holger Karl)

- Fourier-Analyse mit 512 Termen:

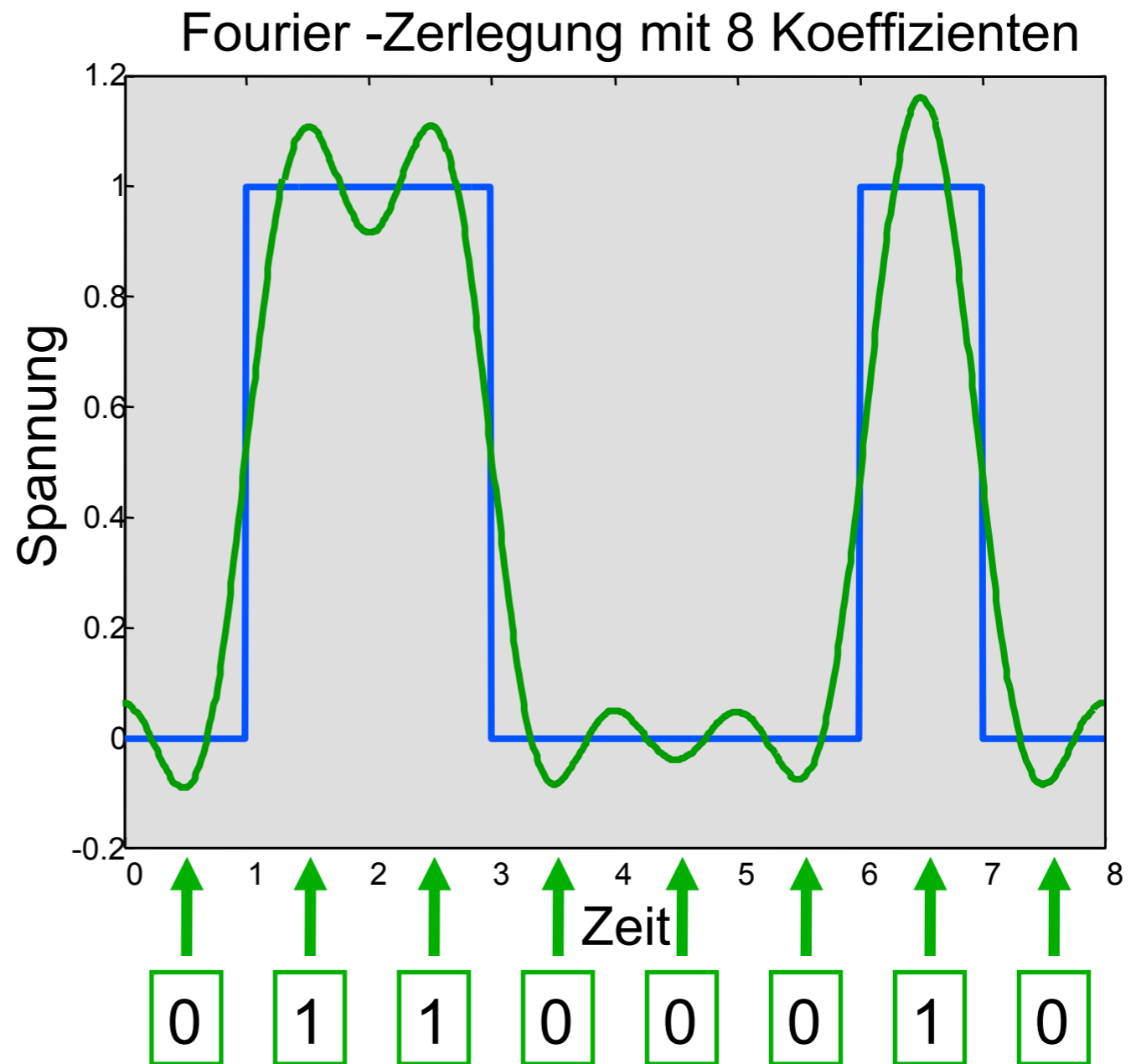


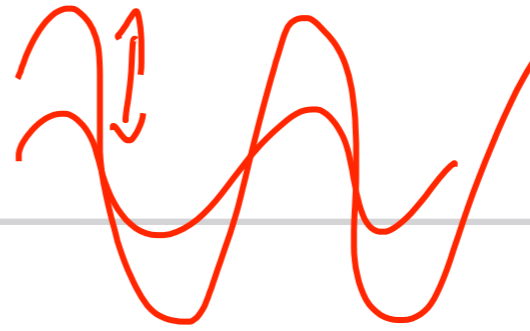
(aus Vorlesung von Holger Karl)

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

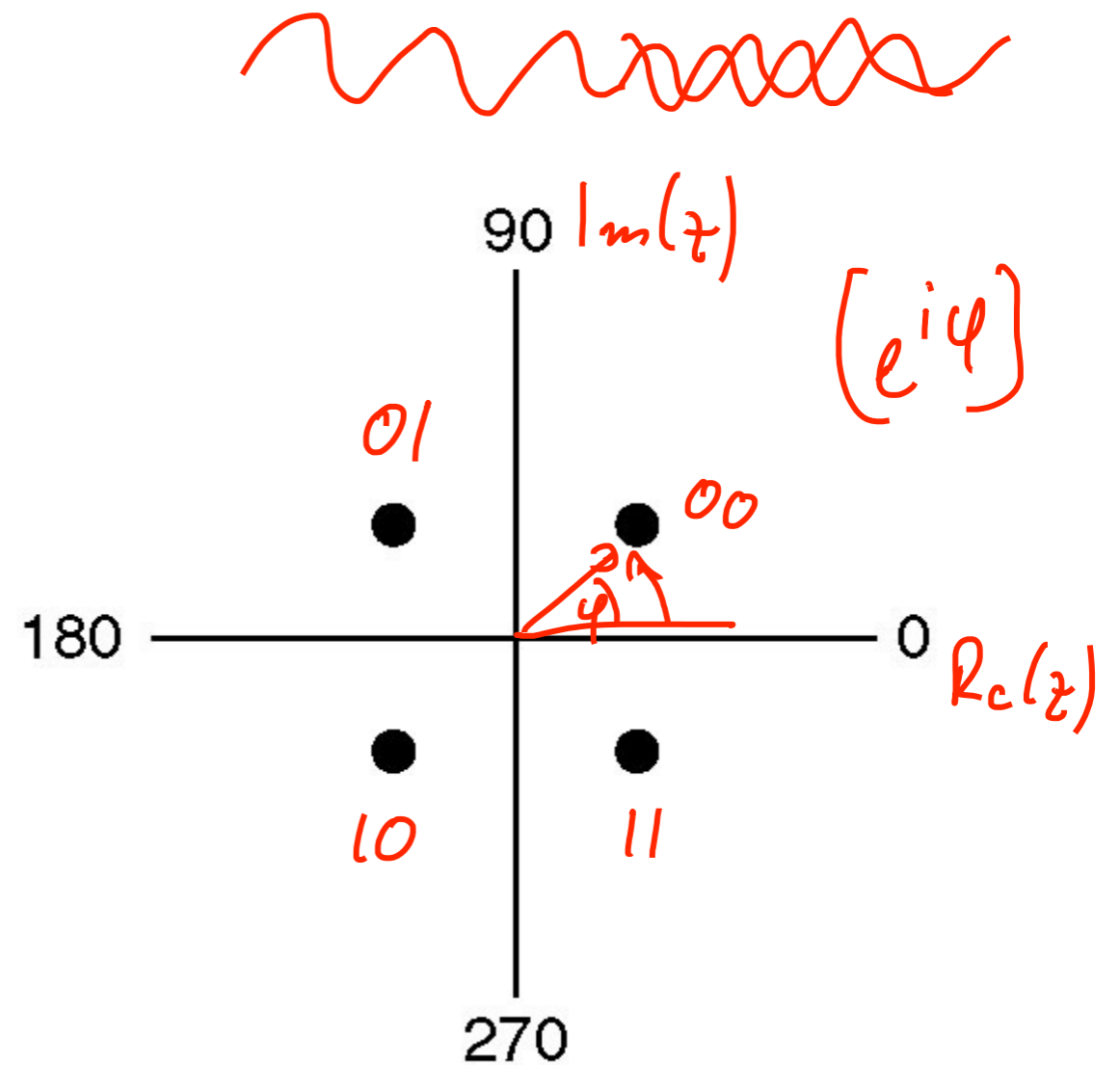
- Die maximal mögliche Symbolrate ist höchstens $2 H$ baud.
- Die maximal mögliche Datenrate ist höchstens $2 H \log_2 V$ bit/s.

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

