

Computergestützte Experimente und Signalauswertung

PHY.W04UB/UNT.038UB

Sensoren & Aktoren

by Jan Enenkel



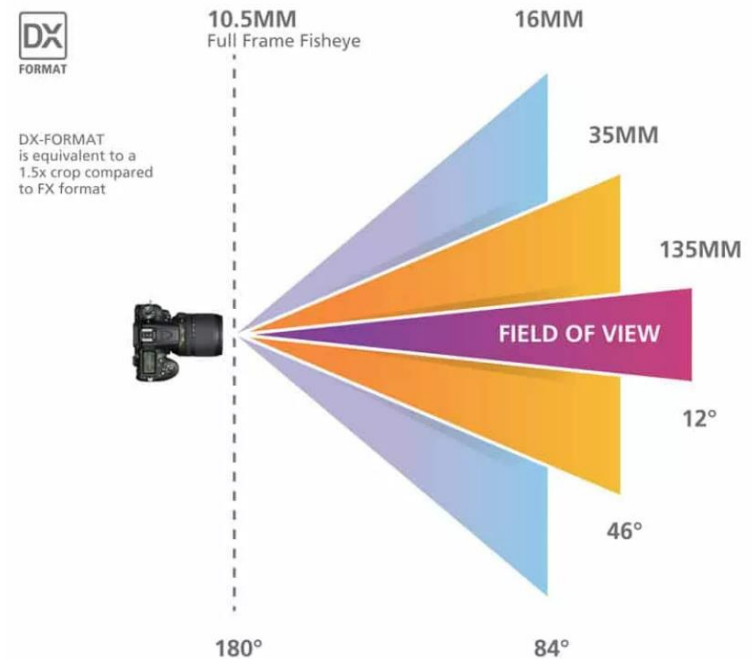
Begriffe

- **Sensor** kann eine physikalische Größe messen
- Definition **Messen**: quantitative Erfassung einer (Mess-)Größe.
- **Aktor** kann eine physikalische Größe stellen
- qualitative Stellung einer physikalischen Größe

Sensor	Aktor
Spannung/Strom	Spannung/Strom
Licht/Kamera	LED/Laser
Positionssensor	Servo/Motor/Piezotreiber
Drehzahl	Motor
Temperatur	Heiz/Kühlelement
Durchfluss	Pumpe
Schall	Lautsprecher
Magnetfeld	Spule

Eigenschaften von Sensoren/Aktoren

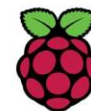
- Eigenschaften im **Datenblatt** ersichtlich
 - Dynamikbereich
 - Min – Max
 - Auflösung zb.: in [Bit]
 - Messzeit
 - Integrationslevel
 - Element / Diskreter Chip / Komplettlösung
 - Schnittstelle
 - Field-Of-View
 - Linearität / Logarithmisch
 - Features
 - Stromverbrauch / Größe des Sensors
- Kalibrierung / Vertrauenswürdigkeit
- Datenblatt lesen!
- Wahl des Sensors/Aktors hat Einfluss auf die Messung!
 - Nicht aber auf die Physik



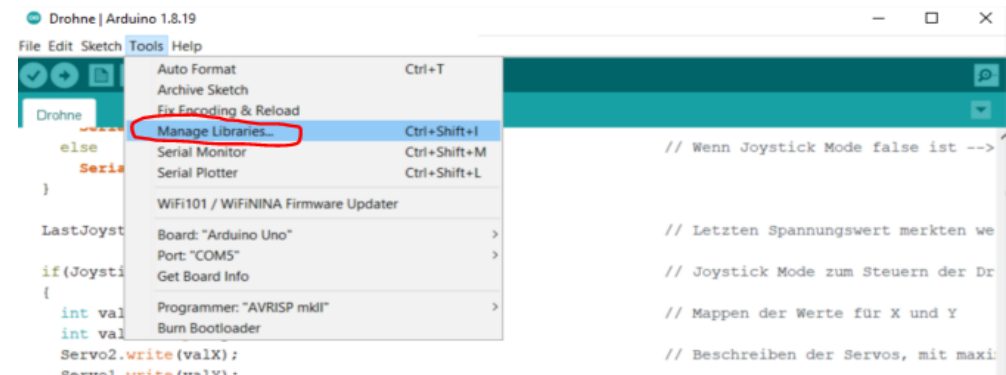
Field of View eines Detektors - Quelle: Nikon USA

Library's – Arduino/Raspberry Pi

- Werden von der Community zur Verfügung gestellt
- Arduino
 - Tools → Manage Libraries...
- Raspberry Pi
 - „pip install“ ...
- Vorteil
 - Einfach zu benutzen
 - Zeitersparnis
 - Gute Abstraktion
- Nachteil
 - Einfach zu benutzen
 - Können Fehlerhaft sein
 - Nicht immer verfügbar
 - Ineffizient/ Langsam / Ressourcenintensiv
 - Decken manchmal nicht das benötigte Feature ab
 - Können Ressourcen blockieren
 - Chat-GPT Codes



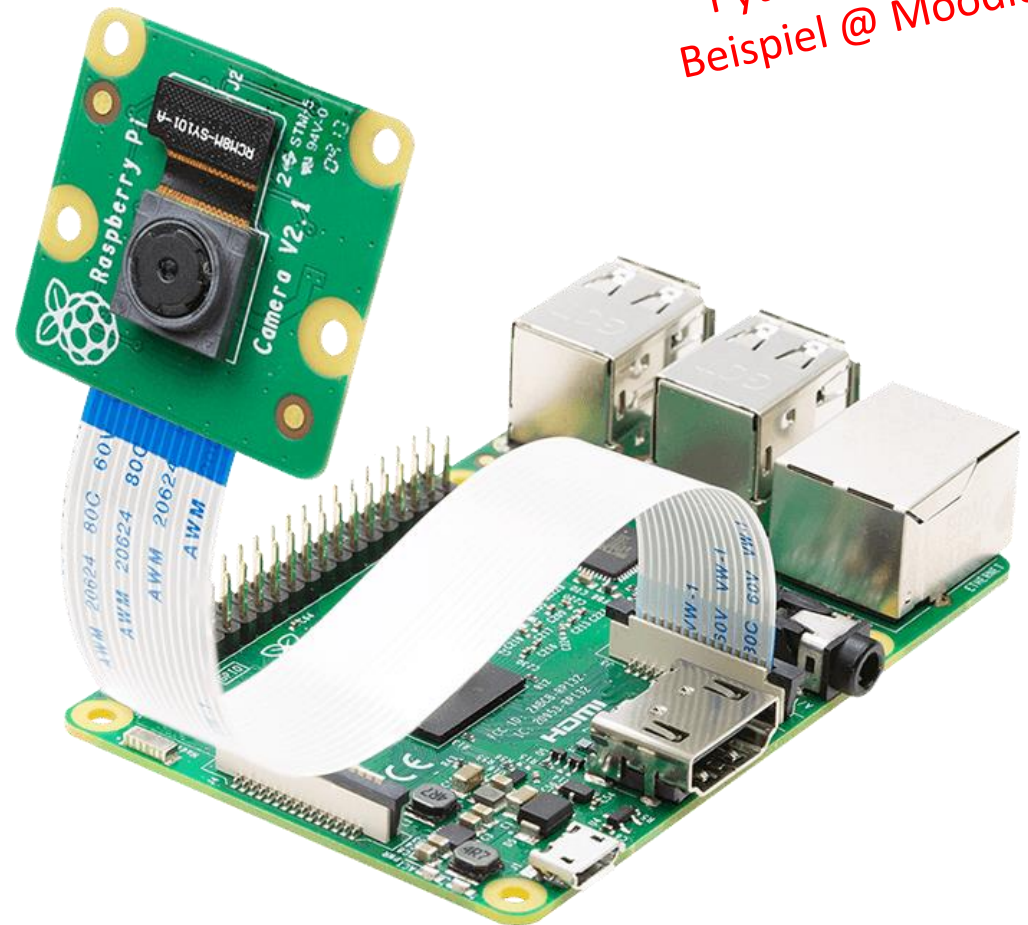
Raspberry Pi



Kamera - Sensor

- Möglich auf Raspberry Pi
 - Und viele andere Systeme
- 5-12MP Versionen verfügbar
 - Mit/ohne Linse
- PiCamera (Python)
 - Üblicherweise 2~3 Befehle für Bilder
- „Image Processing Librarys“
 - PiCamera
 - OpenCV
 - Bubble Tracking
 - StereoscoPy
- Sehr viele Online-Tutorials verfügbar

Python Coding
Beispiel @ Moodle

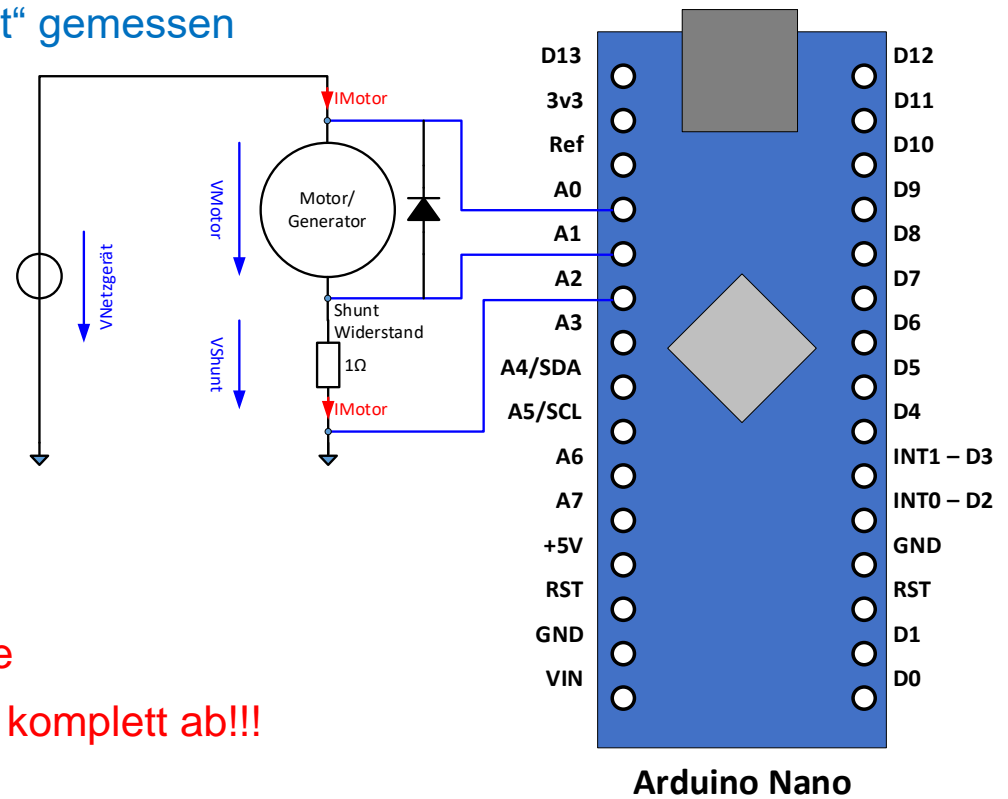


Quelle: Arducam.com

Spannungs/Strom-Sensor AKA 'ADC'

Beispiel eines Generators

- Spannung kann direkt am ADC-Pin gemessen werden
- Strom wird über Spannungsabfall am „Shunt“ gemessen
- A2 kann „0“ sein
 - Hängt von Qualität der GND Verbindung ab.
- Arduino ADC = 10Bit
- A0 pin hält nur 5V aus!
 - Falls Spannung höher wird → Spannungsteiler
- Induktive Lasten benötigen „Freilaufdioden“



PC-USB vs. Netzgerät Problematik

- Nachschwingende/schlechte/alte Netzgeräte
- USB des PC „sieht“ über 6V → PC Schaltet komplett ab!!!

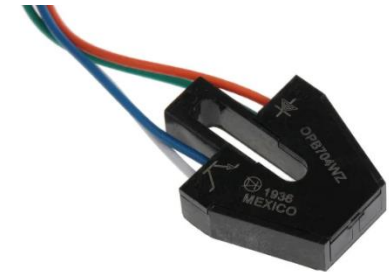
Schaltungsbeispiel zum Vermessen eines Motors

Lichtschranken

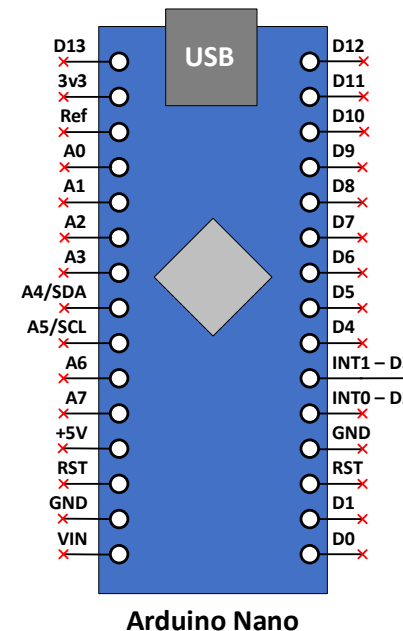
- Reflektiv/Transmissiv
- Diskrete Lösung
 - Laser/LED + LDR/Fotodiode + ADC
 - Selber aufgebaut
- Modul Lösung
 - Mit integriertem Verstärker
- Zur Messung von
 - „0“-Position
 - Drehzahlen
- Möglich Probleme
 - Umgebungslicht kann ein Problem werden
 - Mechanisch für optische Isolation sorgen
 - Software zur Umgebungslichtanpassung (Tiefpass)
 - Laserintensität
 - Stromverbrauch
 - Trägheit des Detektors



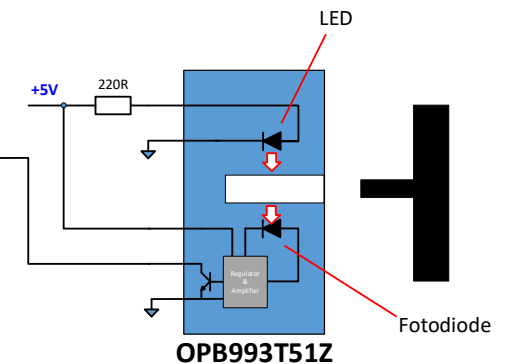
Beispiel einer transmissiven Lichtschranke
Quelle: digikey.de



Beispiel einer reflektiven Lichtschranke
Quelle: reichelt.at

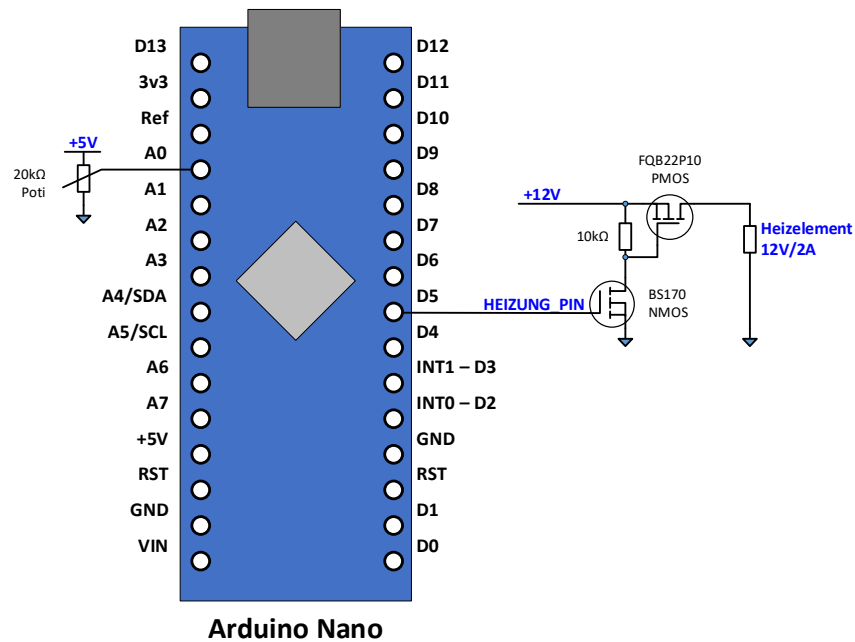


Schaltungsbeispiel zum Benutzen einer Lichtschranke

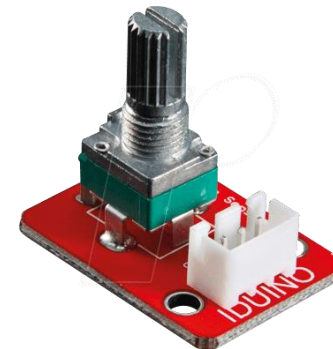


Joystick / Potentiometer

- Bestimmen einen Stellbereichs
- Messen mittels ADC
- Dynamikbereich je nach Model
- Sehr einfach zu benutzen



Schaltungsbeispiel eines Heizungsreglers mit Potentiometer

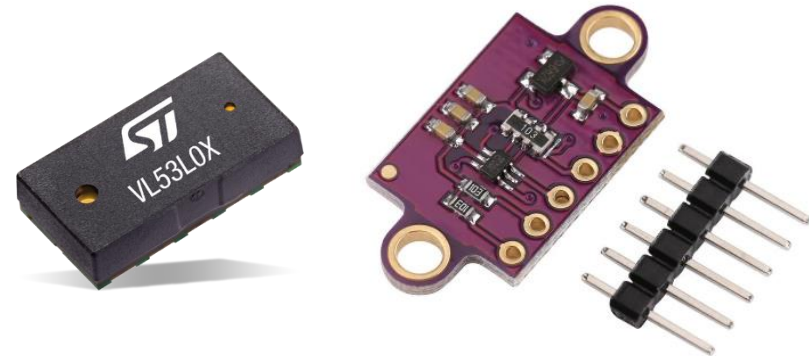


Quelle: reichelt.at

Distanzsensoren

VL53L0X – TOF Sensor

- Distanzmessung mittels optischer Reflektion
 - Lichtgeschwindigkeit/Laufzeitmessung
- Hat einen 940nm Laser integriert
- Messbereich 2-200cm
- I²C Interface
- Field-of-View ~25°
- Funktioniert nicht/schlecht im direkten Sonnenlicht



HC-SR04 Ultraschall Sensor

- Distanzmessung mittels Ultraschall Reflektion
- Messbereich 2-200cm
- 2-Pin Interface (Zeitmessung)
- Field-of-View ~15°
- Multiple Sensoren → eigene Treiber

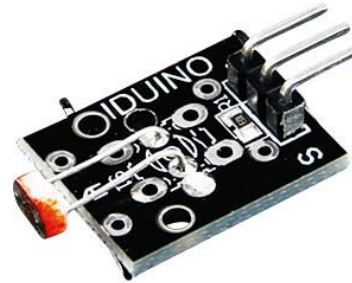


Quelle: reichelt.at

Lichtsensoren

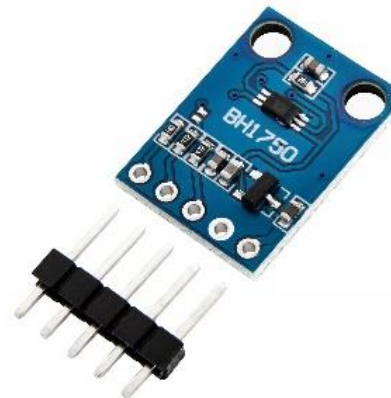
LDR – Light Dependent Resistor

- Billig
- Nicht-Linear & langsam (~20ms je nach Vorwiderstand)
- Intensitäts-Charakteristik oft unbekannt ☹
- Dynamik über Spannungsteiler-Widerstand einstellbar
- ADC als Eingang benötigt
 - Wie haben Sie die Intensitätscharakteristik bestimmt?
 - Wie korreliert die Spannungsteiler Spannung mit der Lichtintensität?

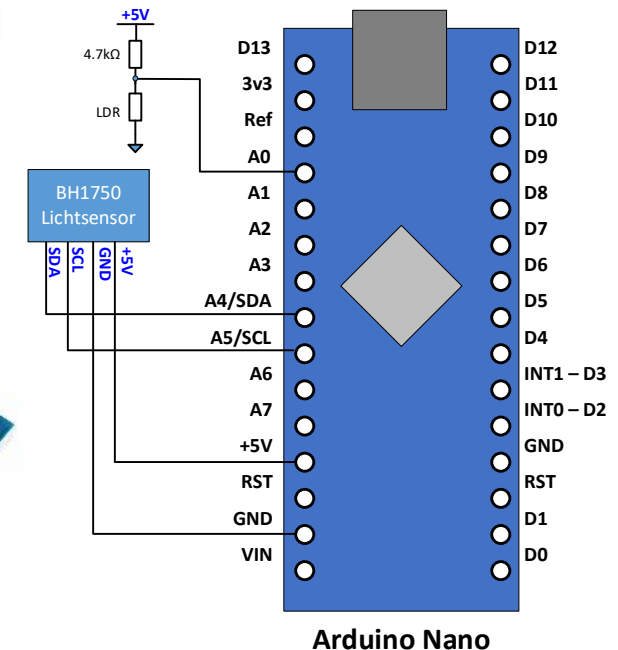


BH1750

- I²C Interface
- 16 Bit
- Lineare Empfindlichkeit
- ca. 190ms für einen Messwert
- Photopische Empfindlichkeit
- Photodiode + TIA + ADC + I²C alles in einem Chip



Quelle: reichelt.at

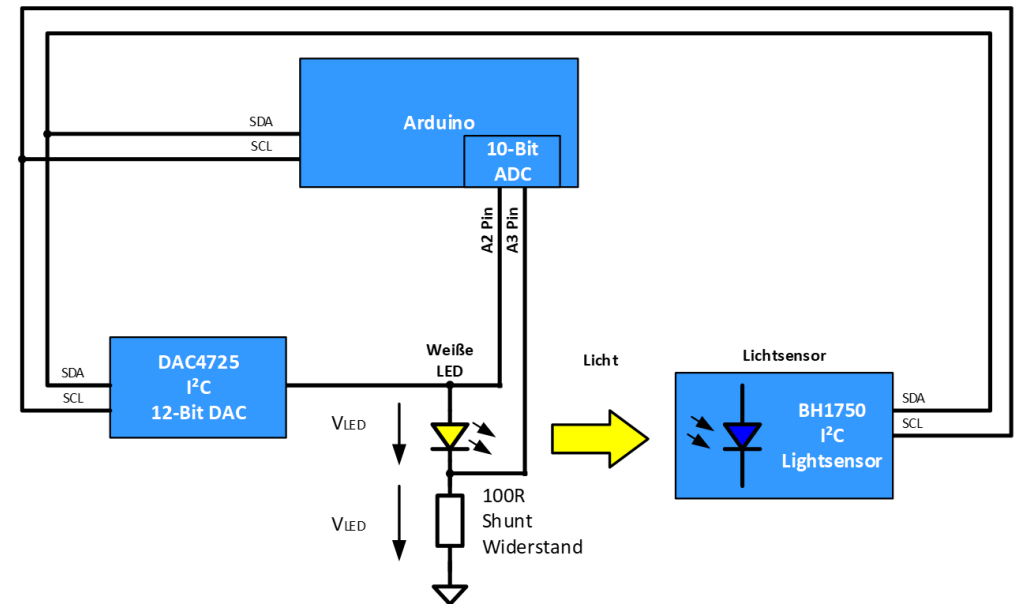


DAC4725 – 12-Bit DAC

- Digital zu Analog Wandler
- I²C Interface
- Dynamikbereich: 0-5V / 12Bit
- Kurzschlussstrom: ~15mA
- 1x Ausgang

Übungsbeispiel

- DAC generiert Spannung
- ADC misst Spannung und Strom
- BH1750 misst Lichtintensität
- Messung von:
 - LED - Spannung zu Strom
 - LED – Strom zu Intensität



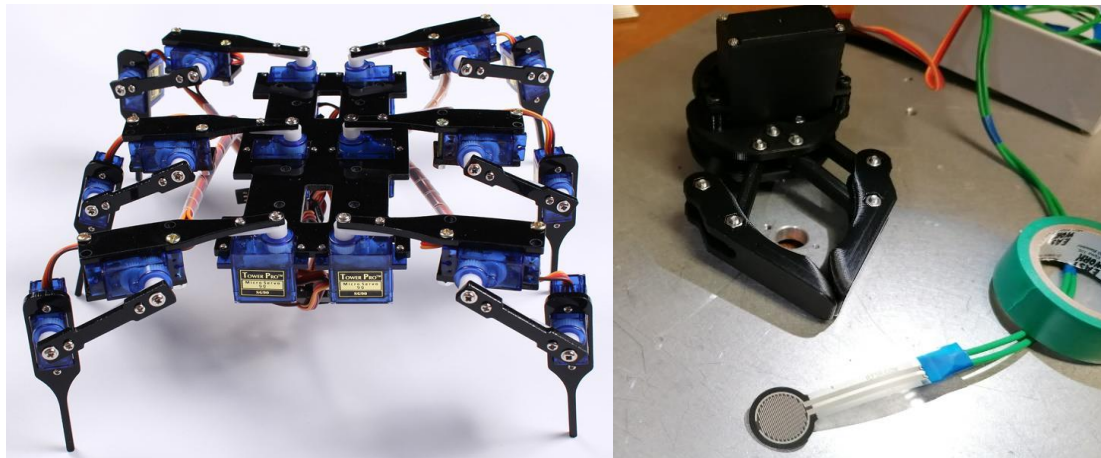
DAC4725 – Zum Vermessen einer LED mit dem BH1750 Lichtsensor



DAC4725 – DAC Breakout Board - Quelle: SparkFun.com

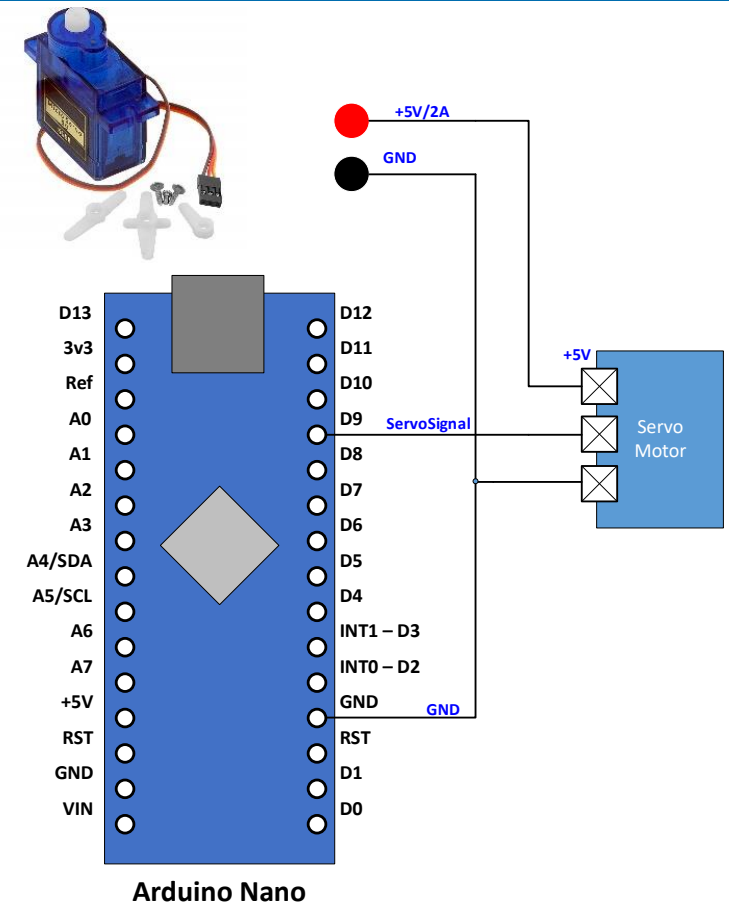
Servos

- Single Wire Interface - 1x Digital-Pin pro Servo
- Kleine Servos → direkt an Arduino +5V
- Große Servos → eigenen Versorgung 5V~2A
- Kann 0-180° einstellen
 - Je nach Servo auch andere Winkel möglich



Quelle: hackday.io

Gripper mit Servo & Piezoresistivem Sensor



Schaltplan für einen Servo

Servo Signal wird mit einem PWM fähigen Pin verbunden

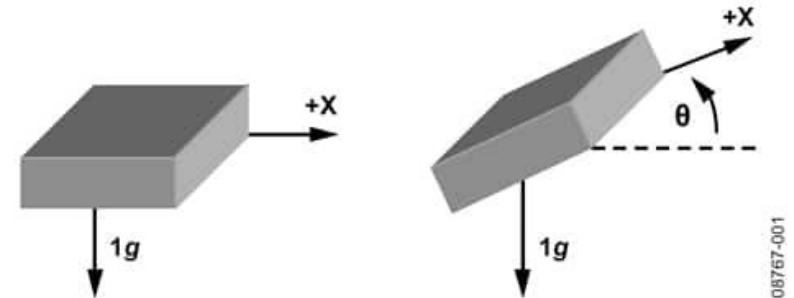
Neigung/Beschleunigung & Luftfeuchte

Accelerometer – ADXL345

- 3 Achsen – 13 Bit Auflösung
- Dynamikbereiche: +/- 2/4/8/16g
- I²C Interface
- Bestimmung von Neigung
- Beschleunigung



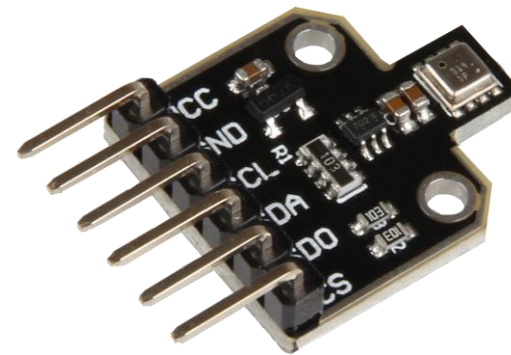
Quelle: adafruit.com



Quelle: digikey.com

Luftfeuchte/Druck/Temperatur – BME680

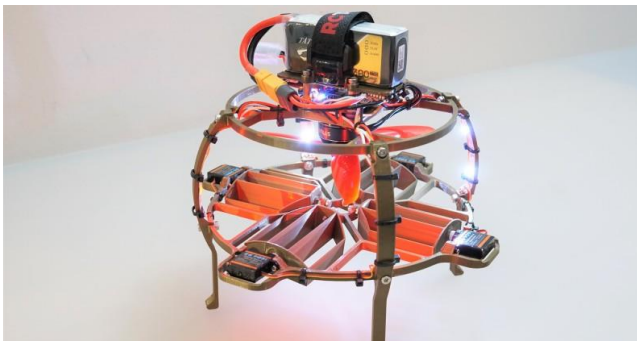
- Bosch Sensortec Sensor für
 - Luftfeuchte
 - Luftdruck
 - Temperatur
 - Luftgüte
- I²C Interface



Quelle: Joy-it.net

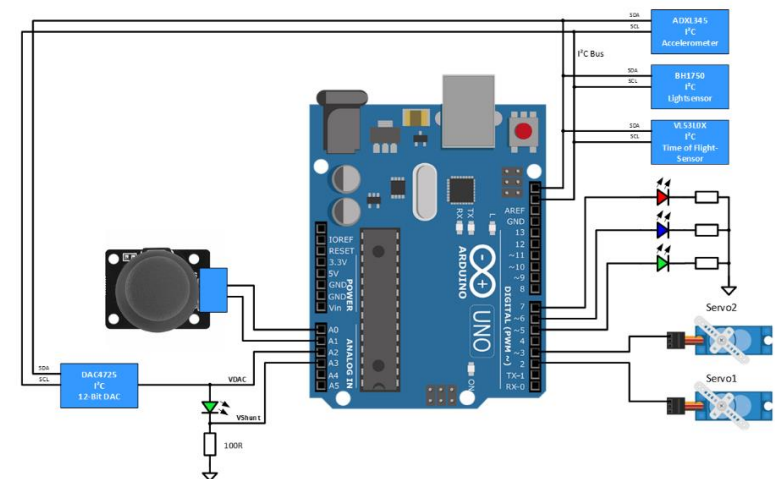
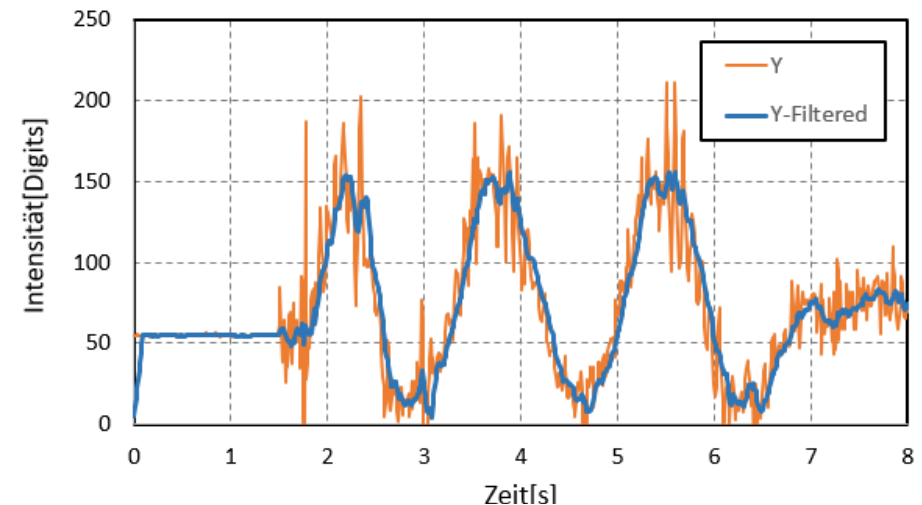
Drohnen Demo

- JoystickMode
 - Manuelle Steuerung der Servos
- G-SensorMode
 - Neigungssensor misst Erdbeschleunigung
 - SW-Tiefpass Filter
 - Servomotoren steuern gegen die Neigung
 - Stabiles System?
- Mode umschalten
 - Mittels Joystick button
- Messdatendarstellung mit MSFT Excel



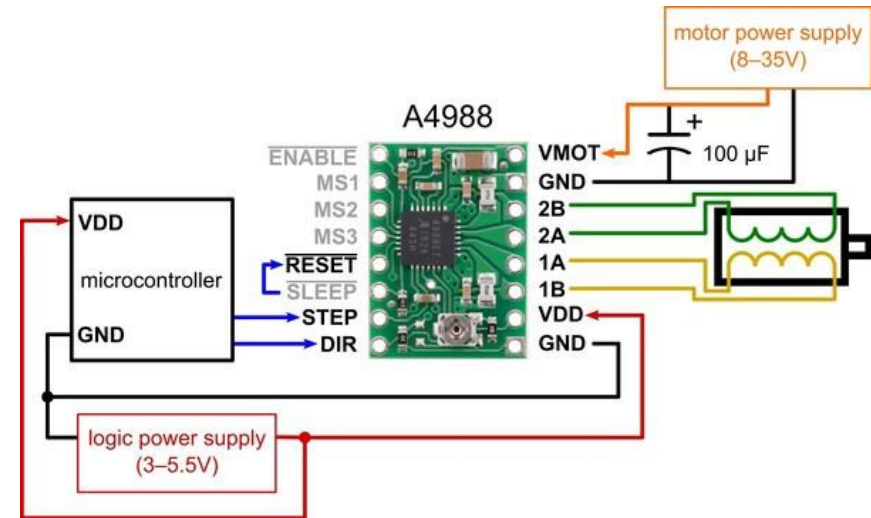
Mögliches Drohnen Konzept - Quelle: Hackaday.com

Beschleunigungssensor Daten



A4988/DRV8825 – Stepper Motoren-Treiber

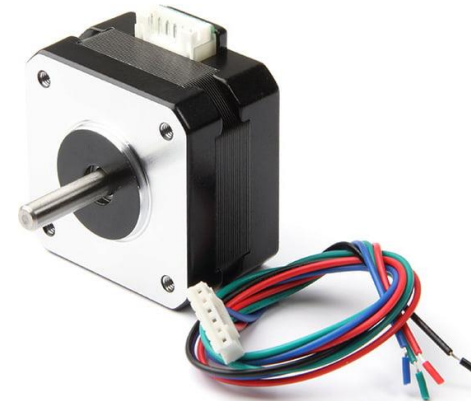
- Zum Antreiben von Stepper Motoren
 - Robotik
 - 3D Drucker
 - Automatisierung
- 2x Eingänge: STEP & DIR
 - STEP gibt Richtung vor
 - Flanke an DIR schaltet zur nächsten Position
- 8-35V Versorgungs-Spannung
- 2A pro Motorspule
- 2x Motorspulen
 - Bidirektionale H-Brücken Treiber
- Full Step / Half Step / PWM Modes
- CNC Shield mit 4x A4988
- Rotor kann aus dem „Feld“ fallen



A4988 Beschaltung - Quelle: pololu.com



CNC Shield mit 4x A4988 - Quelle: Arduino Forum /
arduino.cc



NEMA17 Motor - Quelle: 3djake.com

Temperatursensoren

MCP9808 – I²C Temperatursensor

- Sehr präzise, gute Linearität
- Teuer
- Benötigt I²C Interface



DS1820 – Single Wire Temperatursensor

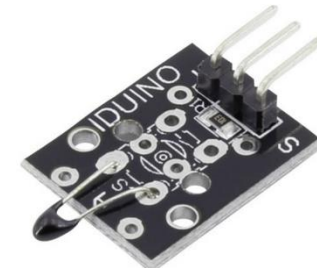
- Sehr Präzise, gute Linearität
- Teuer
- Benötigt 1x Digitalpin
- Wasserdicht



NTC – Negative Temperature Coefficient

- Temperaturabhängiger Widerstand
- Sehr billig / nicht Linear
- Vorwiderstand muss richtig berechnet werden
- Produktionstoleranzen

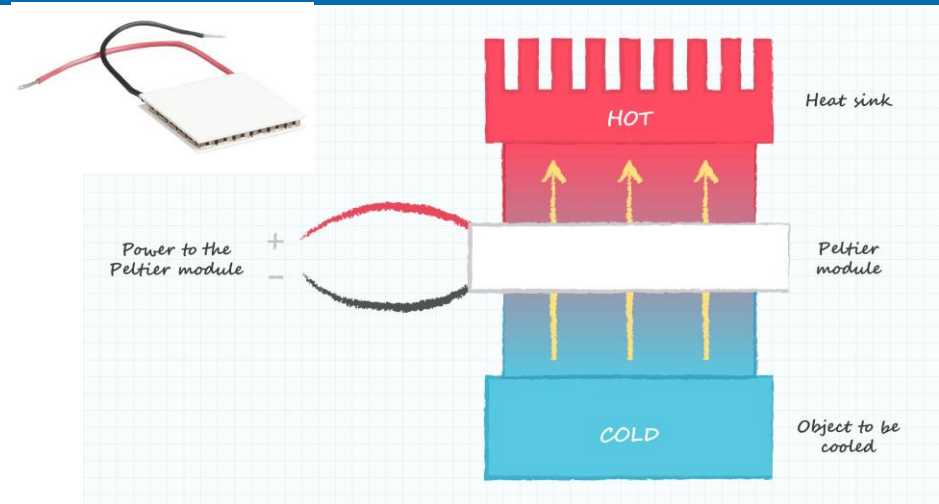
Sample Code
@ Moodle



Peltierelement/Heizpatrone

Peltierelement – TEC/TEG

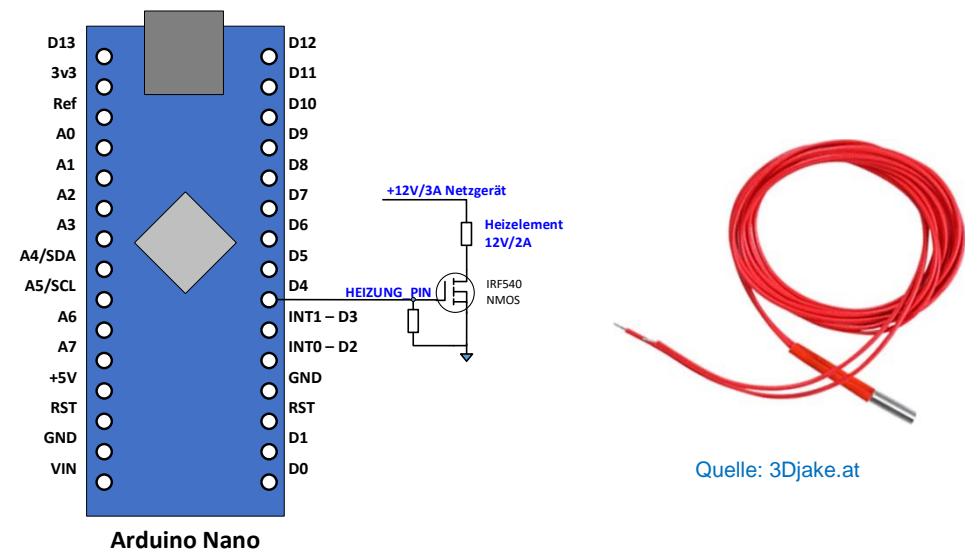
- **TEC – ThermoElectricCooler**
 - Kann Heizen/Kühlen je nach Stromrichtung
 - Über PWM Ansteuerbar
 - Benötigt viel Strom / niedrigere Spannung
 - Benötigt Kühlkörper & Ventilator
- **TEG – ThermoElectricGenerator**
 - Erzeugt Strom aus einer Temperaturdifferenz



Quelle: All-electronics.de

Heizpatrone

- Zum Heizen bis $\sim 350^{\circ}\text{C}$ möglich
- 12V und 2~3A Netzgerät nötig
- Einfach mit PWM Pin zu betreiben
 - MOSFET + Arduino Pin
- Billig



Quelle: 3Djake.at

Kraft & Bodenfeuchtigkeit

Piezo-resistive Kraftsensoren

- Mit Vorwiderstand direkt am ADC Messbar
- Ändert Widerstand über Kraft
- Vorwiderstand sollte auf die Kraft angepasst werden
- Nachteile
 - Temperaturabhängig
 - Langzeitveränderung vs. Belastung
 - Produktionsschwankungen
- **Kalibrierung nötig**



Bodenfeuchtigkeitssensor

- Zur Messung von Feuchtigkeit in Erde
- Kann „Noise“ auf der Leitung haben
 - Software Tiefpass – Moving Average
 - Hardware Tiefpass – RC-Glied
- Widerstands-Spannungsteiler
- **Kalibrierung nötig**

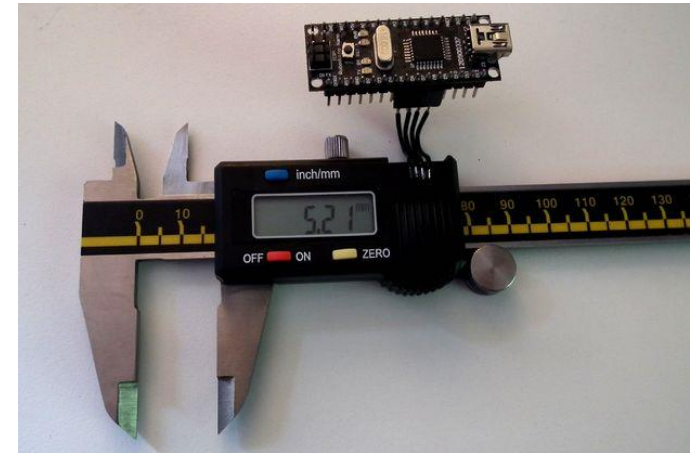


Quelle: reichelt.at

Distanz & Speicher

Messchieber

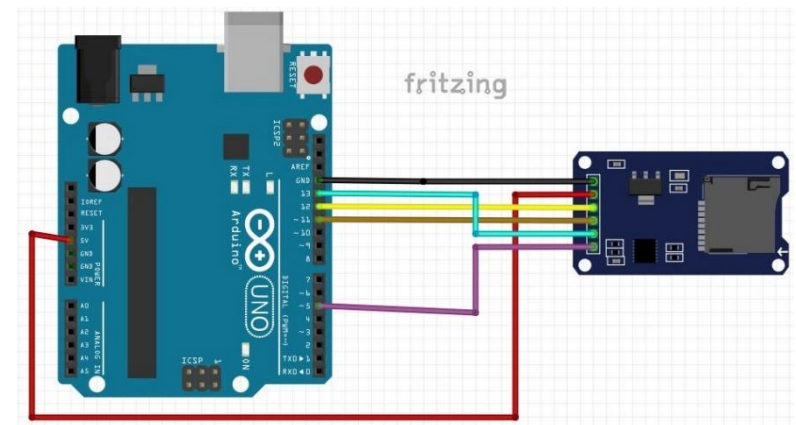
- Eigenes serielles Interface
- Genauigkeit 0.01mm
- Auslese LIBs teilweise fehlerhaft



Quelle: Fablab Karlsruhe

SD-Karte

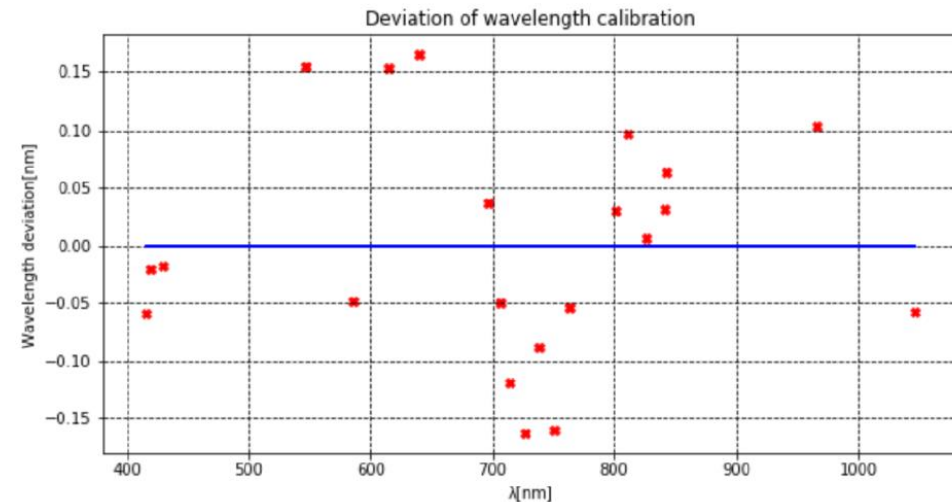
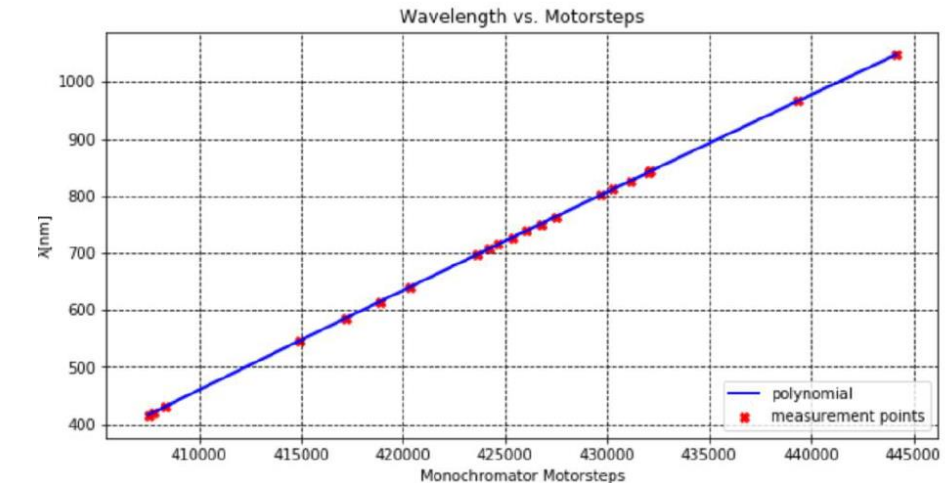
- Viele verschieden Modelle verfügbar
- SPI Interface
- Daten schreiben benötigt Zeit
- Viele Arduino.cc Codes verfügbar



Quelle: Arduino.cc

Kalibrierung von Sensoren

- Sensor wird als „unbekannt betrachtet“
- Vergleichsmessung mit bekannten Größen – „**Normativ**“
 - Kraftsensor → Gewichte
 - Feuchtigkeitssensor → Gewicht nach Zugabe von Wasser
- Messung über mehrere Punkte
- Linear fit / Polynom bestimmen
- Vergleich zwischen Polynom und eigenen Messpunkten
- Genauigkeitsangabe von Hersteller und Messbare Genauigkeit sind nicht immer gleich!

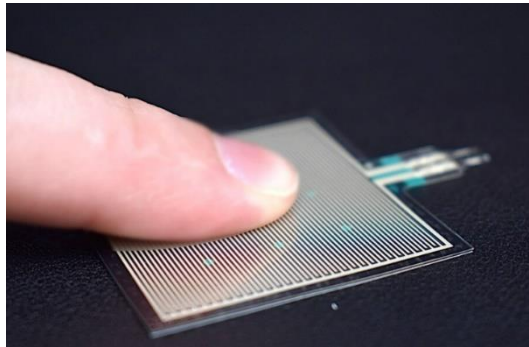


Quelle: Masterarbeit Jan Enenkel – Efficiencies of Photon Pumped Lasers – 2021 TU-Graz

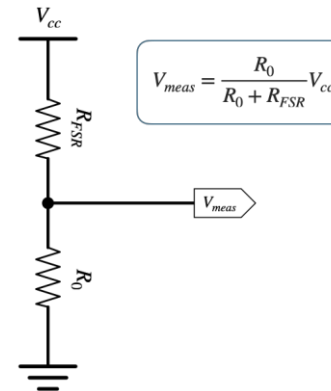
Quelle:

<https://makersportal.com/blog/2020/5/24/force-sensitive-resistors-fsrs-arduino>

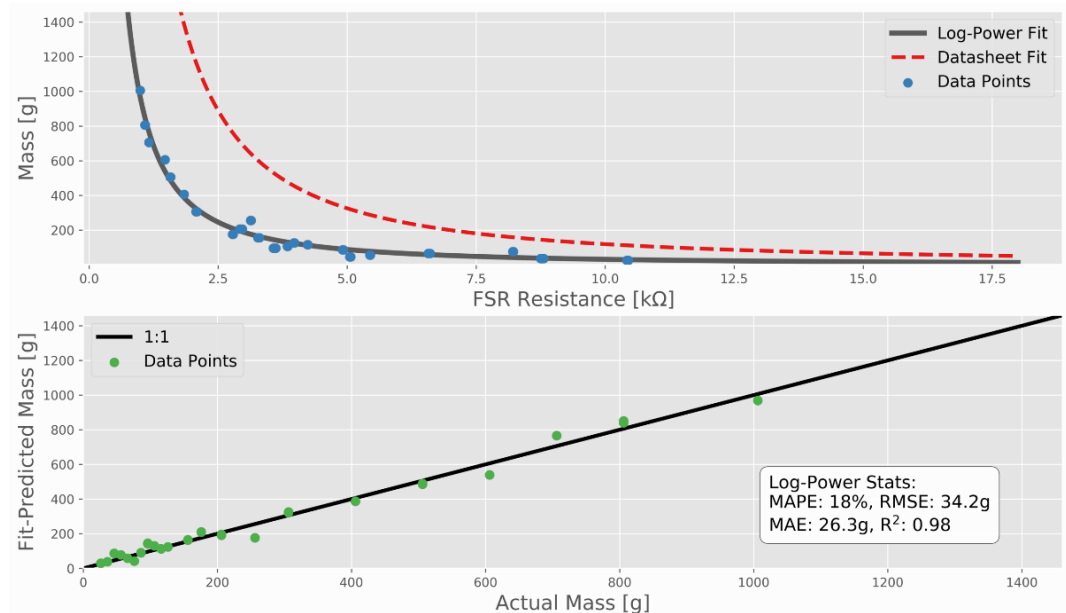
Beispiel einer Kalibrierung



- Piezoresistiver Sensor
- Spannungsteiler → Formel Einsetzen
- Mit Gewichten kalibrieren
- Funktion aufstellen
- In Code des Arduino integrieren
- Verifikation des Codes mit anderen Gewichten
 - Fehlerbestimmung

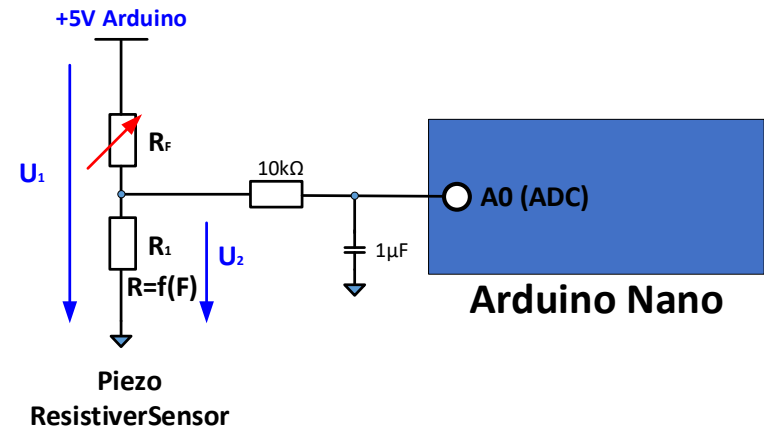


$$R_{FSR} = C_1 * F^{-C_2}$$

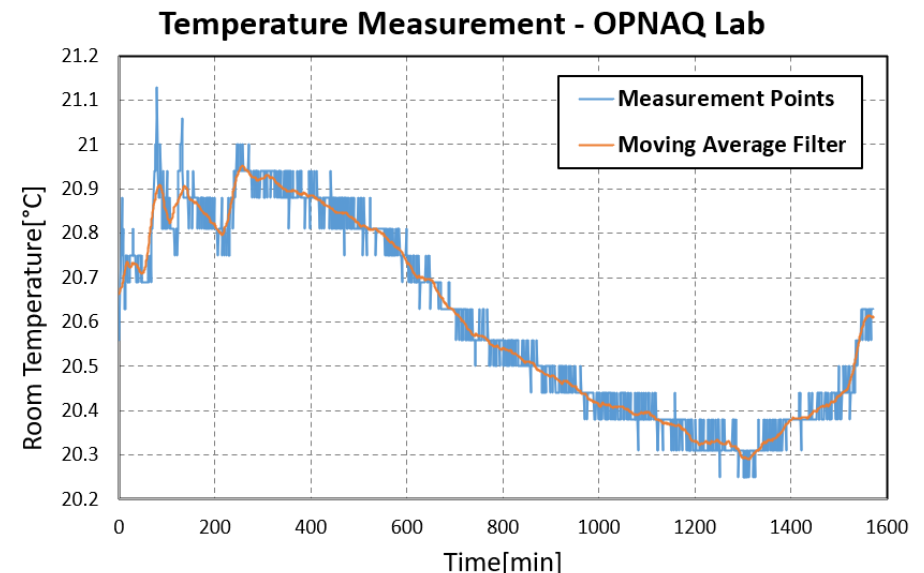


Analogensensoren - Signalaufbereitung

- Wenn Signal verrauscht/schlecht ist
 - Leerlaufmessung
 - Systemmessung
 - Analoger Tiefpass
 - RC-Glied & Grenzfrequenz ausrechnen
 - Software Tiefpass
 - Moving Average Filter
 - FFT → Bandpass/Notch/Tiefpass/Hochpass
 - Filter höherer Ordnung realisierbar
 - mehr Rechenleistung benötigt
- Störquellen:
 - Kabel?
 - Hochfrequente Quellen?
 - 100Hz LED-Lampen → Licht
 - 10-100 kHz - CCFL Lampen → EMC
 - Störquelle
 - Extern: Flex/Staubsauger
 - Intern: Teil der Messung
 - Gemeinsame GND-Leitung Aktor/Sensor



Beispiel eines Analogen Tiefpasses



Mögliche Prüfungsfragen

- Sie haben zwei Messpunkte eines digitalen Temperatursensors ausgemessen. Bei 0°C haben sie 200 Digits gemessen, bei 100°C haben sie 40200 Digits gemessen. Berechnen sie die Parameter einer linearen Funktion. (tipp.: $y=k*x+d$). Wieviel Grad Celsius haben sie bei 0 Digits. Wieviel Digits haben sie bei 50°C. Was können sie tun wenn bei 50°C nicht die erwarteten Digits Messbar sind?
- Sie haben in ihrem CES-Projekt ihre erste Messreihe aufgenommen und festgestellt das sie einige Störsignale auf der Leitung haben welche von der Frequenz viel höher sind als der Messbereich welcher Sie interessiert, was können Sie tun?
- Sie haben einen digitalen Lichtsensor in ihr Experiment eingebaut, I²C funktioniert und wurde verifiziert. Sie haben am Ort des Experiments LED Lampen und der Sensor arbeitet mit einer Integrationszeit von 20ms. Leider wirkt das Signal nicht Stabil. Was kann der Grund sein? Und was können Sie dagegen unternehmen?
- Sie haben einen analogen Lichtsensor (LDR) in ihr Experiment eingebaut. Sie haben am Ort des Experiments LED Lampen und Sie verwenden den ADC des Arduino (120us). Leider wirkt das Signal nicht Stabil. Was kann der Grund sein? Und was können Sie dagegen unternehmen?