Systeme II

2. Woche Bitübertragungsschicht

Christian Schindelhauer
Technische Fakultät
Rechnernetze und Telematik
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Bitübertragungsschicht Physical Layer

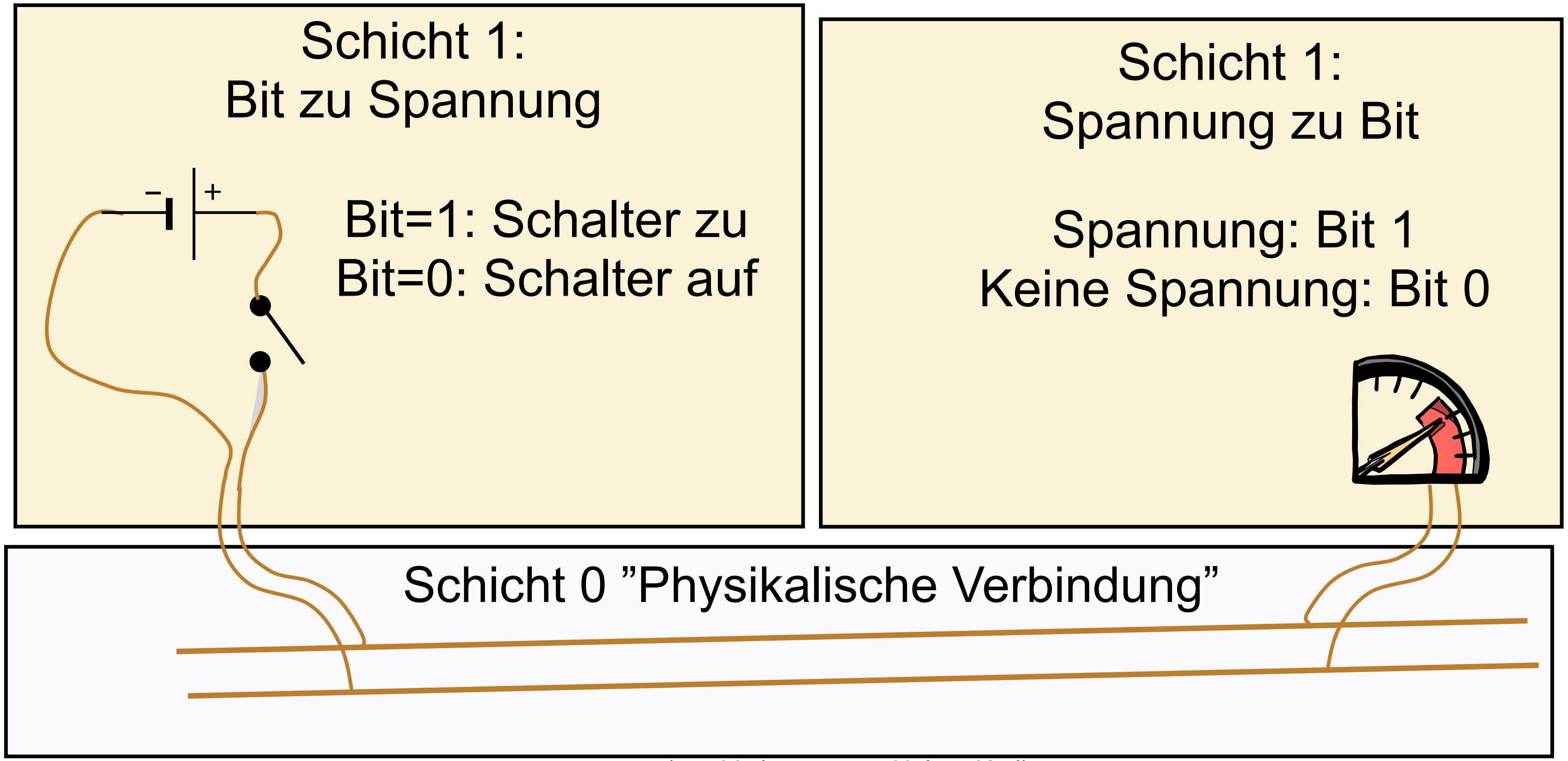
- ISO-Definition
  - Die Bitübertragungsschicht definiert
    - mechanische
    - elektrische
    - funktionale und
    - prozedurale
  - Eigenschaften um eine physikalische Verbindung
    - aufzubauen,
    - aufrecht zu erhalten und
    - zu beenden.

Signale, Daten und Information

- Information
  - Menschliche Interpretation,
    - z.B. schönes Wetter
- Daten
  - Formale Präsentation,
    - z.B. 28 Grad Celsius, Niederschlagsmenge 0cm, Wolkenbedeckung 0%
- 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

Die einfachste Bitübertragung

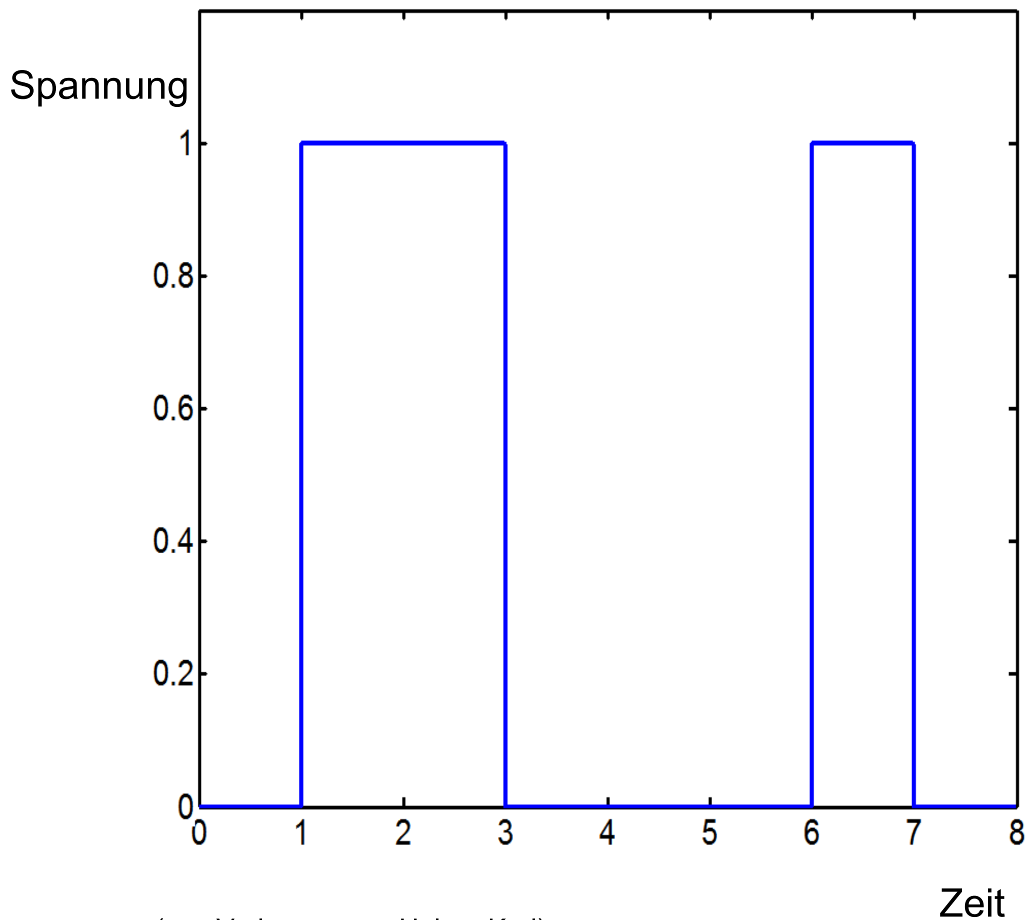
- Bit 1: Strom an
- Bit 0: Strom aus



(aus Vorlesung von Holger Karl)

Übertragung eines Buchstabens: “b”

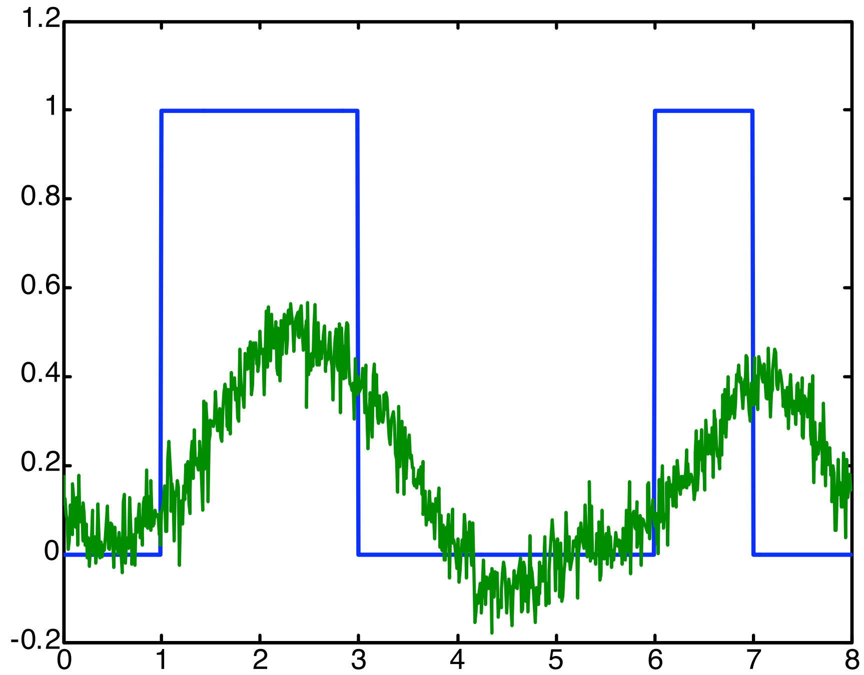
- Zeichen “b” benötigt mehrere Bits
  - z.B. ASCII code of “b” als Binärzahl 01100010
- Spannungsverlauf:



(aus Vorlesung von Holger Karl)

Was kommt an?

- Übertrieben schlechter Empfang
- Was passiert hier?



(aus Vorlesung von Holger Karl)

Physikalische Grundlagen

- 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:

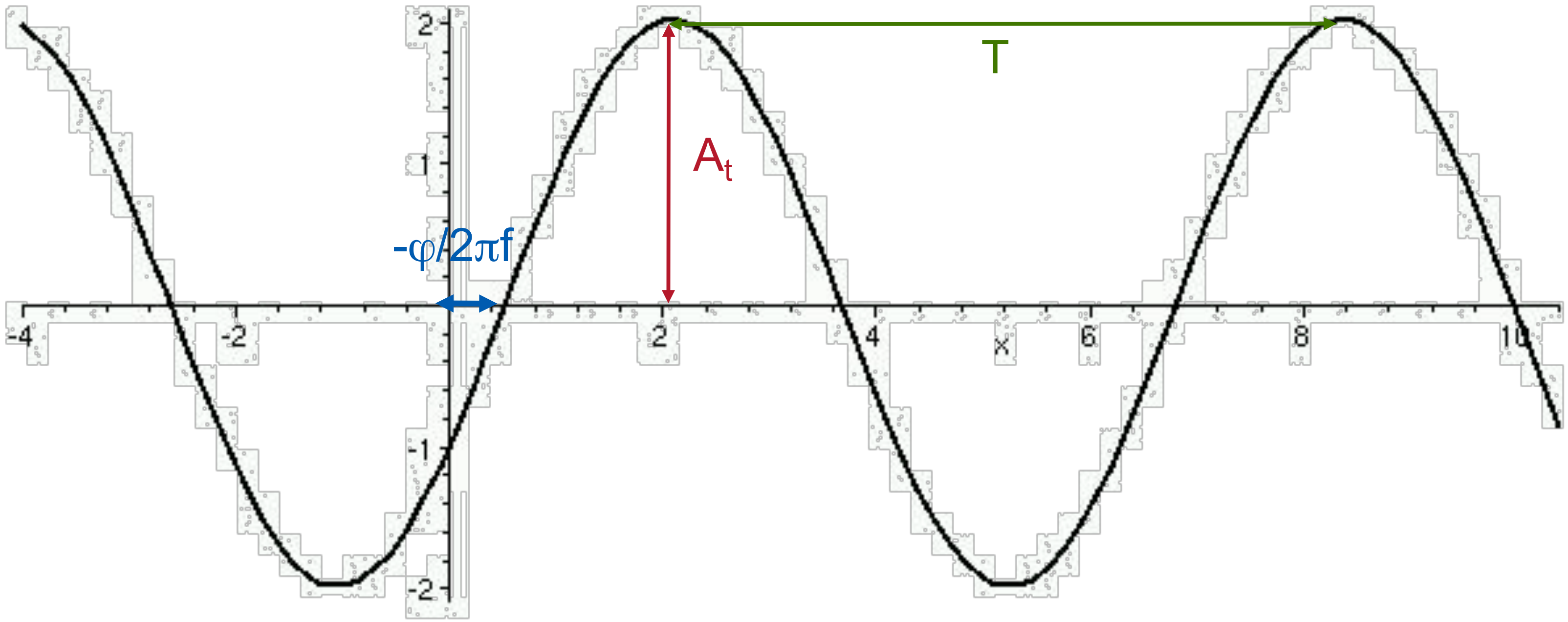
$$\lambda \cdot f = c$$

Amplitudendarstellung

- Amplitudendarstellung einer Sinusschwingung

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

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



Fouriertransformation

- 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 $f(x_0)=(f(x_0-0)+f(x_0+0))/2$

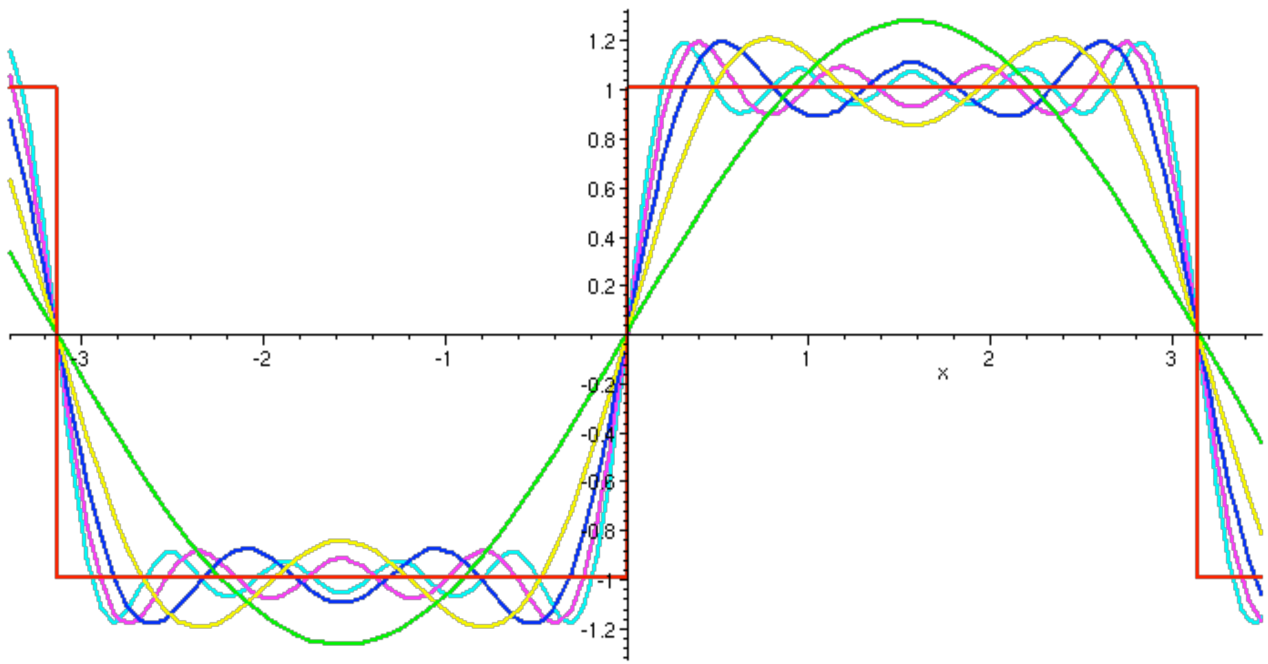
- Satz von Dirichlet:
  - f(x) genüge in $(-\pi,\pi)$ den Dirichletschen Bedingungen. Dann existieren Fourierkoeffizienten $a_0,a_1,a_2,\ldots,b_1,b_2,\ldots$ so dass gilt:

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

Fouriertransformation

- Fouriertransformation einer periodischen Funktion:
  - Zerlegung in verschiedene
  - Sinus/Cosinus-Funktionen

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



CoNe Freiburg

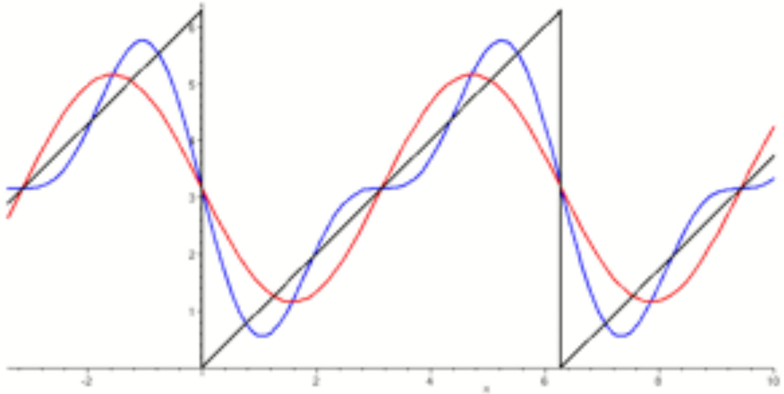
Berechnung der Fourierkoeffizienten

- Die Fourierkoeffizienten a_i, b_i können wie folgt berechnet werden:
  - Für k = 0,1,2,…

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

  - Für k = 1,2,3,…

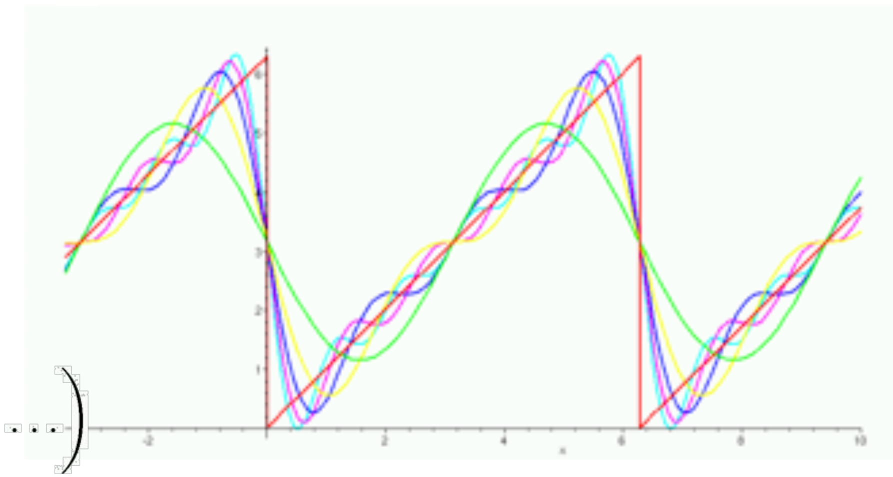
$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin kx \, dx$$



- Beispiel: Sägezahnkurve

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

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



UNI FREIBURG

Fourier-Analyse für allgemeine Periode

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

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

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

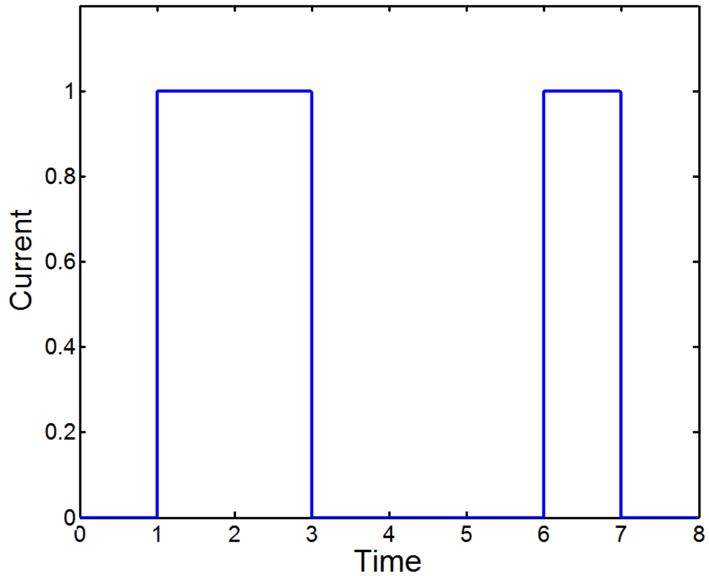
$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \sin(2\pi n f t) dt$$

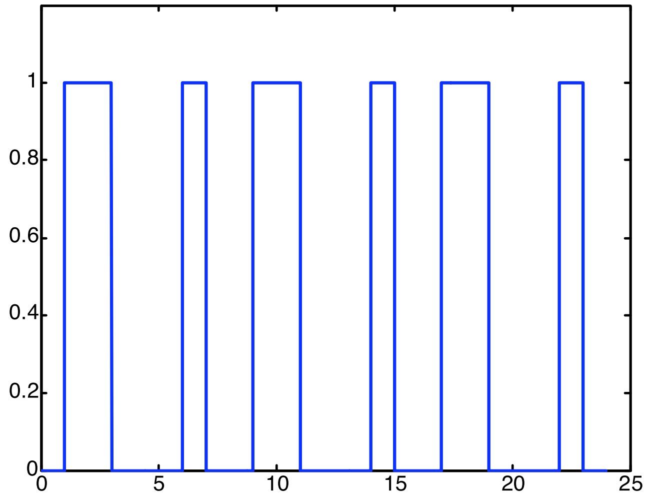
- Die Quadratsumme der k-ten Terme ist proportional zu der Energie, die in dieser Frequenz verbraucht wird:

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

Anwendung der Fourier-Analyse

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

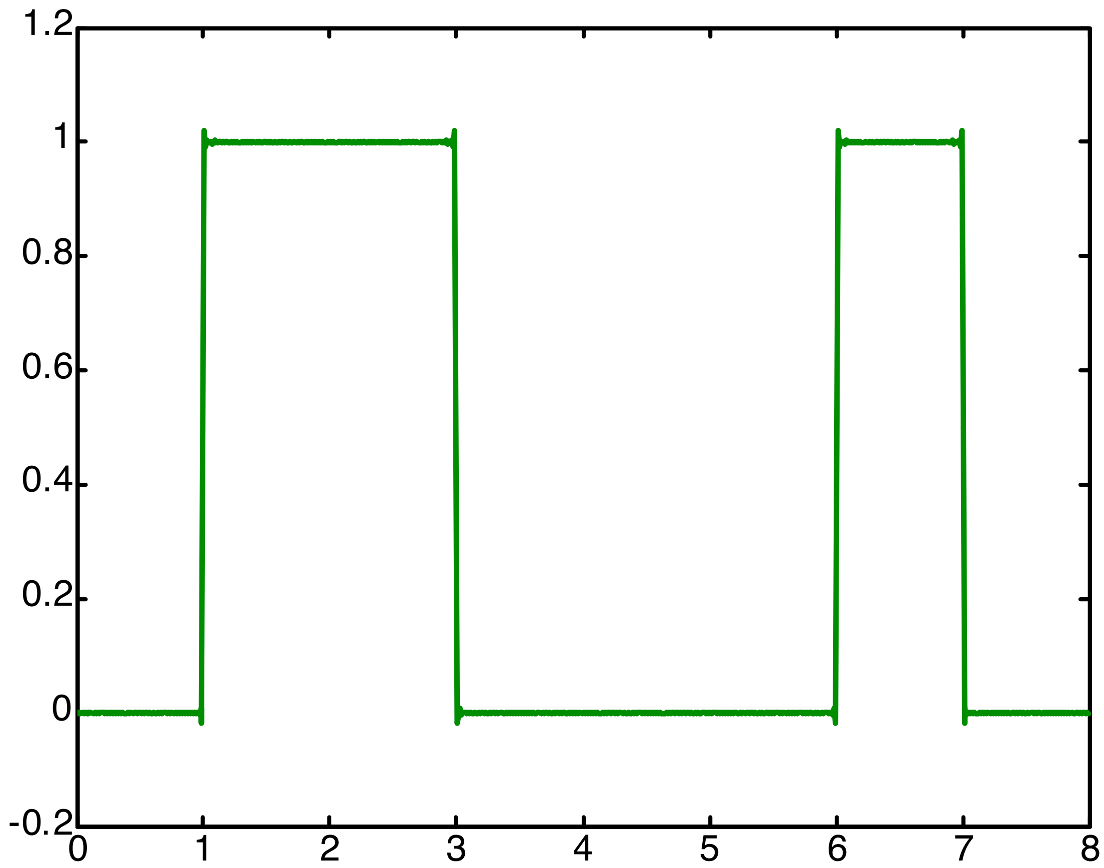




(aus Vorlesung von Holger Karl)

Anwendung der Fourier-Analyse

- Fourier-Analyse mit 512 Termen:



(aus Vorlesung von Holger Karl)

5 Gründe für den schlechten Empfang

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

(aus Vorlesung von Holger Karl)

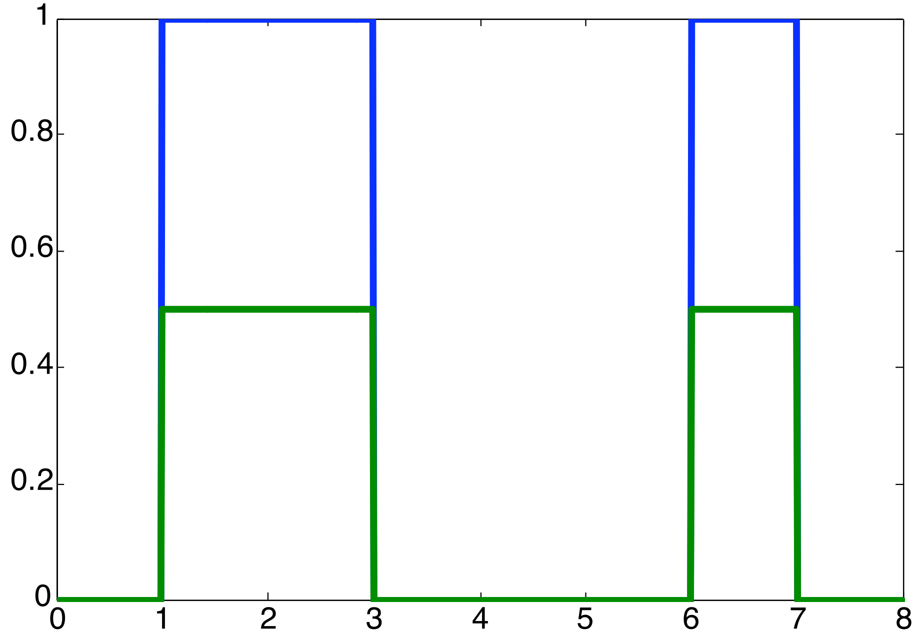
1. Signale werden gedämpft

- Dämpfung α (attenuatation)
  - Verhältnis von Sendeenergie P1 zu Empfangsenergie P0
  - 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

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

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

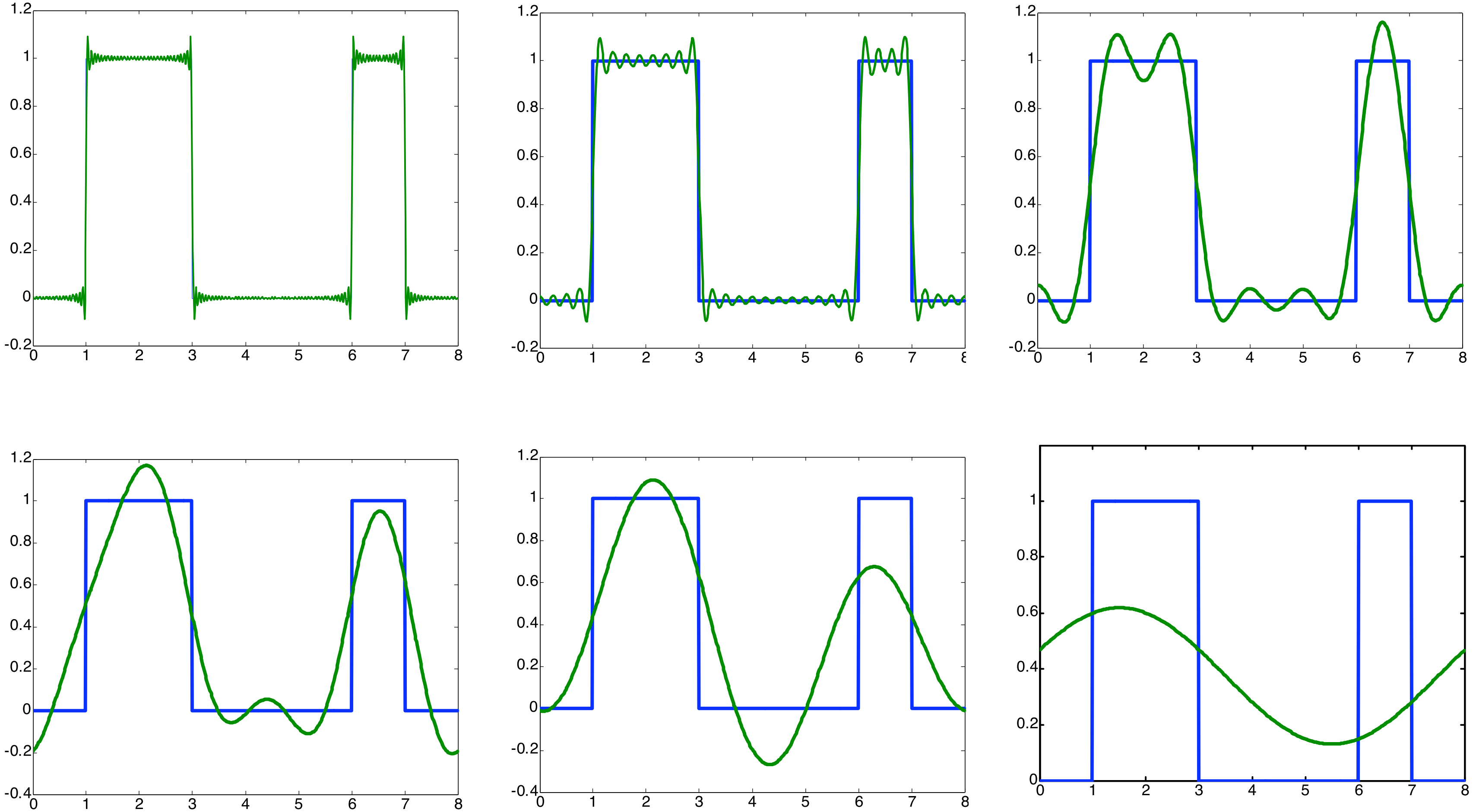
$$= \quad 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_0} \quad \text{(in deziBel [dB])}$$



(aus Vorlesung von Holger Karl)

2. Nicht alle Frequenzen passieren das Medium

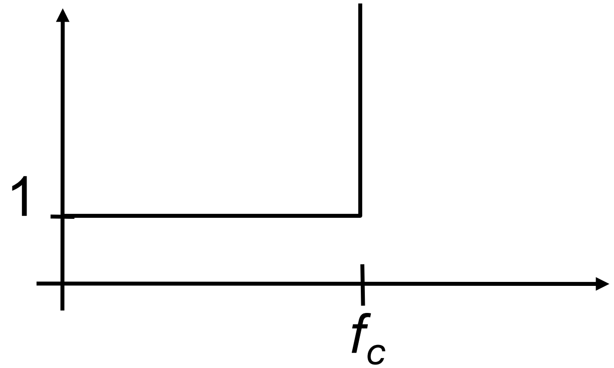
- Das Signal beim Verlust der hohen Frequenzen

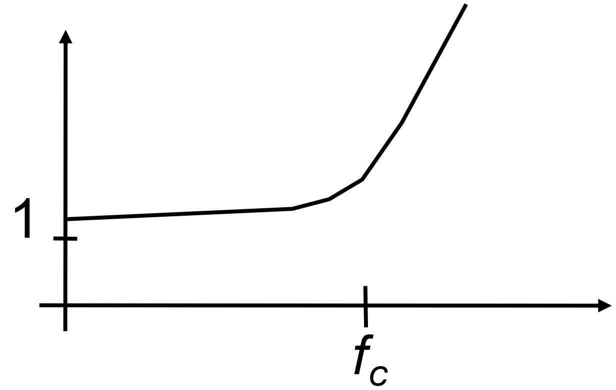


(aus Vorlesung von Holger Karl)

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

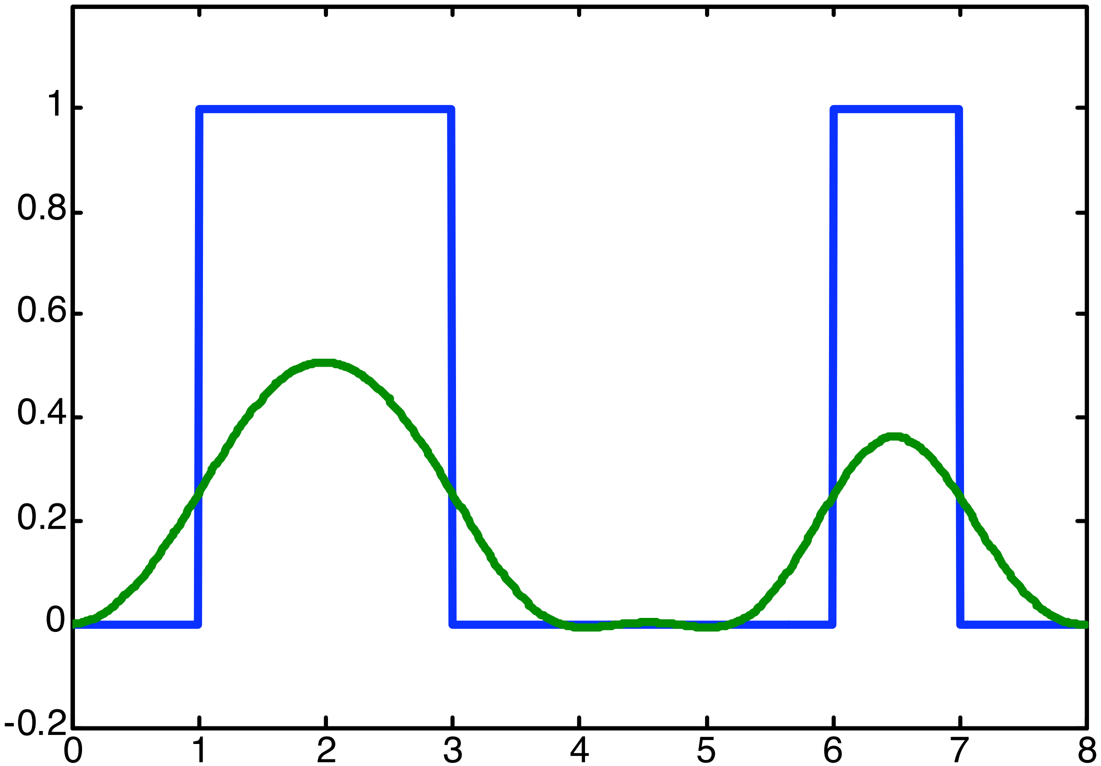




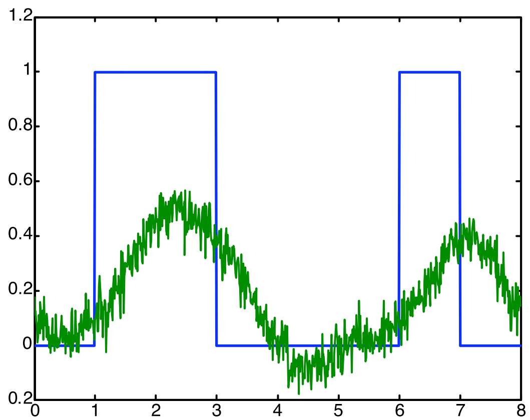
(aus Vorlesung von Holger Karl)

Beispiel mit realistischerer Dämpfung

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



Warum passiert das?



(aus Vorlesung von Holger Karl)

4. Das Medium stört und verzerrt

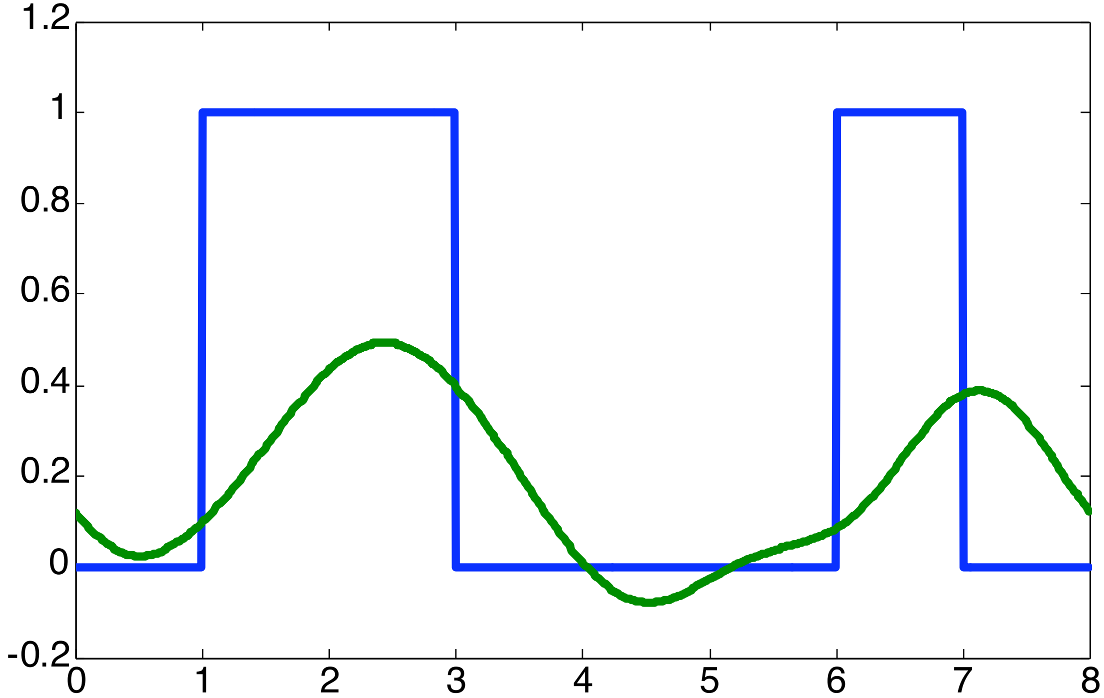
- In jedem Medium (außer dem Vakuum) haben verschiedene Frequenzen verschiedene Ausbreitungsgeschwindigkeit
  - Resultiert in Phasenverschiebung
  - Zu Erinnerung: Sinuskurve ist bestimmt durch Amplitude a, Frequenz f, and Phase φ

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

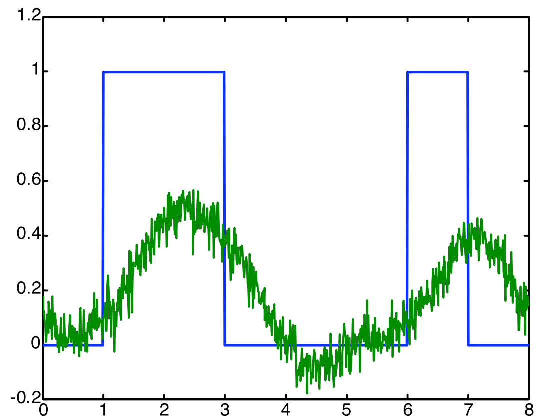
- Die Größe dieser Phasenverschiebung hängt von der Frequenz ab
  - Dieser Effekt heißt Verzerrung (distortion)

(aus Vorlesung von Holger Karl)

Frequenzabhängige Dämpfung und Verzerrung



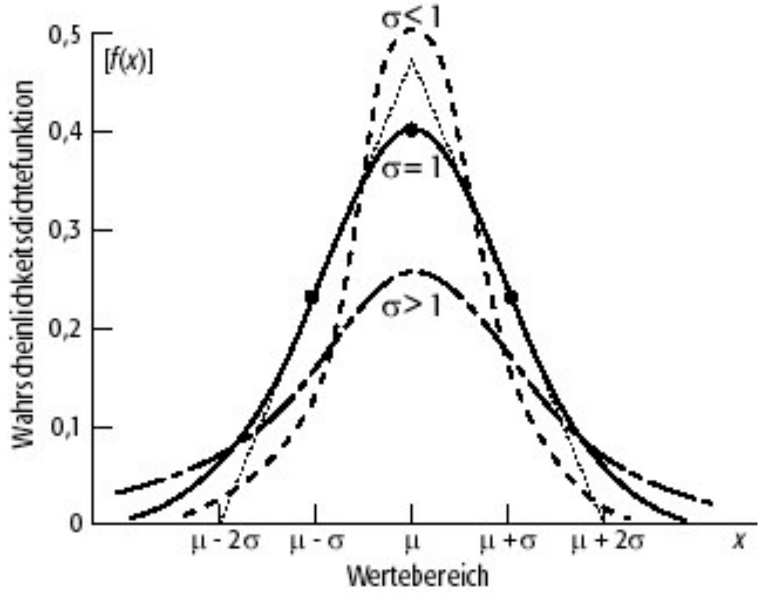
Warum passiert das:



(aus Vorlesung von Holger Karl)

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

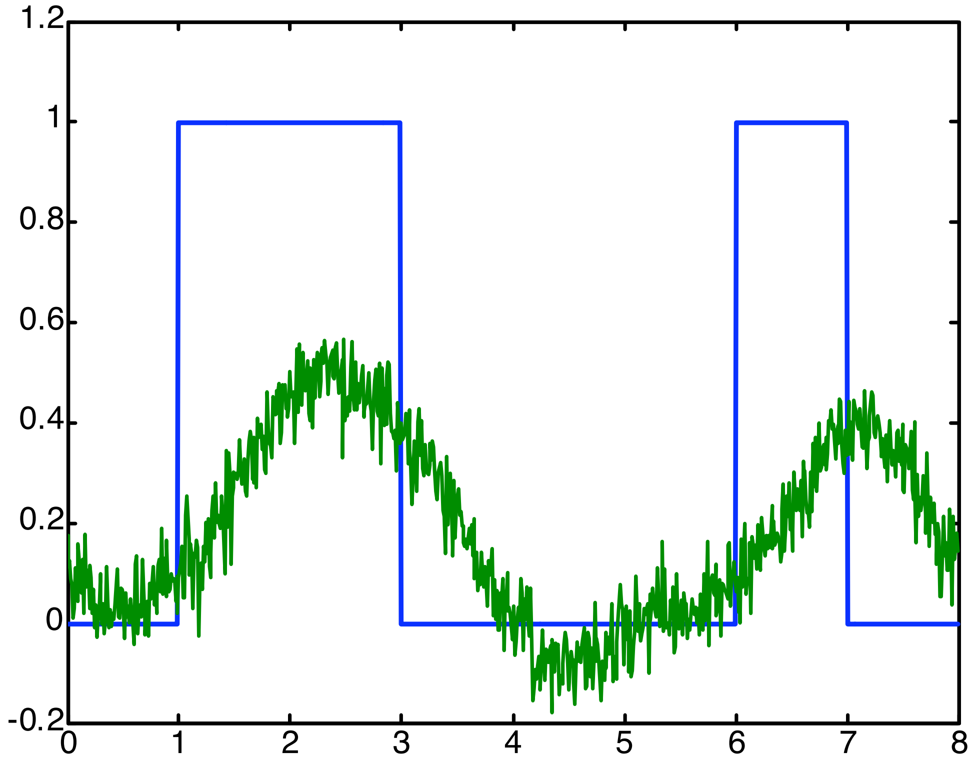


$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

(aus Vorlesung von Holger Karl)

Zusammenfassung

- Dies alles kann das Eingangssignal erklären.



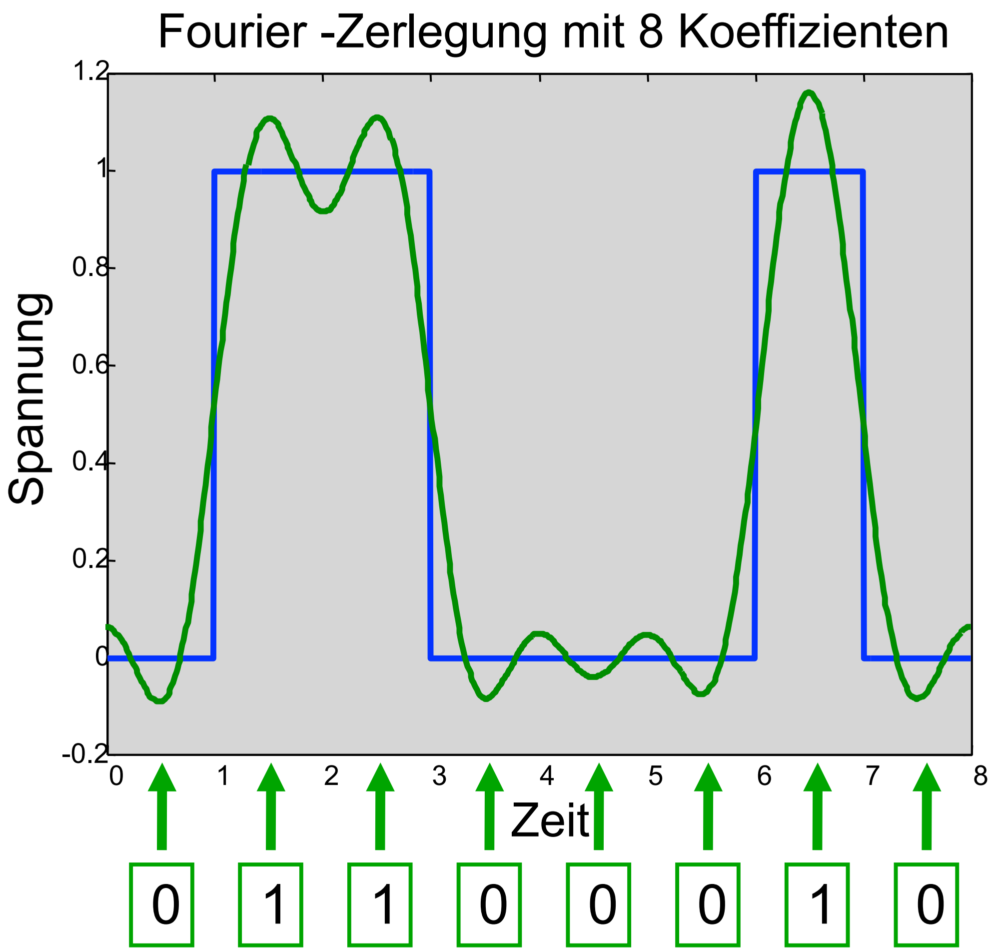
(aus Vorlesung von Holger Karl)

Basisband und Breitband

- 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

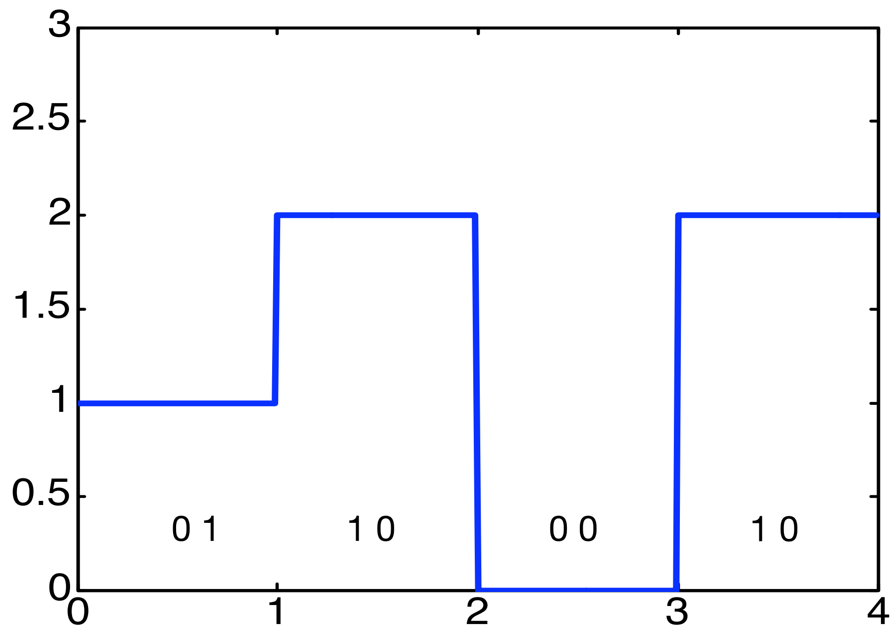
Wie oft muss man messen?

- Wie viele Messwerte sind notwendig, um eine Fouriertransformation bis zur k.-ten Komponenten 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}.



Symbole und Bits

- Für die Datenübertragung können statt Bits auch Symbole verwendet werder
- 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)



Nyquists Theorem

- 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

Der Satz von Shannon

- 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

Systeme II

2. Woche: Bitübertragungsschicht

Christian Schindelhauer
Technische Fakultät
Rechnernetze und Telematik
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg