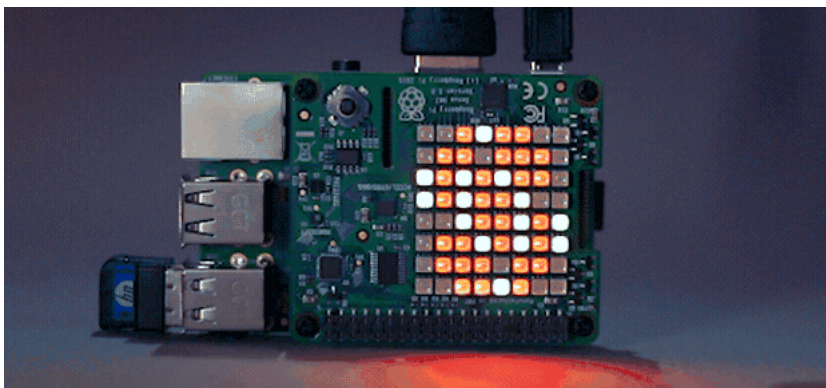


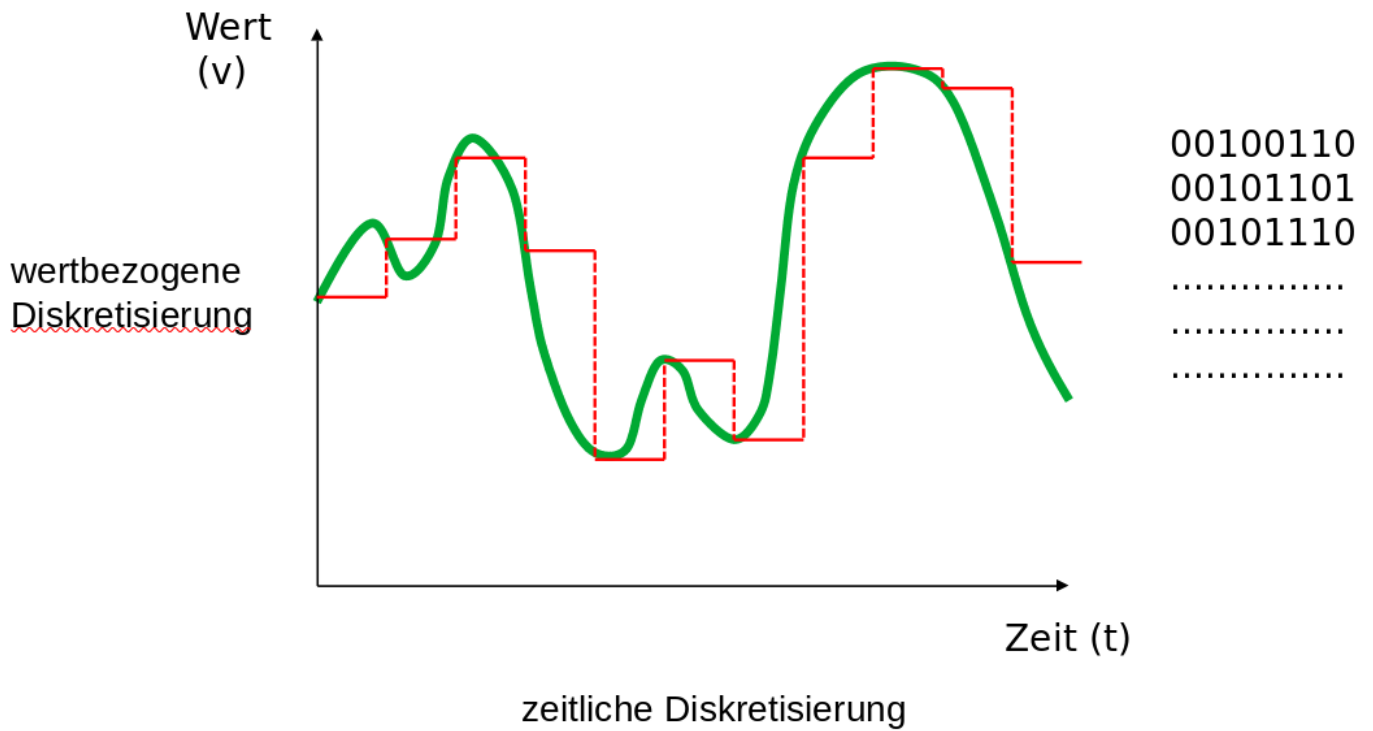
Analog-Digital-Wandler

Parameter	Kursinformationen
Veranstaltung:	Vorlesung Digitale Systeme
Semester	Sommersemester 2022
Hochschule:	Technische Universität Freiberg
Inhalte:	Beschreibung des Aufbaus des Analog-Digital-Wandlers und der Implementierung in der Atmega Familie
Link auf den GitHub:	https://github.com/TUBAF-lfi-LiaScript/VL_DigitaleSysteme/blob/main/lectures/04_AnalogDigitalWandler.md
Autoren	Sebastian Zug, Karl Fessel & Andr� Dietrich



Motivation

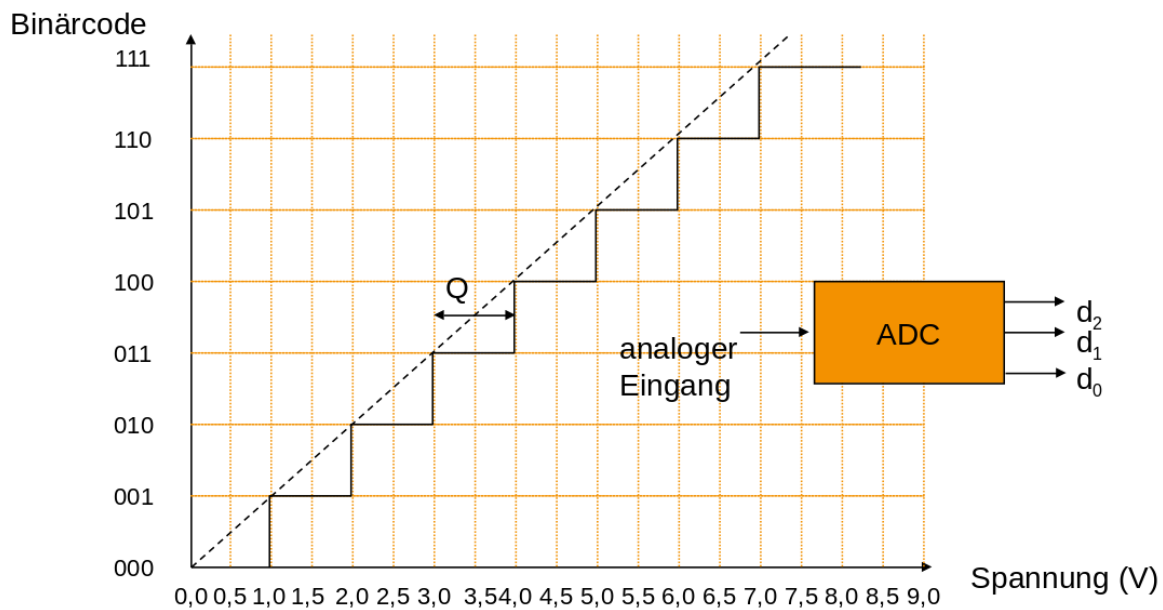
In der vorangegangenen Vorlesung sprachen wir insbesondere über die Erfassung von digitalen Signalen. Eine Erfassung von analogen Werten ist allerdings notwendig, um Phänomene der Umgebung mit dem notwendigen Detailgrad beobachten zu können.



Dabei wird das zeit- und wertkontinuierliche Eingangssignal in eine zeit- und wertdiskrete Darstellung überführt.

Die Idee besteht darin einem Spannungswert einer Zahlenrepräsentation zuzuordnen, die einen Indexwert innerhalb eines beschränkten Spannungswert repräsentiert.

	minimaler Wert		maximaler Wert					
Analog	0V	← Wert →	8V					
Digital	0 1 2 3 4 5 6 7							3 Bit Auflösung
	0 2 3 4							2 Bit
	0 1							1 Bit



Daraus ergibt sich die zentrale Gleichung für die Interpretation des Ausgabens eines Analog-Digital-Wandlers

$$ADC = \frac{V_{in}}{V_{ref}} ADC_{res}$$

oder

$$\frac{ADC \cdot V_{ref}}{ADC_{res}} = V_{in}$$

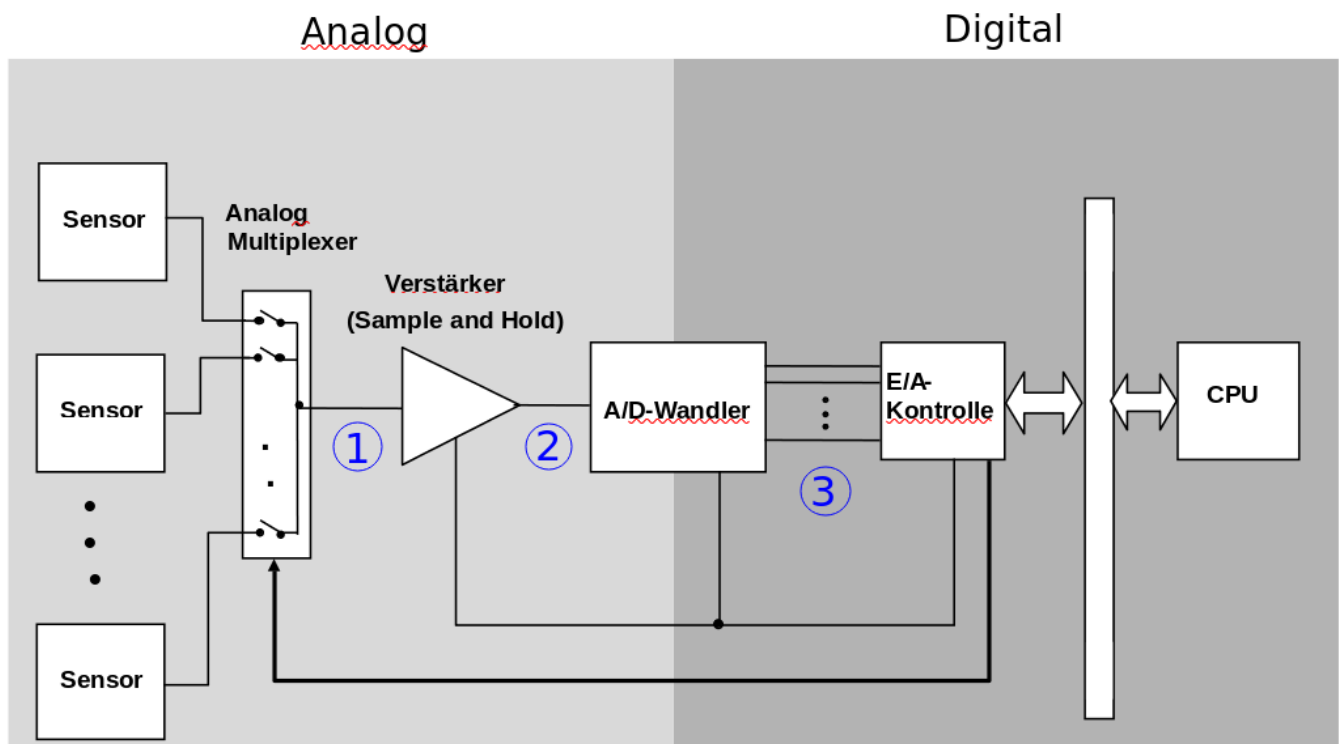
Für unser Beispiel aus der Grafik zuvor bedeutet die Ausgabe von "5" bei einem 3-Bit-Wandler, also

$$\frac{5 \cdot 8V}{2^3} = 5V$$

Der potentielle Quantisierungsfehler Q beträgt

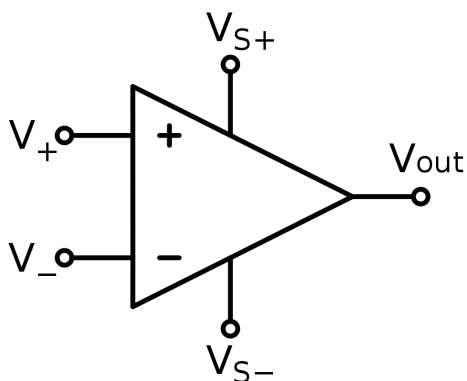
$$Q = \frac{8V}{2^3} = 1V$$

Dabei erfolgt die Wandlung in zwei generellen Schritten. Zunächst wird das Signal zeitlich diskretisiert und darauffolgend wertbezogenen gewandelt.

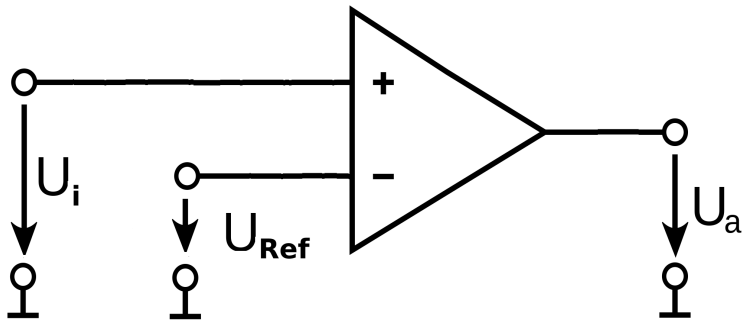


Analog Komparator

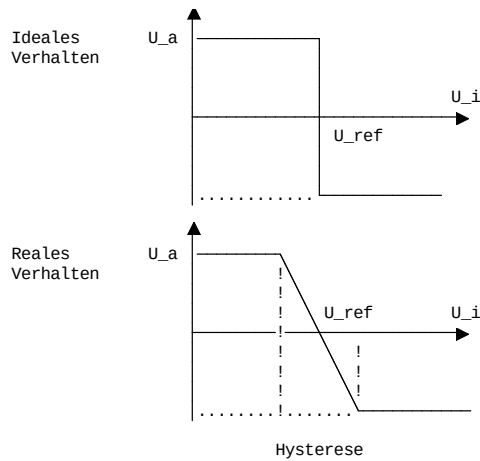
Ein Komparator ist eine elektronische Schaltung, die zwei Spannungen vergleicht. Der Ausgang zeigt in binärer/digitaler Form an, welche der beiden Eingangsspannungen höher ist. Damit handelt es sich praktisch um einen 1-Bit-Analog-Digital-Umsetzer.



Symbol eines Operationsverstärkers

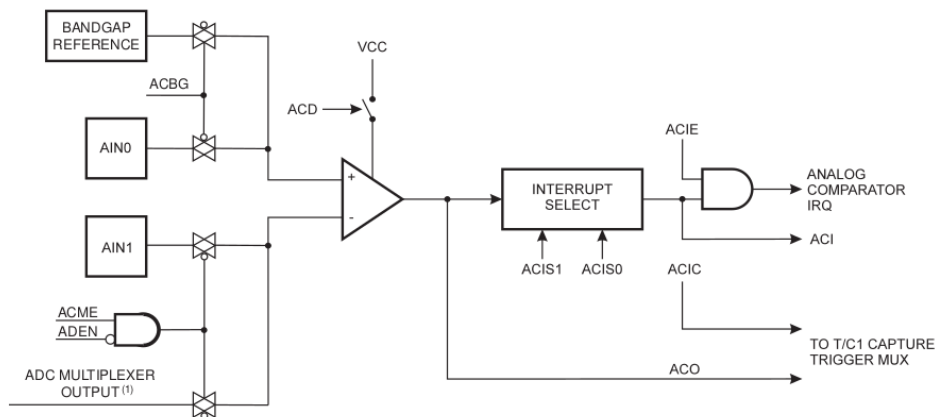


Grundsätzliche Beschaltung eines Operationsverstärkers bei der Verwendung als ADC ^[WikipediaOmegatron]



Im AVR findet sich ein Komparator, der unterschiedliche Eingänge miteinander vergleichen kann: Für "+" sind dies die **BANDGAP Reference** und der Eingang **AIN0** und für "-" der Pin **AIN1** sowie alle analogen Eingänge.

Figure 23-1. Analog Comparator Block Diagram⁽²⁾



Comperator Konfiguration im ATmega ^[AtmelHandbuch]

Die grundlegende Konfiguration erfolgt über die Konfiguration der Bits / Register :

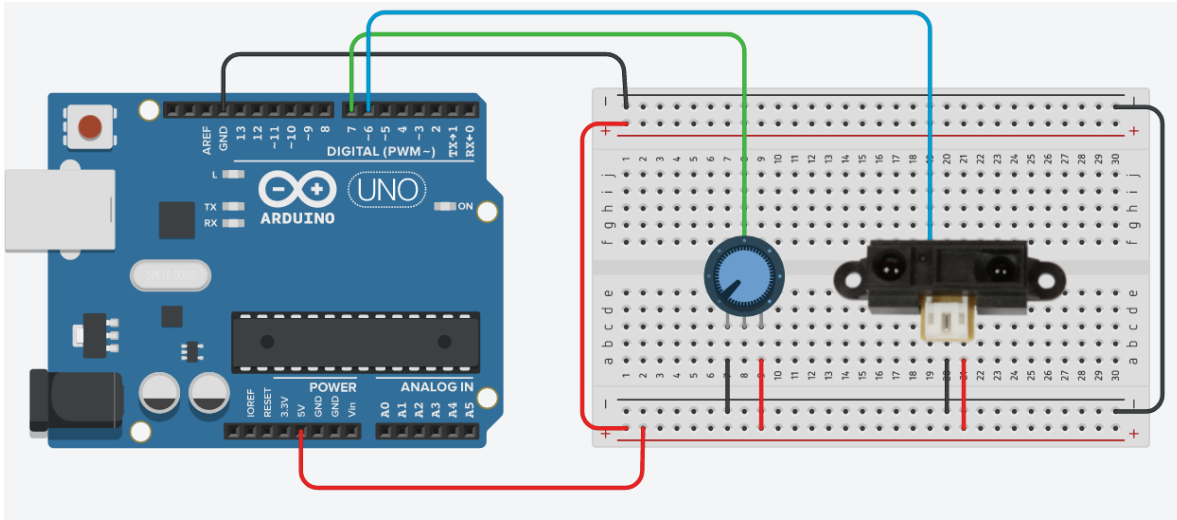
Bits	Register	Bedeutung
ACBG	ACSR	Analog Comparator Bandgap Select
ACME	ADCSRB	Analog Comparator Multiplexer Enable - Bit im Register
ADEN	ADCSRA	Analog Digital Enable
MUX2 , MUX1 , MUX0	ADMUX	Multiplexer Analog input

Dazu kommen noch weitere Parameterisierungen bezüglich der Interrupts, der Aktivierung von Timerfunktionalität oder der Synchronisierung.

Weitere Erläuterungen finden Sie im Handbuch auf Seite

Aufgabe: An welchen Pins eines Arduino Uno Boards müssen Analoge Eingänge angeschlossen werden, um die zwei Signale mit dem Komperator zu vergleichen. Nutzen Sie den Belegungsplan (Schematics) des Kontrollers, der unter [Link](#) zu finden ist.

Ein Beispiel für den Vergleich eines Infrarot Distanzsensors mit einem fest vorgegebenen Spannungswert findet sich im *Example* Ordner der Veranstaltung.



```
#define F_CPU 16000000UL
#include <avr/io.h>

int main()
{
    ADCSRB = (1<<ACME);
    DDRB = (1<<PB5);

    while(1)
    {
        if (ACSR & (1<<ACO)) /* Check ACO bit of ACSR register */
            PORTB &= ~(1 << PB5); /* Then turn OFF PB5 pin */
        else /* If ACO bit is zero */
            PORTB = (1<<PB5); /* Turn ON PB5 pin */
    }
}
```

Einschränkung von Tinkercad The ANALOG COMPARE feature, which is a possible interrupt source on the mega328P, does not work at all (output compare result ACO in register ACSR does not seem to change, no matter what voltages are presented at pins 6, 7).

Die Demo folgt in der Übung

[AtmelHandbuch] Firma Microchip, megaAVR® Data Sheet, Seite 243, [Link](#)

[WikipediaOmegatron] Wikipedia, Autor Omegatron - Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=983276>

Analog Digital Wandler

Voraussetzung für den Wandlungsprozess ist die Sequenzierung des Signals. Mit einer spezifischen Taktrate wird das kontinuierliche Signal erfasst.

Wie sollte die Taktrate für die Messung denn gewählt werden?

PrintSampleResults.py

```
1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 from scipy.optimize import curve_fit
4
5 # Generierung der "Realen Messungen"
6 f = 40 # Hz
7 tmin = -0.3
8 tmax = 0.3
9 t = np.linspace(tmin, tmax, 400)
10 s = np.cos(2*np.pi*f*t)
11
12 # Abtastung mit einer Frequenz kleiner der Grenzfrequenz
13 T = 1/35.0
14 nmin = np.ceil((tmin) / T)
15 nmax = np.floor((tmax) / T)
16 n = np.arange(nmin, nmax) * T
17 y = np.cos(2*np.pi*f*n)
18
19 # Fitting eines Cosinussignals anhand der Messungen
20 def test(x, a):
21     return np.cos(a * x)
22
23 # Berechnung des Signalverlaufes mit der geschätzten Periodendauer
24 param, param_cov = curve_fit(test, n, y)
25 ans = np.cos(param[0]*t)
26
27 # Ausgabe
28 fig, ax = plt.subplots()
29 ax.plot(t, s)
30 ax.plot(n, y, '.', markersize=8)
31 ax.plot(t, ans, '--', color='red', label=f"Estimated Signal")
32 ax.grid(True, linestyle='-.')
33 ax.tick_params(labelcolor='r', labelsizes='medium', width=3)
34
35 plt.show()
36
37 plot(fig) # <- this is required to plot the fig also on the LiaScript
    canvas
```

Wenn ein kontinuierliches Signal, das keine Frequenzkomponenten hat, die über einer Frequenz f_c liegen mit einer Häufigkeit von größer $2f_c$ abgetastet wird, kann das Originalsignal aus den gewonnenen Punkten unverzerrt rekonstruiert werden.

Falls dieses Kriterium nicht eingehalten wird, entstehen nichtlineare Verzerrungen, die auch als Alias-Effekt bezeichnet werden (vgl. Python Beispiel). Die untere Grenze für eine Alias-freie Abtastung wird auch als *Nyquist-Rate* bezeichnet.

Als Erklärung kann eine Darstellung des Signals im Frequenzbereich dienen:

Flashwandler

Vorteil

- Hohe Geschwindigkeit

Nachteil

- Energieverbrauch größer
- Hardwareaufwand für höhere Auflösungen

<https://www.youtube.com/watch?v=x7oPVWLD59Y>

Sequenzielle Wandler

Sequenzielle Wandler umgehen die Notwendigkeit mehrerer Komperatoren, in dem das Referenzsignal variabel erzeugt wird.

Dafür ist allerdings ein Digital-Analog-Wandler nötig, der die Vergleichsspannung ausgehend von einer digitalen Konfiguration vornimmt.

Zählverfahren

Vorteil

- sehr hohe Auflösungen möglich
- Schaltung einfach umsetzbar – kritisches Element DAC/Komperator

Nachteil

- Variierende Wandlungsdauer
- langsam (verglichen mit dem Flashwandler)

Sukzessive Approximation/Wägeverfahren

Vorteil

- Gleiche Wandlungsdauer

Herausforderungen bei der Wandlung

Fehlertypen

- Quantisierungsfehler sind bedingt durch die Auflösung des Wandlers
- Offsetfehler ergeben sich aus einer Abweichung der Referenzspannung und führen zu einem konstanten Fehler.
- Verstärkungsfehler im Analog-Digitalwandler wirken einen wertabhängigen Fehler.
- Der Linearitätsfehler ist die Abweichung von der Geraden. Linearitätsfehler lassen sich nicht abgleichen.

Merke: Die Fehlerparameter hängen in starkem Maße von der Konfiguration des Wandlers (Sample Frequenz, Arbeitsbreite, Umgebungstemperatur) ab!

Datenblatt eines 8 Bit Wandlers der TLC0831 ^[TIDatenblatt]

Referenzspannung

Eine Herausforderung liegt in der stabilen Bereitstellung der Referenzspannung für den Analog-Digital-Wandler.

Parameter eines Analog-Digital-Wandlers

- Auflösung
- Messdauer
- Leistungsaufnahme
- Stabilität der Referenzspannung
- Unipolare/Bipolare Messungen
- Zahl der Eingänge
- Ausgangsinterfaces (parallele Pins, Bus)
- Temperaturabhängigkeit und Rauschverhalten (Gain, Nicht-Linearität, Offset)

[TIDatenblatt] Firma Texas Instruments, Datenblatt AD-Wandler 8 Bit DIL-8, TLC0831, TLC0831IP

Umsetzung im AVR

Merke: Immer zuerst ADCL und erst dann ADCH auslesen.

Beim Zugriff auf ADCL wird das ADCH Register gegenüber Veränderungen vom ADC gesperrt. Erst beim nächsten Auslesen des ADCH-Registers wird diese Sperre wieder aufgehoben. Dadurch ist sichergestellt, dass die Inhalte von ADCL und ADCH immer aus demselben Wandlungsergebnis stammen, selbst wenn der ADC im Hintergrund im Free-Conversion-Mode arbeitet.

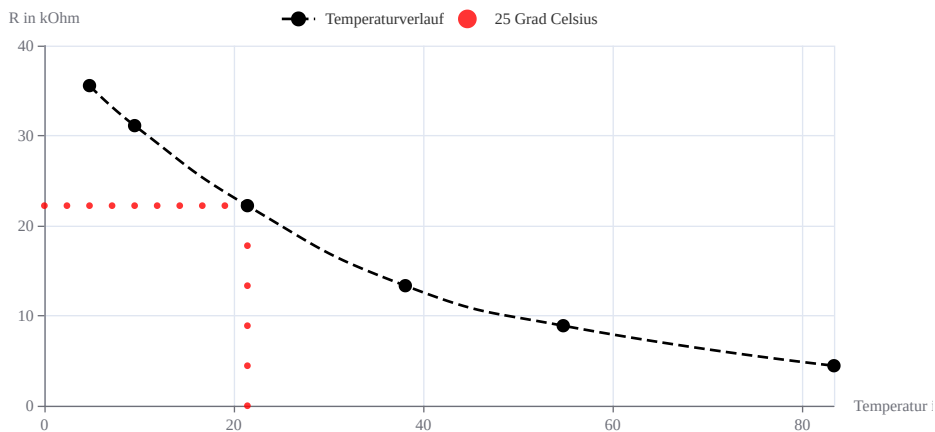
[HandbuchAtmega] Firma Microchip, megaAVR® Data Sheet, Seite 247, [Link](#)

Beispiele

Beispiel 1 - Heißleiter

NTC-Widerstände (*Negative Temperature Coefficient*) werden zur Messung der Temperatur eingesetzt. Wichtigster Kennwert eines NTCs ist der Nennwiderstand R25 bei einer Nenntemperatur von 25 °C.

NTC-Widerstand Kennlinie



$$\frac{R_{NTC}}{R_1} = \frac{U_{NTC}}{U_{R1}} = \frac{U_{NTC}}{(U_{ges} - U_{NTC})}$$
$$R_{NTC} = R_1 \cdot \frac{U_{NTC}}{(U_{ges} - U_{NTC})}$$

Wenn wir davon ausgehen, dass die Referenzspannung des AD-Wandlers gleich U_{ges} ist, generieren wir eine digitale Repräsentation U_{NTC_d} entsprechend

$$U_{NTC_d} = U_{NTC} \cdot \frac{U_{ges}}{ADC_{resolution}}$$

Wie interpretieren wir somit einen beispielhaften Wert von 628 am Ende des Wandlungsprozesses?

$$U_{NTC} = U_{NTC_d} \cdot \frac{ADC_{resolution}}{U_{ges}}$$

Mit diesem Spannungswert können wir nun den zugrundeliegenden Widerstand berechnen und letztendlich die Temperatur.

Beispiel 2 - Lesen eines Analogen Distanzsensors

Für das Beispiel wird der AtMega2560 verwendet, der eine interne Referenzspannung von 2.56 V anstatt der des AtMega328 von 1.1 V bereit stellt.

Referenzsystem des Analog-Digitalwandlers [\[HandbuchAtmega\]](#)

Die Bedeutung ergibt sich beim Blick ins Datenblatt des Sensors GP2D, dessen Maximalwertausgabewert liegt bei etwa 2.55V

```
#ifndef F_CPU
#define F_CPU 16000000UL // 16 MHz clock speed
#endif

#include <avr/io.h>
#include <util/delay.h>

int readADC(int channel) {
    int i; int result = 0;
```

The first ADC conversion result after switching reference voltage source may be inaccurate, and the user is advised to discard this result. Handbuch Seite 252

Beispiel 3 - Temperaturüberwachung des Controllers

The temperature measurement is based on an on-chip temperature sensor that is coupled to a single ended ADC8 channel. Selecting the ADC8 channel by writing the MUX3...0 bits in ADMUX register to "1000" enables the temperature sensor. The internal 1.1V voltage reference must also be selected for the ADC voltage reference source in the temperature sensor measurement. When the temperature sensor is enabled, the ADC converter can be used in single conversion mode to measure the voltage over the temperature sensor. Handbuch Seite 256

```
#ifndef F_CPU
#define F_CPU 16000000UL // 16 MHz clock speed
#endif

#include <avr/io.h>
#include <util/delay.h>

double getTemp(void)
{
    unsigned int wADC;
    double t;

    // Set the internal reference and mux.
    ADMUX = (1<<REFS1) | (1<<REFS0) | (1<<MUX3);
    ADCSRA |= (1<<ADEN); // enable the ADC

    // wait for voltages to become stable.
    delay(20);

    // Start the ADC
    ADCSRA |= (1<<ADSC);

    // Detect end-of-conversion
    while (ADCSRA & (1<<ADSC));
    wADC = ADCW;

    // The offset of 324.31 could be wrong. It is just an indication.
    t = (wADC - 324.31) / 1.22;

    // The returned temperature is in degrees Celsius.
    return (t);
}
```

Aufgaben

- ☐ Reimplementieren Sie die Nutzung des Temperatursensors aus Ihrer "Bastelbox", so dass bis auf die Serielle Kommunikation keine Arduino-Bibliotheken mehr genutzt werden.
- ☐ Nutzen Sie die Infrarot-Distanzsensoren aus Ihrer Box, um eine Entfernungsmessung zu Implementieren. Für die Ausgabe sollten Sie beide Varianten der Linearisierung nutzen - Look-up-Table und Funktionsdarstellung.