

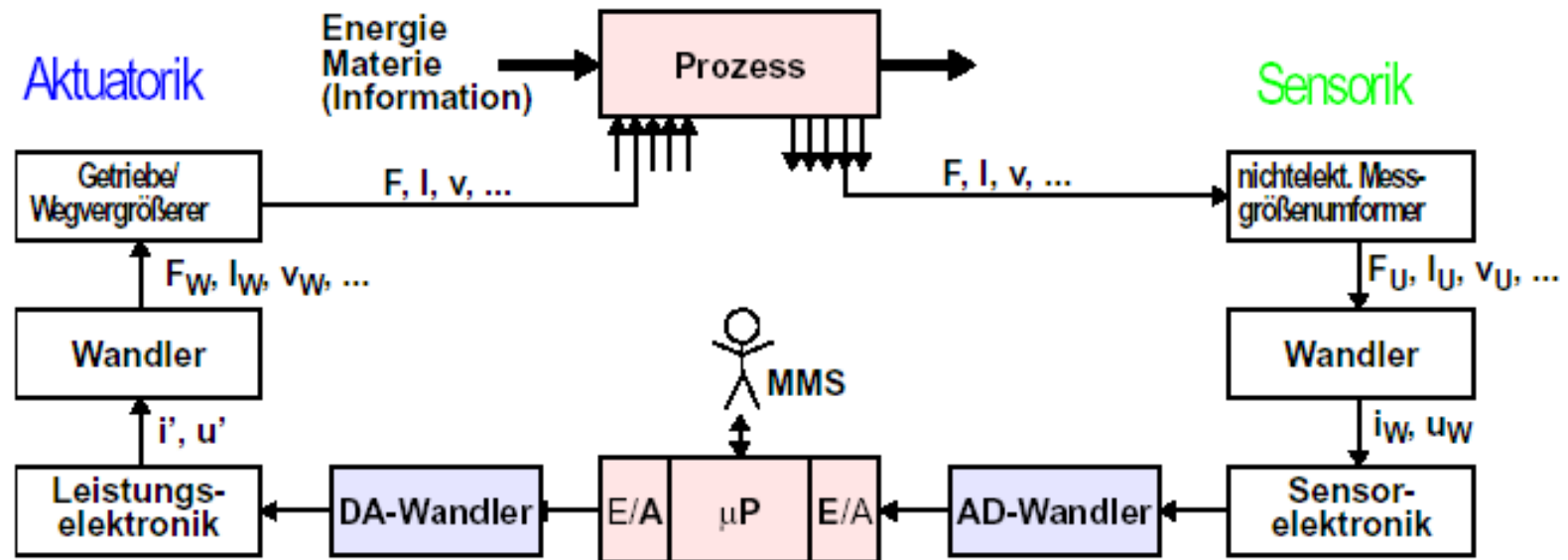
Gliederung der Vorlesung

1. Einleitung
2. Power Management
3. Parallele I/O
4. Serielle Schnittstelle
 - I²C
 - USART
5. Timer Bausteine
6. Interrupt Handling
7. Signalverarbeitung
8. Regelungen
9. Software Interrupt
10. Leitungscodes
11. Weiterführende Themen

Signalverarbeitung

Mikrocontroller werden oft eingesetzt in einer

- Regelung
- Prozesssteuerung



MMS: Multidimensionale und Multimodale Signale

In diesem Kapitel befassen wir uns mit analogen Signalen, z.B.

- Audiosignale
- Schwingungen, z.B. von Maschinen
- Analoge Messgrößen, z.B. Temperatur, Flüssigkeitsstände, Abstände und Geschwindigkeiten
- Analoge Stellgrößen, z.B. Motordrehzahl, Winkel eines Servos

Dieses Kapitel ist unterteilt in 3 Themenbereiche:

- Zeit- und Frequenzbereich
- Analog-Digital-Wandlung
- Digital-Analog-Wandlung

Zeit/Frequenz – Kreisfunktion im Zeitbereich

Die Verarbeitung von Analogen Signalen kann im Zeit- oder im Frequenzbereich erfolgen.

Diagramme im Zeitbereich:

- Auf der Achse nach rechts ist die Zeit
- Auf der Achse nach oben ist die Messgröße

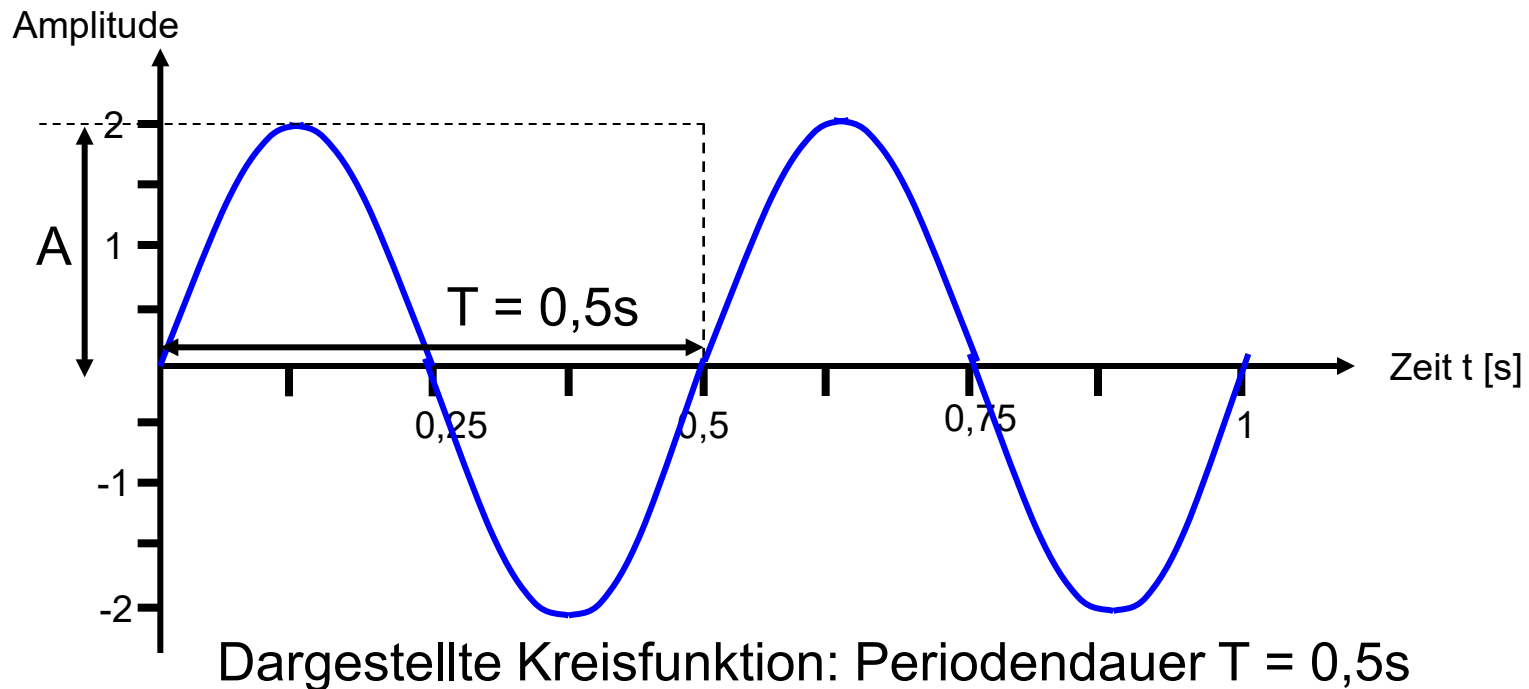
Dies ist die für uns vertrauteste Form der Darstellung. Sie zeigt die Veränderung der Messgröße im Verlauf der Zeit, zum Beispiel der wechselnde Luftdruck auf eine Mikrofonmembran, eine sich ändernde Wegstrecke, Temperatur etc.

Frequenzbereich (auch Spektralbereich):

- Auf der Achse nach rechts ist die Frequenz
- Auf der Achse nach oben ist die Intensität bzw. Amplitude

Diese Darstellung ist für (unendlich) periodische Signale sinnvoll. Wenn man einen kurzen Zeitraum betrachtet, kann man das Signal sich als wiederholend denken und so dennoch aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich umwandeln.

Zeit/Frequenz – Kreisfunktion im Zeitbereich



$$\text{Frequenz } f = \frac{1}{0.5} = 2 \text{ [Hz]}$$

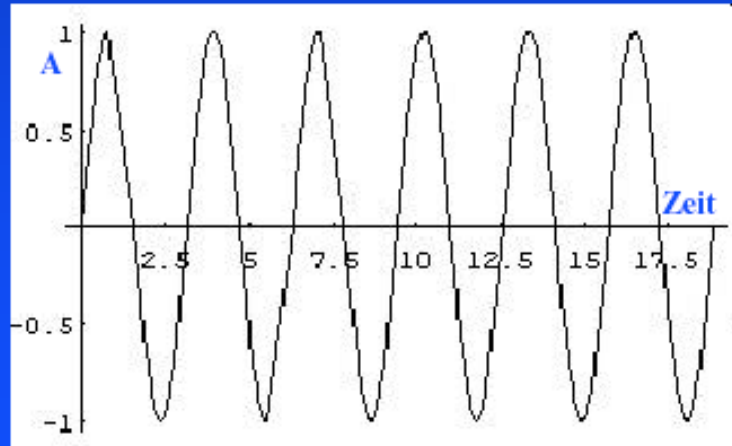
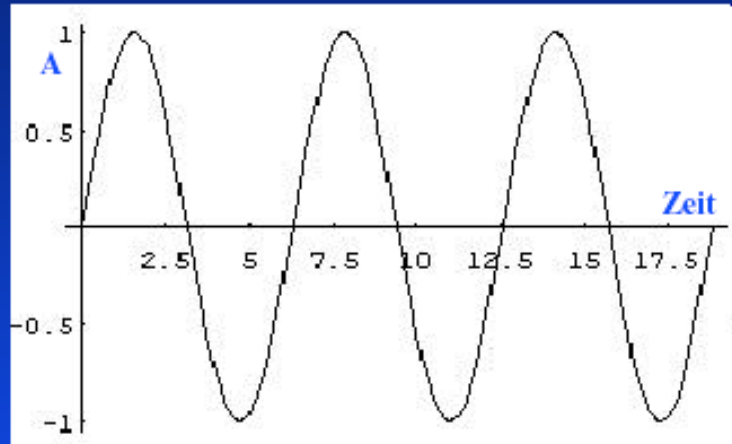
$$y(t) = 2 \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right) = \sin 2 \left(2\pi \frac{t}{0.5}\right) = 2 \sin(4\pi t)$$

Allgemein: $y(t) = A \sin(2\pi f t)$

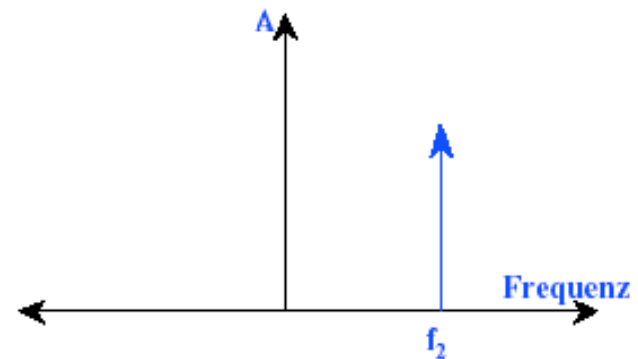
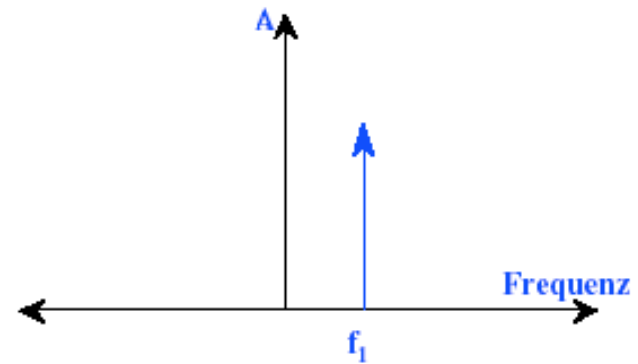
Mit der Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$ auch oft geschrieben als $y(t) = A \sin(\omega t)$

Zeit/Frequenz – Vergleich der Diagramme

Zeitbereich



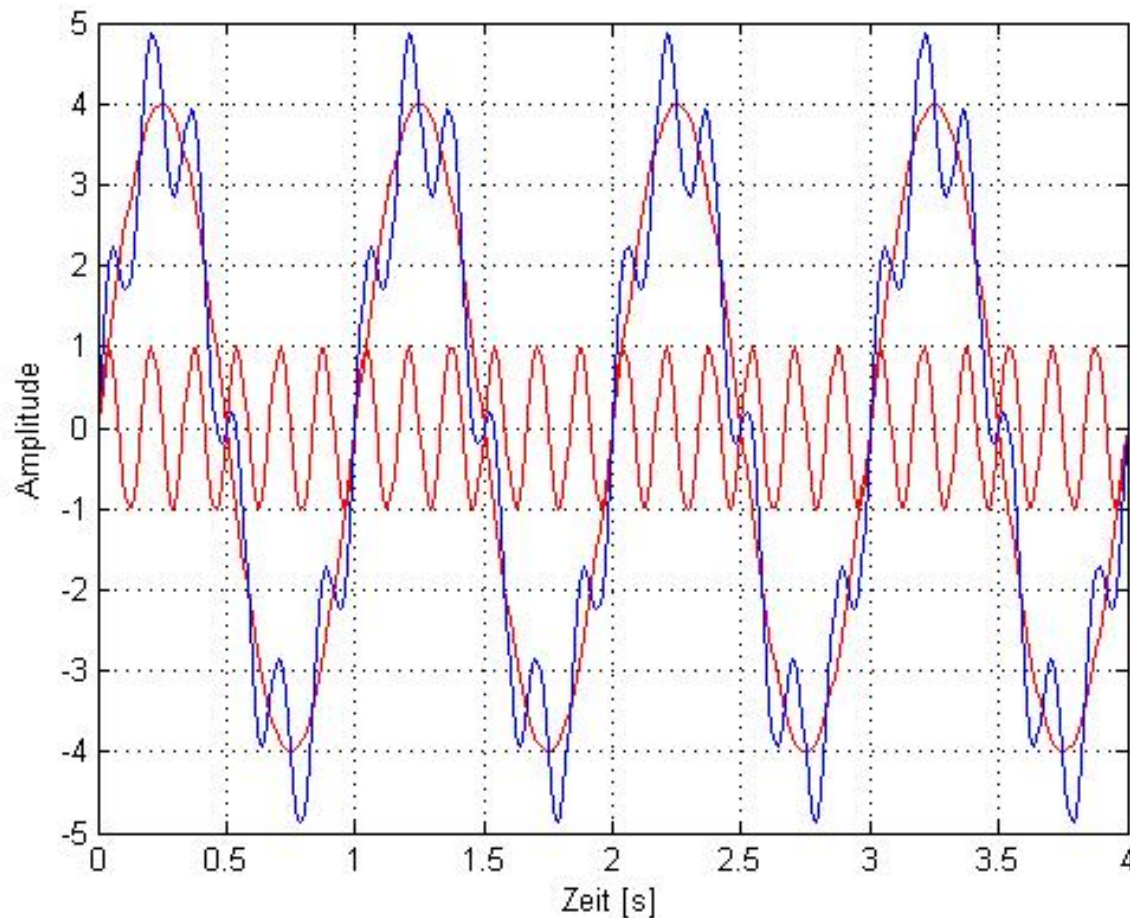
Frequenzbereich



Zeit/Frequenz – Überlagerung von Funktionen

Beispiel einer überlagerten Funktion:

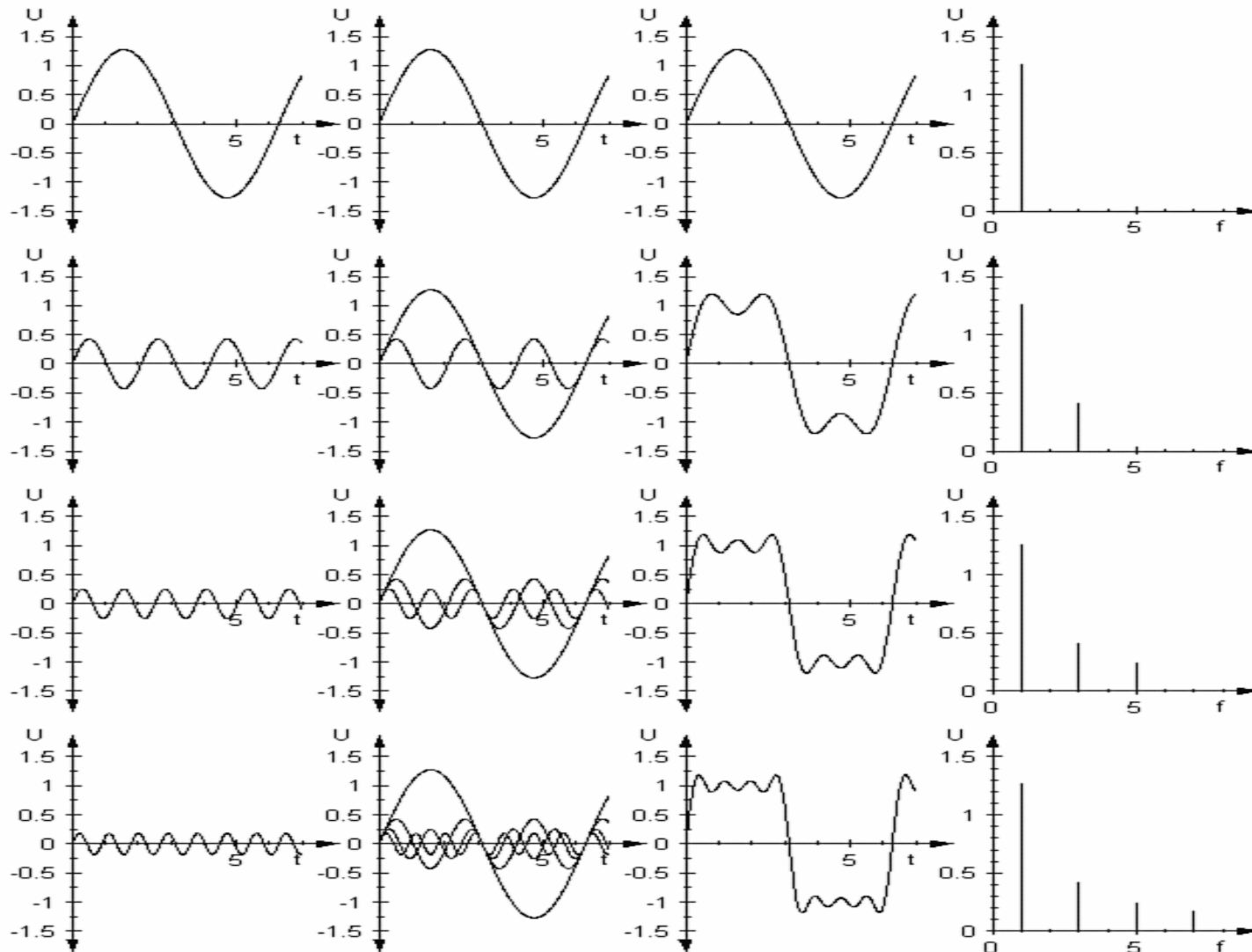
$$y(t) = 4 \sin(2\pi t) + \sin(12\pi t)$$



Vergleiche Beispiele auf
<http://www.falstad.com/fourier/e-index.html>

Zeit/Frequenz – Rechteckfunktion

Beispiel einer Rechteckfunktion: (Quelle Wikipedia)



Eine periodische (oder periodisch fortsetzbare) Funktion lässt sich durch eine Reihe von Sinus- und Kosinusfunktionen darstellen, deren Frequenzen ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz sind:

(Quelle Wikipedia)

$$f_n(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n (a_k \cdot \cos(k\omega t) + b_k \cdot \sin(k\omega t)).$$

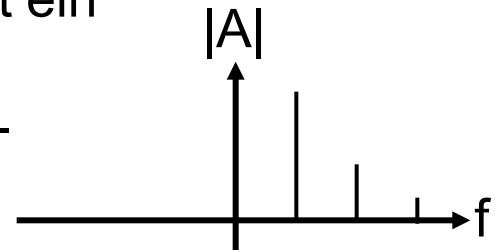
$$\omega = 2\pi \cdot f$$

Die **Kreisfrequenz** ω ist definiert als das 2π -fache der Frequenz f eines periodischen Vorgangs.

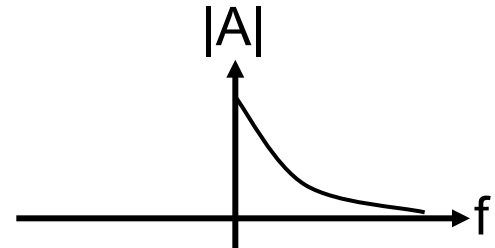
Zeit/Frequenz – Fourier-Transformation

Die Abbildung des Zeit- in den Frequenzbereich erfolgt durch die **Fourier-Transformation**. Man spricht dabei auch von der **Fourier-Analyse**.

Ein **periodisches Signal** bestehend aus einer Grundfrequenz und deren ganzzahlige Vielfache besitzt ein diskretes Spektrum. Im Frequenzbereich bilden Einzelfrequenzen eine **Fourier-Reihe** (diskrete Fourier-Transformation mittels Zahlenreihen und in Form von numerischen Algorithmen).



Ein **nicht-periodisches Signal** besteht aus einem kontinuierlichem Spektrum an Frequenzen (kontinuierliche Fourier-Transformation mittels Infinitesimalrechnung).

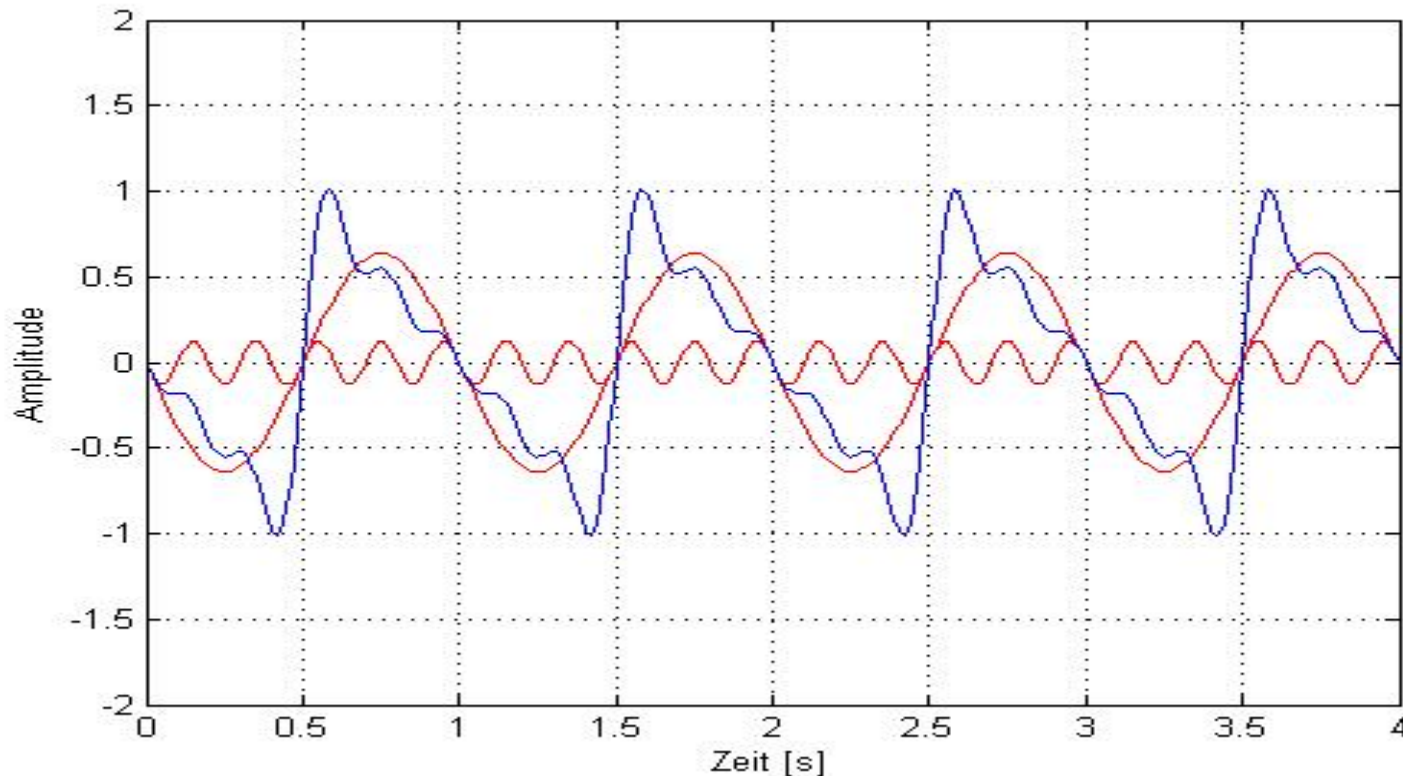


Umkehrfunktionen der Fourier-Transformation erlauben die **Fourier-Synthese** von Signalen aus ihrem Spektrum.

Zeit/Frequenz – Sägezahnfunktion

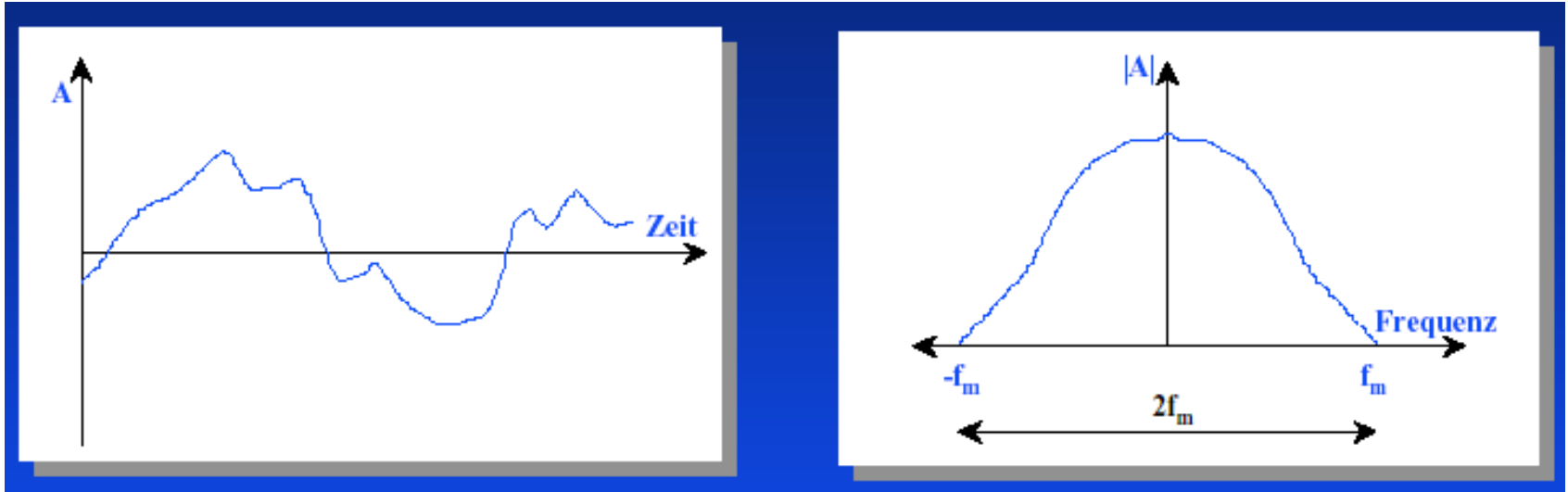
Beispiel einer Sägezahnfunktion: (Quelle Wikipedia)

$$\begin{aligned} f(t) &= -\frac{2h}{\pi} \left[\sin \omega t - \frac{1}{2} \sin 2\omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t \mp \dots \right] \\ &= -\frac{2h}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k-1} \frac{\sin k\omega t}{k} \end{aligned}$$



$h = 1,$
 $k = 1, \dots, 5$

Zeit/Frequenz – Reale Signale

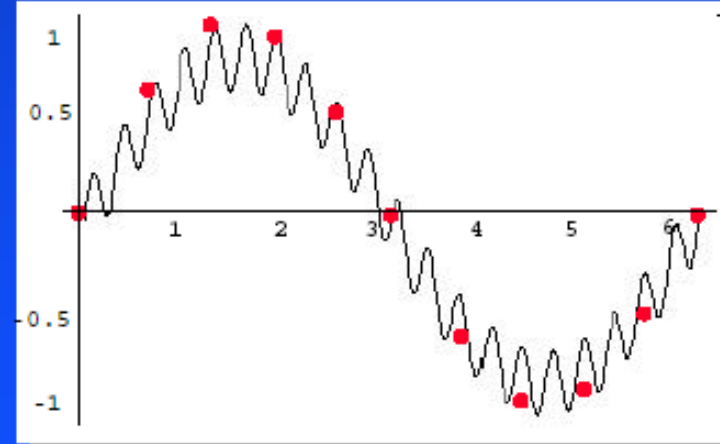
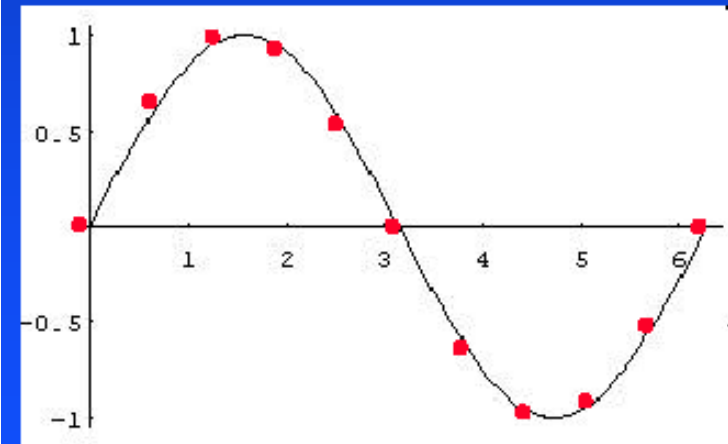
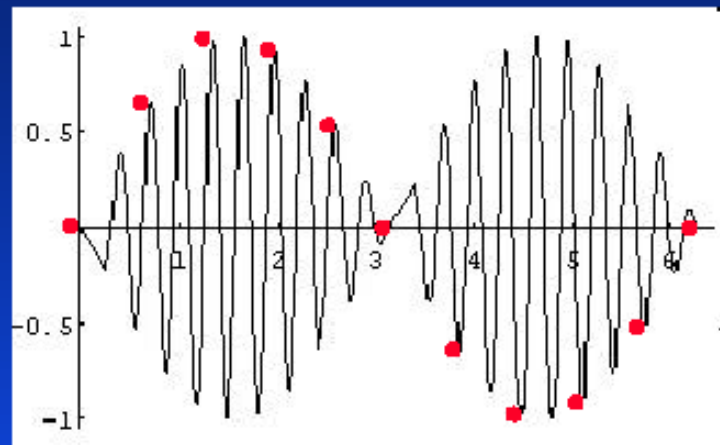
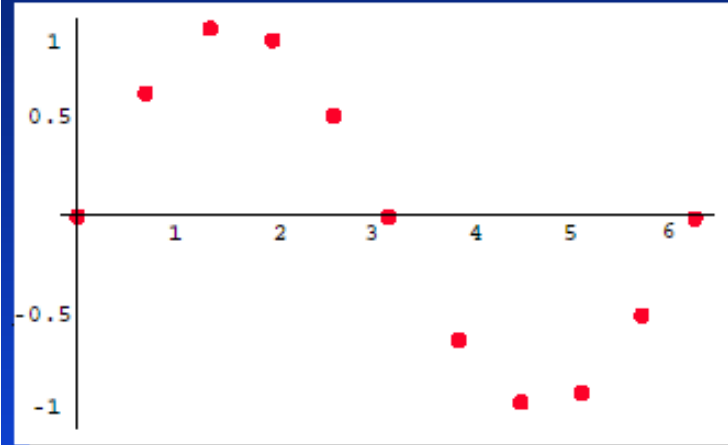


- Die bisher betrachteten idealen Signale waren sich unendlich wiederholende periodische Signale.
- Reale analoge Signale sind kontinuierliche Signale.
- Reale Signale sind Mischungen vieler Frequenzen.
- Sie besitzen eine Bandbreite $2 \cdot f_m$
- Als Frequenzspektrum bezeichnet man alle enthaltenen Frequenzen.

Zeit/Frequenz – Fehlende Information

Rekonstruktion des Signals nach Abtastung ?

Wahl der Abtastfrequenz ist wichtig



Zeit/Frequenz – Abtasttheorem

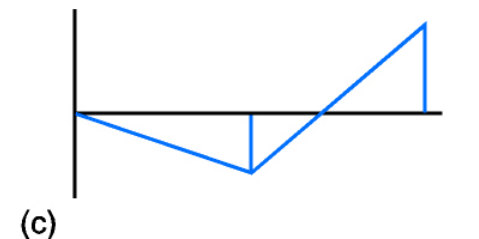
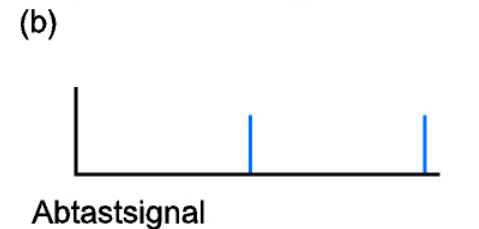
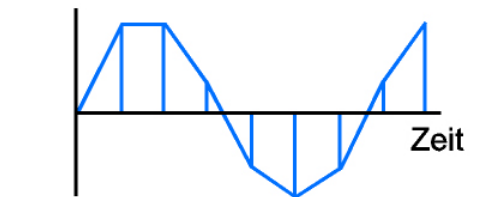
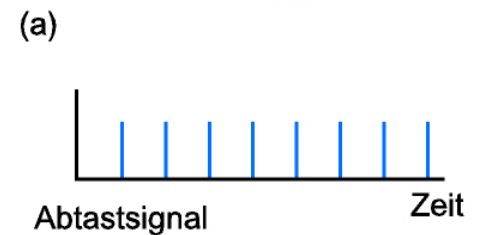
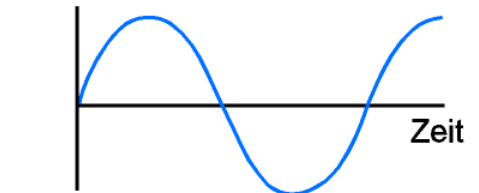
Abtasttheorem von Shannon (Nyquist Kriterium):

Rekonstruktion des Signals in der ursprünglichen Form nur möglich, wenn **Abtastfrequenz f_s** mehr als doppelt so gross ist, wie die grösste Frequenz $f_{\max}$ im abgetasteten Signal

$$f_s > 2 \cdot f_{\max}$$

Falls Abtastfrequenz niedriger, kann die Rekonstruktion ein anderes analoges Signal darstellen

-> **Aliasing** (dt. Pseudonymisierung)



Zeit/Frequenz – Problem Aliasing – 1

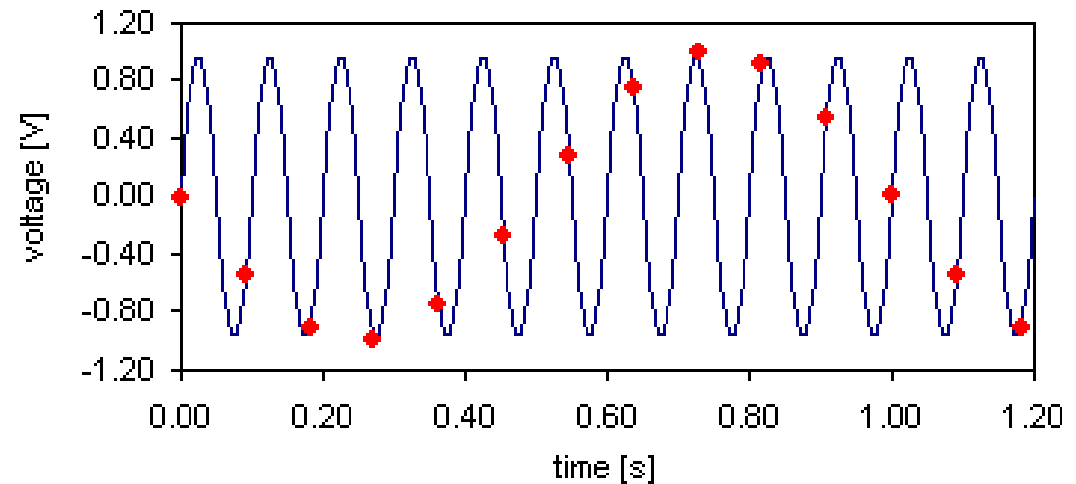
10 Hz Signal

Abtastung: 11 Hz

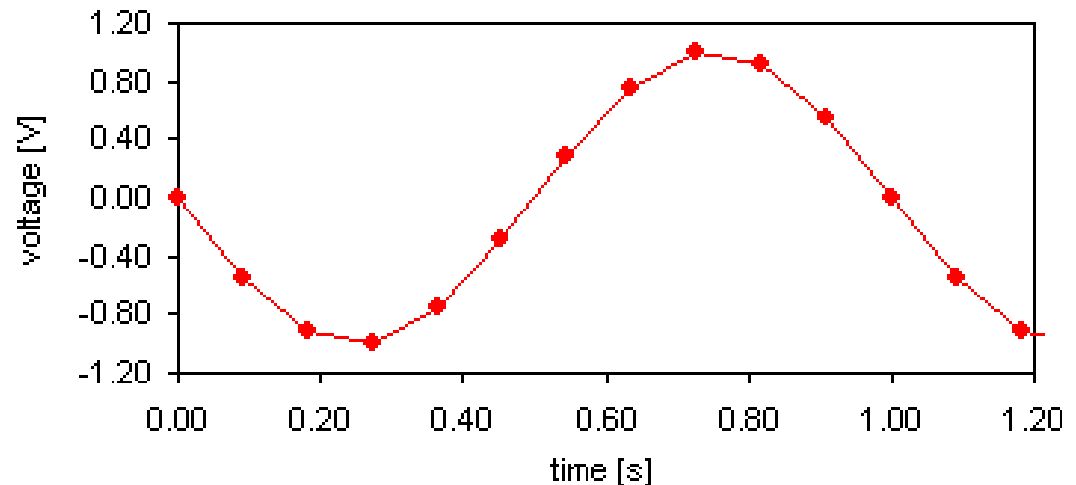
Ergebnis:

1 Hz (!)

Actual and Sampled Data



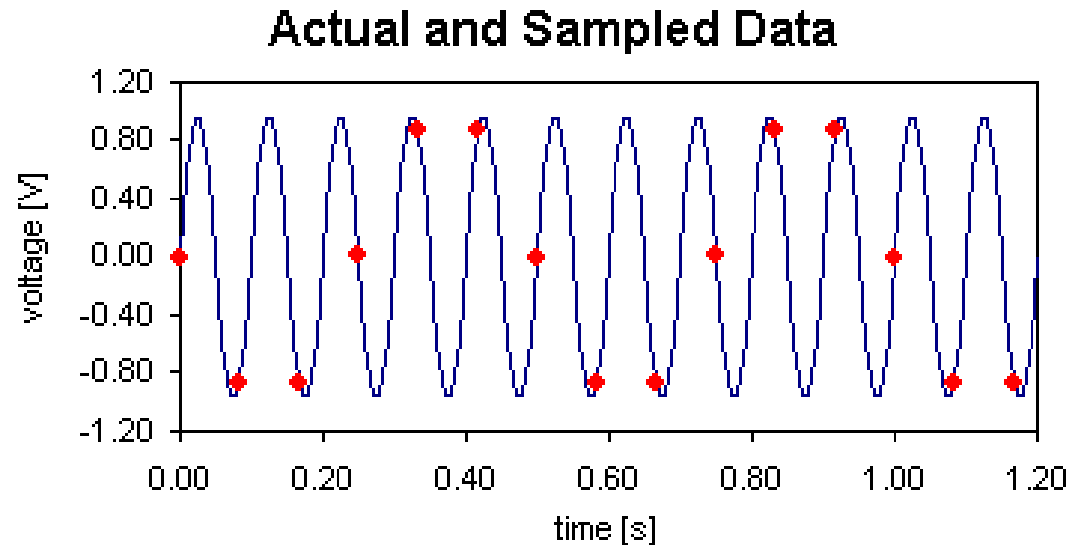
Sampled Data Alone



Zeit/Frequenz – Problem Aliasing – 2

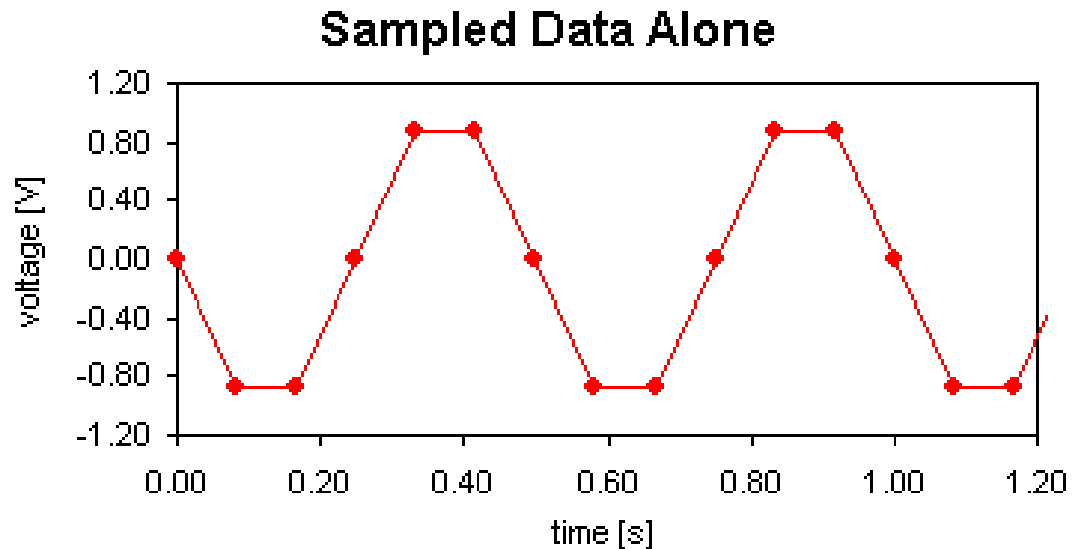
10 Hz Signal

Abtastung: 12 Hz



Ergebnis:

2 Hz (!)



Zeit/Frequenz – Problem Aliasing – 3

10 Hz Signal

Abtastung: 5 Hz

Achtung:

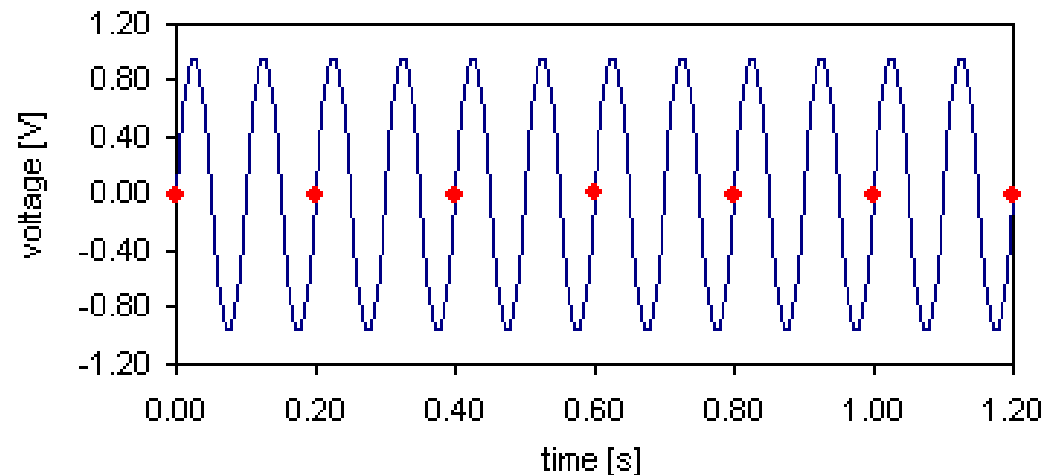
$$f_{\text{sample}} = f_{\text{signal}} / N$$

hier $N = 2$

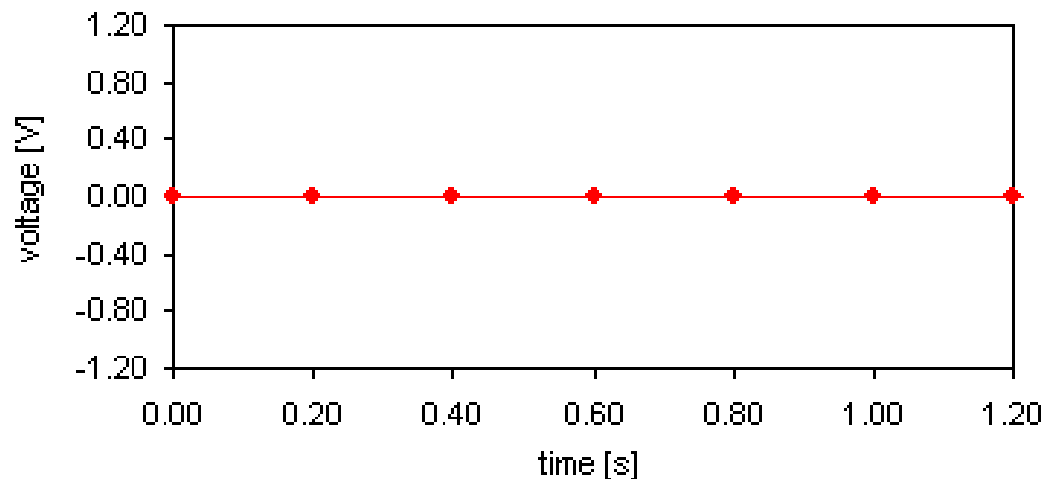
Ergebnis:

0 Hz (!)

Actual and Sampled Data



Sampled Data Alone



Überabtastung

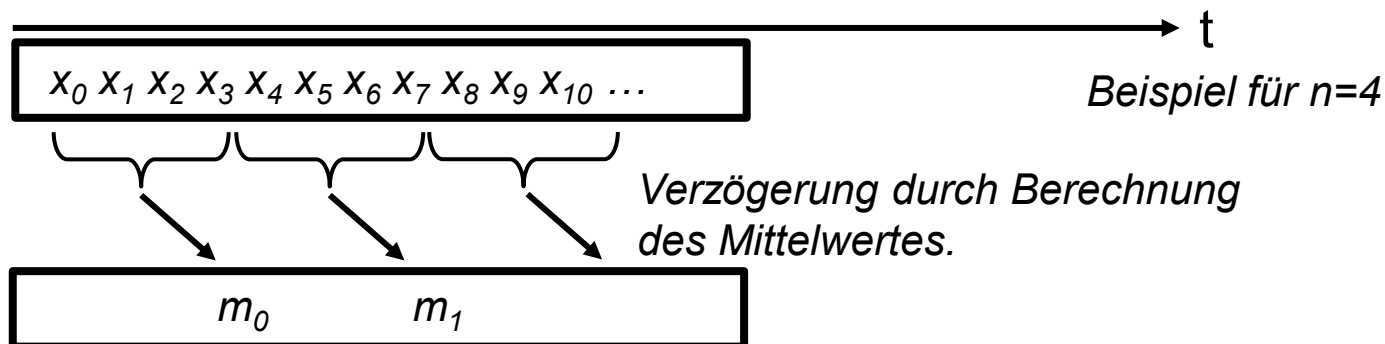
- Abtastung mit einem Mehrfachen der benötigten Abtastfrequenz nach Nyquist
- Oft wählt man 2er-Potenzen als Vielfache
- Vorteile für die weitere Signalverarbeitung z.B. als Anti-Aliasing-Filter
- Erhöhung des Signal-/Rauschabstands (Signal-Noise-Ratio SNR)
- Erlaubt die Abtastung mit geringerer Auflösung (Bitbreite) und Berechnung eines Samples mit höherer Auflösung bei geringerer Abtastrate.

Zeit/Frequenz – Oversampling und Mittelwert

- Die durch Überabtastung entstandenen Messwerte lassen sich mittels Mittelwertbildung verarbeiten.
- Der Mittelwert kann als Signal mit einer entsprechend höheren Auflösung bei reduzierter Abtastfrequenz interpretiert werden.
- Für n Messwerte x_i berechnet sich der Mittelwert m :

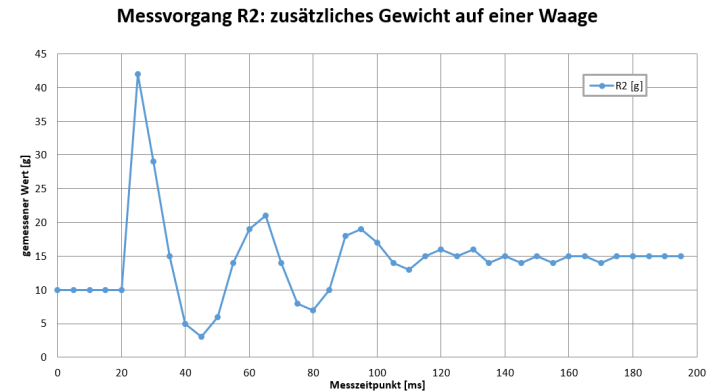
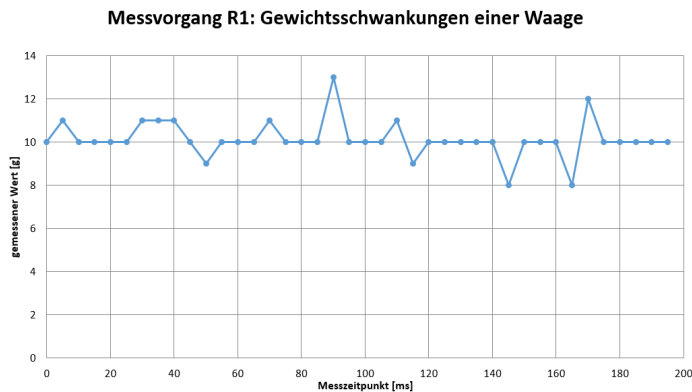
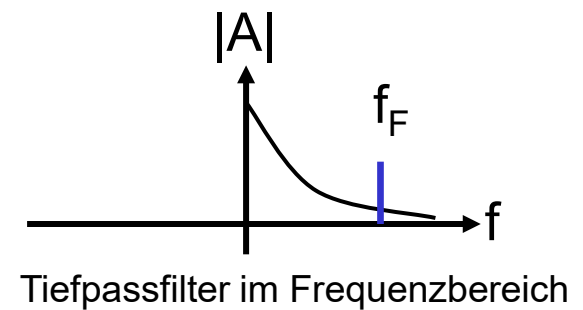
$$m = 1/n \sum_{i=0}^{n-1} x_i$$

- Für eine kontinuierliche Folge von Messwerten lässt sich die Berechnung für jeweils n Zahlen durchführen.
- Die Mittelwertbildung erzeugt eine Verzögerung in der Signalverarbeitung.



Zeit/Frequenz – Tiefpassfilter

- Filtert die hohen Frequenzen heraus
- Glättet das Signal, da Peaks äquivalent sind zu hohen Frequenzen
- Implementierung für digitale Repräsentation u.a. über Mittelwertbildung
- Anwendung bei störenden Impulsen



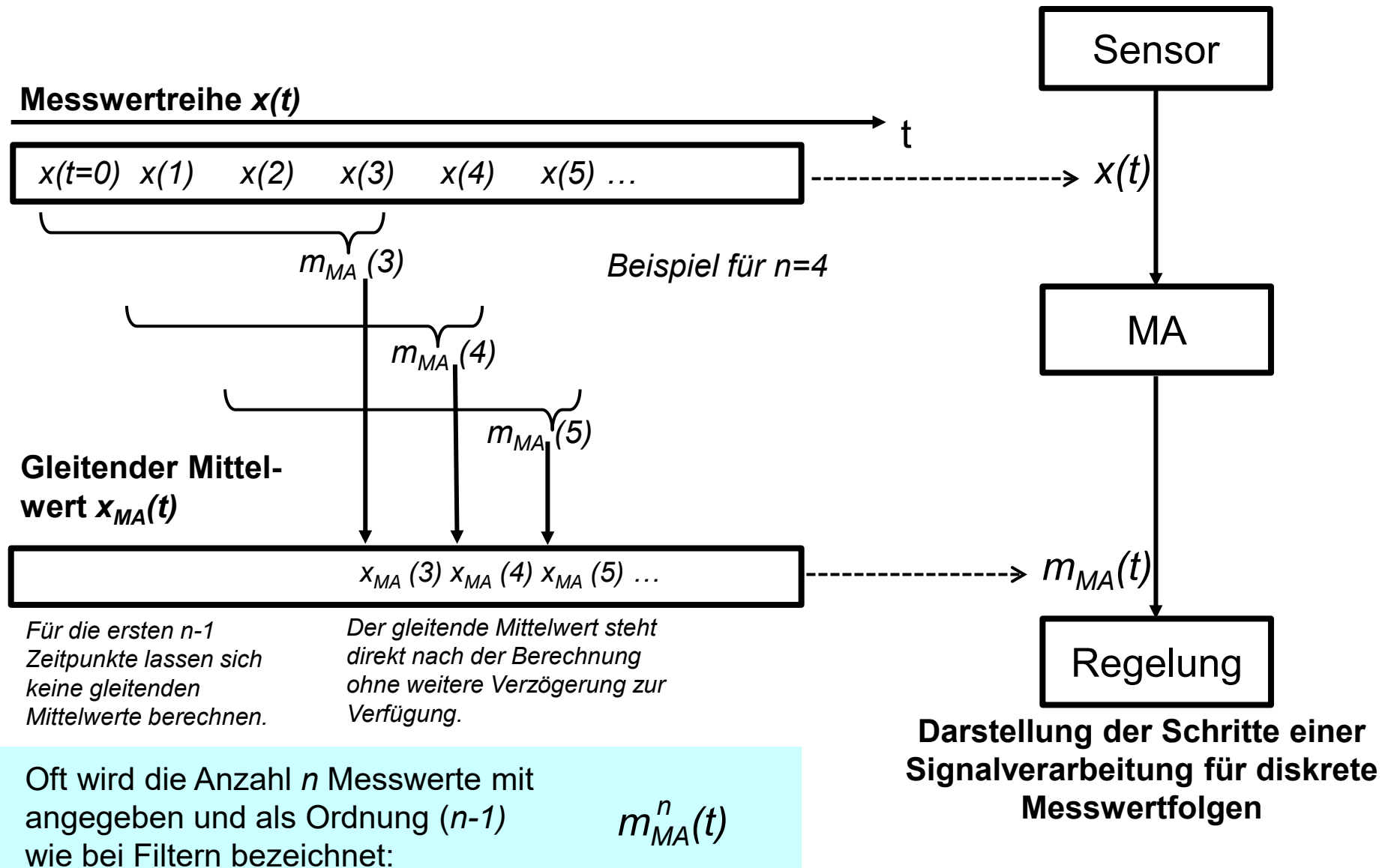
Zeit/Frequenz – gleitender Mittelwert

- Die abgetasteten Messwerte lassen mittels gleitender Mittelwertbildung verarbeiten.
- Der gleitender Mittelwert kann als Messwertfolge mit Tiefpassfilterung bei gleichbleibender Auflösung interpretiert werden.
- Zum Zeitpunkt t berechnet sich der jeweilige gleitende Mittelwert m_j :

$$m_{MA}(t) = 1/n \sum_{i=0}^{n-1} x(t - i)$$

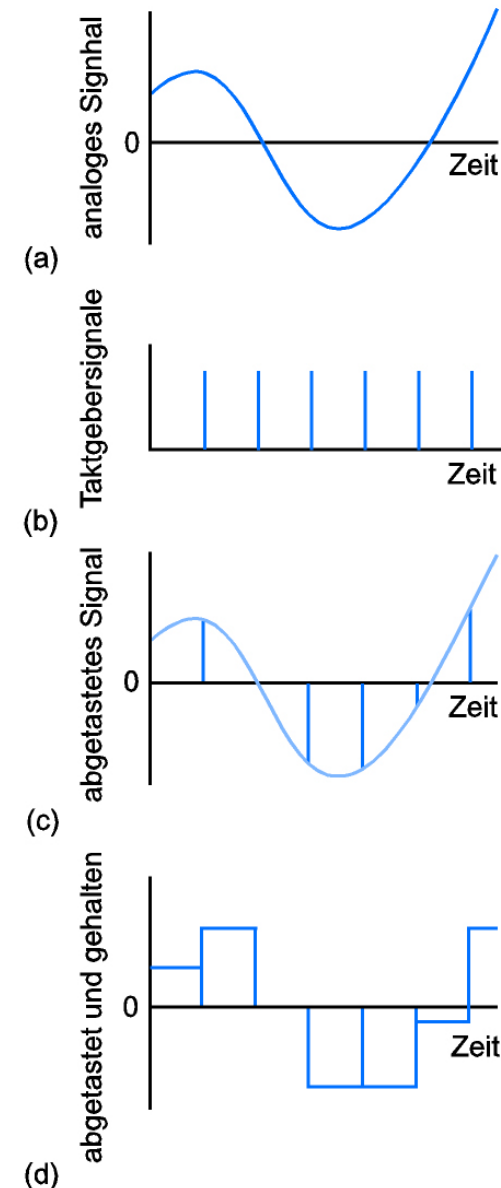
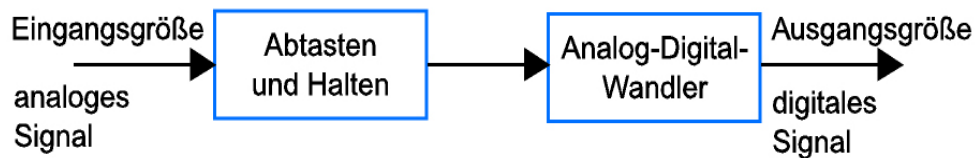
- Für eine kontinuierliche Folge von Messwerten lässt sich die Berechnung für jeweils n Zahlen als gleitender Mittelwert (Moving Average MA) durchführen.
- Das „Rauschen“ von Messwerten sind Schwankungen des Messwertes durch messprinzipbedingte Streuung oder auch durch eine kleinere Messgenauigkeit als die gewählte Genauigkeit der Darstellung der Messwerte.
- Das Rauschen entspricht hohen Frequenzanteilen im Signal.
- Die Bildung eines gleitenden Mittelwerts filtert hohe Frequenzanteile und „glättet“ somit das Signal.
- Sprunghafte Signaländerungen werden durch die gleitende Mittelwertbildung erst verzögert sichtbar.

Zeit/Frequenz – Beispiel gleitender Mittelwert



Analog-Digital Wandlung (ADC)

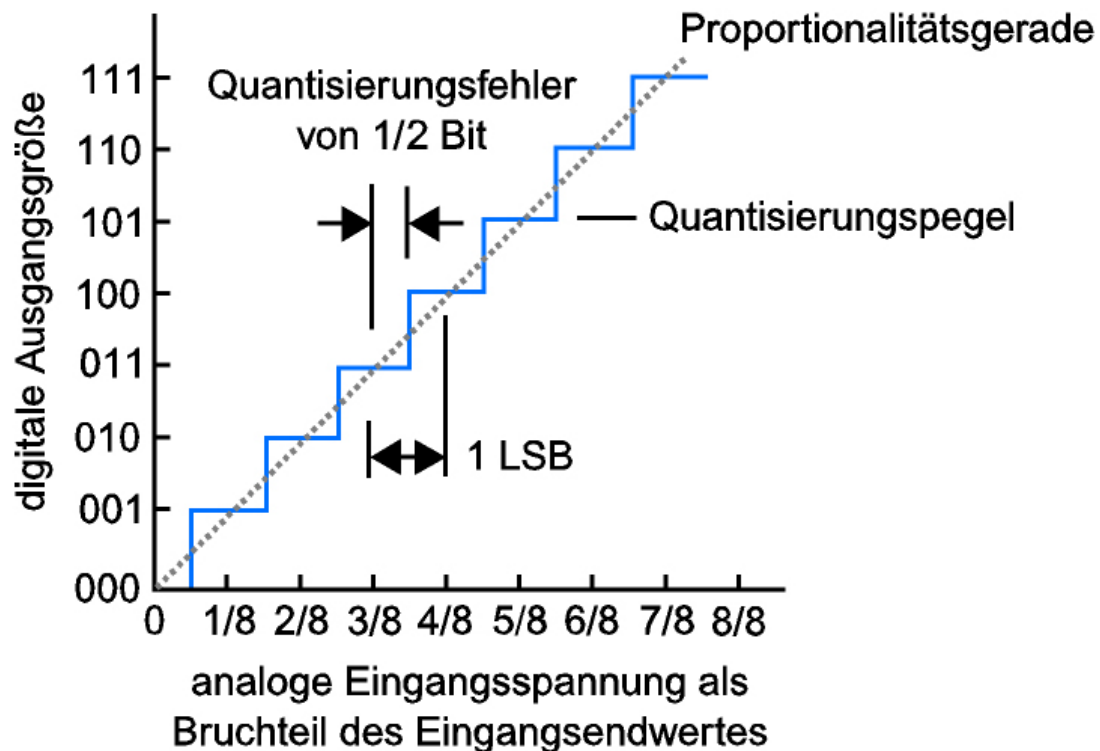
- Analog-Digital-Wandlung
 - umfasst die Umwandlung von analogen Signalen in binäre Wörter
 - Takt sorgt für Abtastung
 - Abtast- und Halteeinheit hält den abgefragten Wert bis zum nächsten Taktimpuls



Analog-Digital Wandlung

Beziehung zwischen der abgetasteten (und gehaltenen)
Eingangssgröße und der Ausgangssgröße

Beispiel: 3 Bit Auflösung



Analog-Digital Wandlung

Allgemein: Wortlänge n Bits

Die minimale Änderung der Eingangsgrösse, die erfasst wird, beträgt:
 $U/2^n$ (U Größenbereich des Analogsignals)

Beispiel:

Wortlänge n : 10 Bits

Größenbereich des Analogsignals U : 10 V

-> Auflösung: $10 \text{ V} / 2^{10} = 10 \text{ V} / 1024 = 9,8 \text{ mV}$

Hörsaalübung:

Thermoelement mit Ausgangsgrösse 0,5 mV/Grad Celsius

Welche Wortlänge n ist erforderlich bei einem Temperaturbereich von 0 bis 200 Grad

Geforderte Auflösung: 0,5 Grad

Analog-Digital-Wandlung – Datenvolumen

Datenvolumen **Beispiel: 1 min Audiosignal**

☐ Hifi-Qualität

$D = 60 \text{ s} \cdot 44100 \text{ Abtastungen/Sek.} \cdot 16 \text{ bit/Sample} = 5292 \text{ kByte}$
(hörbarer Bereich bis ca. 20 kHz)

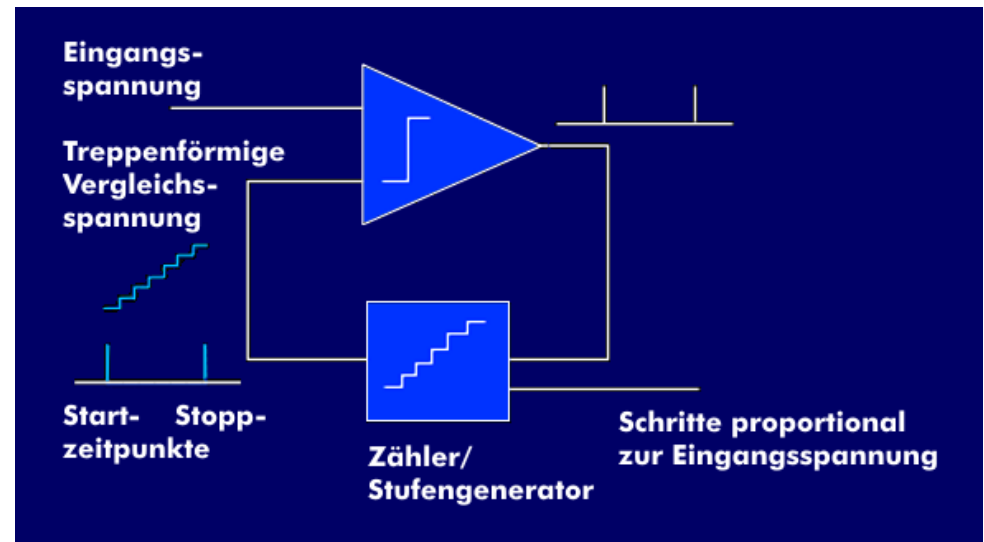
☐ Telefon(ISDN)-Qualität

$D = 60 \text{ s} \cdot 8000 \text{ Abtastungen/Sek.} \cdot 8 \text{ bit/Sample} = 480 \text{ kByte}$

Telefonie in Hifi-Qualität verursacht 11-fach höhere Übertragungskosten.
Ursache: Abtastrate und Wertdiskretisierung

Zählverfahren

- der kleinste gewünschte Schritt (LSB) aufeinander addiert und an einen Komparator geliefert, bis der Wert gleich oder größer der angelegten analogen Referenzgröße ist.
- Schritte werden mit einem Zähler erzeugt
 - geringer Schaltungsaufwand
 - Umsetzungszeit abhängig von der Eingangsgröße



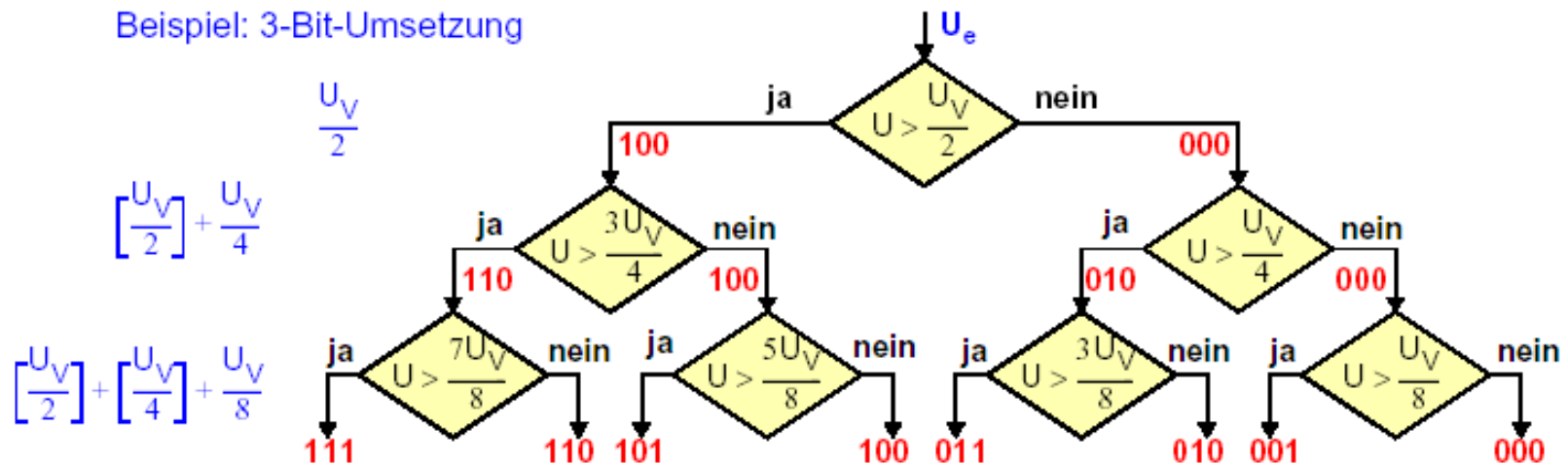
Quelle: itwissen.info

Analog-Digital Wandlung

Wägeverfahren

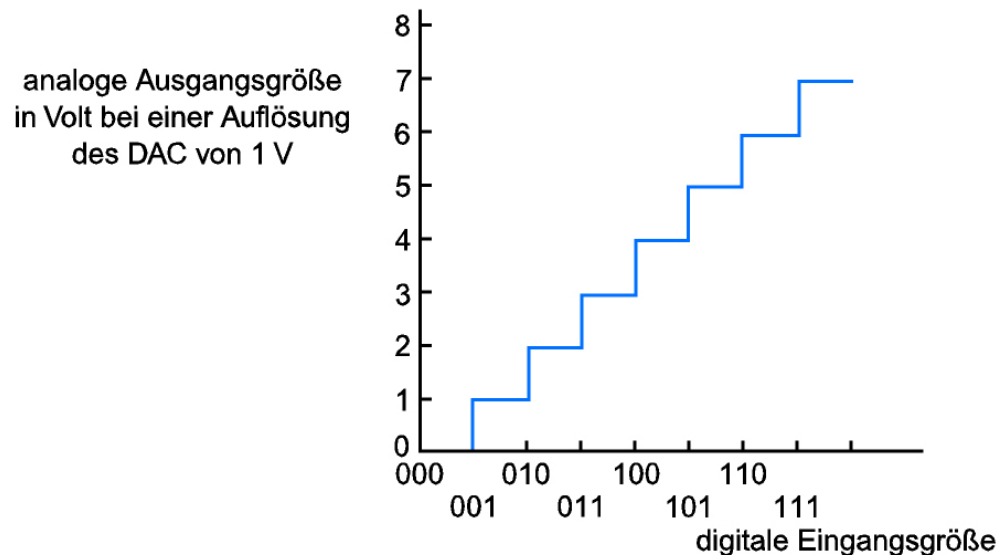
- bitserieller Vergleich, beginnend mit MSB
- analog zum Abwiegen eines unbekannten Gewichts mittels Balkenwaage

Beispiel: 3-Bit-Umsetzung



Digital-Analog Wandlung (DAC)

- ❑ Eingangsgrösse ist ein binäres Wort
- ❑ Ausgangsgrösse analoges Signal der gewichteten Summe der (gesetzten) Bits



Beispiel: Regelventil (vollständige Öffnung 6 V)

8 Bit Digital-Analog Wandlung

Frage: Änderung der Ausgangsgrösse zum Ventil bei einer Änderung von 1 Bit ?

Digital-Analog Wandlung (DAC)

□ Direktes Verfahren

- Alle möglichen Ausgangswerte bereitgestellt (Spannungsteiler)
- Direkt mit dem digitalen Wert über einen 1-aus- n Schalter (Multiplexer) ausgewählt.
- Schnellste und aufwändigste Verfahren
- Einsatz nur in Umsetzern mit sehr wenigen Bits

□ Paralleles Verfahren

- Analoges Ausgangssignal durch je einen parallel geschalteten Widerstand pro Bit erzeugt, der je nach Bit gewichtet ist.
- Verwendung eines R2R-Netzwerk
- Man benötigt so viele Schalter, wie Bits zur Darstellung der digitalen Werte verwendet werden.

