

Karlsruher Institut für Technologie KIT  
Institut für Berufspädagogik  
Master of Science Ingenieurpädagogik

Masterarbeit

**Konzeption und Gestaltung  
eines digitalen Messwerterfassungs-  
systems für den Physikunterricht in  
der Schule**

Autor:	<b>Moritz Ulrich Karl Aupperle</b> Reinhold-Frank-Straße 14 76133 Karlsruhe T.: 0721/47040859 E-Mail: mo.au@gmx.de
Matrikelnummer:	1976472
Gutachter:	Prof. Dr. Günter Quast
Zweitgutachter:	Dr. Antje Bergmann
Abgabetermin:	27.11.2018
Bearbeitungszeit:	6 Monate

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>II</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>V</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Zu den Begriffen „digital“ und „Digitalisierung“ .....	2
1.2 Zur Relevanz digitaler Messwerterfassung im Physikunterricht .....	2
1.3 Aktueller Forschungsstand .....	4
1.3.1 Das digitale Messwerterfassungssystem „Cassy“ (LD Didactic) .....	5
1.3.2 Die Smartphone-App „PhyPhox“ (Zweites Physikalisches Institut der RWTH Aachen University) .....	8
1.3.3 Umgang mit digitalen Messwerterfassungssystemen innerhalb der Physikdidaktik .....	10
1.4 Forschungsfrage.....	11
1.5 Geplante Vorgehensweise.....	11
<b>2 Bestandteile des digitalen Messwerterfassungssystems.....</b>	<b>12</b>
2.1 Der Einplatinencomputer Raspberry Pi .....	12
2.2 Die Programmiersprache Python .....	14
2.3 Das Breadboard .....	14
2.4 Der Analog-Digital-Wandler ADS1115 .....	15
<b>3 Mögliche Sensoren für den Einsatz im Physikunterricht .....</b>	<b>19</b>
3.1 Distanzsensoren .....	19
3.1.1 Ultraschalldistanzsensoren.....	19
3.1.2 Optische Distanzsensoren.....	20
3.1.3 ToF (Time of Flight) Laserdistanzsensoren.....	20
3.1.4 IR-Triangulation-Distanzsensoren.....	21
3.2 Hallsensor zur Messung der magnetischen Flussdichte.....	24
3.3 Analoger Beschleunigungssensor .....	26
3.4 Kraftsensor.....	28
3.5 Piezoresistiver Drucksensor.....	31
3.6 Temperatursensoren.....	33
3.6.1 Widerstandstemperatursensoren .....	33
3.6.2 Temperatursensoren auf Basis der Temperaturabhängigkeit von Halbleiterübergängen.....	35
3.6.3 Thermoelement .....	36
3.7 Instrumentenverstärker .....	38
<b>4 Grundprinzip der digitalen Messwerterfassung .....</b>	<b>40</b>
<b>5 Das Softwarepaket PhyPiDAQ .....</b>	<b>41</b>
5.1 Softwaremodule.....	43

5.1.1	Klassen für Messgeräte und Sensoren .....	43
5.1.2	Klassen zur Visualisierung digitaler Messwerte.....	43
5.1.3	Klasse zum Speichern der digitalen Messwerte.....	44
5.2	Konfigurationsdateien.....	45
5.2.1	Hauptkonfigurationsdatei.....	45
5.2.2	Konfigurationsdatei des Sensors bzw. Messgeräts .....	45
<b>6</b>	<b>Einführungskurs zur digitalen Messwerterfassung mit dem Raspberry Pi und PhyPiDAQ .....</b>	<b>46</b>
6.1	Ziele des Einführungskurses .....	46
6.2	Begründung des Formats .....	46
6.3	Detailbetrachtung des Einführungskurses .....	48
6.3.1	Kapitel 1 – Digitale Messtechnik.....	48
6.3.1.1	Lernziel.....	48
6.3.1.2	Methodisch didaktische Analyse .....	49
6.3.1.3	Kritische Betrachtung .....	49
6.3.2	Kapitel 2 – Das Breadboard und die LED .....	50
6.3.2.1	Lernziele .....	50
6.3.2.2	Methodisch didaktische Analyse .....	50
6.3.2.3	Kritische Betrachtung .....	51
6.3.3	Kapitel 3 – Was bedeutet digitales Messen?.....	51
6.3.3.1	Lernziele .....	52
6.3.3.2	Methodisch didaktische Analyse .....	52
6.3.3.3	Kritische Betrachtung .....	54
6.3.4	Kapitel 4 – Lichtautomatik .....	54
6.3.4.1	Lernziele .....	55
6.3.4.2	Methodisch didaktische Analyse .....	55
6.3.4.3	Kritische Betrachtung .....	56
6.3.5	Kapitel 5 – Wir bauen ein digitales Thermometer .....	57
6.3.5.1	Lernziele .....	57
6.3.5.2	Methodisch didaktische Analyse .....	57
6.3.5.3	Kritische Betrachtung .....	59
6.3.6	Kapitel 6 – Wir bauen einen digitalen Kraftsensor.....	59
6.3.6.1	Lernziele .....	59
6.3.6.2	Methodisch didaktische Analyse .....	60
6.3.6.3	Kritische Betrachtung .....	62
6.4	Weitere kritische Anmerkungen zum Einführungskurs.....	62
<b>7</b>	<b>Mögliche Projekte aufbauend auf PhyPiDAQ .....</b>	<b>64</b>
7.1	Physik im Aufzug mit dem Beschleunigungssensor ADXL335.....	64
7.1.1	Der Schaltungsaufbau auf dem Breadboard mit dem ADXL335 .....	64
7.1.2	Kalibrierung des Beschleunigungssensors.....	65
7.1.3	Mögliche Aufgabenstellungen .....	65
7.1.4	Datenauswertung .....	65
7.2	Höhenbestimmung mit dem Luftdruck- und Temperatursensor BMP280 .....	67

7.2.1	Einbinden des Sensors BMP280 in PhyPiDAQ.....	67
7.2.2	Der Schaltungsaufbau auf dem Breadboard mit dem BMP280.....	67
7.2.3	Höhenbestimmung mit der barometrischen Höhenformel.....	68
7.3	Telemetrie mit einem digitalen Beschleunigungssensor (MMA8451) .....	69
7.3.1	Komponenten und Aufbau der Telemetrie-Box .....	69
7.3.2	Programmieren der Telemetrie-Box .....	70
7.3.3	Anschluss des Transceiver-Moduls an den Raspberry Pi .....	71
7.3.4	Einbinden der Telemetrie Box .....	71
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>72</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>75</b>
	Anhang 1: Einführungskurs zur digitalen Messwerterfassung mit dem Raspberry Pi und PhyPiDAQ .....	75
	Anhang 2: Komponenten für den Einführungskurs .....	129
	Anhang 3: Bauanleitung für den im Einführungskurs verwendeten Kraftsensor.....	133
	Anhang 4: README zu PhyPiDAQ .....	138
	Anhang 5: Anleitung für das Einrichten des Raspberry Pi .....	147
	Anhang 6: Rohdaten Beschleunigung während einer Aufzugfahrt im Physikhochhaus des KIT.....	172
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>VIII</b>
	<b>Danksagung .....</b>	<b>XIV</b>



## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1: Raspberry Pi 3B+ (Quelle: Eigene Darstellung) .....	13
Abb. 2-2: Breadboard mit Spannungsversorgung, Cobbler und über ein Flachbandkabel angeschlossenen Raspberry Pi (Quelle: Eigene Darstellung) .....	15
Abb. 2-3 Schematische Darstellung der Wandlung eines analogen Signals in ein digitales Signal am Beispiel eines 3-Bit AD-Wandlers (Quelle: Eigene Darstellung) .....	16
Abb. 2-4: Analog-Digital-Wandler ADS1115 (Quelle: Eigene Darstellung).....	17
Abb. 2-5: Mehrdeutigkeit bei der Signalrekonstruktion bei Unterabtastung (Quelle: Möser, 2018, S. 7).....	18
Abb. 3-1: Messunsicherheit in Abhängigkeit von Reflexionsgrad und Distanz zum Messobjekt VL53L0X (Quelle: STMicroelectronics, 2018, S. 25).....	20
Abb. 3-2: Schematischer Aufbau eines IR-Triangulation-Distanzsensors (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an Siegwart & Nourbakhsh, 2004, S. 112).....	21
Abb. 3-3: Aufbau eines IR-Triangulations-Distanzsensors SHARP GP2Y0A02YK0F.....	22
Abb. 3-4: Schematischer Aufbau eines Position-Sensitive-Device (großflächige Photodiode) (Quelle: Hamamatsu Photonics, 2017, S. 3) .....	22
Abb. 3-5: Ausgangskennlinie Distanzsenor SHARP GP2Y0A02YK0F in Abhängigkeit der Distanz zum Messobjekt für zwei Objekte mit unterschiedlichem Reflexionsgrad (Quelle: Sharp Devices Europe GmbH, 2006, S. 5).....	24
Abb. 3-6: Halleffekt in einem metallischen Leiter mit rechteckigem Querschnitt (Quelle: Giancoli, 2010, S. 935) .....	25
Abb. 3-7: Ausgangskennlinie analoger Hallsensor SS495 A1 bei einer Versorgungsspannung von 5 V (Quelle: Sensing and Control Honeywell Inc., 2018, S. 3).....	26
Abb. 3-8: Prinzipskizze eines kapazitiven Beschleunigungssensors (Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Tränkler & Reindl, 2014, S. 555).....	26
Abb. 3-9: Brückenschaltung zur Auswertung eines Differentialkondensators (Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Tränkler & Reindl, 2014, S. 556).....	27
Abb. 3-10: Schematischer Aufbau einer Wägezelle (Doppelbiegebalken) sowie eines Dehnungsmessstreifens (Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Baumann, 2015, S. 93; Siemens AG, 2015, S. 20) .....	30

Abb. 3-11: Wheatstonesche Messbrücke als Vollbrücke mit vier DMS (Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Tränkler & Reindl, 2014, S. 438).....	30
Abb. 3-12: Prinzipskizze eines piezoresistiven Differenzdrucksensors (Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Baumann, 2015, S. 105).....	32
Abb. 3-13: Kennlinie Ausgangsspannung über gemessenem Differenzdruck MPX4250DP (Quelle: NXP Semiconductors, 2017b, S. 5) .....	33
Abb. 3-14: Typische Spannungs-Temperatur Kennlinie eines Halbleiter- Temperatursensors (Quelle: Tränkler & Reindl, 2014, S. 89).....	36
Abb. 3-15: Schematische Prinzipschaltung eines Thermoelements (Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Huhnke, 2006, S. 23).....	37
Abb. 3-16: Schematischer Aufbau eines Instrumentenverstärkers (Quelle: Lerch, 2012, S. 211).....	38
Abb. 4-1: Grundprinzip der digitalen Messwerterfassung am Beispiel eines digitalen Kraftsensors (Quelle: Eigene Darstellung) .....	40
Abb. 5-1: Schematische Übersicht über das Softwarepaket PhyPiDAQ (Quelle: Eigene Darstellung) .....	41
Abb. 5-2: Grafische Benutzeroberfläche des Softwarepakets PhyPiDAQ (Quelle: Eigene Darstellung) .....	42
Abb. 5-3: Zeitlicher Verlauf der Kraft im Aufhängepunkt eines Federpendels (Quelle: Eigene Darstellung) .....	43
Abb. 5-4: xy-Diagramm am Beispiel einer Kennlinie einer roten LED (Quelle: Eigene Darstellung) .....	44
Abb. 7-1: Möglicher Schaltungsaufbau auf dem Breadboard für den Sensor ADXL335 (Quelle: Eigene Darstellung) .....	64
Abb. 7-2: Beschleunigung, Geschwindigkeit und Strecke einer Aufzugfahrt (aufwärts) im Physikhochhaus des KIT (Quelle: Eigene Darstellung).....	66
Abb. 7-3: Möglicher Schaltungsaufbau auf dem Breadboard für den Sensor BMP280 (Quelle: Eigene Darstellung).....	68
Abb. 7-4: Möglicher Aufbau einer Telemetrie-Box (Quelle: Eigene Darstellung) .....	70
Abb. 7-5: Möglicher Aufbau Telemetrie-Box (Quelle: Eigene Darstellung) .....	70
Abb. 7-6: Schematischer Aufbau des Breadboards mit dem Transceiver nRF24L01 (Quelle: Eigene Darstellung) .....	71

## **Abkürzungsverzeichnis**

BUS = System zur Datenübertragung

IR = infrarot

DIP = Dual in-line package (Gehäuseform elektronischer Bauelemente)

GFS = Gleichwertige Feststellung von Schülerleistungen

GPIO = General Purpose Input Output (Ein- bzw. Ausgabepin)

IMP = Informatik, Mathematik, Physik

IoT = Internet of Things

I2C = Inter-Integrated Circuit (Bussystem)

KIT = Karlsruher Institut für Technologie

LDR = Light Dependent Resistor (Fotowiderstand)

LSB = Least Significant Bit (niedrigstwertiges Bit)

NTC = Negative Temperature Coefficient

PTC = Positive Temperature Coefficient

SPI = Serial Peripheral Interface (Bussystem)

VNC = Virtual Network Computing (Software zur Übertragung des Bildschirminhalts und Fernsteuerung eines zweiten Computers)

# 1 Einleitung

Digitale Messwerterfassung ist allgegenwärtig. Aus dem privaten Alltag ist digitale Messtechnik nicht mehr wegzudenken, hier seien beispielsweise eine digitale Küchenwaage, ein Gefrierschrank, die Einparkhilfe in Autos oder ganz allgemein das Smartphone genannt. Doch auch im Berufsalltag hat die digitale Messwerterfassung in vielen Bereichen Einzug gefunden, wodurch sich auch die Anforderungen an viele Berufsausbildungen oder Studiengänge gewandelt haben: Möchte ein Schüler beispielsweise ein Studium oder eine Ausbildung im technisch-naturwissenschaftlichen Bereich beginnen, so ist ein gewisses Grundverständnis über die digitale Messwerterfassung und -verarbeitung hilfreich: Ohne ein Grundverständnis ist es zum Beispiel nicht möglich, die Ursache eines fehlerhaften Sensorwertes in einer Automatisierungsanlage auszumachen. Auch Studiengänge wie der Maschinenbau oder eine Ausbildung zum Industriemechaniker, die sich früher wenig mit dem Bereich der Elektrotechnik und Informatik befassten, haben sich schon längst in diese Richtung geöffnet. Nicht ohne Grund sind neue Ausbildungsberufe und Studiengänge im Bereich Mechatronik entstanden. Um den oben genannten Anforderungen in Alltag, Ausbildung, Studium und Beruf gewachsen zu sein, scheint es also dringend erforderlich, Schüler während ihrer Schulzeit mit einem gewissen Grundwissen über digitale Messwerterfassung auszustatten. Hier kann und sollte besonders der Physikunterricht einen wichtigen Beitrag leisten.

Auch ein Konzeptpapier zur Umsetzung der Digitalisierungsstrategie von Baden-Württemberg unterstreicht den heutigen Stellenwert der Digitalisierung im Bildungsbereich und damit auch konkret im Physikunterricht. So heißt es dort:

Die Digitalisierung prägt und verändert zunehmend das Leben und Arbeiten der Menschen in unserem Land wie auch in der ganzen Welt. Schulen sind zentrale Orte der Bildung und Erziehung und deshalb müssen die jungen Menschen hier die Kenntnisse und Fähigkeiten erwerben, um sich reflektiert und auf einer gesicherten Informationsbasis in der Lebens- und Arbeitswelt von heute und morgen bewegen zu können. (Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg, 2017, S. 1)

Die folgende Arbeit befasst sich unter dem Thema „Konzeption und Gestaltung eines digitalen Messwerterfassungssystems für den Physikunterricht in der Schule“ mit der Entwicklung eines digitalen Messwerterfassungssystems und eines zugehörigen Einführungskurses für Schüler. Die Begriffe „digital“ und „Digitalisierung“ spielen in der folgenden Arbeit eine wichtige Rolle. Außerhalb der Arbeit werden sie aktuell jedoch häufig in verschiedenen Kontexten benutzt. Deshalb sollte zunächst geklärt werden, was unter den Begriffen „digital“ und „Digitalisierung“ generell und besonders auch in der vorliegenden Arbeit zu verstehen ist.

## 1.1 Zu den Begriffen „digital“ und „Digitalisierung“

Im physikalischen Sinne beschreibt der Duden „digital“ als „in Stufen erfolgend“ (Duden, 2018a). Darauf Bezug nehmend bedeutet „Digitalisierung“ dann, dass ein analoges in ein digitales Signal gewandelt wird (Duden, 2018b).

Der Duden definiert „digital“ unter anderem aber auch als „auf Digitaltechnik, Digitalverfahren beruhend“ (Duden, 2018a). In diesem Sinne wird „Digitalisierung“ auch im Gabler Wirtschaftslexikon als „digitale Modifikation von Instrumenten, Geräten und Fahrzeugen“ beschrieben (Bendel, 2018). In diesen Bereich lassen sich digitale Tafeln, Tablets und ähnliches im Bereich der Schulbildung einordnen.

Der Begriff der Digitalisierung wird zudem als Synonym für die digitale Revolution verwendet. Dazu führen Wolff und Göbel (2018) auf, dass es hierbei „das Entscheidende ist, dass nicht nur analoge Medien Prozesse mehr oder weniger 1:1 in digitaler Form nachgebildet werden, sondern die Potenziale genutzt werden, die in der Verfügbarkeit digitaler Daten liegen. Das fängt an bei der leichten Aktualisierbarkeit und geht weiter über die Datenanalyse bis hin zu neuen Geschäftsmodellen“ (S.227).

In der geplanten Masterarbeit soll „digital“ sich hauptsächlich darauf beziehen, wie digitale Signale aus einem analogen Signal erzeugt werden und welche Vorteile und Potenziale die Erfassung, Verarbeitung und Analyse von digital erfassten Signalen bieten.

## 1.2 Zur Relevanz digitaler Messwerterfassung im Physikunterricht

Vor der tatsächlichen Entwicklung eines digitalen Messwerterfassungssystems für den Physikunterricht in der Schule sollte eine weitere Frage geklärt werden, nämlich, welche Relevanz digitale Messwerterfassungssysteme im Physikunterricht haben und wie sinnvoll die Entwicklung eines solchen digitalen Messwerterfassungssystems somit ist.

Zunächst bietet sich hier ein Blick in die Lehrpläne des Gymnasiums und des beruflichen Gymnasiums des Landes Baden-Württemberg für das Fach Physik an, die den Lehrern als „Orientierung für die Analyse, Planung und Überprüfung ihrer Unterrichtsarbeit“ dienen sollen (Kircher, 2015c, S. 93). Im Bildungsplan des Gymnasiums wird ganz allgemein festgehalten, dass „[der] Einsatz von Computern, Smartphones oder vergleichbaren Geräten, sowie dem Internet [...] im Physikunterricht eine Selbstverständlichkeit [ist] – beim Wissenserwerb, beim Erfassen und Auswerten von Messdaten, [...]“. Dies wird an anderer Stelle konkretisiert: der Bildungsplan weist das Lernziel aus, dass die „Schülerinnen und Schüler [...] Messwerte auch digital erfassen und auswerten (unter anderem Messwerterfassungssysteme,

Tabellenkalkulation) [können]“ (Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg, 2016, S. 7–8).

Digitale Messwerterfassungssysteme und die Auswertung gewonnener Messdaten mit Hilfe des Computers sind längst Standard in den Naturwissenschaften und dort unverzichtbar. Im Bildungsplan heißt es weiter: „Schülerinnen und Schüler wenden naturwissenschaftliche Arbeitsweisen an, das heißt, sie planen an geeigneten Stellen Experimente zur Überprüfung von Hypothesen, führen Experimente durch, werten diese aus und dokumentieren ihre Ergebnisse“ (Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg, 2016, S. 8). Will man dem Anspruch gerecht werden, dass auch an Schulen moderne Standards der Naturwissenschaften angewendet werden, so scheint der Einsatz digitaler Messwerterfassungssysteme unumgänglich.

Um Experimente zu planen und Messdaten auch in Hinblick auf eine Fehlerbetrachtung auswerten zu können, reicht jedoch die Betrachtung eines solchen Systems als rein technisches Hilfsmittel und anderes Medium zur Darstellung und Auswertung von Messdaten nicht aus. Die Schüler<sup>1</sup> benötigen Kenntnisse über das Grundprinzip der digitalen Messwerterfassung.

Dieses Verständnis von Physikunterricht stützt auch die Landesakademie für Fortbildung und Personalentwicklung an Schulen. Bezugnehmend auf die neuen Bildungsstandards werden hier relativ präzise Vorstellungen über notwendige Kenntnisse der Schüler bei der Messwerterfassung definiert, wie beispielsweise die Forderung, „dass die Schüler kompetent mit der Messwerterfassung umgehen können. Ein reines Wissen über den Ablauf reicht dabei sicher nicht aus. Die Möglichkeiten und Grenzen dieses Verfahrens müssen erarbeitet werden“ (Landesakademie für Fortbildung und Personalentwicklung an Schulen, 2018). Dies ist nur möglich, wenn die Digitalisierung auch im Sinne der Wandlung eines analogen in ein digitales Signal und das Grundprinzip der digitalen Messwerterfassung betrachtet wird.

Aufgrund des wenig zufriedenstellenden Abschneidens deutscher Schüler bei internationalen Vergleichsstudien wie TIMSS oder PISA wurde um die Jahrtausendwende auch die Forderung laut, Naturwissenschaften wie Physik in der Schule nicht isoliert zu betrachten, sondern den Schülern eine „naturwissenschaftliche Grundbildung“, die sogenannte „Scientific Literacy“ mitzugeben. „Scientific Literacy“ basiert unter anderem auf Fähigkeiten wie dem „Verständnis grundlegender naturwissenschaftlicher Basiskonzepte, Vertrautheit mit naturwissenschaftlichen Denk- und Arbeitsweisen“ oder der „kritische[n] Reflexion der Möglichkeiten und Grenzen naturwissenschaftlicher Erkenntnis“ (Mikelskis, 2010, S. 14). Ein zeitgemäßer Physikunterricht sollte also auch unter der Forderung nach Scientific Literacy aktuelle

---

<sup>1</sup> Aus Gründen der Lesbarkeit wird im Folgenden stets die männliche Form gewählt. Nichtsdestoweniger beziehen sich die Angaben auf Angehörige aller Geschlechter.

naturwissenschaftliche Arbeitsweisen wie den Einsatz digitaler Messwerterfassungssysteme vermitteln.

Neben all diesen doch recht deutlich auf Schulinhalte bezogenen Forderungen an den Physikunterricht enthält der Bildungsplan eine weitere Forderung von weitreichender Bedeutung: So soll „der Physikunterricht [...] die Schülerinnen und Schüler für physikalische Fragestellungen begeistern und sie gegebenenfalls auf eine Berufsausbildung oder ein Studium in diesem Bereich vorbereiten“ (Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg, 2016, S. 7). „Die Schülerinnen und Schüler [...] erfahren [durch den Physikunterricht], welche Bedeutung physikalische Sachverhalte für andere Schulfächer und viele Lebensbereiche haben“ (Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg, 2003, S. 13). Was bedeutet dies aber nun im Hinblick auf digitale Messwerterfassung? Wie in der Einleitung bereits beschrieben ist digitale Messwerterfassung sowohl in unserem Alltag, als auch in vielen Ausbildungsberufen, Berufsbildern und Studiengängen allgegenwärtig. Blickt man auf Anwendungen digitaler Messtechnik in Studium oder Beruf, so erscheint ein gewisses Grundwissen über digitale Messwerterfassung hilfreich. Bezogen auf digitale Messtechnik im Alltag wäre es sicher möglich, sich auf die Anwendung von Errungenschaften der digitalen Revolution zu beschränken. Das heißt beispielsweise, vorhandene Apps zur Messwerterfassung zu nutzen, ohne ihre Funktionsweise nachvollziehen zu können. Wir befinden uns schließlich in einem Zeitalter, in dem immer mehr sogenannte „smarte“ Geräte entwickelt werden, die das private Leben erleichtern. Jedoch erfordern eben diese Geräte oft Zugriff zu sensiblen Daten oder leisten nicht exakt das, was der Nutzer gerne hätte. Vielleicht ist es eben unter diesem Aspekt wünschenswert, Schüler so weit im Bereich digitaler Messwerterfassung zu schulen, dass sie bei Interesse in der Lage wären, auf Basis gewisser Grundkenntnisse kreativ zu werden und eigene Projekte zu entwickeln.

In Vorbereitung auf die geplante Masterarbeit zeigte sich jedoch, dass der Einsatz digitaler Messwerterfassungssysteme im Physikunterricht zumindest an den für die Arbeit kontaktierten Schulen nur eine untergeordnete, bzw. keine Rolle spielt. Die Gründe hierfür sind meist finanzieller Natur. Die Schulen sehen an dieser Stelle Handlungsbedarf. Aus diesem Grund steht besonders die Carl-Engler-Schule Karlsruhe einer Kooperation mit dem KIT zur Entwicklung eines für ihren Physikunterricht geeigneten digitalen Messwerterfassungssystems sehr positiv gegenüber.

### 1.3 Aktueller Forschungsstand

Der obige Text verdeutlicht, dass digitale Messwerterfassung im modernen Physikunterricht eine wichtige Rolle einnehmen sollte. Aus diesem Grund existieren bereits etliche digitale Messwerterfassungssysteme für den Unterricht. Zunächst sollen

deshalb Systeme vorgestellt und kritisch beleuchtet werden, die häufig eingesetzt bzw. aktuell viel Beachtung bekommen und deshalb als besonders relevant eingestuft werden. Anschließend soll ein Blick auf die Literatur einen Einblick in die Schwierigkeiten geben, die sich aus der unterschiedlichen thematischen Einordnung digitaler Messwerterfassungssystemen in der Physikdidaktik ergeben.

### 1.3.1 Das digitale Messwerterfassungssystem „Cassy“ (LD Didactic)

Zunächst soll das Computer-Messsystem „Cassy“ von LD Didactic betrachtet werden. Hierbei handelt es sich um einen „Messcomputer“, dessen Einsatzgebiet in einer Physikdidaktik folgendermaßen beschrieben wird: „Der ‚Messcomputer‘ bietet sich an, wenn viele Messwerte in kurzer Zeit aufgenommen werden müssen oder wenn die Zeiträume groß sind und eine automatische Erfassung von Daten nötig wird. [...] Besonders attraktiv ist es, wenn Messwerte in Echtzeit aufbereitet oder grafisch angezeigt werden können“ (Girwidz, 2015b, S. 404–405). Genau diese Attraktivität „Cassys“ wird in der *Physikdidaktik* von Berger näher aufgeschlüsselt: durch geeignete Sensoren können „Messungen nichtelektrischer Größen wie Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, Kräfte, Drücke, Temperaturen[...]“ durchgeführt werden; zudem liefert „Cassy“ ein „ausgewogene[s] didaktische[s] Konzept[...] für Demonstrationsexperimente, mehrere Messgrößen können gleichzeitig erfasst werden, Messgenauigkeit und Verarbeitungsgeschwindigkeiten sind hoch, es bestehen „umfassende numerische und grafische Auswertungsmöglichkeiten“, zudem sind „Messwerte in andere Anwendungen [portierbar]“ (Berger, 2010, S. 159).

Auf der Homepage von LD Didactic wird „Cassy“ damit beworben, dass die Schüler „die Messung nur noch starten und stoppen [müssen]“ (LD DIDACTIC GmbH, 2018b). Eben diese Benutzerfreundlichkeit führt jedoch zu im Physikunterricht unerwünschten Nebeneffekten.

„Cassy“ arbeitet als Blackbox. Das bedeutet, dass das eigentliche Messverfahren verschleiert wird. Betrachtet man jedoch die funktionellen Aspekte von Experimenten im Physikunterricht, so wird schnell klar, dass der ausschließliche Einsatz solcher Blackbox-Systeme zum Erlernen von Messwerterfassung im Physikunterricht somit nicht ausreichen kann: Ein funktioneller Aspekt des Experiments im Physikunterricht ist es nämlich, Fähigkeiten und Fertigkeiten wie „sorgfältiges Messen unter definierten Rahmenbedingungen, Zusammenstellen von Daten, Auswertung und Fehlerbetrachtung [zu üben]“ (Girwidz, 2015a, S. 231). Bei Blackbox-Systemen wie „Cassy“ entfallen Arbeitsschritte wie das Zusammenstellen des notwendigen Messaufbaus vor dem Versuch weitgehend, weil die entsprechenden Experimente im Normalfall bereits fertig ausgearbeitet zur Verfügung stehen und der Aufbau sich meist auf das Zusammenstecken der Komponenten reduziert. Berger (2010) spricht an dieser Stelle



sogar von einer „Überschattung“ der eigentlichen Experimentieranordnung mit der Computertechnik“ (S.158).

Auch das Erlangen von „Scientific Literacy“, also, dass die Schüler eine „Vertrautheit mit naturwissenschaftlichen Arbeits- und Denkweisen“ entwickeln, kann durch den ausschließlichen Einsatz von Blackbox-Systemen zum Erlernen digitaler Messwerterfassung nicht funktionieren (Mikelskis, 2010, S. 14).

Der ausschließliche Einsatz von Systemen wie „Cassy“ zur Messwerterfassung im Physikunterricht ist auch in anderer Hinsicht kritisch zu betrachten. Der Bildungsplan fordert handlungsorientierte Themenbearbeitung, also, dass die Schüler „die typischen Arbeitsweisen der Physik [durch eigenes Tun und Handeln kennenlernen]“ (Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg, 2003, S. 13). Dies ist mit „Cassy“ nur schwer zu realisieren. Zum einen liegt dies sicherlich am Blackbox-Charakter. Zum anderen wird die handlungsorientierte Themenbearbeitung seitens der Schüler aber auch dadurch stark eingeschränkt, dass Messungen mit „Cassy“ meist nur als Demonstrationsversuch durchgeführt werden können. Bei Direktbezug über LD Didactic kosten die einfachsten Systeme mit geringem Funktionsumfang bereits über 400 Euro (LD DIDACTIC GmbH, 2018a). Für einen Klassensatz sind somit mehrere tausend Euro als Anfangsinvestition notwendig. Da nur wenige Schulen über die nötigen finanziellen Mittel verfügen, Systeme wie „Cassy“ im Klassensatz anzuschaffen, bleibt der Einsatz solcher Messcomputer also meist auf Demonstrationsversuche beschränkt. Die Schüler lernen die digitale Messwerterfassung also nur wenig durch eigenes Tun und Handeln kennen. In der vorliegenden Arbeit wird jedoch die These vertreten, dass das Schülerexperiment bei der digitalen Messwerterfassung eine zentrale Rolle spielen muss.

Erste Argumente zur Durchführung von Schülerversuchen werden bereits im Bildungsplan genannt. So heißt es dort:

„Laborübungen sind verbindlicher und unverzichtbarer Bestandteil der Physik am Technischen Gymnasium. Sie begleiten und ergänzen den Unterricht. Hier werden die theoretischen Kenntnisse gefestigt und am praktischen Beispiel erprobt. [...] Arbeitsweisen der Physik wie Messen, Auswerten, Darstellen, Präsentieren werden gelernt. [...] Die spezifischen Anforderungen der Laborübungen verlangen, die Klasse in Gruppen zu teilen“. (Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg, 2003, S. 4)

Neben den genannten „spezifischen Anforderungen[...], die Klasse in Gruppen zu teilen“, die oft auf rechtlichen Rahmenbedingungen begründet sind, sprechen auch zahlreiche didaktische Überlegungen dafür, Experimente nach Möglichkeit in Schülerhand zu geben.

Bei der Verlagerung vom Demonstrationsversuch zum Schülerversuch verlagern sich auch die „Anforderungen an den Lernenden [...] vom Beobachten und Registrieren zum aktiven Durchführen von experimentellen Arbeiten“ (Girwidz, 2015a, S. 233). Dem Schüler wird also eine völlig neue, aktivere Rolle zuteil. Er hat keine Möglichkeit mehr, sich aus dem Denkprozess auszuklinken. Durch sein eigenes Tun werden „Aufbau und Ablauf des Versuchs [...] im Allgemeinen gut erfasst [, d]er Umgang mit technischen Geräten und Versuchsaufbauten wird gelernt [und der Schüler] überwinde[t ...] Schwierigkeiten [und macht die Erfahrung einer] erfolgreiche[n] Datenerfassung [...]“ (Girwidz, 2015a, S. 241). Hier wird also deutlich: Der Schüler profitiert im Allgemeinen bei einem gut geplanten Schülerversuch besonders unter fachlichen Gesichtspunkten. Da die digitale Messwerterfassung Bereiche umfasst, die für viele Schüler wahrscheinlich gänzlich neu sind, erscheint es umso wichtiger, die Schüler in das Experimentieren miteinzubeziehen. Auf diese Weise erkennen sie, wo ihre konkreten Schwierigkeiten beim Schaltungsaufbau, Konfigurieren, Auswerten oder gegebenenfalls beim Programmieren liegen, lernen diese zu beheben und erlangen somit ein gewisses thematisches Grundverständnis.

Darüber hinaus bringt der Schülerversuch weitere Vorteile mit sich, wie beispielsweise, dass er „dem Drang nach Eigentätigkeit entgegen[kommt] und [...] einen Wechsel der Unterrichtsform [ermöglicht] (Girwidz, 2015a, S. 241). Auch hierbei handelt es sich um einen nicht zu unterschätzenden Aspekt: Motivierte Schüler sind sicher bereit, mit hoher Konzentration zu arbeiten. Der „Drang nach Eigentätigkeit“ impliziert, dass die Schüler die notwendigen Arbeitsschritte selbst ausführen möchten. Dies impliziert aber auch, dass sie an komplizierteren Stellen aktiv werden müssen, ihre Probleme benennen und versuchen müssen, zu einer Lösung zu kommen. Ist die Motivation der Schüler durch die gewählte Arbeitsform also hoch, so stärkt dies Girwidz oben genannte These, dass die Schüler neue Lerninhalte durch Schülerexperimente in der Regel gut erfassen können.

Ein weiterer Vorteil des Schülerversuchs ist es, dass sich „Individualisierungs- und Differenzierungsmöglichkeiten [...] in Kleingruppen realisieren [lassen] (Girwidz, 2015a, S. 241). Wie bereits erwähnt befassen sich viele Schüler wahrscheinlich erstmals in ihrem Leben mit digitaler Messwerterfassung. Es mag jedoch auch Schüler geben, die in ihrer Freizeit programmieren und über ein gewisses Vorwissen verfügen. Es ist also zu erwarten, dass gerade zu Beginn erhebliche Unterschiede bezüglich der Lerngeschwindigkeit bestehen. Um möglichst vielen Schülern gerecht zu werden, ist es also sehr sinnvoll, die Lerngruppe in Kleingruppen zu unterteilen, sodass die Schüler in ihrem eigenen Tempo arbeiten können und einen möglichst hohen Lernzuwachs erfahren.

Zuletzt sei noch ein allgemeiner, nicht speziell auf das digitale Messen bezogener Vorteil des Schülerexperiments genannt. Schülerexperimente fördern das Üben „kooperative[n] Arbeiten[s] in Gruppen“ (Girwidz, 2015a, S. 241). Da dieser Aspekt auch in Hinblick auf ein späteres Berufsleben relevant ist, erscheint auch dieses Argument wichtig.

Ein weiteres Manko „Cassys“ für den Physikunterricht ist es, dass das System nicht frei erweiterbar ist. Man ist komplett auf die angebotenen Sensoren beschränkt, die in vielen Fällen mehrere hundert Euro pro Stück kosten. Die potentielle Erweiterbarkeit eines Systems zur digitalen Messwerterfassung wird in dieser Arbeit allerdings als wichtig angesehen. Alleine die Auswahl des Sensors ist ein wichtiger Aspekt bei der Planung eines Experiments. Möchte die Lehrkraft nun kreativ werden und (gemeinsam mit den Schülern) weitere Einsatzmöglichkeiten des digitalen Messwertsystems entwickeln, so ist sie darauf angewiesen, dass das System an sich erweiterbar ist.

Zusammenfassend ergibt sich also folgendes Bild: „Cassy“ sollte im Physikunterricht möglichst dann eingesetzt werden, wenn nicht das Verständnis digitaler Messwerterfassung im Zentrum steht. „Cassy“ sollte dann eingesetzt werden, wenn es darum geht, den Schülern die Möglichkeiten aufzuzeigen, die sich durch moderne Messtechnik ergeben, also beispielsweise die Möglichkeit, eine große Zahl von Messwerten in Echtzeit zu erhalten und auszuwerten. Bei „Cassy“ stehen der unkomplizierte Einsatz und die technische Leistungsfähigkeit im Vordergrund. Die digitale Messwerterfassung ist dabei mehr Mittel zum Zweck als selbst wichtiger Bestandteil des Physikunterrichts.

### **1.3.2 Die Smartphone-App „PhyPhox“ (Zweites Physikalisches Institut der RWTH Aachen University)**

Ein weiteres aktuell populäres Instrument der digitalen Messwerterfassung im Physikunterricht ist die Smartphone-App PhyPhox. Auf ihrer Homepage beschreiben die Macher der App die vorliegenden Funktionen wie folgt: Mithilfe von Phyphox kann der Schüler mit den Sensoren seines Smartphones experimentieren; es ist ein Datenexport in viele gängige Formate möglich; Experimente können ferngesteuert über jeden Webbrowser durchgeführt werden, zudem können auch eigene Experimente durchgeführt werden, die bislang nicht in der App zu finden sind (RWTH Aachen University, 2018).

Beim Einsatz von Phyphox wird also das Smartphone der Schüler in den Unterricht integriert. Das Smartphone hat einen großen Lebensweltbezug und ist den Schülern sehr vertraut. Deshalb ist damit zu rechnen, dass ihre Motivation durch das gewählte Medium sehr hoch ist. Dies wiederum sollte – wie oben beschrieben – dazu beitragen, dass auch der Lernerfolg der Schüler gesteigert wird.

Da in der Regel jeder Schüler ein Smartphone besitzt, können die Versuche zudem als Schülerexperimente durchgeführt werden, wodurch zunächst ähnliche positive Auswirkungen auf Lernprozess und Sozialkompetenz zu erwarten sind wie bei anderen Versuchen zur digitalen Messwerterfassungssystemen in Schülerhand.

Dennoch ergeben sich durch den Einsatz von Schüler-Smartphones im Unterricht einige Probleme, die hier nur exemplarisch betrachtet werden können. Zunächst widerspricht der Einsatz der Smartphones im Physikunterricht dem generellen Smartphone-Verbot vieler Schulen.

Betrachtet man die Ergebnisse einer englischen Studie von Beland und Murphy (2015), so erscheint das Verbot von Mobiltelefonen an Schulen durchaus angebracht. So zeigte sich, dass die Leistungen der Schüler insgesamt nach einem Handyverbot um etwa sechs Prozent anstiegen, bei schwächeren Schülern sogar um 14%. Es wäre somit zumindest zu überlegen, ob der Einsatz von Smartphones über die gesteigerte Motivation der Schüler ausschließlich zu positiverem Lernzuwachs führt, oder ob die Smartphones nicht auch ein großes Ablenkungspotential bergen, das auf der anderen Seite dazu führt, dass weniger als möglich erlernt wird.

Auch soziale Aspekte müssen bedacht werden: Besitzt ein Schüler ein wenig leistungsfähiges Smartphone, so kann sich dies negativ auf seine Messergebnisse auswirken. Der Schüler läuft Gefahr, von der Gruppe bloßgestellt zu werden, da er „nur ein billiges Handy“ hat.

Dieser Aspekt leitet auch zu fachlichen Problemen beim Einsatz von Smartphones bei der digitalen Messwerterfassung über. In unterschiedlichen Smartphones sind unterschiedliche Sensoren verbaut. Dies führt zu ungleichen Messergebnissen. Es ist also keine vergleichbare Messwerterfassung möglich, wodurch auch die Auswertung der Daten im Plenum nur schwer möglich ist. Andererseits könnte dies auch ein Ansatzpunkt zur Diskussion im Unterrichtsgespräch sein.

Das Problem ungleicher Messergebnisse könnte man umgehen, indem die Schule beispielsweise einen Klassensatz identischer Smartphones anschafft. Aber auch diese Lösung scheint im Unterrichtsalltag wenig praktikabel. Schon nach kurzer Zeit würden die Smartphones veraltet wirken; der Effekt des „coolen“ Mediums mit dem dadurch erhofften Motivationsschub ginge verloren. Hinzu käme, dass die Smartphones wahrscheinlich nur selten in Benutzung wären und der Lehrer vor dem Unterricht langwierige Updates durchführen müsste.

Wie auch bei „Cassy“ handelt es sich bei der „PhyPhox“ App zudem um ein Blackbox-System. Es ergeben sich folglich dieselben oben genannten unerwünschten Effekte im Physikunterricht wie bei „Cassy“. Auch die Erweiterbarkeit der App ist stark

eingeschränkt. Versuche, die sich auf Sensoren beziehen, die nicht im Handy verbaut sind, können nicht oder nur schwer realisiert werden.

Die „PhyPhox“ App scheint also eher eine reizvolle Ergänzung zu sein, um im Physikunterricht auf die Möglichkeiten moderner Messtechnik aufmerksam zu machen und besonders auch um zu zeigen, welche Möglichkeiten digitaler Messwerterfassung das eigene Smartphone ohne zusätzlichen Kostenaufwand bietet.

### **1.3.3 Umgang mit digitalen Messwerterfassungssystemen innerhalb der Physikdidaktik**

Aufgrund der Popularität der vorgestellten und anderer digitaler Messwerterfassungssysteme beschäftigt sich auch die Fachliteratur mit diesen. Interessant und auffällig ist hierbei die Einordnung digitaler Messwerterfassungssysteme in die Kapitel der jeweiligen Werke: In der im Springer-Verlag erschienenen „Physikdidaktik: Theorie und Praxis“ von Kircher, Girwidz und Häußler (2015) werden sie im Kapitel „Neue Medien und Multimedia“ geführt; in der im Cornelsen-Verlag erschienenen „Physikdidaktik: Praxishandbuch für die Sekundarstufe I und II“ dagegen beispielsweise im Kapitel „im Unterricht experimentieren“ (Kircher et al., 2015; Mikelskis, 2010b). Hier zeigt sich ein in Bezug auf digitale Messwerterfassungssysteme generell vorliegendes Problem, nämlich, dass die Bedeutung dieser Systeme unterschiedlich eingeordnet werden kann. Dies hat zur Folge, dass der Umgang mit digitalen Messwerterfassungssystemen im Unterricht ebenfalls auf zwei sehr unterschiedliche Weisen erfolgen kann: Der Fokus bei „Neue Medien und Multimedia“ liegt darauf, dass digitale Messwerterfassung eines unter vielen Medien ist, das im Unterricht zum Einsatz kommen kann. Es schließt nicht zwingend mit ein, dass hier ein gänzlich neues Konzept vorliegt, anhand dessen man erklären kann, wie (und nicht nur dass) digitale Messwerterfassung im Genauen funktioniert. Digitale Messwerterfassung kommt somit häufig in der von LD Didactic beworbenen Form zum Einsatz, nämlich, dass die Schüler die Messung nur noch starten und stoppen müssen; die genauen Abläufe hinter der Messung bleiben weitgehend verborgen. Der von Mikelskis (2010b) gewählte Titel setzt seinen Fokus hingegen auf das Experimentieren; dies wird dem Potential der digitalen Messwerterfassung und der zugrunde liegenden Prozesse viel mehr gerecht. Dies gilt jedoch auch nur, wenn das Experiment die der digitalen Messwerterfassung zugrunde liegenden Prozesse nicht außer Acht lässt.

## 1.4 Forschungsfrage

Betrachtet man die bereits bestehenden Systeme sowie die Schwierigkeiten, die sich aus der unterschiedlichen thematischen Einordnung digitaler Messwerterfassungssysteme in der Physikdidaktik ergeben, so erscheint die Entwicklung eines weiteren digitalen Messwerterfassungssystems sinnvoll. Konkret ergibt sich folgende Forschungsfrage:

Wie kann ein digitales Messwerterfassungssystem gestaltet werden, das möglichst viele Vorteile der vorgestellten bestehenden Systeme beibehält, gleichzeitig aber auch zum Verständnis von digitaler Messwerterfassung beiträgt, vergleichbare Messwerterfassung im Schülerexperiment möglich macht und erweiterbar ist?

Zur Realisierung eines solchen digitalen Messwerterfassungssystems soll zudem ein Einführungskurs gestaltet werden. Dieser soll es ermöglichen, dass die Schüler einen möglichst hohen Lernzuwachs im Bereich der digitalen Messwerterfassung erzielen. Es ergibt sich also eine weitere Forschungsfrage:

Wie kann ein Einführungskurs aussehen, der die Prinzipien, die dem digitalen Messwerterfassungssystem zugrunde liegen, für die Schüler transparent macht?

## 1.5 Geplante Vorgehensweise

In den Kapiteln zwei bis fünf soll zunächst die Beantwortung der ersten Forschungsfrage stattfinden. Dafür soll die technische Realisierung des digitalen Messwerterfassungssystems im Mittelpunkt stehen. Zuerst soll unter anderem eine begründete Wahl eines geeigneten Einplatinencomputers und einer geeigneten Programmiersprache erfolgen. Anschließend soll die Auswahl möglicher Sensoren und Auswerteelektronik für verschiedene physikalische Größen unter Berücksichtigung ökonomischer, didaktischer und technischer Gesichtspunkte stattfinden. Im Folgenden soll dann die Struktur des entwickelten Softwarepakets dargestellt und begründet werden.

In Kapitel sechs soll dann die zweite Forschungsfrage beantwortet werden. Der Einführungskurs soll aufgrund didaktischer Überlegungen gestaltet werden. Dieser Einführungskurs soll dann mit zwei Schülergruppen praktisch getestet werden. Auf Basis dieser Tests sollen dann eventuelle Unstimmigkeiten und Schwierigkeiten aufgezeigt und korrigiert werden.

Kapitel sieben soll dann einen Ausblick auf Schülerprojekte geben, die auf Basis des entwickelten digitalen Messwerterfassungssystems und des Einführungskurses realisierbar wären. In einer Zusammenfassung und einem Ausblick soll dann eine Überprüfung der Forschungsfrage stattfinden. Zudem soll erörtert werden, welche neuen Aspekte der Thematik sich auf Grundlage der dann vorliegenden Masterarbeit ergeben.

## **2 Bestandteile des digitalen Messwerterfassungssystems**

Der nachfolgende Abschnitt befasst sich mit einer begründeten Wahl der Komponenten, die als Basis für das zu entwickelnde digitale Messwerterfassungssystem dienen.

### **2.1 Der Einplatinencomputer Raspberry Pi**

Der nachfolgende Abschnitt befasst sich mit der begründeten Auswahl des Computersystems, das zur Konzeption und Entwicklung des digitalen Messwerterfassungssystems genutzt wird.

Betrachtet man die gängigen digitalen Messwerterfassungssysteme, so muss festgestellt werden, dass alleine der Faktor der hohen Kosten von Sensoren und dem Messwerterfassungssystem an sich in den meisten Fällen dafür sorgt, dass die Messgeräte häufig in der Hand des Lehrers sind und den Schülern für eigene Experimente unzugänglich bleiben. Damit ist der Kostenfaktor ein ganz grundsätzlicher, wenn es darum geht, Schülern im Physikunterricht digitale Messtechnik zugänglich zu machen.

Als Basis für das zu entwickelnde digitale Messwerterfassungssystem bietet sich der Raspberry-Pi als Einplatinencomputer in Checkkartenformat in zweierlei Hinsicht an. Zum einen ist das aktuelle Modell Raspberry Pi 3B+ mit einem Preis von ca. 35 € sehr günstig und bietet darüber hinaus die Möglichkeit, über GPIO-Pins direkt digitale Messwerte einzulesen bzw. über verschiedene Schnittstellen (SPI, I2C, 1-Wire) mit Analog-Digital-Wandlern und digitalen Sensoren zu kommunizieren und diese auszuwerten. Zum anderen verfügt der Raspberry Pi auf seiner Platine über sämtliche zum Betrieb des Computers notwendige elektronische Komponenten und zudem über ein eigenes Betriebssystem, das mit allen gewohnten Funktionen eines Computers ausgestattet ist. So finden sich bereits standardmäßig Programme zur Textverarbeitung, Tabellenkalkulation und zur Programmierung sowie ein Browser auf dem Raspberry Pi. Die grafische Benutzeroberfläche ähnelt der Benutzeroberfläche gewohnter Betriebssysteme und ist damit intuitiv und leicht zu bedienen. Das Modell 3B+ verfügt darüber hinaus über eine Bluetooth- und eine W-LAN-Schnittstelle. Über die W-LAN-Schnittstelle ist es möglich, auch von externen Geräten aus (Remotezugriff) auf den Raspberry Pi mit einer VNC-Verbindung zuzugreifen und diesen fernzusteuern. So kann der Raspberry Pi zum einen mit Bildschirm, Tastatur und Maus ausgestattet genutzt werden, jedoch gleichzeitig auch als mobiles und handliches Messdatenerfassungssystem mit einer Power-Bank als Spannungsversorgung genutzt werden (Raspberry Pi Foundation, 2018; reichelt elektronik GmbH & Co. KG.). Dies hat den Vorteil, dass man mit dem Raspberry Pi auf kein Zweitgerät angewiesen ist und

trotzdem die Möglichkeit hat, diesen von einem anderen Gerät aus zu steuern. Die genannten Vorteile ermöglichen es, auf Basis des Raspberry Pi ein umfassendes digitales Messwerterfassungssystem mit grafischer Anzeige der Messwerte, Export der Messdaten und Auswertung auf einem vergleichsweise sehr günstigen System zu realisieren. Dies ist auch ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal zu den bekannten digitalen Messwerterfassungssystemen, die meist auf ein zweites Gerät (Laptop oder PC) zur Messwertanzeige und/oder Auswertung der erfassten Messwerte angewiesen sind.

Die Auswahl vergleichsweise günstiger Sensoren für verschiedene physikalische Größen, die in Verbindung mit dem Raspberry Pi zum Einsatz kommen können, ist dabei nahezu grenzenlos und erweitert sich ständig. Es steht eine große Anzahl an Platinen zur Verfügung, auf denen in der Industrie gängige Sensoren bereits mit der notwendigen äußeren Beschaltung und Anschlusspins für die Verbindung mit dem Raspberry Pi verlötet sind und so unkompliziert verwendet werden können. Trotz des geringen Preises handelt es sich dabei häufig um sehr leistungsfähige Sensoren, deren geringer Preis sich ausschließlich darin begründet, dass diese für den industriellen Massenmarkt entwickelt wurden.

Zudem verfügt der Raspberry Pi über eine große Fangemeinde, die eine nahezu grenzenlose Anzahl von Programmierbeispielen, Projektideen und kompletten Softwarepaketen frei zugänglich im Internet bereitstellt.

Der Raspberry Pi, der eigens von der britischen Raspberry Pi Foundation entwickelt wurde, um die Bildung von Schülern und Studenten in den Bereichen Programmierung, Computerhardware und verwandten Gebieten zu fördern, bietet aus den angeführten Gründen die ideale Grundlage zur Umsetzung eines digitalen Messwerterfassungssystems für Schüler (Charity Commission for England and Wales, 2018). Die folgende Abbildung zeigt einen solchen Raspberry Pi.



Abb. 2-1: Raspberry Pi 3B+ (Quelle: Eigene Darstellung)



## 2.2 Die Programmiersprache Python

Bei der Programmiersprache Python handelt es sich um die native Programmiersprache des Raspberry Pi. Sie wurde von der Raspberry Pi Foundation als Programmiersprache für den Raspberry Pi gewählt, was sich auch in der Namensgebung des Raspberry Pi niedergeschlagen hat (Pi = Py).

Die Programmiersprache Python eignet sich aber nicht nur aus diesem Grund besonders gut für die Programmierung des digitalen Messwerterfassungssystems auf Basis des Raspberry Pi. Python gilt als sehr einfach zu erlernende Programmiersprache, die einen gut lesbaren und knappen Programmierstil fördern soll. Die Befehle sind einfach und verständlich gehalten und die Programmstruktur wird durch Einrückung der einzelnen Programmblöcke sehr übersichtlich gehalten (Dembowski, 2013; Python Foundation). Damit eignet sich Python besonders gut für den Einsatz mit Schülern, da die Einstiegshürde zum Schreiben erster eigener Programme sehr niedrig ist und so direkt mit konkreten kleinen Programmen eingestiegen werden und auf eine langatmige und für die Schüler eventuell abschreckende Einführung verzichtet werden kann.

## 2.3 Das Breadboard

Zum Experimentieren und für den Aufbau von elektronischen Schaltungen mit dem Raspberry Pi eignen sich am besten sogenannte Breadboards. Es handelt sich dabei um Steckplatinen, auf denen handelsübliche elektronische Bauelemente, die für Lochrasterplatinen geeignet sind, in Federkontakte gesteckt werden können. Dieser Punkt ist als besonders positiv hervorzuheben, da die Schüler so mit handelsüblichen Bauelementen in Berührung kommen, die nicht den Eindruck von Spezialbauteilen für den Physikunterricht erwecken. Mit entsprechenden steckbaren Leitungen können so Schaltungen auf diesen Steckbrettern entworfen und durch einfaches Umstecken der Bauteile geändert werden. Zudem können die GPIO-Pins des Raspberry Pi über ein Flachbandkabel und einen sogenannten Cobbler auf dem Breadboard zugänglich gemacht werden. Eine entsprechende Beschriftung auf dem Cobbler erleichtert das Einbinden des Raspberry Pi in die aufgebaute Schaltung.

Ein solches Breadboard verfügt am unteren und oberen Rand über zwei Kontaktreihen, mittels derer eine Betriebsspannung von 3,3 V bzw. 5 V für den Schaltungsaufbau bereitgestellt werden kann. Hier bietet sich besonders eine günstige steckbare Spannungsversorgungsplatine an, die die Betriebsspannungen bereitstellt und über einen EIN/AUS-Schalter verfügt, sodass die Spannungsversorgung des Breadboards für den Schaltungsaufbau unterbrochen werden kann. Zudem kann der Raspberry Pi über ein USB-Kabel von dieser Spannungsversorgung aus versorgt werden, sodass nur ein Netzteil für Breadboard und Raspberry Pi benötigt wird. Grundsätzlich könnte das Breadboard auch über den Raspberry Pi versorgt werden, was aber im Falle einer

fehlerhaften Schaltung zu einer Überlastung der internen Spannungsregler und damit zum Ausfall des Raspberry Pi führen kann. Aus den genannten Gründen ist der Einsatz einer solchen Spannungsversorgungsplatine, auch speziell beim Einsatz mit Schülern, zu empfehlen. Darüber hinaus gibt es Breadboards, die mit drei oder mehr Bananenbuchsen ausgestattet sind und mit den Steckkontakten auf dem Breadboard verbunden werden können. Über die Bananenbuchsen besteht die Möglichkeit, mittels der im Physikunterricht gängigen Leitungen Verbindungen zu den auf dem Breadboard aufgebauten Schaltungen herzustellen. Ein entsprechendes Breadboard mit der Verbindung über ein Flachbandkabel zum Raspberry Pi ist in Abb. 2-2 dargestellt.

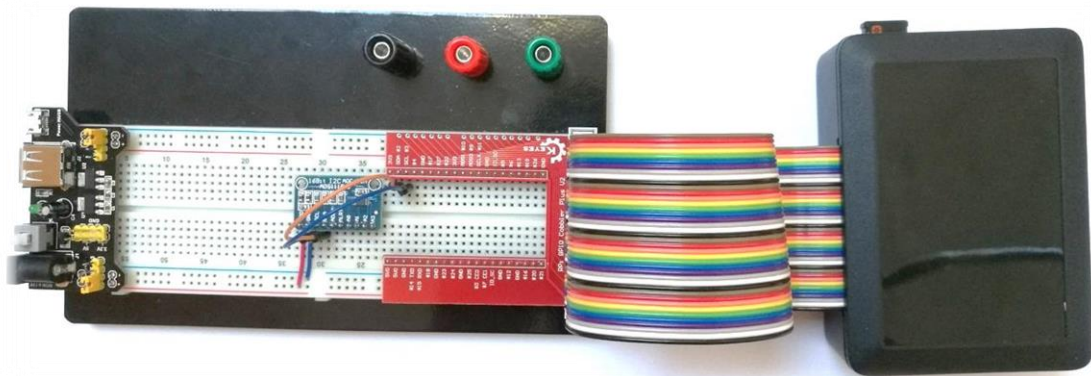


Abb. 2-2: Breadboard mit Spannungsversorgung, Cobbler und über ein Flachbandkabel angeschlossenen Raspberry Pi (Quelle: Eigene Darstellung)

## 2.4 Der Analog-Digital-Wandler ADS1115

Grundlage eines jeden digitalen Messwerterfassungssystems ist die Wandlung eines analogen Signals (wert- und zeitkontinuierlich) eines Sensors in ein digitales Signal (wert- und zeitdiskret). Die am häufigsten anzutreffende Form der Erfassung eines digitalen Messwerts ist die Digitalisierung eines analogen Spannungssignals. Dabei erfolgt die Digitalisierung mit einem sogenannten Analog-Digital-Wandler (AD-Wandler).

Dieser führt zum einen eine Abtastung und zum anderen eine Quantisierung des analogen Signals durch. Bei der Abtastung wird zu äquidistanten Zeitpunkten, also mit einem festen Abtastintervall, ein Abtastwert aus dem Analogsignal erfasst und das zeitkontinuierliche Signal in ein zeitdiskretes Signal überführt. Dieser Abtastwert wird nachfolgend dann quantisiert. Dabei wird dem wertkontinuierlichen Signal ein fester Wert aus einem begrenzten und gestuften Wertevorrat zugewiesen und das Signal in ein wertdiskretes Signal überführt. Man erhält also Wertepaare aus einem diskreten Zeitwert und einem diskreten Signalwert.

Der zeitliche Abstand der digitalen Messwerte ist durch das Abtastintervall gegeben. Der diskrete Signalwert ergibt sich dadurch, dass dem wertekontinuierlichen Signal  $U$  eine diskrete binäre Zahl

$$Z = \frac{U}{U_{LSB}} \quad (2.1)$$

mit  $n$  Stellen (Bit) zugewiesen wird, also das Signal einer Spannungsstufe zugeordnet wird. Der Abstand der Spannungsstufen  $U_{LSB}$ , der als Auflösung des AD-Wandlers bezeichnet wird, ergibt sich aus der Referenzspannung  $U_{Ref}$  und der Anzahl der darstellbaren Stufen des AD-Wandlers zu

$$U_{LSB} = \frac{U_{Ref}}{2^n - 1}. \quad (2.2)$$

Die Anzahl der darstellbaren Stufen des AD-Wandlers ergibt sich dabei aus der Anzahl der möglichen Bitkombinationen des AD-Wandlers. Die Referenzspannung ist gleichzeitig auch die maximal digitalisierbare Messspannung des AD-Wandlers (Wendemuth & Andelic, 2005). Ein 16-Bit AD-Wandler hat damit bei einer Referenzspannung von  $U_{Ref} = 5 \text{ V}$  und  $n = 16$  eine Auflösung von

$$U_{LSB} = \frac{5 \text{ V}}{2^{16} - 1} = \frac{5 \text{ V}}{65536 - 1} = 7,63 \cdot 10^{-5} \text{ V}. \quad (2.3)$$

Somit haben die einzelnen Spannungsstufen einen Abstand von  $7,63 \cdot 10^{-5} \text{ V}$ . In Abb. 2-3 ist die Wandlung eines analogen (blau) in ein digitales Signal (rote Punkte) schematisch am Beispiel eines 3-Bit AD-Wandlers dargestellt.

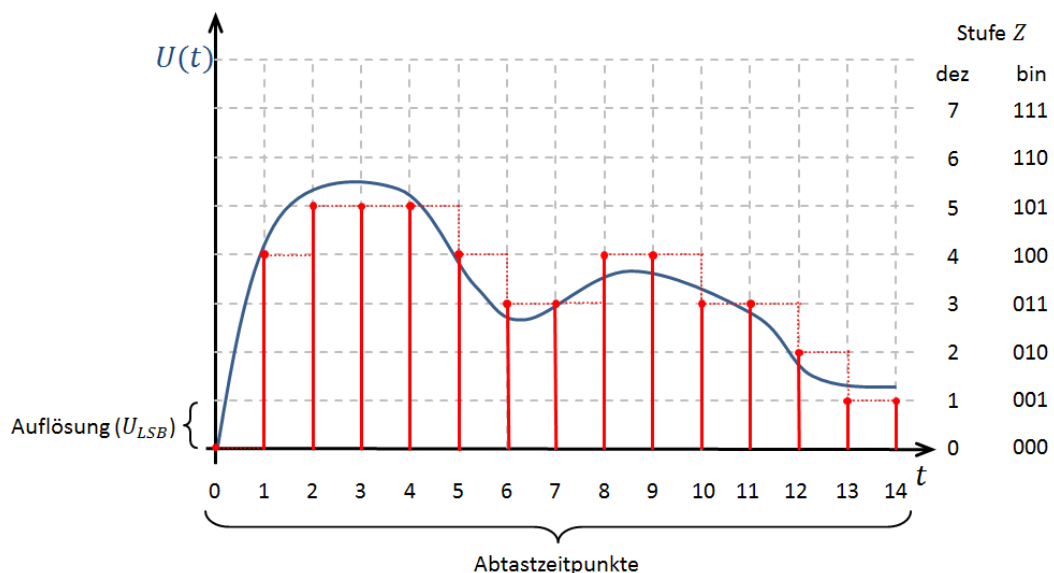


Abb. 2-3 Schematische Darstellung der Wandlung eines analogen Signals in ein digitales Signal am Beispiel eines 3-Bit AD-Wandlers (Quelle: Eigene Darstellung)

Als AD-Wandler für das digitale Messwerterfassungssystem wird der ADS1115 von TEXAS INSTRUMENTS gewählt, der mit der notwendigen äußeren Beschaltung

aufgelötet auf einer Platine erhältlich ist und in Abb. 2-4 dargestellt ist. Der ADS1115 verfügt außer diesem Umstand noch über weitere Vorteile. Er verfügt über 16 Bit und damit eine gute Auflösung des Messsignals, eine geregelte interne Referenzspannung mit geringer Drift sowie die Möglichkeit einer programmierbaren Eingangsverstärkung, mit der die Amplitude des Eingangssignals angepasst werden kann. Außerdem verfügt dieser AD-Wandler über insgesamt vier analoge Eingänge, die alle gegen das Bezugspotential 0 V gemessen werden können. Zudem kann ein differentieller Modus programmiert werden, sodass die Spannung zwischen jeweils zwei der Eingänge gemessen wird. Dieser differentielle Modus ermöglicht es, die Spannung zwischen den Potentialen zweier analoger Eingänge zu messen. So können auch negative Spannungen gemessen werden, solange beide betrachtete Potentiale bei Verwendung einer Spannungsversorgung von 5 V in einem Bereich von - 0,3 V bis 5,3 V liegen (Texas Instruments Cooperation, 2018).

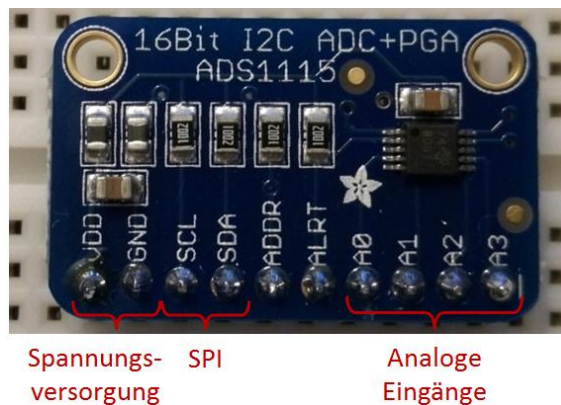


Abb. 2-4: Analog-Digital-Wandler ADS1115 (Quelle: Eigene Darstellung)

Strenggenommen müsste vor der Abtastung eine analoge Filterung des Signals mit einem steilflankigen Tiefpassfilter erfolgen, um den sogenannten Aliasing-Effekt zu vermeiden und das Nyquist-Shannon-Abtasttheorem einzuhalten. Dieses Abtasttheorem besagt, dass bei einem harmonischen Signal mindestens zwei Abtastwerte innerhalb einer Periode liegen müssen, um Mehrdeutigkeiten bei der Rekonstruktion des analogen Signals zu vermeiden. Es gilt also für die Abtastrate  $f_{Abt}$ , dass diese mindestens doppelt so groß wie die größte im Nutzsignal vorkommende Frequenz  $f_{max}$  sein muss:

$$f_{Abt} \geq 2 \cdot f_{max}. \quad (2.4)$$

Abb. 2-5 zeigt an einem Beispiel die Folge einer Abtastung mit zu geringer Abtastrate (Unterabtastung). Es ergibt sich für die Rekonstruktion des analogen Signals eine Mehrdeutigkeit, sodass dieses nicht mehr eindeutig rekonstruiert werden kann (Möser, 2018). Da über den Signalverlauf zwischen den Abtastwerten keine Information vorliegt, wären beide dargestellten Signalverläufe als analoges Ursprungssignal denkbar.

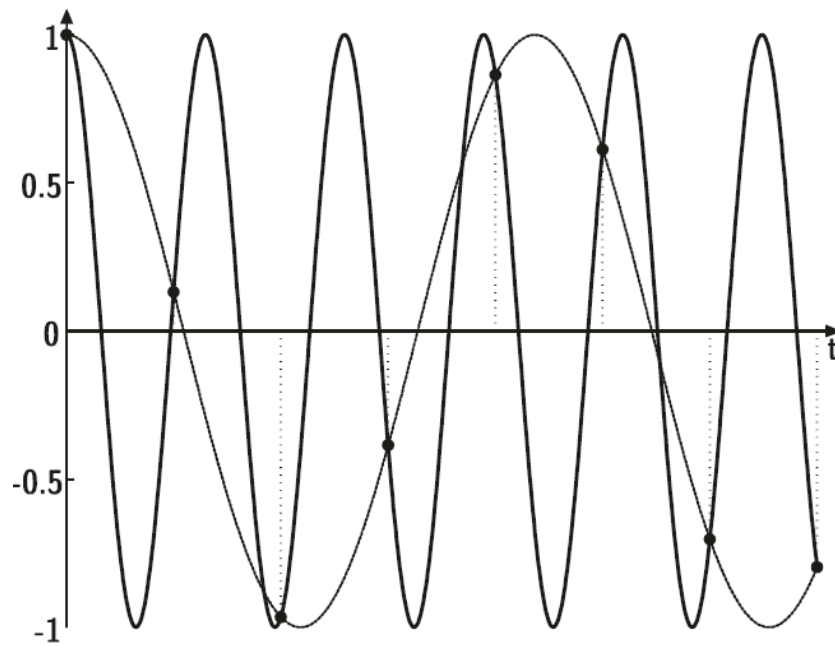


Abb. 2-5: Mehrdeutigkeit bei der Signalrekonstruktion bei Unterabtastung (Quelle: Möser, 2018, S. 7)

Im Falle des zu entwickelnden digitalen Messwerterfassungssystems wird im ersten Schritt auf eine entsprechende analoge Filterung aus Gründen der Vereinfachung verzichtet.

## 3 Mögliche Sensoren für den Einsatz im Physikunterricht

Der nachfolgende Abschnitt befasst sich mit Sensoren, die im Physikunterricht Anwendung finden könnten. Dabei wird jeweils auf das Funktionsprinzip eingegangen, um das Messverfahren transparent zu machen. Die Funktionsprinzipien bieten in vielen Fällen Anknüpfungspunkte zu Themen aus dem Physikunterricht und bieten damit die Möglichkeit, Zusammenhänge zwischen physikalischen Effekten und konkreten technischen Anwendungen herzustellen.

### 3.1 Distanzsensoren

Als mögliche Sensoren zur berührungslosen Distanzmessung im Physikunterricht werden im Folgenden Ultraschalldistanzsensoren und optische Distanzsensoren betrachtet.

#### 3.1.1 Ultraschalldistanzsensoren

Ultraschalldistanzsensoren basieren auf der Laufzeitmessung eines Schallsignals. Durch ein Triggersignal ausgelöst wird ein sehr kurzes sogenanntes Burst-Signal ausgesendet und die Zeit bis zum Eintreffen des reflektierten Schallsignals gemessen. Mit Hilfe der Schallgeschwindigkeit und der gemessenen Laufzeit des Signals kann anschließend auf die Distanz zum Messobjekt geschlossen werden. In Gasen hängt die Schallgeschwindigkeit vom Kompressionsmodul und der Dichte des Gases ab. Für Luft bei Normaldruck spielt lediglich die Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit eine nennenswerte Rolle. Die Schallgeschwindigkeit  $v$  kann nach Giancoli (2010) dann näherungsweise mit der Temperatur  $T$  in  $^{\circ}\text{C}$  bestimmt werden zu

$$v \approx \left( 331 + 0,6 \cdot \frac{T}{^{\circ}\text{C}} \right) \frac{\text{m}}{\text{s}}. \quad (3.1)$$

Die Distanz  $d$  zum Messobjekt ergibt sich mit der gemessenen Laufzeit  $\Delta t$  dann zu

$$d = \frac{v \cdot \Delta t}{2}. \quad (3.2)$$

Ein entsprechender Ultraschallsensor ist mit dem HC-SR04 bereits für ca. 3 € erhältlich (Eckstein GmbH). Kritisch bei der Auswertung ist die Tatsache, dass die Laufzeit des Schallsignals sehr genau bestimmt werden sollte, um eine zufriedenstellende Messgenauigkeit zu erreichen. Dies lässt sich innerhalb eines digitalen Messwerterfassungssystems auf dem Raspberry Pi nur schwer realisieren. Es sind jedoch mit dem Sensor SRF08 bzw. SRF10 Ultraschallsensoren zwei Ultraschallsensoren erhältlich, die bereits ein digitalisiertes Signal liefern. Diese

ermitteln die Laufzeit des Schallsignals bereits mit einem Mikrocontroller im Sensormodul selbst und liefern einen digitalen Zeitwert über den I2C-Bus an den Raspberry Pi. Die Genauigkeit der gemessenen Distanzen ist jedoch auf den Zentimeterbereich begrenzt (Devantech Limited).

### 3.1.2 Optische Distanzsensoren

Unter den optischen Distanzsensoren lassen sich bei den für den Raspberry Pi erhältlichen Sensoren grundsätzlich zwei Messprinzipien unterscheiden. Zum einen sind Sensoren erhältlich, die auf Triangulation basieren und zum anderen sind sogenannte ToF (Time of Flight) Laserdistanzsensoren erhältlich.

### 3.1.3 ToF (Time of Flight) Laserdistanzsensoren

Bei ToF (Time of Flight) Laserdistanzsensoren basiert die Distanzmessung auf einer Laufzeitmessung eines Laserpulses. Dieser wird von einer Laserdiode im Sensor ausgesendet, vom jeweiligen Objekt reflektiert und das reflektierte Laserlicht von einem Sensorelement detektiert. Dabei wird die Laufzeit des Laserpulses gemessen und über die Lichtgeschwindigkeit die Distanz zum jeweiligen Objekt bestimmt. Basierend auf diesem Messprinzip ist der Laserdistanzsensor VL53L0X erhältlich, der beispielsweise aktuell bei verschiedenen Elektronikhändlern wie Eckstein zu einem Preis von ca. 18 € erhältlich ist. Die Messunsicherheit dieses Sensors ist zum einen vom Reflexionsgrad des Messobjekts und zum anderen von der Distanz zum Messobjekt abhängig.

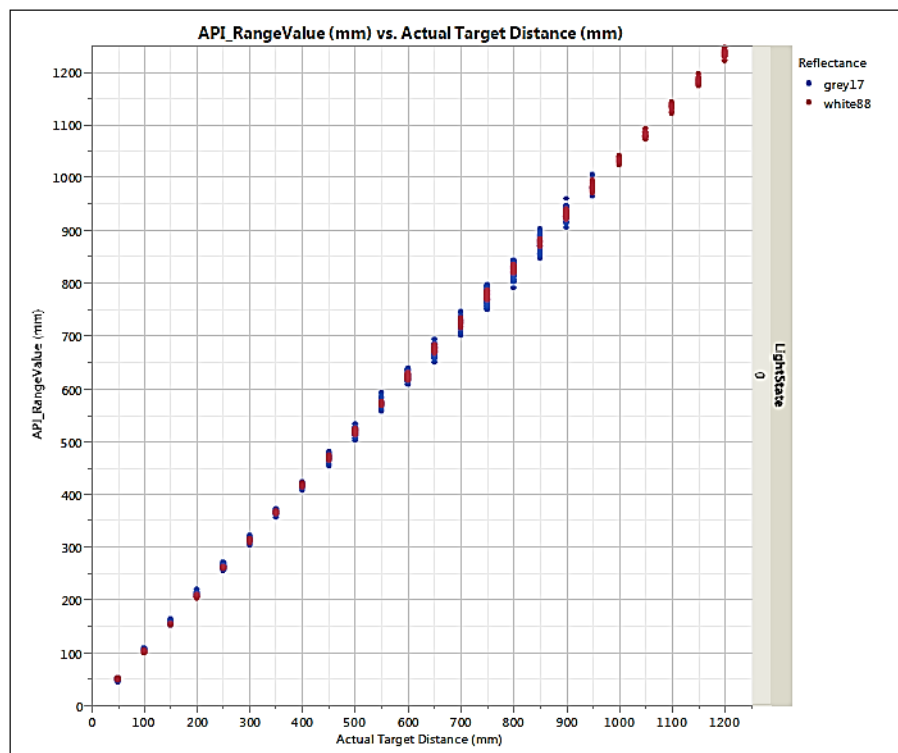


Abb. 3-1: Messunsicherheit in Abhängigkeit von Reflexionsgrad und Distanz zum Messobjekt VL53L0X (Quelle: STMicroelectronics, 2018, S. 25)

In Abb. 3-1 ist die gemessene Distanz durch den Sensor über der tatsächlichen Entfernung des Messobjekts mit der zugehörigen Messunsicherheit dargestellt. In blau sind die Werte für ein graues Messobjekt mit einem Reflexionsgrad von 17% und in rot die Werte für ein weißes Messobjekt mit einem Reflexionsgrad von 88% dargestellt. Es ist klar ersichtlich, dass die Messunsicherheit im Zentimeterbereich liegt und dieser Sensor für Messungen, bei denen eine höhere Genauigkeit gefordert ist, nicht zum Einsatz kommen kann.

### 3.1.4 IR-Triangulation-Distanzsensoren

Die nachfolgend betrachteten Sensoren von Sharp nutzen IR-Triangulation zur Bestimmung der Distanz zum Messobjekt. Dabei kommt eine Infrarot-LED als näherungsweise punktförmige Lichtquelle zum Einsatz. Diese befindet sich im Brennpunkt einer Sammellinse, mit deren Hilfe kollimiertes Licht erzeugt wird. Das auf das Messobjekt fallende Licht wird von diesem teilweise reflektiert und mittels einer Sammellinse auf eine in der Brennebene befindliche großflächige Photodiode fokussiert. Solche Photodioden werden auch als Position-Sensitive-Devices bezeichnet, da sich der Ort eines auf der Photodiode auftreffenden Lichtstrahls bestimmen lässt. Aus den Strecken  $a$  und  $b$ , sowie der Brennweite der Sammellinse  $f$  lässt sich mit Hilfe des Strahlensatzes die Distanz zum Messobjekt  $d$  bestimmen:

$$\frac{f}{a} = \frac{d}{b} \Rightarrow d = \frac{f \cdot b}{a}. \quad (3.3)$$

Anhand der nachfolgenden Abbildungen Abb. 3-2 und Abb. 3-3 können der Aufbau und die geometrischen Verhältnisse eines solchen Sensors nachvollzogen werden.

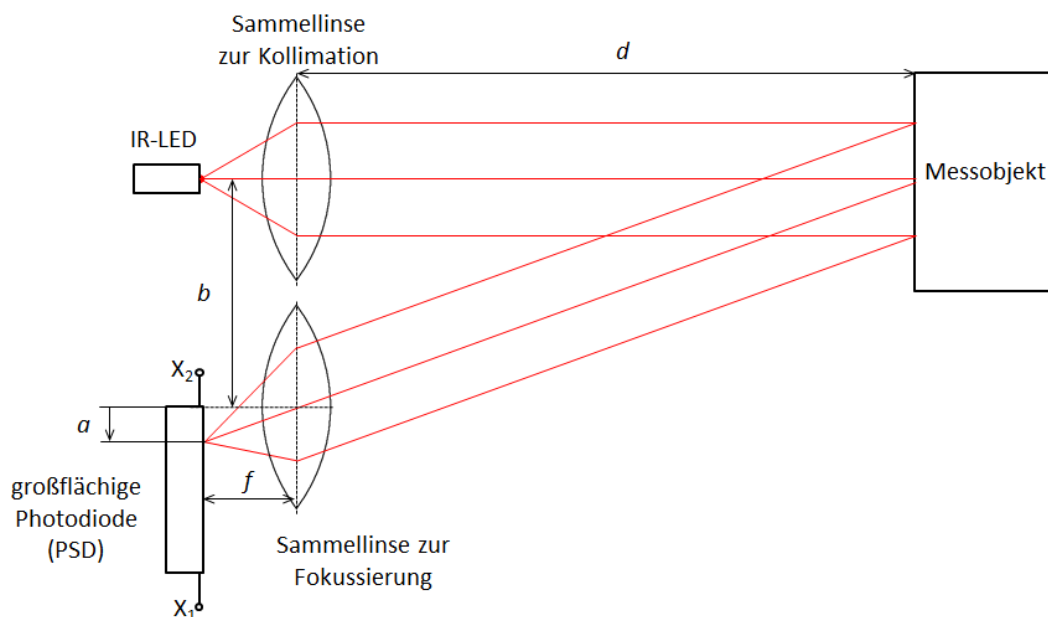


Abb. 3-2: Schematischer Aufbau eines IR-Triangulation-Distanzsensors (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an Siegwart & Nourbakhsh, 2004, S. 112)



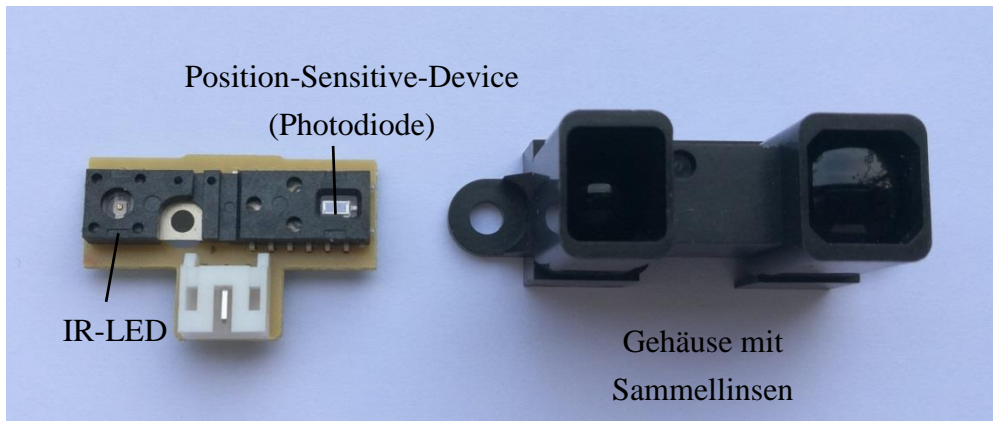


Abb. 3-3: Aufbau eines IR-Triangulations-Distanzsensors SHARP GP2Y0A02YK0F

Abb. 3-4 zeigt den schematischen Aufbau eines Position-Sensitive-Device (PSD). Der schwarze Punkt zeigt beispielhaft einen auf die Photodiode auftreffenden Lichtstrahl. Die Deckelelektrode der großflächigen Photodiode besitzt einen einheitlichen Flächenwiderstand und ist beidseitig kontaktiert ( $X_1$  und  $X_2$ ). Wird die Diode punktförmig belichtet, so fließt im Bereich der Belichtung ein Photostrom, der sich aufgrund des einheitlichen Flächenwiderstands der Deckelektrode in Abhängigkeit von der Position des Lichtpunktes auf die beidseitig angebrachten Kontakte aufteilt.

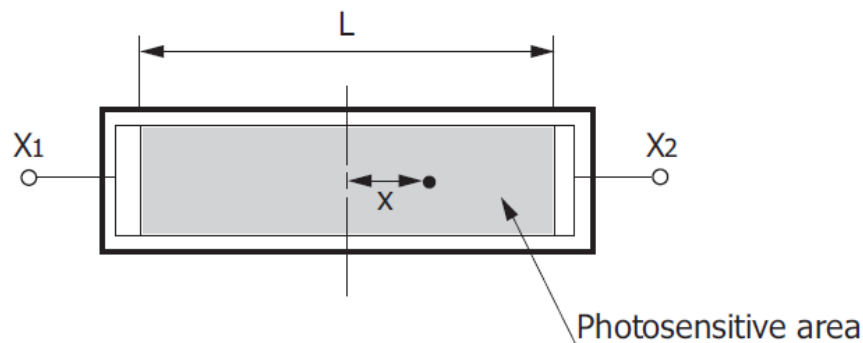


Abb. 3-4: Schematischer Aufbau eines Position-Sensitive-Device (großflächige Photodiode) (Quelle: Hamamatsu Photonics, 2017, S. 3)

Aus den über diese Kontakte fließenden Strömen  $I_1$  und  $I_2$  sowie der Länge  $L$  kann dann die Position des Lichtpunktes auf der Photodiode bestimmt werden (Haus, 2010). Das Verhältnis aus der Differenz der Photoströme  $I_2 - I_1$  und des gesamten Photostroms  $I_1 + I_2$  ist gleich dem Verhältnis des Abstands des beleuchteten Punktes von der Mitte der photosensitiven Fläche  $x$  zur halben Länge der photosensitiven Fläche  $L/2$ :

$$\frac{x}{L/2} = \frac{2x}{L} = \frac{I_2 - I_1}{I_1 + I_2}. \quad (3.4)$$

Bezieht man diese Gleichung auf den Aufbau aus Abb. 3-1 und Strecke  $a$ , so muss die nachfolgende Substitution

$$x = \frac{L}{2} - a \quad \text{für} \quad 0 \leq a \leq \frac{L}{2} \quad (3.5)$$

durchgeführt werden.

Damit ergibt sich für den Bereich  $0 \leq a \leq \frac{L}{2}$

$$\frac{2(L/2 - a)}{L} = \frac{I_2 - I_1}{I_1 + I_2}. \quad (3.6)$$

Nach Umformungen ergibt sich damit für die Strecke  $a$  in Abhängigkeit von den Photoströmen  $I_1$  und  $I_2$

$$a = L \cdot \frac{I_1}{I_1 + I_2} = L \cdot \frac{1}{\frac{I_2}{I_1} + 1} \quad \text{für} \quad 0 \leq a \leq \frac{L}{2}. \quad (3.7)$$

Die Funktion weist ihr Maximum genau dann auf, wenn der Lichtpunkt auf die Mitte der Photodiode trifft und sich der gesamte Photostrom gleichmäßig auf die Teilströme  $I_1$  und  $I_2$  aufteilt. Dieser Punkt entspricht dann aufgrund des aus dem Strahlensatz resultierenden antiproportionalen Zusammenhangs zwischen der Distanz  $d$  und der Strecke  $a$  auch gleichzeitig der kleinsten zu messenden Distanz des Sensors. Mit Gleichung 3.3 ergibt sich damit für die Distanz zum Messobjekt

$$d = \frac{f \cdot b}{a} = \frac{f \cdot b}{L} \cdot \frac{I_1 + I_2}{I_1}. \quad (3.8)$$

Für den Bereich  $L/2 < a \leq L$  stimmt diese Beziehung nicht. Führt man für diesen Bereich die entsprechende Substitution durch, so ergibt sich

$$a = L \cdot \frac{1}{\frac{I_1}{I_2} + 1} \quad \text{für} \quad \frac{L}{2} < a \leq L. \quad (3.9)$$

Damit ergeben sich keine korrekten Werte für die Strecke  $a$ . Mit größer werdender Strecke  $a$  trifft das Licht näher an der Kontaktierung X1 auf das PSD und infolgedessen wird die Stromstärke  $I_1$  größer und  $I_2$  kleiner, sodass die sich aus Gln. 3.9 ergebende Strecke  $a$  kleiner wird. Die Sensoren von Sharp zeigen dieses Verhalten genau in dieser Form. Diese Sensoren werten die Ströme  $I_1$  und  $I_2$  elektronisch aus und geben das resultierende Ergebnis in Form einer analogen Spannung aus. Der Sensortyp ist für verschiedene Messbereiche erhältlich. Die Funktionsweise dieser Sensoren ist in allen Fällen die gleiche. Die unterschiedlichen Messbereiche werden durch andere Brennweiten der Sammellinsen  $f$ , durch einen anderen Abstand der optischen Achsen der Sammellinsen zueinander  $b$  oder durch Änderung der Größe der Photodiode erreicht. In Abb. 3-5 ist beispielhaft die Ausgangskennlinie für den Distanzsensor

GP2Y0A02YK0F für zwei Objekte mit Reflexionsgrad 90% bzw. 18% dargestellt. Hier zeigt sich auch ein Vorteil dieser Sensoren. Da die Ausgangsspannung nicht vom Betrag des Photostroms, sondern vom Verhältnis der Teilströme  $I_1$  und  $I_2$  abhängig ist, ist die Ausgangskennlinie nahezu unabhängig von der Intensität des einfallenden Lichts und somit des Reflexionsgrads des Messobjekts. Es muss lediglich eine gewisse Mindestintensität vorhanden sein.

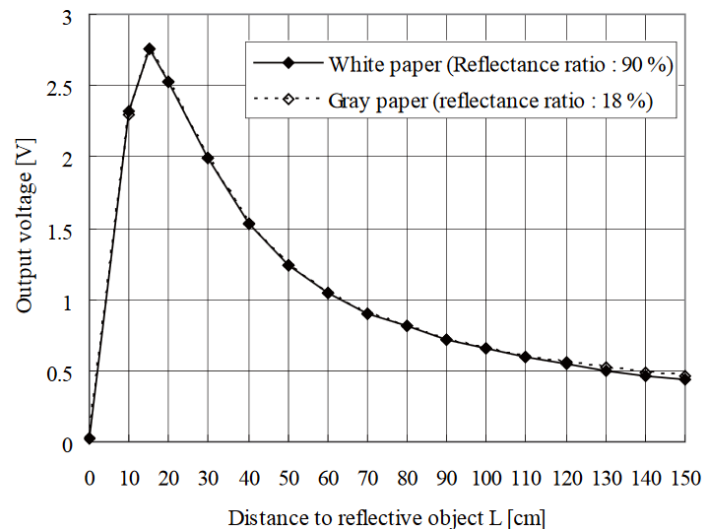


Abb. 3-5: Ausgangskennlinie Distanzsensor SHARP GP2Y0A02YK0F in Abhängigkeit der Distanz zum Messobjekt für zwei Objekte mit unterschiedlichem Reflexionsgrad (Quelle: Sharp Devices Europe GmbH, 2006, S. 5)

## 3.2 Hallsensor zur Messung der magnetischen Flussdichte

Zur Messung der magnetischen Flussdichte können analoge Hallsensoren wie der Hallsensor SS495 A1 von Honeywell zum Einsatz kommen. Die analoge Ausgangsspannung des Sensors kann dann mit Hilfe eines Analog-Digital-Wandlers digitalisiert werden. Als physikalischer Effekt zur Messung der magnetischen Flussdichte wird in diesen Sensoren der Hall-Effekt genutzt. In einem stromdurchflossenen Leiter, der in einem homogenen Magnetfeld festgehalten wird, wirkt auf die bewegten Ladungsträger eine Kraft  $\vec{F}_B$ . Diese Kraft wirkt in senkrechter Richtung zur Bewegungsrichtung der Ladungsträger und zur Richtung des Magnetfelds. Betrachtet man den in Abb. 3-6 rechteckigen Leiter, in dem sich Elektronen mit der Driftgeschwindigkeit  $\vec{v}_d$  nach rechts bewegen und das wirkende Magnetfeld  $\vec{B}$  in die Papierebene hinein zeigt, so wirkt auf die Elektronen mit der Ladung  $-e$  die nach unten gerichtete Kraft

$$\vec{F}_B = -e \cdot \vec{v}_d \times \vec{B} . \quad (3.10)$$

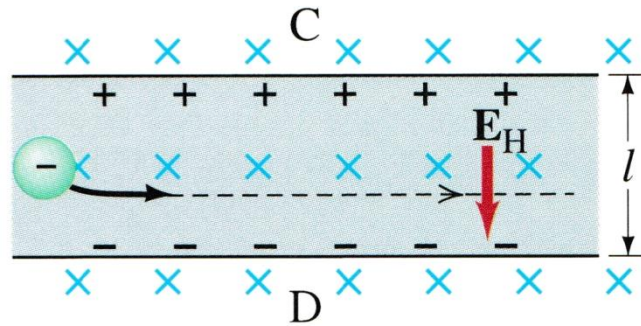


Abb. 3-6: Halleffekt in einem metallischen Leiter mit rechteckigem Querschnitt (Quelle: Giancoli, 2010, S. 935)

Diese Kraft bewirkt, dass sich die Elektronen nach unten hin (Seite D) verschieben und ein Ladungsungleichgewicht und damit eine Potentialdifferenz zwischen der Ober- und der Unterseite des Leiters entsteht. Diese Potentialdifferenz hat wiederum ein elektrisches Feld  $\vec{E}_H$  zur Folge. Aufgrund des entstehenden elektrischen Feldes wirkt auf die Elektronen mit der Ladung  $-e$  die Kraft

$$\vec{F}_H = e \cdot \vec{E}_H. \quad (3.11)$$

Die Elektronen werden soweit verschoben, bis sich ein Gleichgewicht zwischen den beiden Kräften  $\vec{F}_B$  und  $\vec{F}_H$  einstellt:

$$\vec{F}_H = -\vec{F}_B, \quad (3.12)$$

$$e \cdot \vec{E}_H = e \cdot \vec{v}_d \times \vec{B}, \quad (3.13)$$

$$\vec{E}_H = \vec{v}_d \times \vec{B}. \quad (3.14)$$

Für den Fall des dargestellten Leiters stehen die Vektoren der Driftgeschwindigkeit  $\vec{v}_d$  und der magnetischen Flussdichte  $\vec{B}$  senkrecht aufeinander, sodass sich für den Betrag des elektrischen Felds

$$E_H = v_d \cdot B \quad (3.15)$$

ergibt.

Für einen Leiter der Dicke  $l$  und unter der Bedingung, dass das elektrische Feld innerhalb des Leiters homogen und dieser lang und dünn ist, ergibt sich damit eine Hallspannung  $U_H$  zwischen den Außenflächen C und D von

$$U_H = E_H \cdot l = v_d \cdot B \cdot l. \quad (3.16)$$

Somit ist die Hallspannung proportional zur magnetischen Flussdichte, sodass durch Messung der Hallspannung auf die magnetische Flussdichte geschlossen werden kann. Da die entstehende Hallspannung sehr klein ist, verfügt der analoge Hallsensor SS495 A1 über eine interne Verstärkerstufe, mit der die Hallspannung verstärkt wird und anschließend mit einer Offsetspannung der halben Versorgungsspannung versehen wird.

So ist es mit diesem Sensor möglich, magnetische Flussdichten in einem Bereich von  $\pm 67 \text{ mT}$  zu messen. Der Linearitätsfehler liegt laut Datenblatt bei 1% des Messbereichs und die Empfindlichkeit von  $3,125 \pm 0,094 \text{ mV/G}$  bzw.  $31,25 \pm 0,94 \text{ mV/mT}$  bei einer Versorgungsspannung von 5 V. In Abb. 3-7 ist die Ausgangskennlinie des analogen Hallsensors mit dem Offset der halben Versorgungsspannung dargestellt.

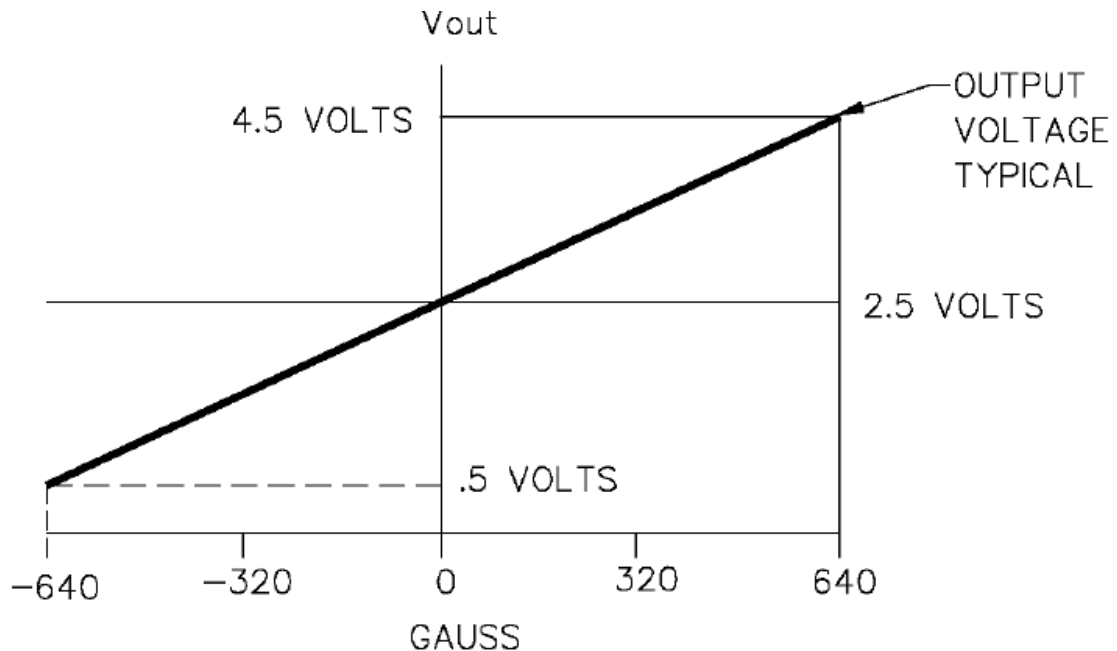


Abb. 3-7: Ausgangskennlinie analoger Hallsensor SS495 A1 bei einer Versorgungsspannung von 5 V (Quelle: Sensing and Control Honeywell Inc., 2018, S. 3)

### 3.3 Analoger Beschleunigungssensor

Die meisten Beschleunigungssensoren basieren auf einem kapazitiven Grundprinzip, sodass an dieser Stelle nur auf dieses Funktionsprinzip eines Beschleunigungssensors eingegangen wird. Bei einem kapazitiven Beschleunigungssensor wird die Wirkung eines sogenannten Differentialkondensators ausgenutzt. Ein solcher Sensor, wie er in Abb. 3-8 dargestellt ist, besteht aus zwei gegenüberliegend angebrachten Gegenelektroden und einer Mittelelektrode, die eine seismische Masse bildet.

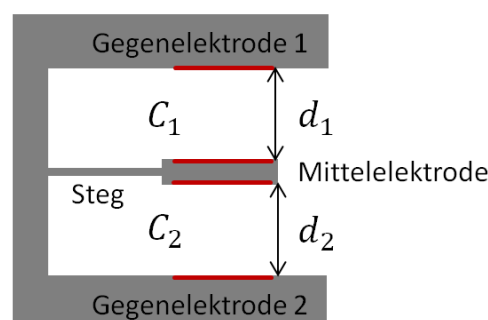


Abb. 3-8: Prinzipskizze eines kapazitiven Beschleunigungssensors (Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Tränkler & Reindl, 2014, S. 555)

Es ergeben sich zwischen den Elektroden der beiden Kondensatoren  $C_1$  und  $C_2$  mit einem Plattenabstand in Ruhelage von  $d_1 = d_2 = d_0$ . Somit ergeben sich mit der Plattenfläche  $A$  und der Permittivität  $\varepsilon$  Kapazitäten von

$$C_1 = C_2 = C_0 = \frac{\varepsilon A}{d_0}. \quad (3.17)$$

Die Mittelelektrode ist über einen Steg aufgehängt und bildet mit diesem zusammen ein Feder-Masse-System. Wird das Sensorelement nun mit einer Beschleunigung  $a$  in senkrechter Richtung nach unten beschleunigt, so wirkt eine Kraft  $F = m \cdot a$  auf die bewegliche Mittelelektrode. Diese Kraft bewirkt eine Auslenkung  $\Delta d$  der Mittelelektrode und damit eine gegenseitige Änderung der Plattenabstände  $d_1 = d_0 + \Delta d$  und  $d_2 = d_0 - \Delta d$  der beiden Kondensatoren  $C_1$  und  $C_2$ . Damit ergibt sich für die beiden Kondensatoren eine symmetrische Kapazitätsänderung von

$$U_2 = \frac{\varepsilon A}{d_0 \pm \Delta d} - \frac{\varepsilon A}{d_0} = \frac{\mp \varepsilon A \cdot \Delta d}{d_0 \cdot (d_0 \pm \Delta d)} = \mp C_0 \frac{\Delta d}{d_0 \pm \Delta d}. \quad (3.18)$$

Die gegenseitige symmetrische Kapazitätsänderung wird dann mit einer in Abb. 3-9 dargestellten Brückenschaltung ausgewertet.

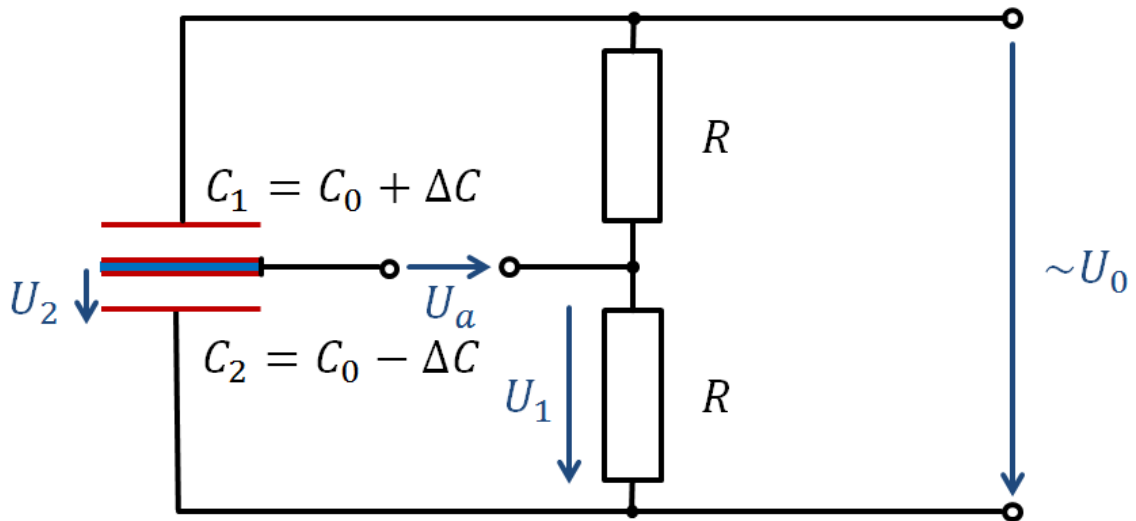


Abb. 3-9: Brückenschaltung zur Auswertung eines Differentialkondensators (Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Tränkler & Reindl, 2014, S. 556)

Legt man an diese Brückenschaltung eine Wechselspannung  $U_0$  an, so teilt sich die Spannung auf die beiden Widerstände  $R$  auf und es ergibt sich  $U_1 = U_0/2$ .

Für den Spannungsteiler der beiden Kondensatoren ergibt sich mit den Impedanzen  $Z_{C1}$  und  $Z_{C2}$

$$U_2 = \frac{Z_{C2}}{Z_{C1} + Z_{C2}} \cdot U_0. \quad (3.19)$$

Mit den komplexen Widerständen der Kondensatoren  $Z = (i\omega C)^{-1}$  und einigen Äquivalenzumformungen ergibt sich mit dem Maschensatz die Ausgangsspannung

$$U_a = U_2 - U_1 = \frac{U_0}{2} \cdot \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2}. \quad (3.20)$$

Mit den Kapazitäten  $C_1 = \frac{\varepsilon A}{d_0 - \Delta d}$  und  $C_2 = \frac{\varepsilon A}{d_0 + \Delta d}$  ergibt sich daraus

$$U_a = \frac{U_0}{2} \cdot \frac{\Delta d}{d_0}. \quad (3.21)$$

Damit ergibt sich ein proportionaler Zusammenhang zwischen der Auslenkung und damit der Beschleunigung und der Ausgangsspannung (Tränkler & Reindl, 2014). Die resultierende Ausgangsspannung wird anschließend noch verstärkt, demoduliert und als analoge Spannung ausgegeben. Ein solcher Beschleunigungssensor für drei kartesische Achsen ist beispielsweise der Sensor ADXL335 von Analog Devices mit einem Messbereich von  $\pm 3g$ , der mit der benötigten äußeren Beschaltung auf einer Platine für einen Preis von ca. 6 € erhältlich ist (Analog Devices, 2009; Eckstein GmbH). Mit dem digitalen Beschleunigungssensor MMA8451 steht zudem ein kalibrierter Beschleunigungssensor mit einem konfigurierbaren Messbereich zur Verfügung (NXP Semiconductors, 2017a).

### 3.4 Kraftsensor

Für die Messung von Kräften kommen hauptsächlich Sensoren auf Basis metallischer Dehnungsmessstreifen (DMS) zum Einsatz. Diese machen sich den physikalischen Effekt zu Nutze, dass sich der elektrische Widerstand eines Drahtes bei Dehnung oder Stauchung ändert. Der elektrische Widerstand  $R$  eines Drahtes ergibt sich aus dem spezifischen Widerstand des Materials  $\rho$ , der Länge  $l$  und dem Drahtdurchmesser  $d$  bzw. der Querschnittsfläche  $A$  zu

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} = \rho \cdot \frac{4l}{\pi d^2}. \quad (3.22)$$

Für den Widerstand bedeutet dies, dass dieser proportional zur Länge und reziprok proportional zur Querschnittsfläche des Drahtes ist. Wird ein elektrischer Leiter gedehnt, so nimmt die Länge zu und die Querschnittsfläche ab, sodass sich ein höherer Widerstand ergibt. Wird der elektrische Leiter jedoch gestaucht, so verkürzt sich der Leiter und die Querschnittsfläche nimmt zu, was zu einem niedrigeren elektrischen Widerstand führt.

Betrachtet man die mechanische Spannung  $\sigma$  in einem metallischen Leiter, so ergibt sich mit dem Elastizitätsmodul  $E$  des Materials und der Dehnung  $\varepsilon$  (relative Längenänderung  $\Delta l/l$ ) folgender Zusammenhang

$$\sigma = E \cdot \frac{\Delta l}{l} = E \cdot \varepsilon . \quad (3.23)$$

Unter Einbeziehung der materialabhängigen Konstanten  $k$ , die die Empfindlichkeit charakterisiert und die Beziehung zwischen Längenänderung und Durchmesseränderung des Materials herstellt, ergibt sich dann für die Widerstandsänderung  $\Delta R/R$  der folgende proportionale Zusammenhang zur Dehnung  $\Delta l/l$

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \frac{\Delta l}{l} = k \cdot \varepsilon . \quad (3.24)$$

Damit dieser Zusammenhang gegeben ist, darf die Verformung des Drahtes ausschließlich im elastischen Verformungsbereich des Werkstoffs erfolgen. Im Gegensatz zu DMS auf Siliziumbasis, die sich den piezoresistiven Effekt zu Nutze machen, sind die  $k$ -Faktoren bei Metall-DMS wesentlich kleiner und liegen im Bereich von zwei bis sechs. Der Vorteil von Metall-DMS liegt in der Temperaturstabilität, weshalb sie eine breite Anwendung finden. Der in 3.5 behandelte piezoresistive Effekt tritt bei Metallen kaum auf, sodass dieser vernachlässigt werden kann und die Widerstandsänderung im Wesentlichen auf die genannten Geometrieeffekte zurückzuführen ist.

Um Widerstandsänderungen in verwertbarer Größe zu erhalten, muss der elektrische Leiter sehr dünn sein (Durchmesser ca. 0,02 mm) und über eine große Länge verfügen. Um die große Leiterlänge auf einer möglichst geringen Fläche zu platzieren, wird der Draht bei Dehnungsmessstreifen in engen Abständen mäanderförmig auf ein isolierendes Trägermaterial aufgebracht und mit Anschlüssen versehen. Am häufigsten werden Folien-DMS eingesetzt, bei denen ein hauchdünner Widerstandsdraht als Messgitter zwischen zwei Kunststofffolien eingeschweißt ist. Dehnungsmessstreifen kommen häufig als Sensorelement in Kraftmessaufnehmern zur indirekten Kraftmessung zum Einsatz. Die Dehnungsmessstreifen werden hierfür auf einem Messkörper aufgeklebt, sodass die Dehnung des Messkörpers auf den DMS übertragen wird. Wichtig hierbei ist, dass ein fester und bekannter Zusammenhang zwischen einwirkender Kraft und resultierender Dehnung des Messkörpers besteht. Als Messkörper haben sich einige Grundkörper bewährt, die über Stärken in unterschiedlichen Anwendungsbereichen verfügen. Im Regelfall werden vier Dehnungsmessstreifen so auf dem Verformungskörper verklebt, dass zwei DMS gedehnt und zwei gestaucht werden. Für den Einsatz in der Schule bieten sich Wägezellen an, wie sie auch in Küchenwaagen eingesetzt werden. Diese sind bereits für ca. 10 € für verschiedene Messbereiche erhältlich und somit viel günstiger als die von LD DIDACTIC vertriebenen Kraftsensoren. Außerdem sind diese Wägezellen in ihrem Aufbau sehr transparent, sodass das Messprinzip von Schülern leicht nachvollzogen werden kann. Ein solcher Kraftmessaufnehmer (Wägezelle) auf Basis eines



Doppelbiegebalkens mit vier Dehnungsmessstreifen ( $R_1, R_2, R_3$  und  $R_4$ ) und ein Dehnungsmessstreifen (DMS) sind in Abb. 3-10 schematisch dargestellt. Die Verformung des Doppelbiegebalkens ist dabei zum besseren Verständnis des Funktionsprinzips stark übertrieben dargestellt.

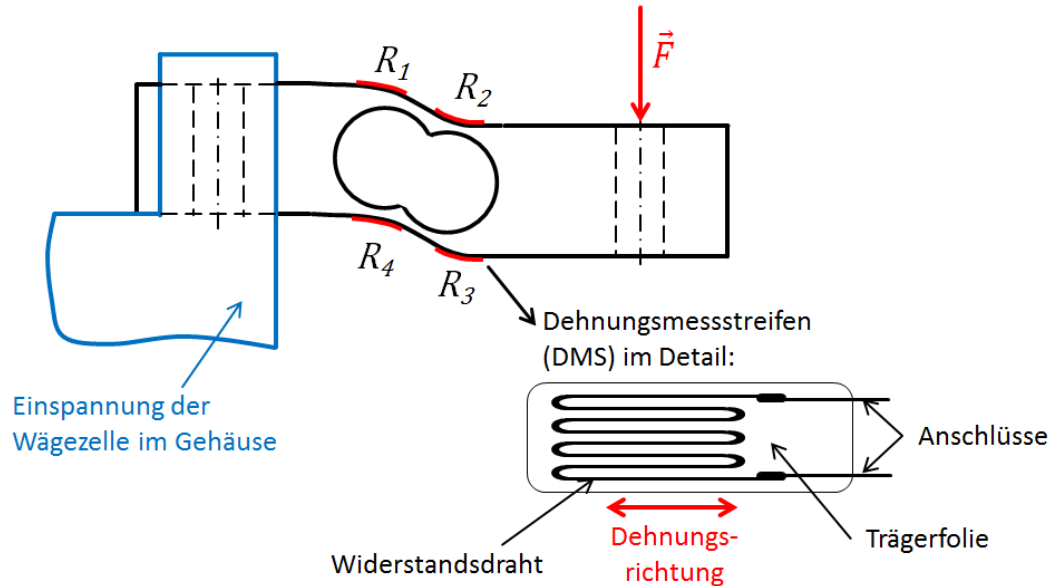


Abb. 3-10: Schematischer Aufbau einer Wägezelle (Doppelbiegebalken) sowie eines Dehnungsmessstreifens (Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Baumann, 2015, S. 93; Siemens AG, 2015, S. 20)

Trotz der Ausführung als Messgitter sind die entstehenden Widerstandsänderungen äußerst gering, sodass für deren Auswertung eine Verschaltung als Widerstandsbrücke notwendig ist. Es werden Viertel-, Halb- und Vollbrücken unterschieden, wobei die gängige Schaltung als Vollbrücke mit vier belasteten DMS als Widerstände die höchste Empfindlichkeit bietet. Außerdem gleichen sich durch die Verschaltung als Vollbrücke die Temperaturgänge der vier DMS aus. Bei den genannten Wägezellen kommen Vollbrücken, wie in Abb. 3-11 dargestellt, zum Einsatz.

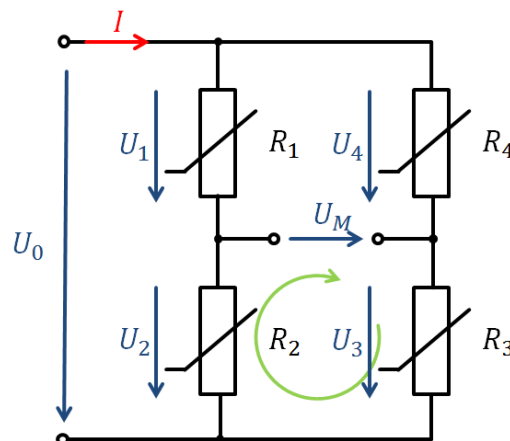


Abb. 3-11: Wheatstonesche Messbrücke als Vollbrücke mit vier DMS (Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Tränkler & Reindl, 2014, S. 438)

Betrachtet man die untere Masche (grüner Pfeil), so ergibt sich für die Messspannung  $U_M$

$$U_M = U_2 - U_4 = U_0 \cdot \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right). \quad (3.25)$$

Die Vollbrücke wandelt die Widerstandsänderung in eine Messspannung

$$U_M = U_0 \cdot \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)}. \quad (3.26)$$

Für den Fall, dass die Widerstände alle gleich groß ( $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ ) und die Widerstandsänderungen  $\Delta R$  durch den symmetrischen Aufbau des Doppelbiegebalkens betragsgleich sind, gilt für kleine Widerstandsänderungen ( $\Delta R_i \ll R_i$ )

$$U_M = \frac{U_B}{4} \cdot \left( \frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_3}{R} - \frac{\Delta R_4}{R} \right). \quad (3.27)$$

Mit Gln. 3.24 ergibt sich

$$U_M = \frac{k \cdot U_B}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4). \quad (3.28)$$

Für die Brückenschaltung bedeutet dies, dass sich die Änderungsbeträge benachbarter DMS bei gleichem Vorzeichen subtrahieren und bei verschiedenen Vorzeichen addieren. Durch den symmetrischen Aufbau des Doppelbiegebalkens der Wägezelle in Abb. 3-10 ergibt sich für die vier DMS eine betragsgleiche Dehnung. Werden die Dehnungsmessstreifen wie in Abb. 3-10 angeordnet, sodass die Vorzeichen der Dehnungen  $\varepsilon_i$  und damit Widerstandsänderungen  $\Delta R_i$  der DMS alternieren ( $\varepsilon = \varepsilon_1 = -\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\varepsilon_4$ ), ergibt sich für die Messspannung

$$U_M = k \cdot U_B \cdot \varepsilon. \quad (3.29)$$

Mit Hilfe einer solchen Wägezelle wird also eine Kraft in eine Dehnung und daraus resultierende Widerstandsänderung gewandelt. Die sich daraus ergebende Messspannung in der Wheatstoneschen Brückenschaltung kann dann anschließend verstärkt und mit einem AD-Wandler digitalisiert werden.

### 3.5 Piezoresistiver Drucksensor

Bei der Druckmessung von Gasen kommen häufig piezoresistive Drucksensoren zum Einsatz. Sie basieren darauf, dass sich der Widerstand eines unter einer mechanischen Spannung stehenden Halbleiters stark ändert. Durch die mechanische Spannung ändert sich die Kristall- und damit Bandstruktur des Halbleiters, sodass die beweglichen Ladungsträger energetisch umverteilt werden und sich die Beweglichkeit der Ladungsträger und damit der spezifische Widerstand des Halbleiters ändert. Es treten

dabei unterschiedliche Effekte in Richtung und senkrecht zur mechanischen Spannung auf, sodass sich für den Halbleiter ein anisotroper spezifischer Widerstand  $\rho$  ergibt. Der Effekt ist abhängig von der Temperatur, der Ausrichtung des Kristallgitters und der Dotierung des Halbleiters. Dieser Effekt ist bei Halbleitern wesentlich größer als die Widerstandsänderung durch Veränderung der Geometrie, sodass diese vernachlässigt werden kann und für die relative Widerstandsänderung  $\Delta R/R$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (3.30)$$

gilt.

Für einen Drucksensor werden insgesamt vier Halbleiter-Piezowiderstände so auf einer Siliziummembran aufgebracht, dass jeweils zwei dieser Widerstände in einem Bereich mit Zugspannung bzw. Druckspannung liegen (Tränkler & Reindl, 2014). Die Auswertung eines solchen Drucksensors geschieht in gleicher Weise wie beim zuvor beschriebenen Kraftsensor mit Hilfe einer Wheatstoneschen Messbrücke.

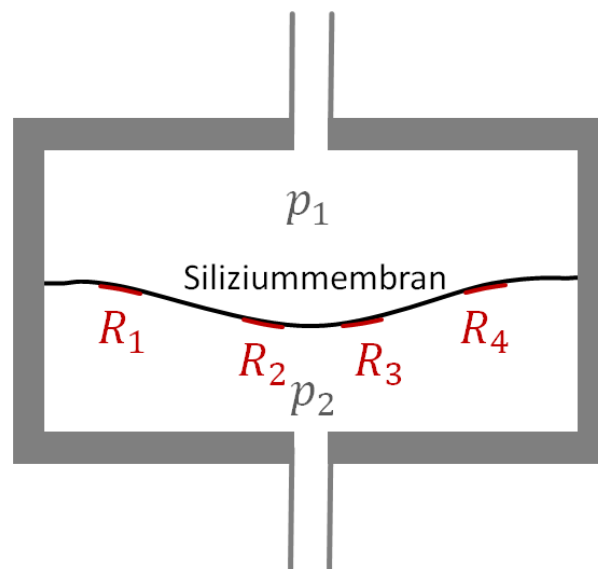


Abb. 3-12: Prinzipskizze eines piezoresistiven Differenzdrucksensors (Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Baumann, 2015, S. 105)

Ein solcher Sensor mit einer Versorgungsspannung von 5 V, der somit direkt am Breadboard nutzbar ist, ist beispielsweise der temperaturkompensierte Differenzdrucksensor MPX4250DP von NXP Semiconductors. Dieser Sensor besitzt einen Messbereich von 0 bis 250 kPa und ist für einen Betrag von unter 20 € erhältlich (NXP Semiconductors, 2017b; reichelt elektronik GmbH & Co. KG.). Der Sensor liefert eine bereits verstärkte analoge Ausgangsspannung, die mit Hilfe des AD-Wandlers digitalisiert und mit entsprechenden Kalibrationswerten in digitale Messwerte des Differenzdrucks umgerechnet werden kann. Dieser Sensortyp ist auch für andere

Druckbereiche erhältlich. Nachfolgend in Abb. 3-13 ist die Ausgangskennlinie des Differenzdrucksensors dargestellt.

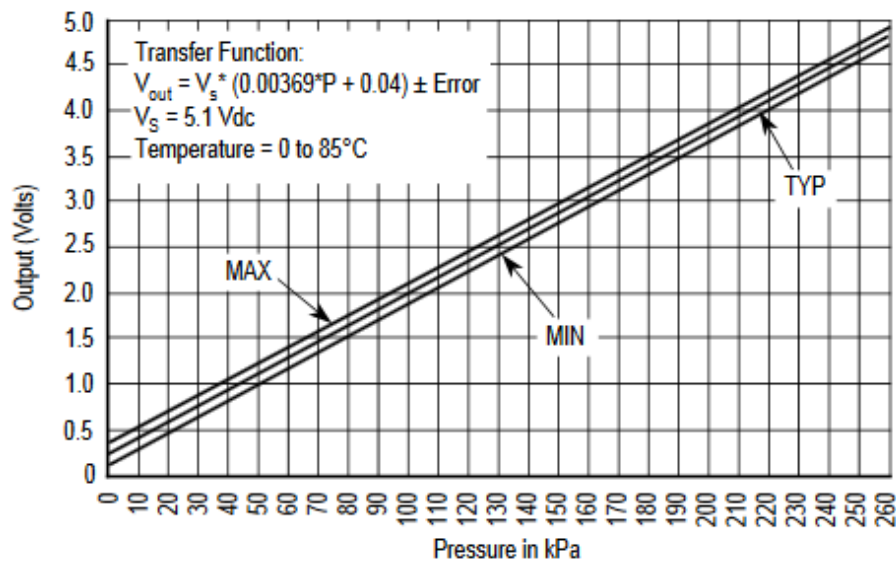


Abb. 3-13: Kennlinie Ausgangsspannung über gemessenem Differenzdruck MPX4250DP (Quelle: NXP Semiconductors, 2017b, S. 5)

## 3.6 Temperatursensoren

Für die Temperaturmessung steht eine Vielzahl an Sensoren zur Verfügung, die sich für unterschiedliche Anwendungsgebiete eignen und sich verschiedene physikalische Effekte zur Temperaturmessung zunutze machen. Nachfolgend wird kurz auf die Möglichkeiten zur Temperaturmessung eingegangen. Auf eine ausführliche Diskussion der einzelnen Effekte wird an dieser Stelle verzichtet, da dies den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde.

### 3.6.1 Widerstandstemperatursensoren

Widerstandstemperatursensoren machen sich die Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit verschiedener Materialien zunutze. Je nach Material und Temperaturbereich spielen dabei unterschiedliche physikalische Prozesse eine Rolle. Auf eine ausführliche Diskussion wird an dieser Stelle verzichtet und auf Tränkler & Reindl (2014) verwiesen. Grundsätzlich lassen sich zwei Grundcharakteristika sogenannter Thermistoren in der Anwendung als Temperatursensoren unterscheiden. Zum einen finden sogenannte PTC-Widerstände (Positive Temperature Coefficient) Anwendung, die einen positiven Temperaturkoeffizienten aufweisen. Zum anderen kommen sogenannte NTC-Widerstände mit einem negativen Temperaturkoeffizienten zum Einsatz. Zur Gruppe der PTC-Widerstände zählen Metallwiderstände. Dabei kommen vor allem Platinwiderstände mit einem Grundwiderstand von 100 Ω bzw. 1000 Ω bei 0 °C als sogenannte PT100- bzw. PT1000-Messwiderstände zum Einsatz.

Der positive Temperaturkoeffizient bei Metallen lässt sich auf die verminderte Beweglichkeit der Ladungsträger in Metallen bei steigender Temperatur durch Zunahme der Gitterschwingungen zurückführen (Tränkler & Reindl, 2014). Die Auswertung der Widerstandsänderung bei einer Temperaturänderung kann mittels einer Wheatstoneschen Brückenschaltung erfolgen. Mit Hilfe dieser Brückenschaltung erhält man eine temperaturabhängige Messspannung, die anschließend mit einem AD-Wandler digitalisiert werden kann. Eine weitere Möglichkeit der Auswertung ist die Speisung des Messwiderstands mit einem Konstantstrom und gleichzeitige Spannungsmessung. Über das Ohmsche Gesetz kann dann der Widerstand berechnet und über diesen die Temperatur bestimmt werden. Für eine solche Messung kann der Chip MAX31865 von Maxim Integrated verwendet werden, der den digitalisierten Widerstandswert über den SPI-BUS an den Raspberry Pi überträgt.

Als NTC-Widerstände (Negative Temperature Coefficient) kommen üblicherweise keramische Halbleiter aus Metalloxiden zum Einsatz, die einen hohen negativen Temperaturkoeffizienten und eine stark nichtlineare Widerstands-Temperatur-Kennlinie aufweisen. Bei den verwendeten keramischen Halbleitermaterialien lässt sich der Ladungstransport auf das Hüpfen (Hopping) der Ladungsträger zwischen den Wirtsatomen zurückführen. Dieser thermisch aktivierte Hopping-Prozess wird bei höheren Temperaturen begünstigt, sodass die Leitfähigkeit des Materials zunimmt (Tränkler & Reindl, 2014).

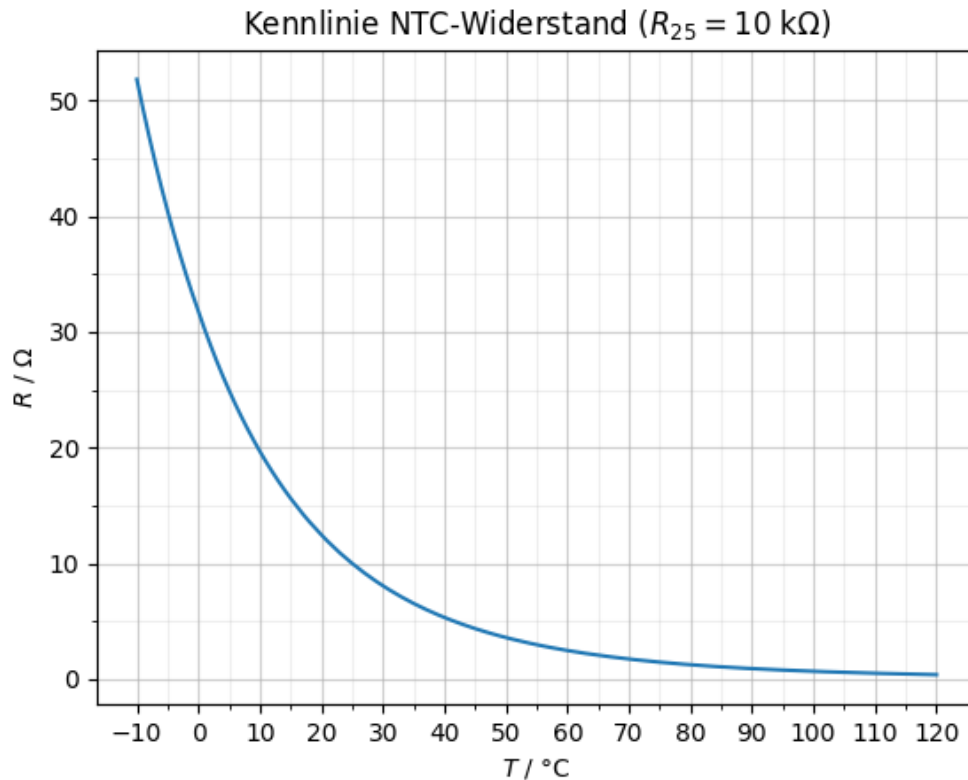


Abbildung 3-1: Kennlinie eines NTC-Widerstands (Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von TDK Electronics AG, 2018)

Aufgrund des hohen Temperaturkoeffizienten dieser NTC-Messwiderstände kann die Auswertung der Widerstandsänderung mit Hilfe eines einfachen Spannungsteilers aus dem NTC-Widerstand und einem Festwiderstand erfolgen. Greift man die Spannung zwischen den beiden Widerständen ab, so erhält man ein temperaturabhängiges Spannungssignal, das anschließend mit einem AD-Wandler digitalisiert werden kann.

### 3.6.2 Temperatursensoren auf Basis der Temperaturabhängigkeit von Halbleiterübergängen

Die Temperaturabhängigkeit der Strom-Spannungs-Kennlinie eines pn-Übergangs kann zur Temperaturmessung genutzt werden. In der Praxis wird hierfür der pn-Übergang eines bipolaren Transistors genutzt, dessen Basis-Kollektor-Strecke kurzgeschlossen ist. Der Transistor wird somit als Diode betrieben. Wird diese Diode in Durchlassrichtung mit einem konstanten Strom gespeist, so ergibt sich eine temperaturabhängige Basis-Emitter-Spannung  $U_{BE}$ , mit der sich eine Temperaturmessung realisieren lässt. In den erhältlichen Halbleiter-Temperatursensoren kommt im Normalfall die Kombination aus zwei solcher Transistoren zum Einsatz. Dadurch lassen sich der Einfluss der Exemplarstreuung der Transistoren und weitere unerwünschte Effekte reduzieren und es ergibt sich zwischen der Differenz der beiden Basis-Emitter-Spannungen  $\Delta U_{BE}$  und der absoluten Temperatur ein linearer Zusammenhang (Tränkler & Reindl, 2014). Ein

typischer Sensor mit diesem Messprinzip ist der sehr günstige digitale Temperatursensor DS18B20 von Maxim Integrated, der bereits zu einem Preis von ca. 3 € erhältlich ist (Eckstein GmbH). Dieser führt die Digitalisierung des Spannungssignals bereits intern durch und liefert als digitales Ausgangssignal bereits ein kalibriertes Temperatursignal, das über einen Eindraht-BUS an den Raspberry Pi übertragen wird (Maxim Integrated, 2018).

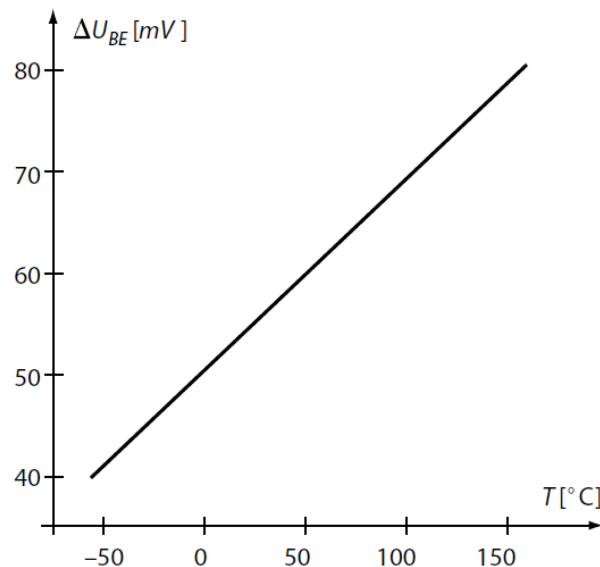


Abb. 3-14: Typische Spannungs-Temperatur Kennlinie eines Halbleiter-Temperatursensors (Quelle: Tränkler & Reindl, 2014, S. 89)

### 3.6.3 Thermoelement

Thermoelemente machen sich den thermoelektrischen Effekt (Seebeck-Effekt) zunutze. Ist ein stromloser metallischer Leiter an seinen beiden Enden unterschiedlichen Temperaturen ausgesetzt, also weist dieser einen Temperaturgradienten auf, so ergibt sich zwischen den Enden eine elektrische Spannung  $U$ . Diese Spannung ist abhängig vom Material und der Temperaturdifferenz entlang des Leiters. Mit dem materialabhängigen Seebeck-Koeffizienten  $S$  ergibt sich diese Spannung zu

$$U = \int_{T_1}^{T_2} S(T) dT. \quad (3.31)$$

Kombiniert man zwei verschiedene Materialien mit verschiedenen Seebeck-Koeffizienten  $S_A$  und  $S_B$  zu einem Hin- und Rückleiter und verbindet diese an einem Ende elektrisch miteinander, so ergeben sich entlang der beiden Leiter unterschiedliche Spannungen, sodass an den offenen Enden eine Thermospannung

$$U_{th} = \int_{T_1}^{T_2} (S_A(T) - S_B(T)) dT \quad (3.32)$$

gemessen werden kann. Für kleine Temperaturdifferenzen können die Seebeck-Koeffizienten als konstant angenommen werden und es ergibt sich

$$U_{th} = (S_A - S_B) \cdot (T_2 - T_1). \quad (3.33)$$

Damit ist die Thermospannung nur von der Differenz der Seebeck-Koeffizienten der Materialien A und B sowie der Temperaturdifferenz zwischen den Enden der Leiter abhängig. Die Kontaktstelle zwischen den beiden Leitern dient in der Anwendung als Messstelle für die Temperatur  $T_2$ . An den offenen Enden wird die Verbindung zu einem hochohmigen Spannungsmessgerät über Zuleitungen hergestellt. Die Verbindungsstelle dient damit als Vergleichsstelle zur Messung der Referenztemperatur  $T_1$ . Bestehen die beiden Zuleitungen aus demselben Material, so ergibt sich keine weitere Spannungsdifferenz und es kann bei bekannter Referenztemperatur und bekannter Differenz der Seebeck-Koeffizienten die Temperatur  $T_2$  an der Messstelle bestimmt werden. Die dargestellten Zusammenhänge können anhand Abb. 3-15 nachvollzogen werden. Je nach zu messendem Temperaturbereich kommen unterschiedliche Materialpaarungen zum Einsatz. Thermoelemente eignen sich insbesondere auch zur Messung von sehr hohen Temperaturen jenseits der 1000 °C. (Lerch, 2012; Tränkler & Reindl, 2014).

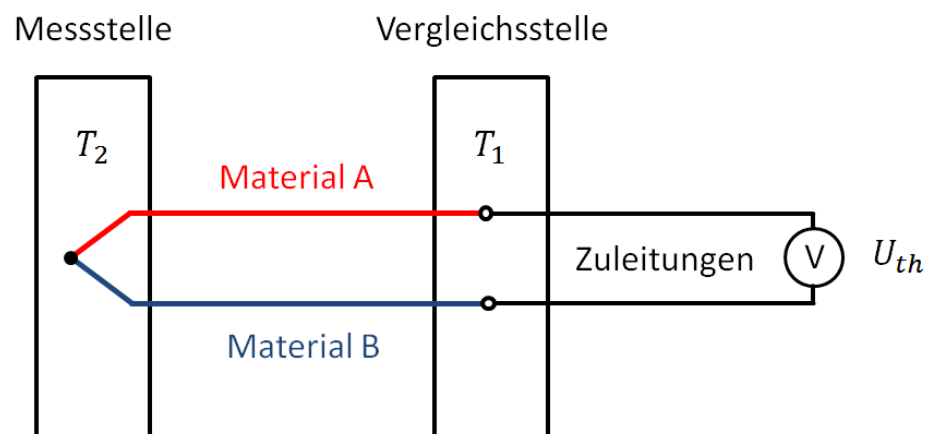


Abb. 3-15: Schematische Prinzipschaltung eines Thermoelements (Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Huhnke, 2006, S. 23)

Da die zu messenden Thermospannungen sehr klein sind und die Empfindlichkeit der Thermoelemente im Bereich von  $\mu\text{V/K}$  liegt, ist zur Digitalisierung und Messung der Thermospannung eine entsprechende Spannungsvorverstärkung notwendig. Dies kann zum einen in einem für die Schüler transparenten Messverfahren mit einem Instrumentenverstärker (siehe 3.7), oder direkt mit dem auf die Digitalisierung von Thermospannungen spezialisierten Chip MAX31855 von Maxim Integrated erfolgen. Dieser misst intern direkt die Referenztemperatur und führt bereits die Digitalisierung der Thermospannung durch, sodass eine unkomplizierte Temperaturmessung mit Thermoelementen möglich ist (Maxim Integrated, 2015).



### 3.7 Instrumentenverstärker

Um die Auflösung des AD-Wandlers bei kleinen Spannungen im mV-Bereich gut auszunutzen, ist eine Verstärkung der Messspannung notwendig. Solche Spannungen treten beispielsweise beim in 3.4 beschriebenen Kraftsensor auf. Für die analoge Verstärkung solcher Signale eignen sich Instrumentenverstärker, die als integrierte Schaltkreise erhältlich sind und direkt auf dem Breadboard eingesetzt werden können. Ein solcher Instrumentenverstärker verstärkt die Differenzspannung zwischen den beiden Eingängen mittels einer Schaltung aus drei Operationsverstärkern, von denen zwei als hochohmige nichtinvertierende Verstärker arbeiten und einer als Differenzverstärker die Differenz dieser beiden verstärkten Eingangssignale bildet. Der Aufbau eines Instrumentenverstärkers ist beispielhaft in Abb. 3-16 dargestellt.

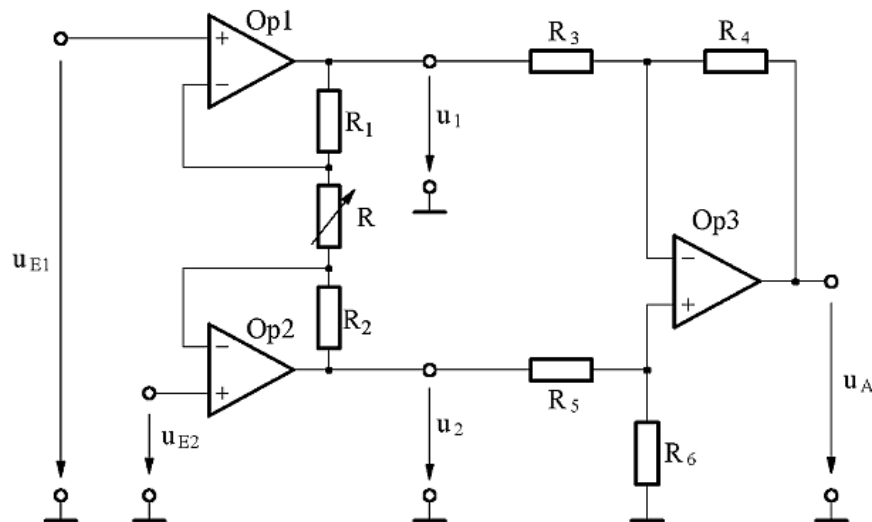


Abb. 3-16: Schematischer Aufbau eines Instrumentenverstärkers (Quelle: Lerch, 2012, S. 211)

Solche Instrumentenverstärker zeichnen sich durch einen sehr hohen Eingangswiderstand im GΩ-Bereich und die Möglichkeit zur sehr einfachen Einstellung des Verstärkungsfaktors durch äußere Beschaltung mit einem Widerstand aus (Lerch, 2012).

Für das Grundverständnis digitaler Messwerterfassung kann die interne Funktionsweise eines solchen Verstärkers als weniger relevant für die Schüler eingestuft werden. Aus diesem Grund wird auch an dieser Stelle auf eine ausführliche Darstellung verzichtet. Das detaillierte Funktionsprinzip kann Lerch, 2012, S. 201–203 entnommen werden.

Als wichtig hingegen ist jedoch das Verständnis dafür anzusehen, dass bei Signalen im mV-Bereich vor der Digitalisierung eine Verstärkung notwendig ist. Diese Verstärkung ist notwendig, um das Signal in der Amplitude an den durch die Referenzspannung gegebenen Messbereich des AD-Wandler anzupassen und so eine gute Auflösung zu erreichen.

Für den Einsatz auf dem Breadboard hat sich im Rahmen dieser Arbeit der Instrumentenverstärker AD623 von Analog Devices bewährt. Dieser verfügt über einen sogenannten rail-to-rail Spannungsausgang, sodass die Ausgangsspannung des Instrumentenverstärkers Werte bis nahe an die positive und negative Versorgungsspannung erreichen kann. Der Instrumentenverstärker AD623 ist als integrierter Schaltkreis in einem sogenannten DIP-Gehäuse mit 8-Pins erhältlich, sodass er direkt auf das Breadboard gesteckt werden kann. Über die äußere Beschaltung mit einem Widerstand kann eine Eingangsverstärkung von bis zu Faktor 1000 eingestellt werden. Der Verstärkungsfaktor  $V$  ergibt sich nach Lerch (2012) im Falle des Instrumentenverstärkers AD623 mit den Widerständen  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 50 \text{ k}\Omega$  durch die äußere Beschaltung des Instrumentenverstärkers mit dem Widerstand  $R$  zu

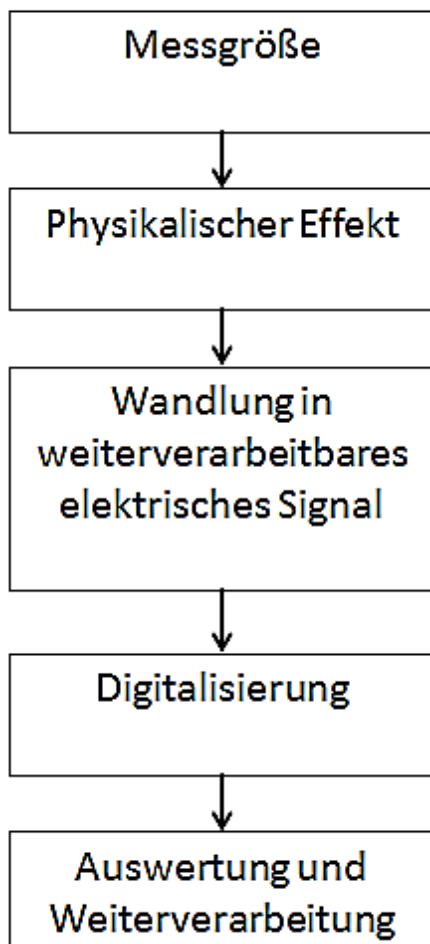
$$V = \frac{R_4}{R_3} \left( 1 + \frac{R_1 + R_2}{R} \right) = 1 + \frac{100 \text{ k}\Omega}{R}. \quad (3.34)$$

Außerdem ist es möglich, über einen Referenzspannungseingang eine Offsetspannung zum Messsignal zu addieren (Analog Devices, 2018).

## 4 Grundprinzip der digitalen Messwerterfassung

Betrachtet man die Sensoren für die unterschiedlichen physikalischen Messgrößen, so kann für das digitale Messen ein Grundprinzip abgeleitet und festgehalten werden. Jeder digitale Sensor basiert darauf, dass die zu messende physikalische Größe mittels eines physikalischen Effekts in einem Sensorelement in eine elektrisch auswertbare Größe gewandelt wird. Diese wird anschließend in ein weiterverarbeitbares elektrisches Signal gewandelt, das digitalisiert und anschließend unter Zuhilfenahme von Kalibrationswerten zur eigentlichen Messgröße verrechnet wird. Dieses Grundprinzip ist unabhängig von der zu messenden physikalischen Größe und für das Verständnis eines digitalen Messwerterfassungssystems von grundlegender Bedeutung. Abb. 4-1 zeigt das Grundprinzip für das Beispiel eines digitalen Kraftsensors.

### Grundprinzip der digitalen Messwerterfassung



### konkretes Beispiel (Kraftsensor)

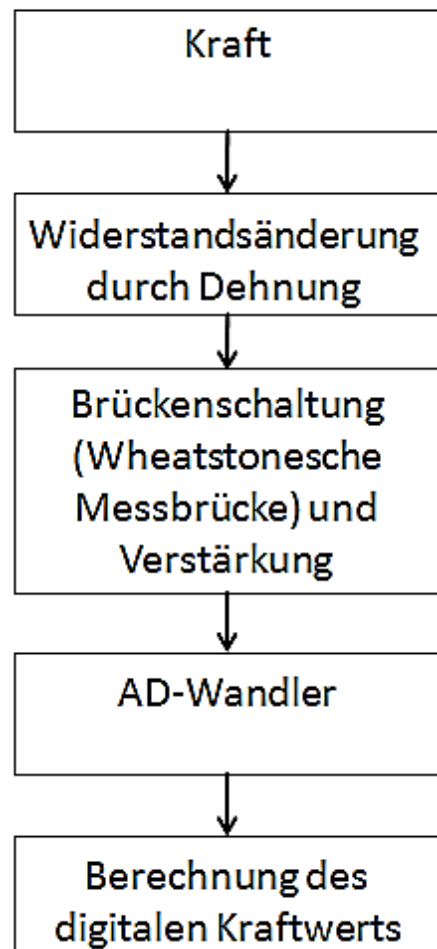


Abb. 4-1: Grundprinzip der digitalen Messwerterfassung am Beispiel eines digitalen Kraftsensors (Quelle: Eigene Darstellung)

## 5 Das Softwarepaket PhyPiDAQ

Zur digitalen Messwerterfassung, Visualisierung der digitalen Messwerte in Echtzeit sowie für die Speicherung der gewonnenen Messwerte im .csv Format zur späteren Auswertung wurde im Rahmen der Masterarbeit das Softwarepaket PhyPiDAQ entwickelt. Dieses Softwarepaket ist als Open-Source-Projekt konzipiert und bietet ein Framework zur Erweiterung durch zusätzliche digitale Sensoren oder Messgeräte sowie weitere Darstellungsmodule. PhyPiDAQ stellt also keine abgeschlossene Software zur digitalen Messwerterfassung dar, sondern soll als Grundlage für Weiterentwicklungen dienen. Die nachfolgende Beschreibung bezieht sich auf die Softwareversion 0.9.1 (Aupperle & Quast, 2018). Das zugehörige README sowie eine Anleitung zur Einrichtung des Raspberry Pi befinden sich in Anhang 4 und Anhang 5.

Für die Nutzung des Softwarepakets PhyPiDAQ als digitales Messwerterfassungssystem steht eine über Konfigurationsdateien konfigurierbare Umgebung mit einer grafischen Benutzeroberfläche zur Verfügung. Mit dieser können sehr allgemeine Messaufgaben ausgeführt werden, ohne dabei eigenen Programmcode schreiben zu müssen. Diese Umgebung soll den Einsatz des Softwarepakets im Unterricht erleichtern. In Abb. 5-1 ist eine schematische Übersicht zum Aufbau und der Funktionsweise des Softwarepakets PhyPiDAQ dargestellt.

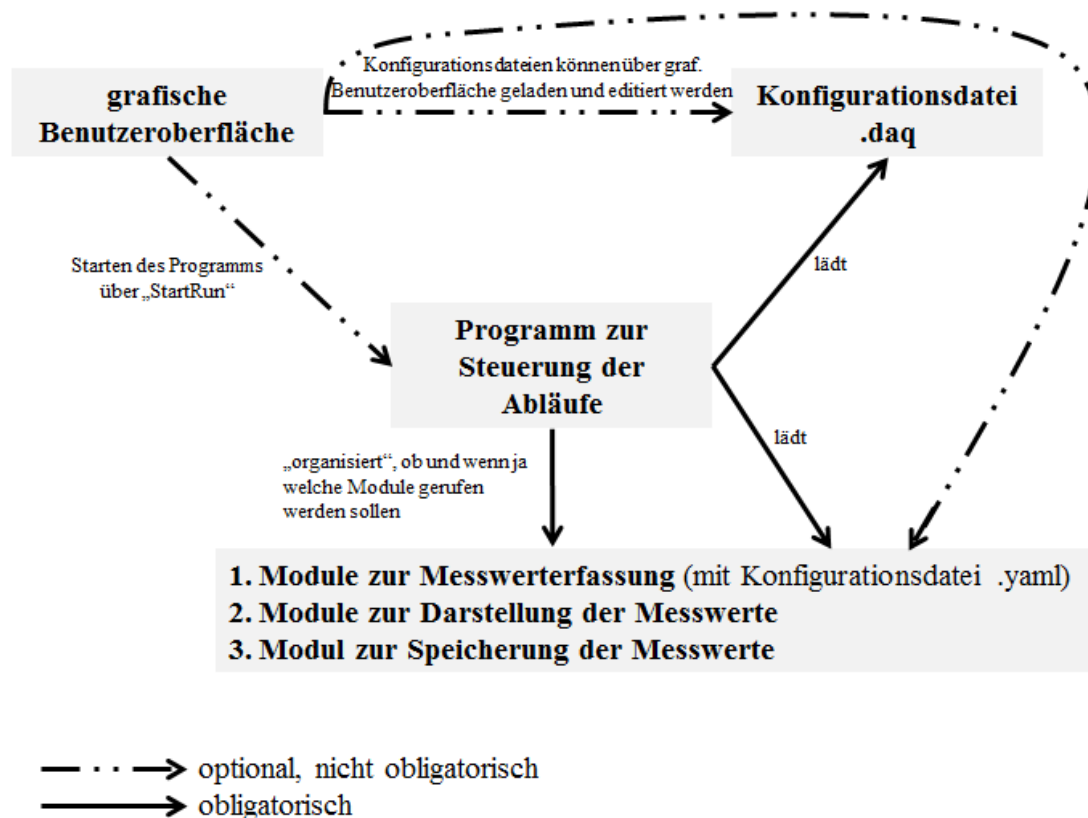


Abb. 5-1: Schematische Übersicht über das Softwarepaket PhyPiDAQ (Quelle: Eigene Darstellung)

Die Basis des Softwarepakets bilden Module zur digitalen Messwerterfassung mit Sensoren und Messgeräten, zur Darstellung der erfassten digitalen Messwerte und zur Speicherung der Messwerte im CSV-Format. Das übergeordnete Programm `run_phypi.py` stellt die konfigurierbare Umgebung für das digitale Messwerterfassungssystem zur Verfügung und wird über eine Konfigurationsdatei vom Typ `.daq` konfiguriert. Dieses Programm steuert die übergeordneten Abläufe während der Messwerterfassung. Es lädt die allgemeine Konfigurationsdatei sowie die Konfigurationsdatei des jeweiligen Sensors bzw. Messgeräts vom Typ `.yaml`, steuert den Aufruf der einzelnen Module mit der entsprechenden Konfiguration und führt übergeordnete Aufgaben, wie die Verrechnung einzelner Messkanäle, aus. Für den erleichterten Einsatz von PhyPiDAQ in der Schule verfügt das Softwarepaket über die grafische Benutzeroberfläche `phypi.py`, mit deren Hilfe die Konfigurationsdateien geladen, editiert und gespeichert werden können sowie das Programm `run_phypi.py` mit der entsprechenden Konfiguration gestartet werden kann. Diese lässt sich über ein klickbares Symbol starten. Nachfolgend wird auf die einzelnen Softwaremodule sowie die Konfigurationsdateien näher eingegangen. Die nachfolgende Abbildung zeigt die grafische Oberfläche. Über den Reiter Configuration kann in die Konfiguration der Konfigurationsdateien gewechselt werden.

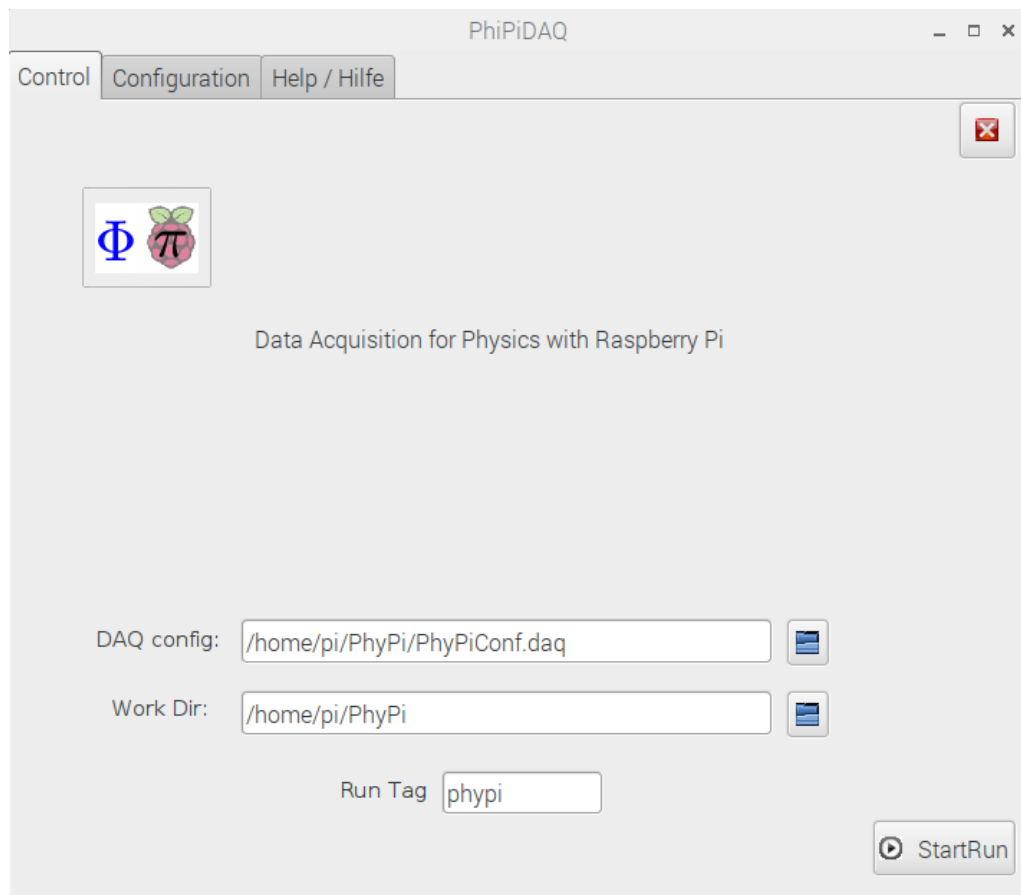


Abb. 5-2: Grafische Benutzeroberfläche des Softwarepakets PhyPiDAQ (Quelle: Eigene Darstellung)

## 5.1 Softwaremodule

Innerhalb des Softwarepakets PhyPiDAQ stehen Module zur Erfassung, zur Visualisierung sowie zur Speicherung digitaler Messwerte zur Verfügung. Auf diese Module wird nachfolgend genauer eingegangen.

### 5.1.1 Klassen für Messgeräte und Sensoren

Das Softwarepaket PhyPiDAQ bietet eine einfache und einheitlich gehaltene Abstraktionsschicht für die Verwendung von Messgeräten und Sensoren am Raspberry Pi. Für jeden Sensor bzw. jedes Gerät, das zur Datenerfassung genutzt wird, sind eine eigene Klasse mit einheitlicher Schnittstelle sowie eine zugehörige Konfigurationsdatei vorgesehen. In der Konfigurationsdatei `<Name_Sensor_Geraet>.yaml` wird die jeweilige Sensor- bzw. Gerätekonfiguration vorgenommen. Die jeweiligen Klassen `<Name_Sensor_Geraet>.py` verfügen dabei lediglich über drei einheitliche Methoden, sodass der Aufruf immer in gleicher Form erfolgt. Jeder Sensor bzw. jedes Gerät verfügt über eine Initialisierungsmethode `init(<config_dictionary>)`, in der die Konfiguration gemäß der Konfigurationsdatei vorgenommen wird und Daten zur Konfiguration der grafischen Darstellung der digitalen Messwerte bereitgestellt werden. Darüber hinaus gibt es eine Methode `acquireData(buffer)`, bei deren Aufruf Messdaten des jeweiligen Sensors bzw. Geräts in einen Puffer geschrieben werden, in dem diese dann zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung stehen. Zum Beenden der Datenerfassung wird die Methode `closeDevice( )` aufgerufen, um die Verwendung des jeweiligen Sensor bzw. das jeweilige Gerät geordnet zu beenden.

### 5.1.2 Klassen zur Visualisierung digitaler Messwerte

Das Softwarepaket verfügt über zwei Klassen zur Visualisierung digitaler Messwerte. Die Klasse `DataLogger.py` dient zur Darstellung des zeitlichen Verlaufs der digitalen Messwerte.

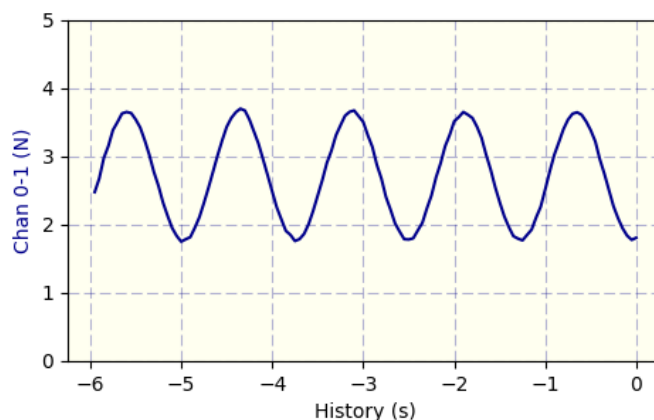


Abb. 5-3: Zeitlicher Verlauf der Kraft im Aufhängepunkt eines Federpendels (Quelle: Eigene Darstellung)

In Abb. 5-3 ist beispielhaft ein zeitlicher Kraftverlauf im Aufhängepunkt eines Federpendels dargestellt.

Außerdem bietet diese Klasse die Möglichkeit der Darstellung von Messgrößen als xy-Diagramm. Diese Darstellungsform kann beispielsweise zur Aufzeichnung einer LED-Kennlinie, wie in Abb. 5-4, verwendet werden.

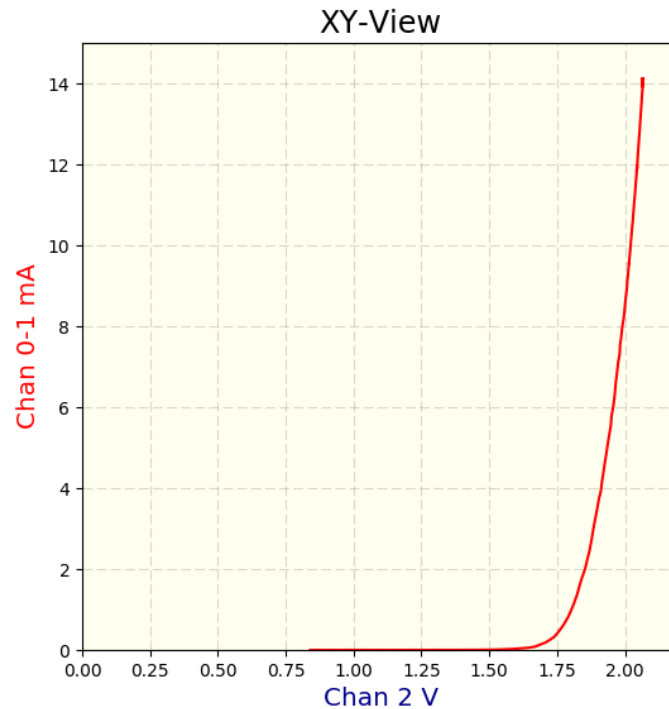


Abb. 5-4: xy-Diagramm am Beispiel einer Kennlinie einer roten LED (Quelle: Eigene Darstellung)

Die Klasse `DataGraphs.py` bietet zudem die Möglichkeit zur gleichzeitigen Darstellung des zeitlichen Verlaufs, von Balkendiagrammen sowie gegebenenfalls einer xy-Darstellung der digitalen Messwerte.

Die jeweilige Klasse zur Visualisierung wird bei der Verwendung des Softwarepakets PhyPiDAQ von einem Hintergrundprozess `mpTKDisplay.py` mit einer konfigurierten Abtastrate aufgerufen. Dieser stellt die animierte Darstellung der digitalen Messwerte zur Verfügung und ermöglicht das Pausieren und spätere Fortsetzen der Messung sowie das Speichern der aktuellen Grafik als Bilddatei.

### 5.1.3 Klasse zum Speichern der digitalen Messwerte

Mit der Klasse `DataRecorder.py` verfügt PhyPiDAQ über die Möglichkeit, die Messdaten einer Messung als Datei im CSV-Format abzuspeichern. Hierbei ist der Dateiname frei wählbar und wird beim Speichern entsprechend durch das Datum und die Uhrzeit der Messung ergänzt. Im Header (Kopfzeilen) der Datei sind sämtliche relevanten Metadaten zu den gespeicherten Messdaten wie Messintervall, verwendete Messkanäle und der jeweilige Messbereich hinterlegt, sodass diese direkt den

Messdaten zugeordnet sind. Da verschiedene Tabellenkalkulationsprogramme unterschiedliche Anforderungen an den Separator in CSV-Dateien stellen, kann dieser ebenfalls konfiguriert werden.

## 5.2 Konfigurationsdateien

Um das digitale Messwerterfassungssystem PhyPiDAQ zu konfigurieren, ist eine Hauptkonfigurationsdatei vom Typ `.daq` sowie für jeden verwendeten Sensor bzw. jedes verwendete Messgerät eine Konfigurationsdatei vom Typ `.yaml` notwendig. In den Konfigurationsdateien wird die Syntax der Markup-Sprache `yaml` verwendet, da diese starke Parallelen zu der Programmiersprache Python aufweist und so die Konfigurationsdateien leichter zu verstehen sind.

### 5.2.1 Hauptkonfigurationsdatei

Die Hauptkonfigurationsdatei vom Typ `.daq` enthält die allgemeine Konfiguration des digitalen Messwerterfassungssystems. In dieser Datei wird angegeben, welche Sensoren bzw. Messgeräte für die Messung und welches Grafikmodul für die Darstellung der Messwerte verwendet werden soll. Zudem wird an dieser Stelle das Abtastintervall konfiguriert. Für die grafische Ausgabe können in der Konfigurationsdatei den einzelnen Messkanälen Farben und eine Achsbeschriftung zugeordnet werden. Außerdem können Kalibrationswerte für die einzelnen Messkanäle hinterlegt werden, auf deren Grundlage der jeweilige Messwert der zu messenden physikalischen Größe bestimmt wird. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, Formeln auf die Messkanäle anzuwenden und das Speichern der erfassten Messwerte zu konfigurieren.

### 5.2.2 Konfigurationsdatei des Sensors bzw. Messgeräts

In den Konfigurationsdateien der einzelnen Sensoren und Messgeräte können diese spezifisch konfiguriert werden. Im Falle des AD-Wandlers ADS1115 bedeutet dies, dass an dieser Stelle angegeben wird, welcher analoge Eingangskanal mit welcher Eingangsverstärkung und in welchem Modus digitalisiert wird.



## **6 Einführungskurs zur digitalen Messwerterfassung mit dem Raspberry Pi und PhyPiDAQ**

Der folgende Abschnitt befasst sich mit der Erarbeitung und Durchführung eines Einführungskurses zur digitalen Messwerterfassung mit dem Raspberry Pi und PhyPiDAQ. Zunächst sollen die Ziele des Kurses erläutert werden. Anschließend soll das gewählte Format des Kurses begründet werden und eine detaillierte Betrachtung des Kurses stattfinden. Der entsprechende Einführungskurs befindet sich in Anhang eins. Eine Zusammenstellung der benötigten Komponenten und eine Bauanleitung für den verwendeten Kraftsensor befinden sich Anhang zwei und Anhang drei.

### **6.1 Ziele des Einführungskurses**

Hauptziel des Einführungskurses ist es, ein Grundverständnis digitaler Messwerterfassung mit allen relevanten Teilschritten zu schaffen und damit die Verwendung des entwickelten digitalen Messwerterfassungssystems PhyPiDAQ im Unterricht vorzubereiten. Dies soll die Schüler dazu befähigen, nicht nur reine Anwender zu sein, sondern sich über die zugrunde liegenden Vorgänge und die Vorteile, aber auch Grenzen der digitalen Messwerterfassung bewusst zu sein. Dazu ist eine didaktische Reduktion der Teilschritte erforderlich, sodass sich die Schüler nur mit den für das Grundverständnis relevanten Aspekten befassen müssen und eine Überforderung weitgehend vermieden wird.

Der Einführungskurs soll zudem das Interesse der Schüler für das Programmieren und kleinere Elektronikprojekte wecken und Hemmschwellen in dieser Hinsicht abbauen. Dieser Aspekt gilt auch für Lehrer, die häufig bisher keinerlei Berührung mit der Thematik der digitalen Messwerterfassung hatten bzw. das System im Falle von Cassy „nur“ bedient haben. Außerdem soll mit dem Einführungskurs ein Grundstein für eigene Schülerprojekte im Bereich der digitalen Messwerterfassung mit PhyPiDAQ gelegt werden.

### **6.2 Begründung des Formats**

Wie zuvor bereits angedeutet sind nicht nur die meisten Schüler, sondern auch viele Lehrer mit dem Bereich der digitalen Messwerterfassung wenig vertraut. Der Kurs soll den Lehrern deshalb ein stabiles Gerüst bieten, anhand dessen sie die Schüler an PhyPiDAQ heranzuführen können. Dies ist auch unter Betrachtung der Zeitkomponente wichtig: Da die Lehrer im Berufsalltag bereits hinreichend ausgelastet sind, ist es sinnvoll, den Einführungskurs so zu gestalten, dass die Einarbeitungszeit der Lehrer vor der tatsächlichen Nutzung im Unterricht möglichst gering ausfällt. Trotzdem sollen die Lehrer nicht Gefahr laufen, aufgrund der Unterrichtsdynamik plötzlich vor fachlich

schwer lösbaren Problemen zu stehen, die sich daraus ergeben, dass sie wenig Erfahrung auf dem Gebiet haben. Daher soll der Einführungskurs engmaschig strukturiert gehalten werden. Das bedeutet, dass die einzelnen Arbeitsschritte sich möglichst aus den vorherigen Arbeitsschritten ergeben sollen, bzw. aufgrund der vorherigen Arbeitsschritte für Schüler und Lehrer nachvollziehbar sein sollen. Eigene Ergänzungen des Lehrers wie Einstiege oder thematische Überleitungen sollen aus den oben genannten Gründen nicht erforderlich sein. Eine solche Strukturierung ermöglicht es auch, den Kurs jederzeit ohne großen Planungsaufwand erneut in nahezu identischer Weise durchzuführen. Auch dies ist unter Betrachtung der Zeitkomponente ein wünschenswerter Effekt.

Der Kurs soll zudem so gestaltet werden, dass ein hohes Maß an handlungsorientierter Themenbearbeitung gegeben ist. Wie oben bereits beschrieben bedeutet dies, dass

die Schülerinnen und Schüler [...] durch eigenes Tun und Handeln unter Anleitung der Lehrkraft die typischen Arbeitsweisen der Physik kennen[lernen]. Sie erfahren, welche Bedeutung physikalische Sachverhalte für andere Schulfächer und viele Lebensbereiche haben. (Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg, 2003, S. 13)

Als Sozialform soll deshalb die Partnerarbeit gewählt werden. Hierdurch soll erreicht werden, dass jeder Schüler „gezwungen“ ist, selbst aktiv zu werden und bei Problemen dennoch einen Ansprechpartner hat, mit dem er gemeinsam eine Lösung finden kann. Wie die Einzelarbeit ermöglicht die Partnerarbeit individuelle Denkvorgänge. Durch „das mündliche Formulieren, Erklären und Nachfragen im Zweierteam [scheint die Partnerarbeit aber] zu einem tieferen Durchdringen und Verstehen komplexer Sachverhalte [beizutragen]“ (Scholz, 2016, S. 52). Um eine gut funktionierende Partnerarbeit zu ermöglichen, sollen die Texte und Anleitungen des Kurses so gehalten werden, dass die Schüler die Versuche weitgehend eigenständig durchführen und Arbeitsaufträge anhand der gegebenen Informationen selbstständig lösen können.

Des Weiteren muss bei der Gestaltung des Kurses beachtet werden, dass Schülergruppen heterogene Gruppen sind. Zum einen sei hier die vertikale Heterogenität genannt, also „das unterschiedliche Leistungsvermögen der Schüler“ (Scholz, 2016, S. 9). Diesem soll im Einführungskurs durch die bereits genannte engmaschige Gestaltung des Kurses begegnet werden. Durch diese Form der Gestaltung ist es jedem Schülerpaar möglich, in seinem eigenen Tempo weitgehend unabhängig von den Mitschülern zu arbeiten. Beenden besonders leistungsstarke Schüler unerwartet früh alle Aufgaben des Kurses, so können diese sich an der Programmierung weiterer, eigener Messaufgaben versuchen und somit kreativ werden. Leistungsschwächere Gruppen schaffen es dagegen unter Umständen nicht, alle Kapitel des Kurses vollständig zu bearbeiten. Jedoch erzielen auch sie einen Lernfortschritt, da auch sie handlungsorientiert an die digitale Messwerterfassung herangeführt werden, wenn auch

nicht auf demselben Niveau. Durch die enge Führung des Kurses soll also eine Niveaudifferenzierung stattfinden. Des Weiteren soll mit jedem Kapitel das Anforderungsniveau der Aufgaben sukzessive ansteigen. Je leistungstärker eine Gruppe also ist, desto mehr Kapitel kann sie bearbeiten und desto mehr steigt auch die fachliche Anforderung.

Neben der vertikalen Heterogenität besteht in Schulklassen auch horizontale Heterogenität, also „unterschiedliche[...] Interessen, Lernwege[...] und Zugangsweisen der Schüler zu einem Thema oder einer Aufgabenstellung“ (Scholz, 2016, S. 9). Verschiedene Themengebiete und der Einsatz verschiedener Sensoren in den einzelnen Kapiteln sollen den unterschiedlichen Interessen der Schüler gerecht werden. Zudem soll im Einführungskurs versucht werden, auch verschiedene Lernwege und Zugangsweisen zum Thema für unterschiedliche Lerntypen anzubieten: Es sollen Abbildungen zum Einsatz kommen (visueller Lernweg), praktische Versuche durchgeführt werden (haptischer Lernweg), komplette Versuche geplant, durchgeführt und ausgewertet werden (handlungsorientierter Lernweg), sowie ein Austausch mit einem Mitschüler stattfinden (kommunikativ-kooperativer Lernweg) (Scholz, 2016). Im folgenden Abschnitt soll nun beschrieben werden, wie die genannten Ziele des Einführungskurses konkret umgesetzt werden und das Format ausgestaltet werden soll.

### **6.3 Detailbetrachtung des Einführungskurses**

Die Detailbetrachtung des Einführungskurses gliedert sich in Abschnitte, die sich mit dem jeweiligen Kapitel des Kurses beschäftigen. Dabei sollen für jedes Kapitel zunächst Lernziele ausgewiesen werden. Im Anschluss soll eine didaktisch-methodische Analyse des Kapitels durchgeführt werden. Auf Basis einer praktischen Durchführung des Kurses mit einer Schülergruppe am KIT sowie Eindrücken aus einer teilweisen Durchführung des Kurses an der Carl-Engler-Schule soll dann eine kritische Betrachtung des jeweiligen Kapitels stattfinden.

Es ist zu beachten, dass an dieser Stelle keine Fachanalyse vorgesehen ist. Genaue fachliche Erläuterungen finden sich in den vorangehenden Kapiteln dieser Arbeit. Sollte es dennoch fachlich relevante Anmerkungen wie beispielsweise die Notwendigkeit einer didaktischen Reduktion geben, so werden diese in der jeweiligen didaktisch-methodischen Analyse thematisiert.

#### **6.3.1 Kapitel 1 – Digitale Messtechnik**

Kapitel eins stellt eine thematische Hinführung zur digitalen Messwerterfassung dar.

##### **6.3.1.1 Lernziel**

Die Schüler kennen die Bedeutung digitaler Messtechnik im Alltag.

### 6.3.1.2 Methodisch didaktische Analyse

Wie oben bereits beschrieben dient Kapitel eins der thematischen Hinführung zur digitalen Messwerterfassung. Kircher (2015) nennt verschiedene Einstiegsformen, die im Physikunterricht eingesetzt werden können. Im Einführungskurs findet ein sogenannter „Einstieg über Schlüsselbegriffe“ statt. Dies bedeutet, dass „Schüler [...] über grundlegende Begriffe eines thematischen Bereiches (Schlüsselbegriffe) [...] motiviert werden, durch direkte Fragen nach den Vorstellungen der Schüler über diese Begriffe“. Der gewählte Schlüsselbegriff lautet im Einführungskurs „digitale Messtechnik“ (Kircher, 2015b, S. 173). Der Einstieg über einen Schlüsselbegriff wird gewählt, da es auf diese Weise möglich ist, mit möglichst geringem Zeitaufwand ins Thema einzusteigen. Zudem bietet der Begriff aufgrund seiner Bedeutung im Alltag ausreichend Potential, die Schüler für die folgenden Unterrichtssequenzen zu motivieren.

Da der Einführungskurs so konzipiert ist, dass die Schüler ihn weitestgehend alleine, sprich ohne den Einsatz von Unterrichtsgesprächen, durchführen können, muss auch der Einstieg alle nötigen Informationen enthalten, die die Schüler brauchen, um den Schlüsselbegriff „digitale Messtechnik“ für sich konkretisieren zu können. Deshalb beginnt der Einführungskurs mit einem kurzen, leicht verständlichen Infotext zur digitalen Messtechnik. Dieser soll den Schülern zum einen verständlich machen, in welchen Bereichen ihres Alltags digitale Messtechnik vorkommt. Zum anderen soll durch die Herstellung eines Bezugs zu ihrem Alltag eine Motivation geweckt werden, mehr über digitale Messtechnik erfahren zu wollen.

Die sich anschließende Aufgabe eins soll das Interesse am Thema digitale Messtechnik vertiefen und ein Bewusstsein für die allgemeine Bedeutung digitaler Messtechnik und ihrer Verbindung zur Physik schaffen. An dieser Stelle wird kein Infotext, sondern eine bewusst offen gehaltene Aufgabe eingesetzt. Dadurch soll eine kurze Diskussion zwischen den jeweiligen Schülerpaaren initiiert werden, bei der die Schüler feststellen, dass digitale Messtechnik in ihrem Alltag sehr präsent ist. Durch das Ausfüllen der Tabelle soll zudem jede Gruppe „gezwungen“ sein, sich Gedanken zu machen, dass, bzw. welche physikalische Größe bei der gewählten Anwendung gemessen wird.

### 6.3.1.3 Kritische Betrachtung

In der ersten Durchführung mit einer leistungsstarken Schülergruppe am KIT ergaben sich keine Probleme in der Umsetzung von Kapitel eins.

Aufschlussreich war hier die zweite Durchführung an der Carl-Engler-Schule: Aus organisatorischen Gründen fand der Kurs und somit auch Kapitel eins hier nicht wie geplant in Partnerarbeit, sondern im Unterrichtsgespräch mit der ganzen Klasse statt. Es zeigte sich, dass in dieser (etwas leistungsschwächeren Gruppe) etliche Schüler relativ

unsicher bezüglich des Themas waren. Das Unterrichtsgespräch half ihnen, den Schlüsselbegriff „digitale Messtechnik“ besser zu verstehen und somit einen besseren Zugang zu dem neuen Thema zu bekommen. Es wäre also zu überlegen, ob es nicht sinnvoll wäre, in Kapitel eins zukünftig das Potential der ganzen Klasse im Klassengespräch zu nutzen. Hierzu könnte die Bearbeitung zuerst in Partnerarbeit erfolgen und die Ergebnisse anschließend im Plenum diskutiert werden. Da Kapitel eins am Beginn der Einheit steht, würde ein Klassengespräch hier auch nicht zu Problemen bezüglich der geplanten Leistungsdifferenzierung führen (also, dass jede Gruppe in ihrem eigenen Tempo arbeitet und eventuell Zusatzaufgaben erledigt).

### **6.3.2 Kapitel 2 – Das Breadboard und die LED**

Kapitel zwei befasst sich mit der Vermittlung von grundlegendem Wissen über Breadboard und die Verwendung von LEDs. Dieses Wissen benötigen die Schüler, um Breadboard und LEDs im weiteren Verlauf des Kurses korrekt einsetzen zu können.

#### **6.3.2.1 Lernziele**

Die Schüler ...

- ... wissen, was beim Betrieb einer LED beachtet werden muss.
- ... kennen den Aufbau des Breadboards und wissen, welche Steckkontakte elektrisch miteinander verbunden sind.
- ... können die Funktionstüchtigkeit einer einfachen Schaltung auf dem Breadboard beurteilen und ihre Begründung verbalisieren.

#### **6.3.2.2 Methodisch didaktische Analyse**

Kapitel zwei beginnt mit einem kurzen Einführungstext darüber, was die Schüler in diesem Kapitel erwartet. Der Einführungstext ersetzt einen Lehrervortrag, da die Schüler sich in Kapitel zwei in einer Phase der Partnerarbeit befinden, in die jedes Schülerpaar zu einem individuellen Zeitpunkt einsteigt.

Im Anschluss folgen Infotexte über den Einsatz der LED und den Aufbau des Breadboards. Hier wird also Fachwissen zur Verfügung gestellt, das den Schülern durch Lesen eines Textes vermittelt werden soll. Die Schüler müssen hierbei nicht diskutieren oder selbst in einer praktischen Aufgabe aktiv werden – ihre Rolle ist eine relativ Passive. Dennoch erscheint die Wahl der Infotexte an dieser Stelle sinnvoll: Kapitel zwei stellt eine Erarbeitungsphase dar, in der Fachwissen erlangt werden soll. Hierzu schreiben Kauertz & Fischer, dass dabei nicht grundlegendes Wissen vorgegeben werden sollte, da dies „zu einer kognitiven Entlastung führt, so dass mehr Ressourcen für das aktuelle Lernen verfügbar sind“ (Kauertz & Fischer, 2010, S. 667). Sowohl das Wissen über den fachgemäßen Einsatz von LEDs als auch das Wissen über den Aufbau

des Breadboards können nicht als gegeben vorausgesetzt werden. Es ist also von essentieller Bedeutung, den Schülern dieses Wissen von Grund auf zu vermitteln. Können die Schüler die genannten Bauteile von Beginn an richtig einsetzen, können viele Fehler in gesteckten Schaltungen vermieden und Frustration seitens der Schüler umgangen werden.

Die Infotexte werden zudem um Bilder ergänzt. Kircher schreibt, dass „Bilder [...] bei der geistigen Verarbeitung und Interpretation schwer verständlicher physikalischer Texte [helfen]“ (Kircher, 2015a, S. 119). In Kapitel zwei werden dafür Symboldarstellungen gewählt, da sich hier physikalisch-technische Informationen wie elektrisch verbundene Steckkontakte auf dem Breadboard gut veranschaulichen lassen. Infotexte und Bilder sollen also gemeinsam dazu führen, dass die Schüler, auch ohne Hilfe des Lehrers, ein Grundwissen über den Einsatz der LED und den Aufbau des Breadboards erlangen können.

An die Erarbeitungsphase schließt sich dann eine Übungsphase an, in der das neue Fachwissen transferiert werden soll: In Aufgabe eins diskutieren die Schüler in Partnerarbeit, warum in welcher Schaltung eine LED (nicht) leuchtet und müssen dabei das zuvor Gelernte verbalisieren. Sie können somit überprüfen, ob sie die Texte tatsächlich verstanden haben. Eventuelle Unklarheiten können im Gespräch mit dem Mitschüler geklärt werden. Nach Lösen der Aufgabe sollten die Schüler dann bereit für die tatsächliche Arbeit mit LED und Breadboard sein, womit die Grundlage für die nachfolgenden Kapitel geschaffen wäre.

### 6.3.2.3 Kritische Betrachtung

Bei der Durchführung von Kapitel zwei ergaben sich sowohl am KIT als auch an der Carl-Engler-Schule keine nennenswerten Probleme. Es wäre allerdings zu überlegen, ob es nicht lohnenswert wäre, die Überprüfung von Aufgabe zwei in praktischer Form durchzuführen, indem also jedes Schülerpaar die fraglichen Schaltungen steckt und überprüft, ob die LEDs leuchten. Dies hätte den Vorteil, dass die Schüler erste Praxiserfahrungen im Stecken von Schaltungen auf dem Breadboard sammeln könnten. Zudem würde es Kapitel zwei weniger theorielastig und somit für die Schüler spannender machen.

### 6.3.3 Kapitel 3 – Was bedeutet digitales Messen?

Kapitel drei befasst Verständnis über den digitalen Charakter eines GPIO-Pins.

### 6.3.3.1 Lernziele

Die Schüler ...

- ... wissen, dass der Raspberry Pi über GPIO-Pins (Ein- und Ausgangspins) mit seiner Umgebung kommunizieren kann.
- ... können eine einfache Schaltung auf dem Breadboard aufbauen.
- ... können ein einfaches Programm zur Abfrage und Ausgabe des Zustands eines Eingangspins des Raspberry Pi erstellen.
- ... können ihre Beobachtungen verbalisieren und daraus einen allgemeinen Zusammenhang ableiten.
- ... wissen, wie der digitale Zustand eines Eingangspins festgelegt ist und kennen die Bedeutung des Begriffs „digital“.

### 6.3.3.2 Methodisch didaktische Analyse

Wie auch Kapitel zwei beginnt Kapitel drei mit einem einleitenden Text über die Thematik des folgenden Kapitels, der einen Lehrervortrag ersetzt. Wie auch im vorherigen Kapitel begründet sich der einleitende Text darin, dass die Schülerpaare zu unterschiedlichen Zeitpunkten mit dem Kapitel beginnen. Die Einführung wird bewusst sehr kurz gehalten, um es den Schülern zu ermöglichen, so schnell wie möglich mit dem praktischen Versuch beginnen zu können. Dies erscheint besonders auch unter dem Aspekt sinnvoll, dass die beiden vorherigen Kapitel bereits sehr theoretisch gehalten waren.

Der Einführungstext ist mit einem Infotext über GPIO-Pins verknüpft. An dieser Stelle beginnt also bereits die Erarbeitungsphase, in der, wie in Abschnitt 6.3.2.2 bereits beschrieben, grundlegendes neues Wissen zur Verfügung gestellt werden muss, um den Schülern ein erfolgreiches Arbeiten bei der folgenden Aufgabe zum Verhalten der GPIO-Pins zu ermöglichen. Durch optische Hervorhebungen wird versucht, den Schülern wichtige Schlagworte zu verdeutlichen und den Lesefluss zu erleichtern.

Im Anschluss folgt das eigentliche Schülerexperiment zum GPIO-Pin. Mikelskis stellt Forderungen an ein effektives Schülerexperiment. Diese beinhalten unter anderem, dass die Aufgabenstellung klar und verständlich formuliert sein sollte, gleichzeitig aber auch, dass „kleinschrittige kochrezeptartige Experimentieranleitungen“ vermieden werden sollten (Mikelskis-Seifert & Leisner-Bodenthin, 2007, S. 34). Da viele Schüler mit dem Breadboard wenig vertraut sind, erscheint es notwendig, die Aufgabenstellungen bei der Durchführung sehr detailliert zu gestalten. Dies führt allerdings zwangsläufig zu einer kleinschrittigen, kochrezeptartigen Experimentieranleitung. Mikelskis-Seifert & Leisner-Bodenthin (2007) fordern weiter, dass das Experiment eine angemessene Herausforderung für die Schüler darstellen sollte. Würde man auf eine kleinschrittige Anleitung verzichten, so ist davon auszugehen, dass das Experiment für viele Schüler

zu schwierig wäre, also keine angemessene Herausforderung mehr darstellen würde. Um also auch dieser Forderung gerecht zu werden, wird in der Anleitung zur Durchführung des Experiments in Kapitel drei in Kauf genommen, dass die Anleitungen kleinschrittig sind und somit nicht alle genannten Forderungen an ein Experiment erfüllt werden können. Die Entscheidung zu Gunsten der kleinschrittigen Erklärungen wird auch durch folgende Aussage gestützt, die besagt, dass

je nach [...] Leistungsniveau [...] mehr oder weniger ausführliche Anleitungen oder fachliche Zusatzinformationen bereitzustellen [sind]. Insbesondere sind oft Hilfestellungen in folgenden Abschnitten nötig: Strukturierung des Arbeitsablaufs, [...] technische Umsetzung (z.B. Anschluss und Bedienung von Geräten), Datenaufnahme (präzise Messung und Dokumentation), Aufbereitung und Interpretation der Daten. (Girwidz, 2015a, S. 241)

Ab dem Unterpunkt „5“ der Durchführung beginnt dann die Programmierung am Raspberry Pi. Auch hier werden bewusst sehr kleinschrittige Arbeitsanweisungen gewählt, da davon auszugehen ist, dass viele Schüler an dieser Stelle zum ersten Mal in ihrem Leben programmieren. Um dennoch einen Lernerfolg bei den Schülern im Bereich des Programmierens zu erzielen, werden alle auszuführenden Schritte erläutert und der Programmcode mit erklärenden Kommentaren versehen.

Die kleinschrittigen Arbeitsanweisungen zum Stecken auf dem Breadboard und zur Programmierung geschehen in Vorbereitung auf die nächsten Kapitel, in denen die Schüler dann weniger angeleitet und mit ihrem Vorwissen aus Kapitel drei erneut Schaltungen aufbauen und programmieren sollen. Der Kurs soll teilweise als Spiralcurriculum gestaltet werden; eine genauere Erklärung hierzu wird in Abschnitt 6.3.4.2 gegeben.

Wie auch in Kapitel zwei kommen in der vorliegenden Anleitung schematische Bilder von Schaltplan, Breadboard und Raspberry Pi zum Einsatz, die das Verständnis für die Durchführung verbessern sollen. Diese werden ergänzt durch eine Übersicht über die verwendeten Bauteile auf den ersten Seiten des Einführungskurses, in denen Schüler ihnen unbekannte Bauteile nachschlagen können. Somit soll gewährleistet sein, dass die Schüler die Experimente tatsächlich weitgehend selbstständig und ohne weitere Nachfragen an die Lehrkraft durchführen können.

Nach dem erfolgreichen Stecken auf dem Breadboard und der sich anschließenden Programmierung erfolgt ein Test des geschriebenen Programms, der ab Unterpunkt „8“ startet. Hier ist es nun wieder möglich, die Aufgaben weniger nach „Kochrezept“ zu gestalten. Girwidz (2015) weist darauf hin, dass Abläufe im Schülerversuch aufgrund der direkten Beteiligung im Allgemeinen gut erfasst werden. Deshalb ist Unterpunkt „8“ so gestaltet, dass die Schüler selbst herausfinden müssen, dass ein GPIO-Pin nur zwei Zustände annehmen kann und wie diese festgelegt sind. Diese Beobachtung erscheint essentiell. Durch das experimentelle Erschließen dieser Gegebenheit erhofft



man sich, dass die Schüler sich das Erfahrene merken und in den nachfolgenden Kapiteln darauf zurückgreifen können. Auch die Unterpunkte „10“ und „11“ sind so gestaltet, dass die Schülerpaare ihre Ideen diskutieren und anschließend aufschreiben müssen. Auch an dieser Stelle erhofft man sich, dass durch die Diskussion und das anschließende Verbalisieren ein tiefergehendes Verständnis über den Begriff „digital“ erzielt werden kann.

#### 6.3.3.3 Kritische Betrachtung

Den Elftklässlern der Carl-Engler-Schule war das Potentiometer unbekannt, die Zwölftklässler am KIT hingegen kannten das Potentiometer. Vor der Durchführung von Kapitel drei sollte also gegebenenfalls abgefragt werden, ob das Potentiometer bekannt ist. Falls nein sollte es vorab im Unterricht eingeführt werden.

Der Anschluss der Breadboardleitungen an die Bananenbuchsen stellte für viele Schüler ein Problem dar. Auch die Abbildung in der Übersicht über wichtige Komponenten war den Schülern hier keine Hilfe, da sie diese Übersicht nicht gesehen hatten. Hier sollte die Lehrkraft also entweder vorab zeigen, wie Breadboardleitungen an Bananenbuchsen angeschlossen werden, oder zumindest auf die Existenz der Übersicht über wichtige Komponenten im Arbeitsheft des Einführungskurses hinweisen.

In der getesteten Version des Kurses wurde viel über die Kommandozeile gearbeitet. Auf den Schülerbildschirmen waren folglich mehrere sehr ähnliche Fenster geöffnet, was teils zu Verwirrung bei den Schülern führte. In der vorliegenden Arbeit wurde der Einsatz von Kommandozeilen deshalb reduziert und durch eine grafische Bedienung über Klicken ersetzt.

Bei den Aufgaben in den Unterpunkten „8“ und „10“ bemängelten zudem einige Schüler, dass die beiden Aufgaben eine Dopplung darstellen würden. In „8“ geht es jedoch darum, Beobachtungen zu notieren und in „10“ darum, eine Auswertung vorzunehmen. Die Reaktion der Schüler zeigt also, dass einige Schüler sich in der Unterscheidung zwischen Beobachtung und Auswertung schwer tun und an dieser Stelle Übungsbedarf haben. Aus diesem Grund sollten die Aufgaben zu „8“ und „10“ dringend als separate Aufgaben beibehalten werden.

#### 6.3.4 Kapitel 4 – Lichtautomatik

Kapitel vier befasst sich mit dem Alltagsbeispiel einer Lichtautomatik. Auf Grundlage der Erkenntnisse aus Kapitel drei wird ein einfacher digitaler Sensor aufgebaut. Aufbauend darauf werden allgemeine Zusammenhänge für ein Grundprinzip der digitalen Messwerterfassung abgeleitet.

#### 6.3.4.1 Lernziele

Die Schüler ...

- ... können den funktionalen Zusammenhang zwischen physikalischen Größen am Beispiel des LDR verbal beschreiben.
- ... kennen den Spannungsteiler als einfache Schaltung zur Wandlung einer Widerstandsänderung in eine Spannungsänderung.
- ... können das Sensorsignal eines einfachen Sensors mit Hilfe eines GPIO-Pins digitalisieren und dieses weiterverarbeiten.
- ... können den Zusammenhang zwischen einem abstraktem Schaltplan und einem konkreten Aufbau einer Schaltung auf dem Breadboard herstellen.
- ... können von einem Beispiel (Lichtautomatik) auf einen allgemeinen Zusammenhang (Grundprinzip der digitalen Messwerterfassung) schließen.

#### 6.3.4.2 Methodisch didaktische Analyse

Auch Kapitel vier beginnt mit einem thematischen Einführungstext; die Begründung hierfür entspricht den Begründungen in den Abschnitten 6.3.2.2 und 6.3.3.2. Die Einführung soll über konkrete Anwendungen der Lichtautomatik einen Lebensweltbezug herstellen und die Schüler somit für die folgende Experimentierphase motivieren.

Um die Motivation der Schüler möglichst hoch zu halten, erfolgt dann ein direkter Einstieg in das Experiment. In Unterpunkt „2“ sollen die Schüler ihre Beobachtungen zunächst notieren. Durch die offene Aufgabenform schulen die Schüler ihr Vermögen, Beobachtungen ohne Interpretation zu notieren. Um dies zu ermöglichen, erfolgt die Interpretation der Beobachtung erst in Unterpunkt „3“ anhand eines Diagramms. Das Diagramm wird eingesetzt, da Grafiken wie Diagramme „übergeordnete Zusammenhänge in der Regel effizienter sichtbar [machen als Tabellen]. Sie ermöglichen auch anschauliche Vergleiche zwischen Theorie und Messung“ (Girwidz, 2015a, S. 207). Zudem sind Diagramme in der Wissenschaft allgegenwärtig; es ist also von hoher Bedeutung, potentielle künftige Wissenschaftler im Umgang mit Diagrammen zu schulen. Bei der anschließenden ebenfalls freien Formulierung der Auswertung sollen die Schüler die Unterscheidung zwischen Beobachtung und Auswertung weiter festigen. Darüber hinaus fordert der Bildungsplan für das Allgemeinbildende Gymnasium, dass die Schüler „funktionale Zusammenhänge zwischen physikalischen Größen verbal beschreiben (zum Beispiel ‚je-desto‘-Aussagen)“ (Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg, 2016, S. 11). Dies wird hier explizit geübt.

In Unterpunkt „4“ folgt dann ein verhältnismäßig langer Infotext über Spannungsteiler. Das hier vermittelte Wissen über Spannungsteiler ist nötig, um die weiteren Kapitel des

Kurses erfolgreich durchführen zu können. Um also weiterarbeiten zu können, müssen die Schüler den Text verstehen; sie benötigen eine hohe Lesekompetenz. Betrachtet man die Ergebnisse der PISA-Studie von 2015, so gelingt es in Deutschland rund 16% der getesteten 15-Jährigen Schüler nicht, ein Grundkompetenzniveau bei der Lesekompetenz zu erreichen, das es ihnen ermöglicht, effektiv am Leben teilzuhaben (OECD, 2015). Es scheint also notwendig, an dieser Stelle zu überprüfen, ob die Schüler den Infotext verstanden haben. So schließen sich an den Text vier Aufgaben an, anhand derer alle relevanten Informationen des Textes in den Schülerpaarungen noch einmal diskutiert und verinnerlicht werden sollen.

Der zweite Teil des Experiments beginnt aus oben genannten Gründen erneut mit einem kurzen Einführungstext. Es folgt eine Anleitung. Da bei der Programmierung ein den Schülern noch unbekannter Programmcode geschrieben wird, ist es unumgänglich, die Anleitung erneut sehr detailliert zu gestalten. Wie auch in Kapitel drei wird aber durch erklärende Kommentare gleichzeitig versucht, einen Lerneffekt bei den Schülern zu erzeugen. Durch das Ausprobieren der Lichtautomatik am Ende des Experiments erhalten die Schüler durch eigenes Tun (Abdunkeln des Fotowiderstands) ein direkt sichtbares Ergebnis. Dadurch sollen die Schüler ein Erfolgserlebnis haben, das sie für das kommende Kapitel erneut motiviert.

Das Kapitel endet mit einem Schema, das das Grundprinzip digitaler Messwerterfassung an einem konkreten Beispiel, hier der soeben bearbeiteten Lichtautomatik, aufzeigt. Dieses Schema soll nun in allen folgenden Kapiteln mit dem jeweiligen konkreten Beispiel wiederkehren. Durch die thematische Wiederholung in den folgenden Kapiteln soll den Schülern bewusst werden, dass das Grundprinzip digitaler Messwerterfassung an sich immer identisch abläuft und auch auf Beispiele mit nicht genannten, weiteren Sensoren übertragen werden kann. Es soll den Schülern somit eine gewisse Übersicht über die Thematik verschaffen. Bei jeder Wiederholung des Schemas soll die zugehörige Aufgabe dann etwas schwieriger werden, also ähnlich dem Prinzip eines Spiralcurriculums, bei dem Themen immer wieder aufgegriffen und weiter differenziert werden (Schnotz, 2011). Da das Schema in Kapitel vier erstmalig eingeführt wird, ist das Anforderungsniveau der Aufgabe mit Lückentext-Charakter relativ gering.

#### 6.3.4.3 Kritische Betrachtung

Insgesamt schien die Bearbeitung von Kapitel vier den Schülern Spaß zu machen. Besonders die einfache Realisierung der Lichtautomatik schien die Schüler begeistern. Der Spannungsteiler war den Elftklässlern der Carl-Engler-Schule unbekannt. Somit erschien auch das Verständnis der damit verbundenen Aufgaben in dieser Klassenstufe anspruchsvoll. Die Zwölftklässler dagegen, denen der Spannungsteiler aus dem Unterricht bekannt war, hatten keinerlei Schwierigkeiten und erkannten die

Zusammenhänge sofort. Es ist also durchaus sinnvoll, den Spannungsteiler vor einer Durchführung des Einführungskurses zu besprechen.

Außerdem war bei der Durchführung mit den Zwölftklässlern, um die Schaltung möglichst einfach zu halten, ein Festwiderstand anstatt eines Potentiometers im Spannungsteiler verbaut. Es zeigte sich jedoch, dass der Effekt der Lichtautomatik wesentlich schöner gezeigt werden kann, wenn das Widerstandsverhältnis des Spannungsteilers durch ein Potentiometer angepasst werden kann. Dieser Aufbau wurde mit den Elftklässlern getestet und brachte bessere Ergebnisse.

### **6.3.5 Kapitel 5 – Wir bauen ein digitales Thermometer**

Kapitel fünf befasst sich mit der Analog-Digital-Wandlung und Kalibrierung eines digitalen Sensors am Beispiel eines einfachen digitalen Thermometers.

#### **6.3.5.1 Lernziele**

Die Schüler ...

- ... können die Analog-Digital-Wandlung nachvollziehen.
- ... erkennen die Notwendigkeit einer Analog-Digital-Wandlung zur digitalen Auswertung eines analogen Sensors.
- ... können mit Hilfe eines Spannungsteilers aus einem Festwiderstand und einem temperaturveränderlichen Widerstand (NTC) eine Sensorschaltung planen und aufbauen.
- ... kennen das Grundprinzip der digitalen Messwerterfassung und können es auf das konkrete Beispiel eines digitalen Thermometers anwenden.
- ... können einen digitalen Temperatursensor kalibrieren.

#### **6.3.5.2 Methodisch didaktische Analyse**

Voraussetzung für den Bau eines digitalen Thermometers ist ein gewisses Grundverständnis über die Analog-Digital-Wandlung. Dieses Thema ist jedoch für Schüler sehr abstrakt, sodass im Kurs zunächst versucht wird, die Analog-Digitalwandlung über die Analogie einer Leiter greifbar zu machen. Bei der Wahl einer Analogie im Physikunterricht müssen einige Aspekte beachtet werden. Um eine Akzeptanz zu erreichen, muss den Schülern die Analogie vertraut sein, was im Falle der Leiter gegeben ist. Zudem sollte eine „Tiefenstrukturähnlichkeit“ bestehen. Auch dies ist bei der Leiter der Fall; die genaue, analoge Höhe, auf der sich eine Person befindet, kann in eine digitale, stufenbasierte Höhe umgewandelt werden. Um die Motivation der Schüler zu wecken, wird die Analogie durch einen einfachen Cartoon eingeleitet. Der Einführungstext beschreibt die Analogie und führt das Thema Analog-Digitalwandlung ein. Wichtig ist beim Einsatz einer Analogie dann allerdings auch, dass die Analogie um

den „primären Lernbereich“, hier also die Analog-Digital-Wandlung, erweitert wird (Kircher, 2015a). Dies geschieht im nächsten Abschnitt.

Die Erarbeitungsphase erfolgt nun in umgekehrter Reihenfolge wie in Kapitel vier: Zuerst wird den Schülern ein Grundwissen über die Analog-Digital-Wandlung vermittelt. Dies geschieht anhand von Schaubildern, Infotexten und Aufgaben. Schaubilder und Infotexte dienen dazu, neues benötigtes, nicht voraussetzbares Wissen zu schaffen; die Aufgaben dienen der Überprüfung des Textverständnisses und der Festigung. In Aufgabe zwei üben die Schüler zudem erneut das Verbalisieren physikalischer Gegebenheiten.

Aufgabe drei und Unterpunkt „1“ der Durchführung zur Realisierung des digitalen Thermometers bereiten dann auf das eigentliche Experimentieren vor. Wie bereits in Abschnitt 6.3.3.2 beschrieben sollen die Anforderungen an die Schüler bezüglich des Steckens auf dem Breadboard im Laufe des Kurses steigen. Da die Schüler nun bereits mehrere Schaltungen gesteckt haben und mit dem Breadboard vertraut sind, sollen sie nun auf Basis ihres neu erworbenen Wissens den Schaltplan und theoretischen Schaltungsaufbau auf dem Breadboard alleine vervollständigen. Unterpunkt „2“ geht dann noch einen Schritt weiter. Die Schüler sollen lernen, einer Tabelle die nötigen Informationen zu entnehmen und diese praktisch beim Aufbau der Schaltung zu nutzen. Sowohl die theoretischen als auch die praktischen Aufgaben sollen dazu führen, dass die Schüler im Umgang mit dem Breadboard Sicherheit erlangen. Sie sollen langsam dazu hingeführt werden, auch eigene Schaltungen stecken zu können.

Ab Unterpunkt „3“ steht dann wieder das Verständnis der Analog-Digital-Wandlung anhand eines konkreten Programms im Zentrum. Da hier wieder neue Programmierbefehle zum Einsatz kommen, ist die Programmierung stark angeleitet. Wie gewohnt sollen erklärende Kommentare den Lernzuwachs sicherstellen. Zudem werden in diesem Abschnitt immer wieder auch erklärende Infotexte zur Verfügung gestellt, die gewährleisten sollen, dass die Schüler stets wissen, wie man vom digitalisierten Zahlenwert des AD-Wandlers zu einer digitalisierten Spannung gelangt. Wann immer möglich werden zudem Aufgaben eingesetzt, bei denen die Schüler selbst aktiv werden und somit in den Denkprozess eingebunden werden. Die letzte Aufgabe vor Unterpunkt „5“ wird bewusst als Aufgabe und nicht als Infotext gestaltet. Die Schüler sollen durch eigenes Experimentieren realisieren, dass sie bis zu diesem Zeitpunkt für die Temperatur „nur“ einen Spannungswert erhalten. Sie sollen somit die Notwendigkeit für die Kalibrierung verstehen.

Die Kalibrierung stellt in der Physik einen wichtigen Prozess dar. Die Durchführung einer eigenen Kalibrierung soll den Schülern an dieser Stelle einen exemplarischen Einblick in die Arbeitsweise eines Physikers geben. Ein kurzer Einführungstext in Unterpunkt „5“ verdeutlicht die Notwendigkeit der Kalibrierung. Um den Prozess der

Kalibrierung für die Schüler vollkommen transparent zu machen, führen sie zunächst eine Kalibrierung und die zugehörige Kurvenanpassung „von Hand“ durch. Anschließend erfolgt die zugehörige Programmierung. Wie gewohnt sind den Programmzeilen dabei Erklärungen beigelegt. Wie auch im vorherigen Kapitel können die Schüler beim Test ihres digitalen Thermometers sofort Erfolgserlebnisse verbuchen. Hiervon erhofft man sich eine Steigerung der Motivation für das nächste Kapitel.

Wie in Abschnitt 6.3.4.2 bereits beschrieben folgt zum Schluss wieder das Schema zum Grundprinzip der digitalen Messwerterfassung. Das Niveau der Aufgabenstellung ist dabei etwas höher angesetzt als bei der Lichtautomatik: Es werden keine festen Begriffe mehr vorgegeben; die Schüler haben durch die konkreten Werte am Rand dennoch Anhaltspunkte, die ihnen bei der Wahl der korrekten Begriffe helfen sollen.

### 6.3.5.3 Kritische Betrachtung

Kapitel fünf wurde ausschließlich mit der Schülergruppe am KIT durchgeführt. Hier traten keine nennenswerten Probleme auf. Die Schüler schienen davon beeindruckt zu sein, dass mit einfachen Mitteln ein eigenes digitales Thermometer realisiert werden kann.

## 6.3.6 Kapitel 6 – Wir bauen einen digitalen Kraftsensor

Kapitel sechs dient der Einführung des digitalen Messwerterfassungssystems PhyPiDAQ am Beispiel eines digitalen Kraftsensors auf Basis einer Wägezelle.

### 6.3.6.1 Lernziele

Die Schüler ...

- ... erkennen die Vorteile des Einsatzes eines digitalen Messwerterfassungssystems.
- ... können PhyPiDAQ für eine Messaufgabe konfigurieren.
- ... kennen den Aufbau eines Kraftsensors und können seine Funktionsweise erklären.
- ... kennen die Wheatstonesche Messbrücke als wichtige Auswerteschaltung für Sensoren und können ihre Funktionsweise erklären.
- ... erkennen die Notwendigkeit einer analogen Vorverstärkung bei Sensorsignalen mit kleiner Amplitude.
- ... können den Zusammenhang zwischen dem selbst programmierten digitalen Thermometer und den Abläufen in PhyPiDAQ herstellen.
- ... erkennen den Alltagsbezug digitaler Messwerterfassung.
- ... vertiefen ihr Verständnis für das „Grundprinzip der digitalen Messwerterfassung“.

### 6.3.6.2 Methodisch didaktische Analyse

Beim Bau des digitalen Kraftsensors findet mit der Wägezelle, wie sie in digitalen Waagen zum Einsatz kommt, ein Alltagsgegenstand Einzug in den Kurs. Damit soll den Schülern ein klarer Bezug von Einführungskurs zu ihrer Lebenswelt aufgezeigt werden. Mit Hilfe eines einführenden Textes, Infotexten und Abbildungen wird den Schülern dieser Bezug gleich zu Beginn des Kapitels verdeutlicht. Als Abbildungen kommen Fotos zum Einsatz. Diese werden gewählt, damit die Schüler konkrete Bauteile wie Wägezelle oder Widerstandsdrähte der Dehnungsmessstreifen im Experiment schnell erkennen. Zudem kommen Prinzipskizzen und Schemazeichnungen zum Einsatz, bei denen „Details, die vom eigentlichen Inhalt eher ablenken, [...] einfach weggelassen werden [können]“ (Girwidz, 2015a, S. 206). Sie dienen dem Verständnis des Funktionsprinzips der Wägezelle. Wie in den vorherigen Kapiteln sollen Aufgaben das Verständnis der Schüler vertiefen und eine erste Lernzielkontrolle darstellen.

Da Kapitel sechs sehr umfangreich ist, soll den Schülern eine Art roter Faden an die Hand gegeben werden, sodass sie zu jeder Zeit wissen, an welcher Stelle des „Grundprinzips der digitalen Messwerterfassung“ sie sich gerade befinden. Das zugehörige Schema wird deshalb immer wieder dann abgebildet, wenn die Schüler beim folgenden Schritt des Grundprinzips ankommen. Um zudem die Motivation der Schüler bei der Bearbeitung des Kapitels hoch zu halten, wird versucht, das Kapitel problemorientiert zu gestalten, es wird also „die Problemstellung herausgearbeitet und ein Erklärungsbedürfnis geweckt [...]“ (Girwidz, 2015a, S. 239). Dies geschieht erstmalig beim Schaltungsentwurf. Der folgende Lösungsansatz mit den Aufgaben vier bis neun soll dann dem Erklärungsbedürfnis nachkommen. Durch die Erarbeitungsphase anhand von Aufgaben sollen eine möglichst hohe Schüleraktivierung und ein möglichst großes Verständnis über die Thematik erreicht werden. Da das Verständnis über die Funktionsweise einer Kombination zweier Spannungsteiler als Wheatstonesche Messbrücke im Vordergrund steht (und nicht die Fähigkeit, anhand konkreter Zahlenwerte Gleichungen zu lösen), liefern die Aufgaben keine Zahlenwerte, sondern qualitative Aussagen. Mit der Anwendung der Wheatstoneschen Messbrücke im Ausschlagverfahren lernen die Schüler eine der wichtigsten Schaltungen in der Messtechnik kennen, die in sehr vielen Sensoren zum Einsatz kommt.

Die Realisierung des digitalen Kraftsensors ist erneut relativ kochrezeptartig gestaltet. Dies liegt darin begründet, dass viele Schritte ausgeführt werden müssen, die nicht intuitiv erschlossen werden können und somit einer genauen Anleitung bedürfen. Dennoch bietet dieses Unterkapitel die Möglichkeit zu einem bedeutenden Lernfortschritt: Die Schüler stellen fest, dass die Abläufe denen beim digitalen Thermometer entsprechen. Zusätzlich realisieren sie, dass das Programm PhyPiDAQ die Möglichkeit zur grafischen Anzeige und zu einer auf die Messaufgabe angepassten

Konfiguration bietet. Sie erkennen folglich, dass PhyPiDAQ einen entscheidenden Vorteil gegenüber der „eigenen“ Programmierung bietet: Es ist nicht nötig, für jede Messaufgabe ein eigenes Programm zu schreiben. Durch das Erkennen dieses Vorteils erhofft man sich, dass die Schüler motiviert werden, auch in den eventuell folgenden Projekten oder Anwendungen in Versuchen im Physikunterricht gerne mit PhyPiDAQ zu arbeiten. Der vorläufige Test in Unterpunkt „8“ soll den Schülern dann ein erstes Erfolgserlebnis bereiten und zeigen, dass ihr digitaler Kraftsensor ein Signal produziert; zusätzlich leitet er zum folgenden Abschnitt über, da er die Notwendigkeit einer analogen Vorverstärkung deutlich macht.

Ab Unterpunkt „9“ beschäftigt sich der Kurs dann mit dem Instrumentenverstärker. Auf die Funktionsweise eines Instrumentenverstärkers wird an dieser Stelle nicht eingegangen, da dies die Schüler von der eigentlichen Aufgabe ablenken würde. Wie auch der vorherige Abschnitt beginnt dieser Teil mit einer Problemstellung, die den Schülern die Notwendigkeit der folgenden Arbeitsschritte verdeutlichen soll. Aus oben genannten Gründen ist die Anleitung ab Unterpunkt „12“ erneut relativ kochrezeptartig gehalten. Die Anleitung erhält eine „Zusatzinformation zur Schaltung für Interessierte“. Diese beinhaltet Informationen, die für die Durchführung des Kurses nicht essentiell sind und von denen angenommen wird, dass sie leistungsschwächere Schüler überfordern, bzw. verwirren könnte. Um interessierten, leistungsstarken Schülern dennoch eine Möglichkeit zu geben, die Schaltung im Detail nachvollziehen zu können, werden die dazu nötigen Informationen deshalb in dieser Form bereitgestellt; es handelt sich also um eine Leistungsdifferenzierung. Wie gewohnt steht am Ende des Kapitelabschnitts ein Test des Schaltungsaufbaus und der vorgenommenen Konfiguration von PhyPiDAQ, der auch der Aufrechterhaltung der Motivation seitens der Schüler dienen soll.

Das erneut folgende Schema zum „Grundprinzip der digitalen Messwerterfassung“ und Punkt „13“ leiten dann zur Kalibrierung über, indem sie deren Notwendigkeit für den Bau des digitalen Kraftsensors aufzeigen. Bei der Kalibrierung selbst sollen die Schüler erstens die Kalibrierung erneut üben; zweitens sollen sie für die weitere Arbeit mit PhyPiDAQ motiviert werden, indem sie Folgendes erkennen: Durch PhyPiDAQ lassen sich (im Gegensatz zur Messung „von Hand“) innerhalb kurzer Zeit ohne großen Aufwand sehr viele Messwerte erfassen und anschließend bspw. mit einem Tabellenkalkulationsprogramm verarbeiten. Der abschließende Test des aufgebauten Federpendels soll den Schülern dann ein Erfolgsgefühl vermitteln, dass sie mit relativ einfachen Mitteln einen digitalen Kraftsensor gebaut haben, der in Physikexperimenten zum Einsatz kommen kann. Man erhofft sich dadurch, dass die Schüler beim Einsatz von PhyPiDAQ motiviert mitarbeiten oder sogar interessiert daran sind, eigene Messprojekte durchzuführen.



Der Kurs endet mit einer kurzen Zusammenfassung einiger Beobachtungen zum Federpendel. Es wäre an dieser Stelle auch noch möglich gewesen, die digitalen Messwerte zur erfassen und auszuwerten. Es wird jedoch als sinnvoll empfunden, den Kurs für die Schüler mit einer praktischen Tätigkeit wie dem Test des Federpendels zu beenden, bei der hoffentlich ein gewisser Stolz über die erfolgreiche Bearbeitung des Kurses auch nach Abschluss des Kurses bestehen bleibt. Müssten die Schüler im Anschluss noch eine theoretische Aufgabe bearbeiten, so wird angenommen, dass dies dem gewünschten Effekt entgegenwirken würde. Zudem würde dann nicht mehr die digitale Messwerterfassung, sondern das Federpendel thematisch im Zentrum stehen.

#### 6.3.6.3 Kritische Betrachtung

Kapitel sechs wurde nur mit der leistungsstarken Gruppe von Zwölftklässlern am KIT durchgeführt. Hierbei traten im Wesentlichen nur Probleme mit den Konfigurationsdateien im yaml-Format auf. Ein fehlendes Leerzeichen kann bspw. dazu führen, dass die Konfiguration fehlerhaft ist. Die Schüler sollten zwar lernen, dass beim Programmieren sorgfältig gearbeitet werden und auf Kleinigkeiten geachtet werden muss, trotzdem besteht an dieser Stelle noch Optimierungsbedarf an PhyPiDAQ. Es sollten zumindest differenzierte Fehlermeldungen generiert werden, die Hilfe bei der Fehlersuche bieten.

### 6.4 Weitere kritische Anmerkungen zum Einführungskurs

Am Ende der beiden Tests des Einführungskurses wurde jeweils eine Kurzevaluation durchgeführt. Diese ergab im Wesentlichen, dass es den Schülern Spaß machte, den Einführungskurs durchzuführen. Die Tatsache, dass die Schüler innerhalb des Kurses selbst aktiv werden, Schaltungen auf dem Breadboard aufbauen und programmieren durften wurde mehrfach positiv hervorgehoben. Hierbei wurde auch darauf hingewiesen, dass dies einen Kontrast zum Schulalltag darstellt. Zudem wurde angegeben, dass die Mischung aus theoretischen und praktischen Anteilen als gelungen empfunden wurde.

Von einzelnen Schülern der leistungsstarken Zwölftklässler, die in den Ferien zum Praktikum am KIT waren, wurde angemerkt, dass aus ihrer Sicht der Kurs an einzelnen Stellen zu ausführlich gehalten ist. Hier zeigt sich die besondere Herausforderung, in einem solchen Einführungskurs dem unterschiedlichen Wissensstand und Leistungsvermögen gerecht zu werden. Je nach persönlicher Voraussetzung kann die Einschätzung verschiedener Schüler in diesem Punkt weit auseinandergehen. Der Einführungskurs stellt in seiner ausgearbeiteten Form einen Kompromiss dar, um Schülern mit unterschiedlichen Voraussetzungen gerecht zu werden.

Besonders bemerkenswert ist die unterschiedliche Einschätzung von Schülern und Lehrern bezüglich des Einsatzes des Breadboards im Physikunterricht. Die Verwendung des Breadboards wurde von den Schülern ausdrücklich als besonders positiv erwähnt, während sämtliche Lehrer den Einsatz eines Breadboards im Schulalltag als kritisch ansahen. Von einzelnen Schülern wurden vorgefertigte Steckbretter, die den Schaltungsaufbau bereits nahelegen, als „Kindergarten“ bezeichnet und hervorgehoben, dass sie mit „echter Technik“ arbeiten wollen. Dieser Aspekt wurde in dieser Form nicht erwartet und könnte darauf hindeuten, dass der Einsatz von handelsüblicher Technik im Unterricht eine motivierende Wirkung auf Schüler haben kann. Von Seiten der Lehrkräfte wurde insbesondere erwähnt, dass die Kontakte auf dem Breadboard sehr klein sind, nicht alle Schüler in der Lage seien, eine funktionstüchtige Schaltung auf einem solchen Breadboard aufzubauen und die Betreuung im Unterricht kaum möglich sei. Die Betreuung stellt in der Tat eine Herausforderung dar, da die Lehrkraft auf die einzelnen Kleingruppen individuell eingehen muss und die Gruppe daher nicht zu groß werden darf. Der Umgang der Schüler mit den Breadboards erfolgte jedoch unerwartet unkompliziert. Die Schüler konnten den Aufbau des Breadboards schnell erfassen und im Normalfall war in jeder Gruppe mindestens ein Schüler, der aufkommende Probleme beim Schaltungsaufbau selbständig lösen konnte. Sollten sich bei einer Durchführung des Kurses hier große Unterschiede zwischen den Gruppen ergeben, so könnte diesem Effekt durch ein Anpassen der Gruppenzusammensetzung entgegengewirkt werden. Diese kann auch für den leistungsfähigeren Partner in einer Gruppe den Lerneffekt erhöhen, da dieser beim Erklären das Gelernte wiederholt, neu ordnet und damit festigt.

Zudem waren einzelne Lehrkräfte skeptisch, da durch einen fehlerhaften Schaltungsaufbau einzelne Bauteile zerstört werden können. Während des Tests wurde lediglich ein Potentiometer durch eine fehlerhafte Schaltung zerstört. Dies stellt jedoch kein Problem dar, da sich ein Ersatz sehr kostengünstig beschaffen lässt. Solange eine solche Zerstörung eines Bauteils nicht mutwillig erfolgt, birgt diese durchaus Lernpotential. Nur in einer komplett vorgegeben Lernumgebung passieren keine Fehler. Dürfen die Schüler jedoch selbst experimentieren, so sehen sie, dass unsorgfältiges Arbeiten oder ein fehlerhafter Aufbau beim Experimentieren konkrete Folgen haben. Außerdem ist die Fehlersuche und –behebung selbst ein Aspekt, der mit Schülern geübt werden sollte und bietet die Möglichkeit für einen wesentlich verstärkten Lerneffekt bei den Schülern. Um einen Fehler bzw. ein Problem zu lösen, ist es essentiell, den Aufbau zu verstehen, sodass die Schüler für eine erfolgreiche Problemlösung gezwungen sind, sich intensiv mit dem Lerngegenstand auseinanderzusetzen.

## 7 Mögliche Projekte aufbauend auf PhyPiDAQ

Der nachfolgende Abschnitt stellt Projekte vor, wie sie aufbauend auf PhyPiDAQ mit Schülern in Projektphasen durchgeführt werden könnten. In diesem Bereich besteht auch die Möglichkeit zur Vergabe von GFS für besonders interessierte Schüler. Die Projekte stellen einen wesentlich höheren Anspruch an die Schüler als der Einführungskurs und der Einsatz von PhyPiDAQ in seiner bestehenden Form. Die Schüler müssen hier selbst planen, das Projekt durchführen und überprüfen, ob sie die zu Beginn gesteckten Projektziele erreicht haben bzw. im Falle eines Scheiterns die Gründe dafür analysieren.

### 7.1 Physik im Aufzug mit dem Beschleunigungssensor ADXL335

Ziel dieses Projekts ist es, die Beschleunigungswerte während einer Aufzugsfahrt digital zu messen und auszuwerten. Der Fokus liegt in diesem Projekt auf der Kalibrierung, Messwertaufnahme und Datenauswertung. Eine eigene Programmierung ist nicht notwendig. Der ADXL335 ist ein analoger Beschleunigungssensor, dessen Ausgangsspannung mit dem AD-Wandler digitalisiert werden kann.

#### 7.1.1 Der Schaltungsaufbau auf dem Breadboard mit dem ADXL335

Der analoge Beschleunigungssensor liefert für die drei Achsen x, y und z analoge Ausgangsspannungen, die über eine Offsetspannung verfügen, um auch negative Beschleunigungen messen zu können. Diese Offsetspannung kann entweder softwareseitig durch Anwenden einer Formel auf den digitalisierten Wert oder schaltungstechnisch kompensiert werden. Die schaltungstechnische Variante hat den Vorteil, dass dann die programmierbare Verstärkung des AD-Wandlers ADS1115 genutzt werden und so eine bessere Auflösung erreicht werden kann. Diese Kompensation erfolgt durch eine differenzielle Messung.

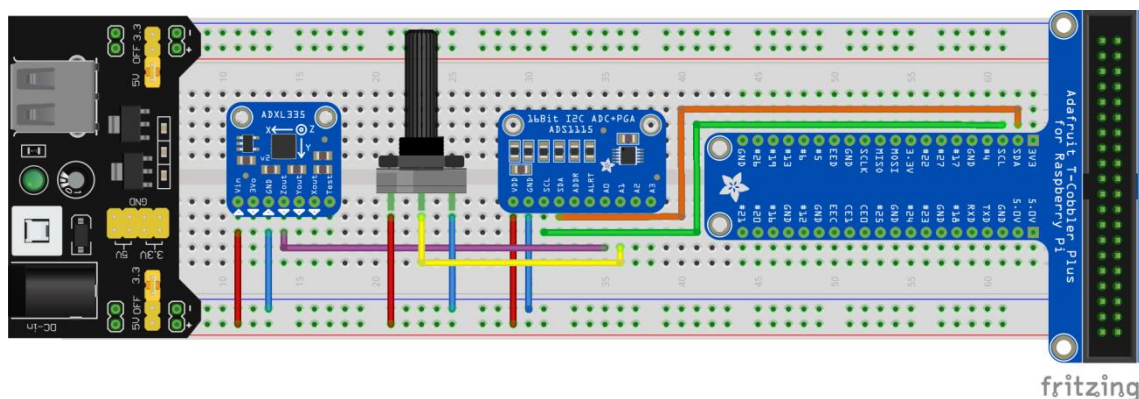


Abb. 7-1: Möglicher Schaltungsaufbau auf dem Breadboard für den Sensor ADXL335 (Quelle: Eigene Darstellung)

Ein möglicher Schaltungsaufbau auf dem Breadboard ist in Abb. 7-1 dargestellt. Vom Potential des analogen Messsignals am Anschluss A0 des AD-Wandlers wird das Potential des Mittelabgriffs eines 10 k $\Omega$  Potentiometers an Anschluss A1 subtrahiert. Über das Potentiometer kann so das Potential zur Kompensation der Offsetspannung eingestellt werden.

### 7.1.2 Kalibrierung des Beschleunigungssensors

Da der Beschleunigungssensor einen Linearitätsfehler von  $\pm 0,3$  % des maximalen Messwerts von 3g besitzt, reicht für die geplante Anwendung eine relativ einfach Kalibrierung (Analog Devices, 2009). Dazu wird die digitalisierte Spannung für den Fall gemessen, dass das Breadboard mit dem entsprechenden Aufbau auf dem Tisch steht. Anschließend wird das Breadboard auf dem Kopf von unten gegen die Tischplatte gehalten und abermals die digitalisierte Spannung gemessen. Die resultierende Spannungsdifferenz entspricht dann 2g und es kann ein Kalibrationsfaktor für die Messung der Beschleunigung bestimmt werden.

### 7.1.3 Mögliche Aufgabenstellungen

Bei der Datenauswertung sind verschiedene Schwierigkeitsstufen denkbar. Zum einen kann eine simple Fahrtrichtungserkennung des Aufzugs diskutiert werden. Zum anderen könnte auch eine Art Detektivspiel gestaltet werden. Die Klasse könnte in Gruppen unterteilt die Beschleunigungswerte während einer Aufzugfahrt messen. Die Aufgabe könnte dann darin bestehen, die Aufzugfahrt anhand der Messdaten zu rekonstruieren bzw. zu ermitteln, in welches Stockwerk die Schüler gefahren sind. Eine weitere Möglichkeit ist es, die Geschosshöhe aus dem Beschleunigungsverlauf einer Aufzugfahrt zwischen zwei Stockwerken zu bestimmen. Wichtig ist hierbei, dass kein hydraulischer Aufzug, sondern ein Seilaufzug verwendet wird. Die Tests wurden mit dem Seilaufzug im Physikhochhaus des KIT durchgeführt. Ein Test in einem hydraulischen Aufzug ergab keine zufriedenstellenden Ergebnisse.

### 7.1.4 Datenauswertung

Nachfolgend wird auf die Datenauswertung im Falle einer Bestimmung der Geschosshöhe aus dem Beschleunigungsverlauf einer Aufzugfahrt eingegangen. Im einfachsten Fall erfolgt die Datenauswertung mit dem Tabellenkalkulationsprogramm LibreOffice Calc auf dem Raspberry Pi. Die Auswertung kann aber auch mit python erfolgen. Mit der matplotlib-Bibliothek lassen sich beispielsweise wesentlich schönere Diagramme erstellen als in Libre-Office Calc. Für den Beginn bietet sich für den Einsatz mit den Schülern ein Tabellenkalkulationsprogramm trotzdem an, da dieses Vorgehen häufig schon vertraut ist bzw. vertraut sein sollte.

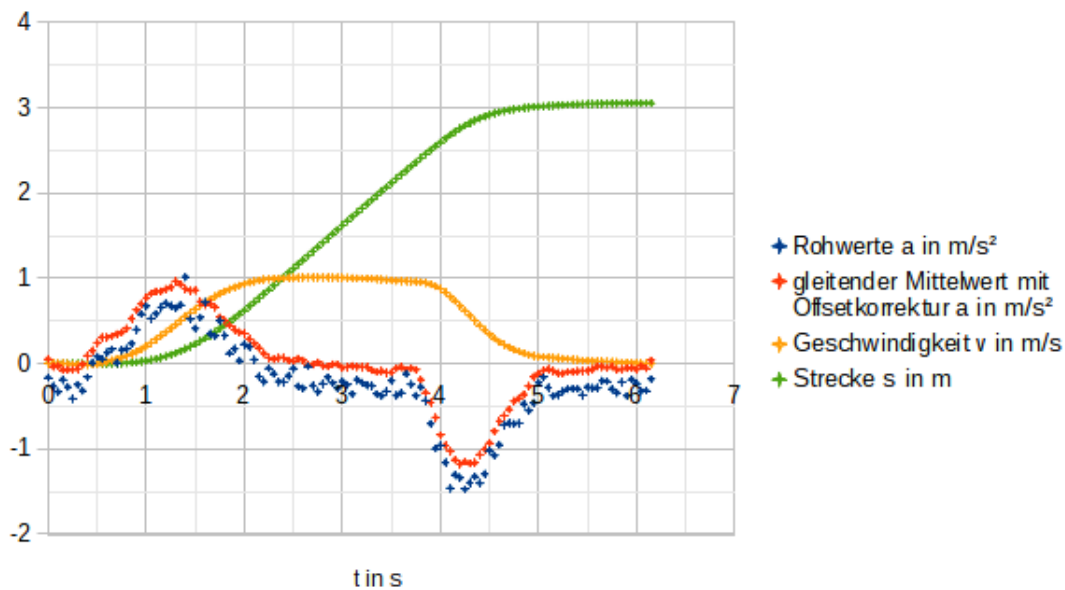


Abb. 7-2: Beschleunigung, Geschwindigkeit und Strecke einer Aufzugfahrt (aufwärts) im Physikhochhaus des KIT (Quelle: Eigene Darstellung)

In Abb. 7-2 ist beispielhaft eine Aufzugfahrt (aufwärts) zwischen zwei Stockwerken im Physikhochhaus des KIT dargestellt. Die zugehörigen Rohwerte der Messung können dem Anhang 6 dieser Arbeit entnommen werden.

Im Rahmen der Datenauswertung können Schülern Vorteile der digitalen Messwerterfassung und –auswertung aufgezeigt werden. In blau sind die gemessenen Rohwerte der Beschleunigung dargestellt. Die rot dargestellten Messwerte entsprechen den durch eine gleitende Mittelwertbildung (über fünf Messwerte) gefilterten Rohwerten, die zusätzlich einer Offsetkorrektur unterzogen wurden. Hierbei kann aufgezeigt werden, wie mit einfachen Mitteln ein verrauschtes digitales Messsignal aufbereitet werden kann. Mit dem Tabellenkalkulationsprogramm ist es darüber hinaus sehr einfach, eine Integration der Beschleunigung durchzuführen und dadurch den Geschwindigkeitsverlauf (orange) zu erhalten. Dazu benötigen die Schüler keine Kenntnisse über das Integrieren aus dem Mathematikunterricht. Die Integration kann durch simples Aufaddieren der Fläche unter der Kurve erfolgen, was für die Schüler auch ohne die entsprechenden mathematischen Vorkenntnisse verständlich gemacht werden kann. Mit demselben Verfahren kann anschließend auch der Zusammenhang zwischen zurückgelegter Strecke und Geschwindigkeit bestimmt werden. Im dargestellten Beispiel ergibt sich eine Geschosshöhe von ca. 3 m. Es handelt sich um eine sehr ungenaue Messung der Geschosshöhe, was aber an dieser Stelle auch nicht im Fokus steht. Der Fokus liegt darauf, die Möglichkeiten der Auswertung digitaler Messwerte und die Zusammenhänge zwischen Beschleunigung, Geschwindigkeit und zurückgelegter Strecke des Aufzugs aufzuzeigen.

## 7.2 Höhenbestimmung mit dem Luftdruck- und Temperatursensor BMP280

Ziel dieses Projektes ist es, den Luftdruck- und Temperatursensor BMP280 in PhyPiDAQ einzubinden und mit Hilfe gewonnener Messdaten die Höhe eines größeren Gebäudes (z.B. Schulhaus) oder eines anderen Objekts (z.B. Turmberg in Durlach) zu bestimmen.

Der kalibrierte Luftdruck- und Temperatursensor BMP280 wurde von Bosch für den Einsatz in Smartphones, Uhren, Navigationsgeräten und anderen mobilen Geräte konzipiert. Der Sensor kommt beispielsweise in den I-Phones von Apple zum Einsatz (t3n digital pioneers, 2017). Anwendung findet der Sensor in der Wettervorhersage sowie Indoor- (Stockwerkerkennung) und Outdoor-Navigation. Er liefert als digitales Ausgangssignal den Luftdruck und die Temperatur. Die Messung des Luftdrucks basiert dabei auf dem in 3.5 vorgestellten piezoresistiven Messprinzip. Die relative Genauigkeit des Sensors im Falle der Luftdruckmessung liegt dabei bei  $\pm 0,12$  Pa, was bei einer Höhenbestimmung ungefähr  $\pm 1$  m entspricht. Um diese Genauigkeit in der Realität zu erreichen, ist eine entsprechende Signalfilterung notwendig, da bereits durch das Öffnen oder Schließen von Fenstern und Türen geringe Druckschwankungen entstehen können (Bosch Sensortec GmbH, 2018). Eine solche Filterung lässt sich auf dem Sensor konfigurieren, kann aber beim Einsatz in der Schule auch durch eine einfache Mittelwertbildung bei der Auswertung der Messdaten erfolgen. Zudem kann die Messaufgabe (hohes Gebäude) so gewählt werden, dass es eine untergeordnete Rolle spielt, ob die mögliche Messgenauigkeit tatsächlich erreicht wird.

### 7.2.1 Einbinden des Sensors BMP280 in PhyPiDAQ

Für die Einbindung des Sensors BMP280 in PhyPiDAQ müssen nur ein entsprechendes Softwaremodul `BMP280Config.py` und eine Konfigurationsdatei `BMP280Config.yaml` erstellt werden. Hierfür können die entsprechenden Dateien anderer Sensoren als Vorlage genutzt werden, da der grundsätzliche Aufbau wie bereits erwähnt immer identisch ist. Zur Entwicklung des notwendigen Programmcodes können zum einen das Datenblatt des Sensors wie auch ein von Plate (2018) erstelltes Projekt zur Luftdruckmessung mit dem Sensor BMP280 herangezogen werden.

### 7.2.2 Der Schaltungsaufbau auf dem Breadboard mit dem BMP280

Der Schaltungsaufbau auf dem Breadboard gestaltet sich sehr einfach, da der Drucksensor digitale Werte über den I2C- oder SPI-Bus liefert und sich der Aufbau somit auf wenige Steckverbindungen beschränkt. Nachfolgend in Abb. 7-3 ist beispielhaft ein solcher Aufbau auf dem Breadboard dargestellt.

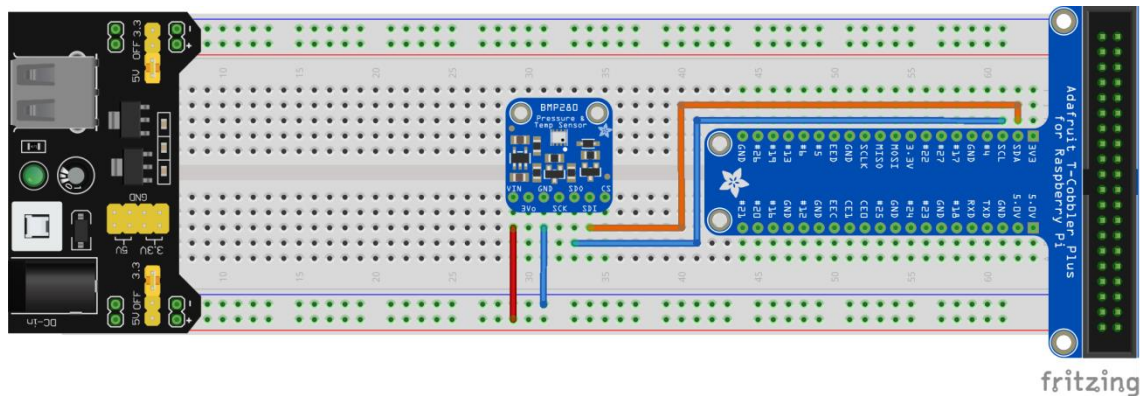


Abb. 7-3: Möglicher Schaltungsaufbau auf dem Breadboard für den Sensor BMP280  
(Quelle: Eigene Darstellung)

### 7.2.3 Höhenbestimmung mit der barometrischen Höhenformel

Mittels der barometrischen Höhenformel kann über den gemessenen Luftdruck auf eine Höhendifferenz geschlossen werden. Auf diese Weise kann, wie oben beschrieben, zum Beispiel die Höhe eines größeren Gebäudes oder eines anderen hohen Objekts bestimmt werden. Für die Druckänderung  $dp$  ergibt sich in Abhängigkeit von der mittleren molaren Masse  $M$ , der Gravitationsfeldstärke  $g$ , der Temperatur  $T$  und der Höhenänderung  $dh$  mit der universellen Gaskonstante  $R$  nach Roedel und Wagner (2017)

$$dp = -p \cdot \frac{Mg}{RT} \cdot dh. \quad (7.1)$$

Geht man davon aus, dass sich die Zusammensetzung der Umgebungsluft nicht ändert, die Gravitationsfeldstärke für kleine Höhendifferenzen konstant ist und die Temperatur als konstant angenommen werden kann (Bsp.: Aufzugfahrt), so ergibt sich nach einer Integration mit dem Luftdruck auf Bezugshöhe  $p_0$

$$p(h) = p_0 \cdot e^{-\frac{Mg}{RT}h}. \quad (7.2)$$

Wendet man diese Gleichung nun auf das Problem einer Höhenbestimmung eines Gebäudes an, so kann man mit dem Luftdruck auf Bezugshöhe  $p_0$  und einem zweiten Druck  $p_1$  bspw. auf Höhe des obersten Stockwerks die Höhendifferenz  $\Delta h$  bestimmen zu

$$\Delta h = \frac{RT}{Mg} \cdot \ln\left(\frac{p_0}{p_1}\right). \quad (7.3)$$

### **7.3 Telemetrie mit einem digitalen Beschleunigungssensor (MMA8451)**

Das nachfolgend beschriebene Projekt ist wesentlich anspruchsvoller als die zuvor beschriebenen Projekte. In diesem Fall bietet sich am technischen Gymnasium die Kooperation mit dem Fach Computertechnik an. Am Gymnasium könnte ein solches Projekt im Rahmen des neuen Fachs IMP stattfinden. Der Bau einer kleinen und leichten Telemetrie-Box mit einem Beschleunigungssensor stellt auch in Hinblick auf das Internet der Dinge (IoT) eine reizvolle Aufgabe dar. Speziell im Falle eines Beschleunigungssensors macht das besonders Sinn, da Leitungsverbindungen bei Beschleunigungsvorgängen meist hinderlich sind und ein Aufbau mit zu hoher Masse in vielen Fällen nicht verwendet werden kann.

#### **7.3.1 Komponenten und Aufbau der Telemetrie-Box**

In einer entsprechenden Telemetrie-Box kann das 2.4GHz-Transceiver-Modul nRF24L01 für die Datenübertragung zum Einsatz kommen. Der Transceiver ist auch mit einer externen Antenne erhältlich, wenn eine besonders große Reichweite gewünscht ist. Als Sensor bietet sich an dieser Stelle der digitale und kalibrierte Beschleunigungssensor MMA8451 an. Da das Sendemodul möglichst klein und leicht gehalten werden sollte, wird ein kleiner Mikrocontroller (Arduino Nano/ATmega328) als Steuerungsmodul verwendet. Dieser übernimmt die Aufgabe, den Sensorwert des Beschleunigungssensors zyklisch abzufragen und diesen mittels des Transceivers an den Raspberry Pi zu senden. Die Spannungsversorgung erfolgt über einen kleinen Lithium-Polymer-Akkumulator mit einem Hochsetzsteller (MT3608), der die Spannung des Akkumulators an die notwendige Betriebsspannung des Mikrocontrollers anpasst. Um den Akkumulator unkompliziert laden zu können, kann ein entsprechendes Lademodul (Adafruit Micro-Lipo Charger) mit Micro-USB-Anschluss zum Einsatz kommen, sodass die Box mit dem Raspberry Pi Netzteil geladen werden kann. Für die Spannungsversorgung des Transceivers sollte noch ein Elektrolytkondensator vorgesehen werden, der Spannungsschwankungen ausgleicht. Über einen einfachen Schalter lässt sich die Sensorbox an- bzw. ausschalten. Sämtliche Komponenten lassen sich beispielsweise über den Elektronikhändler Eckstein mit Schulrabatt beziehen (Eckstein GmbH).

Der Gesamtaufbau der Telemetrie-Box ist so kompakt, dass er sich ohne weiteres in einer größeren Tic-Tac-Box unterbringen lässt (siehe Abb. 7-4).





Abb. 7-4: Möglicher Aufbau einer Telemetrie-Box (Quelle: Eigene Darstellung)

Eine Übersicht des gesamten Aufbaus ist in Abb. 7-5 dargestellt.

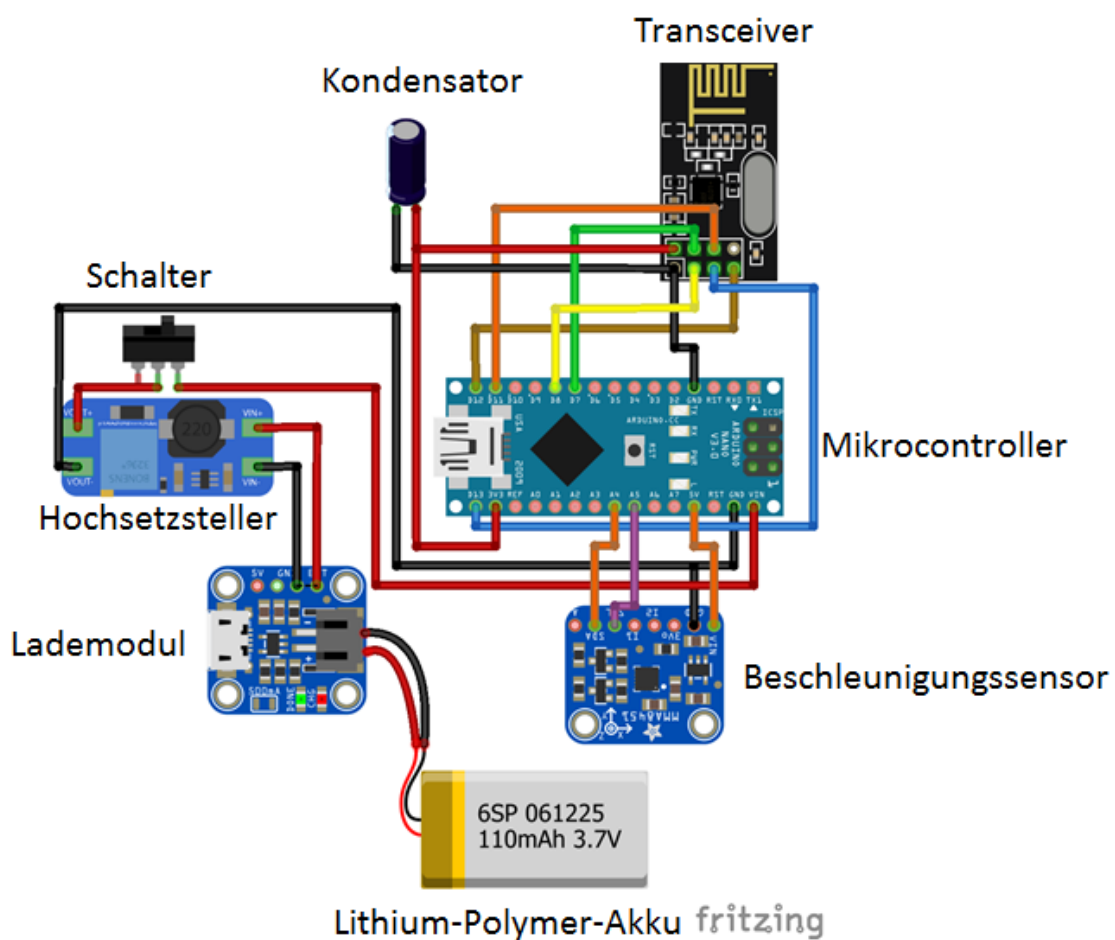


Abb. 7-5: Möglicher Aufbau Telemetrie-Box (Quelle: Eigene Darstellung)

### 7.3.2 Programmieren der Telemetrie-Box

Der Arduino sollte im einfachsten Fall in der Arduino-Programmierungsumgebung programmiert werden. Diese kann auch auf dem Raspberry Pi installiert werden. Für die Programmierung können Bibliotheken für den Beschleunigungssensor (Adafruit\_MMA8451\_Library) und den Transceiver (RF24) verwendet werden (Coliz, 2011; Townsend, 2012). Um den Programmcode möglichst einfach zu halten, reicht es

an dieser Stelle völlig aus, in einer Schleife den Sensorwert abzufragen und an den Raspberry Pi zu senden. Eine synchronisierte Zeitsteuerung ist hier nicht zwingend notwendig, da das Empfangsmodul den letzten gesendeten Wert speichert und die Sensorwerte mit einer relativ hohen Rate übertragen werden können. Als Basis für das Programm können die Beispiele, die in den jeweiligen Bibliotheken enthalten sind, herangezogen werden. Im Falle des Transceivers bietet das Beispielprogramm `pingpair_dyn` eine gute Grundlage für ein eigenes Programm zur Kommunikation mit einem Raspberry Pi. Außerdem kann ein Projekt zur Funkkommunikation zwischen Raspberry Pi und Arduino mit dem Transceiver-Modul nRF24L01 genutzt werden (Stern, 2016).

### 7.3.3 Anschluss des Transceiver-Moduls an den Raspberry Pi

Das Transceiver Modul kommuniziert über den SPI-BUS mit dem Raspberry Pi und muss an die entsprechenden GPIO-Pins des Raspberry Pi angeschlossen werden. Nachfolgend in Abb. 7-6 ist der entsprechende Aufbau dargestellt.

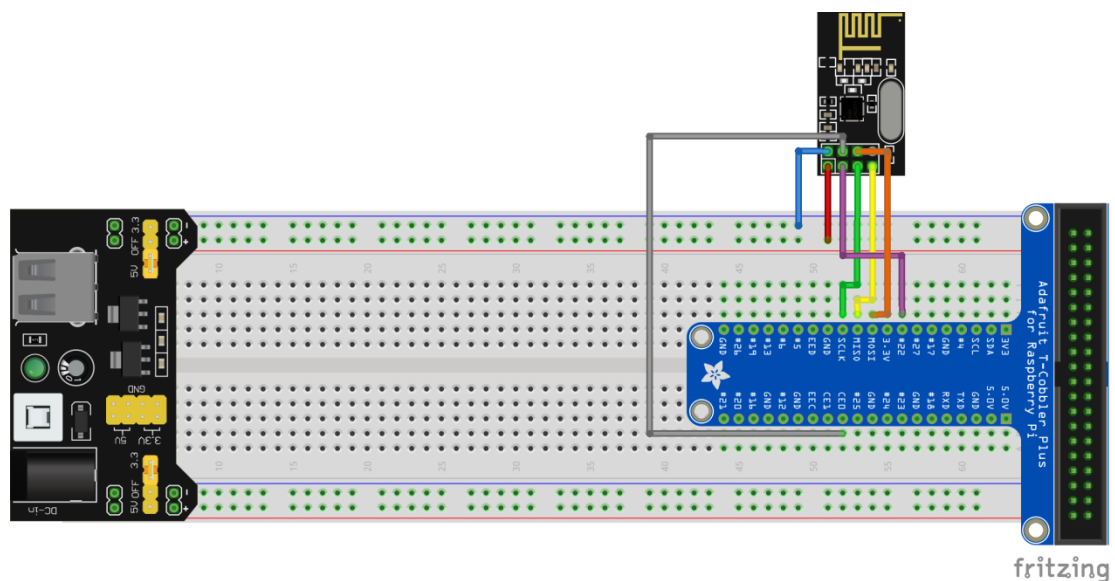


Abb. 7-6: Schematischer Aufbau des Breadboards mit dem Transceiver nRF24L01 (Quelle: Eigene Darstellung)

### 7.3.4 Einbinden der Telemetrie Box

Für die Einbindung der Telemetrie-Box in PhyPiDAQ müssen ein entsprechendes Softwaremodul `TelemetryConfig.py` und eine Konfigurationsdatei `TelemetryConfig.yaml` erstellt werden. Hierfür können die entsprechenden Dateien anderer Sensoren als Vorlage genutzt werden, da der grundsätzliche Aufbau wie bereits erwähnt immer identisch ist. Zur Entwicklung des notwendigen Programmcodes kann die Bibliothek RF24 und im Speziellen das Beispiel `pingpair_dyn.py` herangezogen werden (Coliz, 2011).

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Zu Beginn der Arbeit wurde folgende Forschungsfrage gestellt: Wie kann ein digitales Messwerterfassungssystem gestaltet werden, das möglichst viele Vorteile der vorgestellten Systeme (Cassy, PhyPhox) beibehält, gleichzeitig aber auch zum Verständnis von digitaler Messwerterfassung beiträgt, vergleichbare Messwerterfassung im Schülerexperiment möglich macht und erweiterbar ist?

Mit dem Softwarepaket PhyPiDAQ wurde im Rahmen dieser Arbeit der Grundstein für ein digitales Messwerterfassungssystem auf Basis des Einplatinencomputers Raspberry Pi für den Physikunterricht realisiert. Es bietet die Möglichkeit zur grafischen Anzeige erfasster digitaler Messwerte während einer Messung und zur Speicherung der Messdaten. Die Messdaten werden im CSV-Format gespeichert, sodass sie für die Auswertung mit Tabellenkalkulationsprogrammen oder anderen Möglichkeiten der Datenauswertung zur Verfügung stehen. PhyPiDAQ ist dabei transparent und relativ einfach erweiterbar gestaltet. Die Bedienung kann dabei sowohl direkt am Raspberry Pi als auch über VNC-Fernzugriff betriebssystemunabhängig von einem anderen Gerät aus erfolgen. Die Konfiguration des Systems erfolgt dabei entweder über Konfigurationsdateien oder über eine grafische Benutzeroberfläche, die den Einsatz in der Schule erleichtert. Aufgrund der geringen Kosten von knapp über 100€, die für eine Grundausstattung eines Messkoffers notwendig sind, können Schulen in der Regel so viele Messkoffer anschaffen, dass die Schüler Experimente in Partnerarbeit durchführen können. Die Nutzung digitaler Messwerterfassungssysteme bleibt so nicht mehr auf den Lehrer beschränkt.

Zudem wurde gefragt: Wie kann ein Einführungskurs aussehen, der die Prinzipien, die dem digitalen Messwerterfassungssystem zugrunde liegen, für die Schüler transparent macht?

Im Rahmen der Arbeit wurde ein Einführungskurs zur digitalen Messwerterfassung mit dem Raspberry Pi und PhyPiDAQ gestaltet und mit Elft- und Zwölftklässlern eines Technischen Gymnasiums getestet. Ziel dieses Kurses ist es, den Schülern ein Grundprinzip des digitalen Messens anhand von Beispielen mit Alltagsbezug näherzubringen und die Abläufe von PhyPiDAQ transparent zu machen. Der Kurs ist dabei so gestaltet, dass die Schüler mit einfachen Mitteln und Programmen eigene digitale Sensoren in Form einer Lichtautomatik und eines digitalen Thermometers realisieren. Mit der Realisierung eines digitalen Kraftsensors wird der Übergang von eigener Programmierung zum Einsatz des Messwerterfassungssystems PhyPiDAQ umgesetzt. Dabei steht immer das Verständnis für das zugrunde liegende Prinzip im Vordergrund.

Die Realisierung von PhyPiDAQ und des zugehörigen Einführungskurses stieß bei Lehrern und Schülern auf großes Interesse: So wurde im Rahmen eines Pädagogischen Tages eine Art Lehrerfortbildung zum Thema der vorliegenden Masterarbeit durchgeführt. Beim Schülerpraktikum am KIT meldeten sich trotz Herbstferien mehr Schüler an, als Plätze zur Verfügung standen. Auch weitere Lehrer waren daran interessiert, mehr über PhyPiDAQ zu erfahren. In den genannten Formaten sowie bei der teilweisen Durchführung des Einführungskurses an der Carl-Engler-Schule zeigte sich, dass PhyPiDAQ und der Einführungskurs insofern als gelungen betrachtet werden dürfen, dass Schüler und Lehrer sich größtenteils sehr gut im Programm und dem zugehörigen Kurs zurecht fanden; zudem schien ihnen die Bearbeitung größtenteils Spaß zu machen. Aus diesem Grund erscheint es lohnenswert, weitere Kapazitäten in das Projekt PhyPiDAQ zu investieren. So sollten die beschriebenen und weitere Sensoren getestet und auf dieser Basis Schülerversuche für den Physikunterricht gestaltet werden.

Die Fortführung des Projektes erscheint auch unter einem anderen Gesichtspunkt wichtig: Im Rahmen der PISA-Studie zeigte sich, dass 43% der deutschen Schüler, die nach ihrer PISA-Testleistung als hochkompetent in Naturwissenschaften eingestuft wurden, sich als naturwissenschaftlich nicht oder nur geringfügig interessiert bezeichneten (Prenzel, 2008). Auch wenn dieses Ergebnis bereits einige Jahre zurückliegt, so wird angenommen, dass es auch heute noch weitgehend gültig sein sollte, da viele der damals unterrichtenden Physiklehrer auch heute noch unterrichten und sich seit 2006 seitens der Fachdidaktik kein grundlegend neues Konzept für den Physikunterricht an Schulen flächendeckend durchgesetzt hat. Diesem Ergebnis müssen also Maßnahmen folgen, die das naturwissenschaftliche Interesse steigern. Euler erwähnt Schülerlabore als Lernorte, die „authentische Bezüge zur Lebenswelt her[stellen] [...] [und] die Möglichkeiten von Naturwissenschaft und Technik fassbar [machen]. Für die Gewinnung kreativer Köpfe werden in den Laboren sowohl die Faszination als auch die Verantwortung von Tätigkeiten in Wissenschaft und Technologie erlebbar“ (Euler, 2010, S. 817). Schülerlabore selbst werden von Euler dabei folgendermaßen verstanden:

Unter Schülerlaboren werden außerschulische Lernorte verstanden, die ganzen Schulklassen Begegnungen mit modernen Natur- und Ingenieurwissenschaften ermöglichen. Dies geschieht im Rahmen geeigneter Lernumgebungen mit Laborcharakter, die Schüler[...] zur aktiven Auseinandersetzung mit naturwissenschaftlichen und technischen Fragestellungen und Methoden anregen. Die Authentizität der Arbeitsweisen und Lernerfahrungen steht dabei im Zentrum. (Euler, 2010, S. 798)

Abgesehen von dem außerschulischen Lernort erfüllen der vorliegende Kurs und mögliche Anwendungen des entwickelten digitalen Messwerterfassungssystems alle

Kriterien des Schülerlabors und könnten somit einen Beitrag zu einer Steigerung des naturwissenschaftlichen Interesses unter Schülern führen. Dass der Kurs und die Arbeit mit PhyPiDAQ im Rahmen des Schulalltags stattfinden, muss zudem nicht unbedingt negativ bewertet werden: Zum einen ist die Realisierung an der eigenen Schule besonders für Schulen interessant, die sich nicht in der Nähe einer Universitätsstadt befinden und somit einen schlechten Zugang zu Schülerlaboren haben. Zum anderen können Schüler durch den regelmäßigen Einsatz von PhyPiDAQ an der eigenen Schule die Möglichkeiten, die ihnen ein naturwissenschaftliches Studium bieten könnte vielleicht sogar besser erahnen, als wenn sie das Labor nur einen Tag besuchen. Somit können sie im Rahmen eines zeitgemäßen Physikunterrichts eventuell sogar nachhaltiger für ein naturwissenschaftliches Studium motiviert werden.

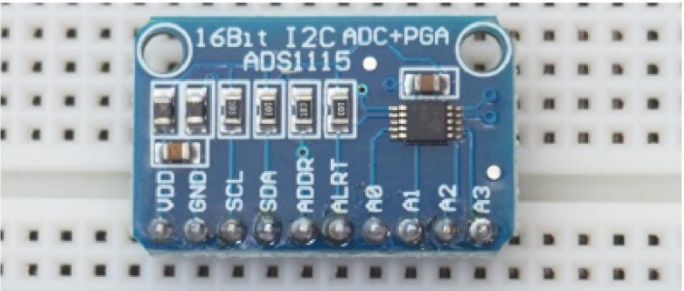
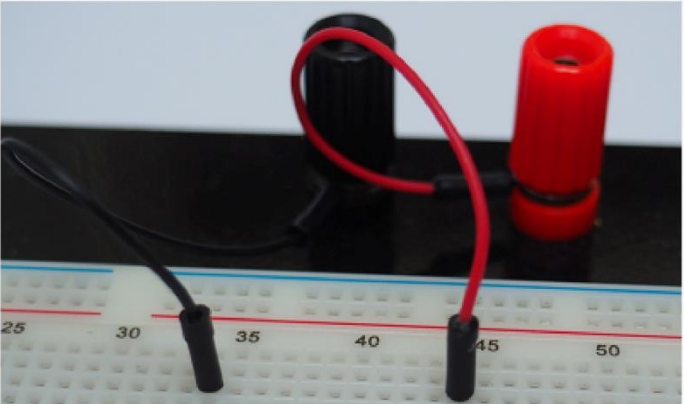


Für einen Wirtschafts- und Wissenschaftsstandort wie Deutschland ist genau diese Motivation für Naturwissenschaften an Schulen essentiell: Um den Standort in seiner heutigen Qualität aufrecht zu erhalten, müssen kontinuierlich neue kreative Köpfe gewonnen werden, die die Forschung vorantreiben und den aktuellen Herausforderungen gewachsen sind. Dafür muss das Interesse an Naturwissenschaften vor einem möglichen Studium, also in der Schule, geweckt werden. Hierzu könnten PhyPiDAQ und die sich daraus ergebenden Projekte einen wertvollen Beitrag leisten.

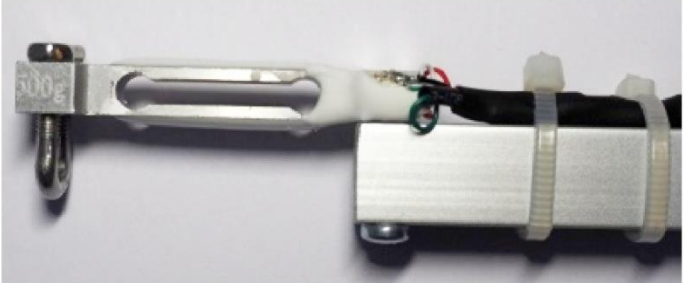

## Anhang

### Anhang 1: Einführungskurs zur digitalen Messwerterfassung mit dem Raspberry Pi und PhyPiDAQ


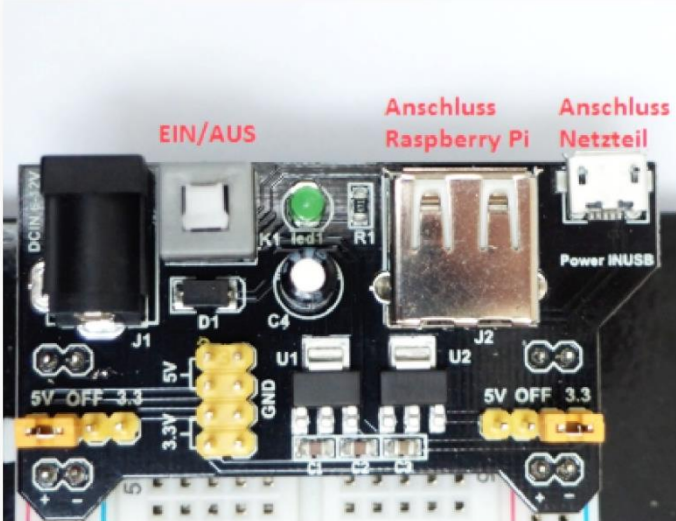
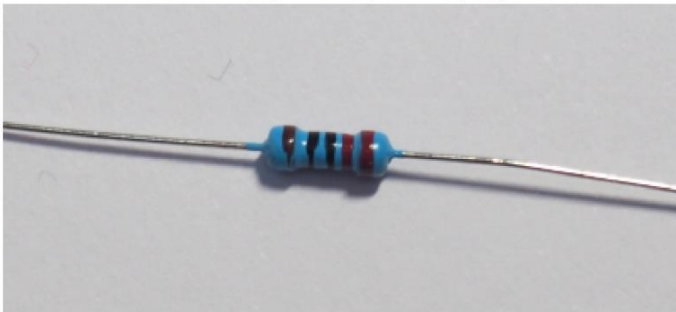


# Einführungskurs zur digitalen Messwerterfassung mit dem Raspberry Pi und PhyPiDAQ

Übersicht über wichtige Komponenten	
AD-Wandler ADS1115	 <p>A blue printed circuit board (PCB) for the ADS1115 16-bit I2C ADC+PGA is shown mounted on a white breadboard. The board features a central black integrated circuit (IC) and several surface-mount components. Labels on the board include '16Bit I2C ADC+PGA', 'ADS1115', and pin headers for 'VDD', 'GND', 'SCL', 'SDA', 'ADDR', 'ALRT', and four analog input pins labeled 'A0', 'A1', 'A2', and 'A3'.</p>
Bananenbuchse mit angeschlossener Breadboardleitung	 <p>A close-up view of a black banana plug connected to a red wire. The red wire is plugged into a breadboard. The breadboard's internal connections are visible, and the wire is secured with a black rubber band. The breadboard has a scale marked from 25 to 50.</p>
Fotowiderstand (LDR Typ5516)	 <p>A small, rectangular, light-sensitive resistor (LDR) sensor is shown. It has two long, thin metal leads extending from one end. The sensor itself is a small, dark, rectangular component with a wavy pattern on its surface.</p>
Instrumentenverstärker AD623	 <p>A black integrated circuit (IC) package for the AD623AN is shown. The package is a dual in-line package (DIP) with eight pins. The top of the package is labeled with 'AD623AN', '#1734', and '3948361'. A small triangle symbol is also visible on the package.</p>

Übersicht über wichtige Komponenten	
Keramikkondensator 0,1 $\mu\text{F}$	
Elektrolytkondensator 10 $\mu\text{F}$	
Kraftsensor, Wägezelle TAL220B	
NTC-Widerstand $R_{25} = 10 \text{ k}\Omega$	



Übersicht über wichtige Komponenten	
Potentiometer 10 kΩ	
Spannungsversorgung	 <p>The image shows a circuit board for voltage supply. It features a DC input jack (J1), a push button (K1) labeled 'EIN/AUS', a green LED (K1 led1), a resistor (R1), a USB port (J2), and a USB connector (U2). There are also two sets of 5V, OFF, and 3.3V output pins. Labels in red text indicate 'Anschluss Raspberry Pi' and 'Anschluss Netzteil'.</p>
Widerstand (Bsp. 10 kΩ)	<p>Farbcode: braun, schwarz, schwarz, rot, braun</p> 

# 1. Digitale Messtechnik

Digitale Messtechnik begegnet uns im Alltag überall. Die digitale Temperaturanzeige am Gefrierschrank, eine Pulsuhr beim Sport, eine digitale Küchenwaage oder die Einparkhilfe beim Auto...unsere Welt wäre eine andere ohne digitale Messtechnik!

**Aufgabe 1:** Nennen Sie drei weitere Geräte oder Anwendungen, in denen digitale Messtechnik vorkommt und nennen Sie die physikalische Größe, die dabei gemessen wird.

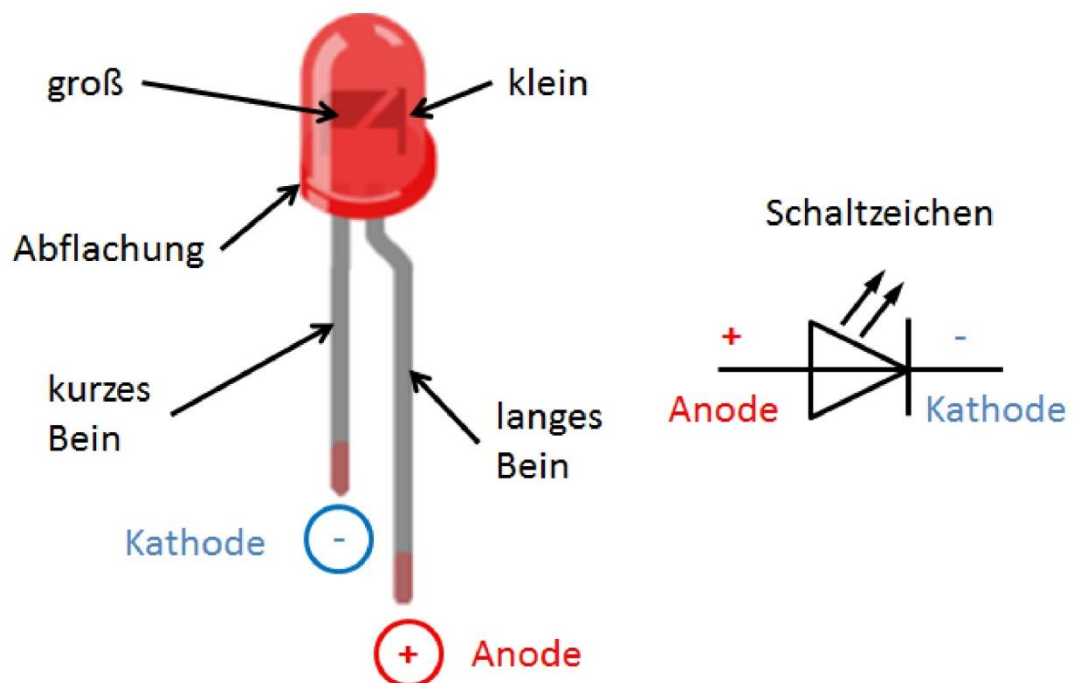
	Gerät / Anwendung	physikalische Größe
1.		
2.		
3.		

## 2. Das Breadboard und die LED

### Einführung

In den nächsten Stunden befassen wir uns damit, wie man digitale Messwerte erfassen und verarbeiten kann. Wir nutzen dabei ein Breadboard, auf dem wir die Schaltungen stecken sowie LEDs als Leuchtmittel. Zunächst schauen wir uns an, wie diese einzusetzen sind.

### Die LED

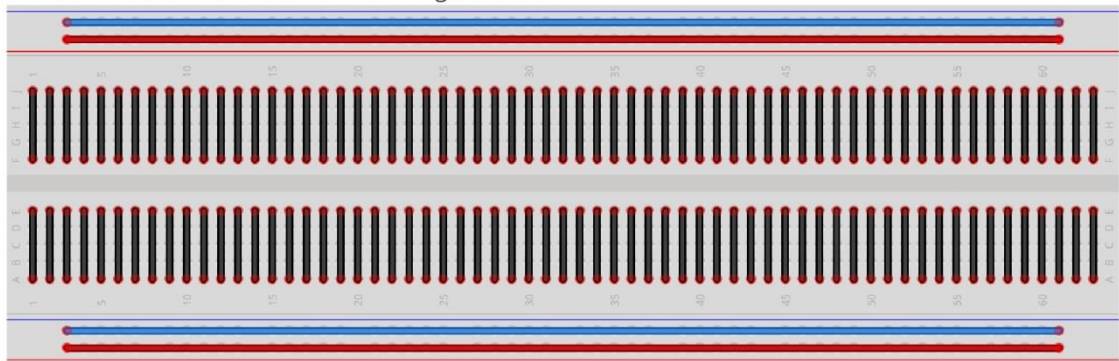


In unserem Projekt verwenden wir keine Glühlampen, sondern LEDs, wenn wir etwas optisch anzeigen wollen. **LED** ist die Abkürzung für **L**ight **E**mitting **D**iode, was auf Deutsch so viel bedeutet wie Licht emittierende bzw. aussendende Diode. Um die LED zum Leuchten zu bringen, kann diese im Gegensatz zu einer Glühlampe nicht einfach an eine Spannungsversorgung angeschlossen werden. Es sind **zwei Dinge** zu beachten:

1. Die LED muss immer mit einem **Widerstand (Vorwiderstand) in Reihe** betrieben werden, da sie sonst zerstört wird.
2. Die LED ist eine Diode und kann in Durchlass- oder in Sperrrichtung angeschlossen werden. Sie hat also eine **Anode** (Pluspol) und eine **Kathode** (Minuspol). Soll die **LED leuchten**, muss sie in Durchlassrichtung geschaltet werden, d.h. die **Anode** muss am **höheren Potential** angeschlossen werden.

## Das Breadboard

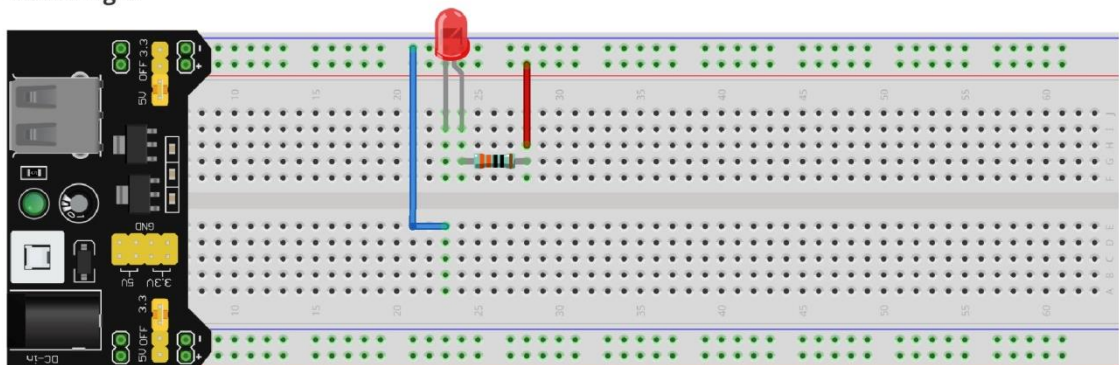
Auf dem Breadboard bauen wir unsere Schaltungen auf. Um die Schaltungen stecken zu können ist es wichtig zu wissen, wie das Breadboard aufgebaut ist. In der nachfolgenden Abbildung sind die elektrisch verbundenen Steckkontakte durch Linien gekennzeichnet.



fritzing

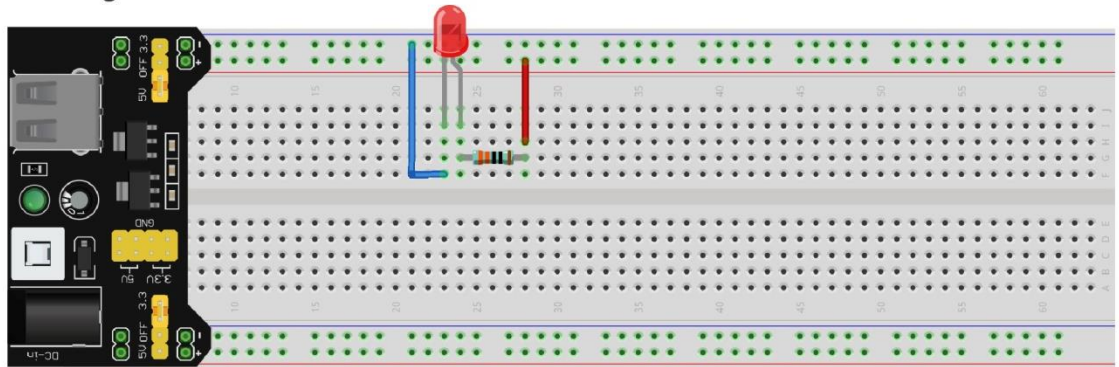
**Aufgabe 1:** In welcher der nachfolgend abgebildeten Schaltungen leuchtet die LED? Begründe.

**Schaltung 1:**

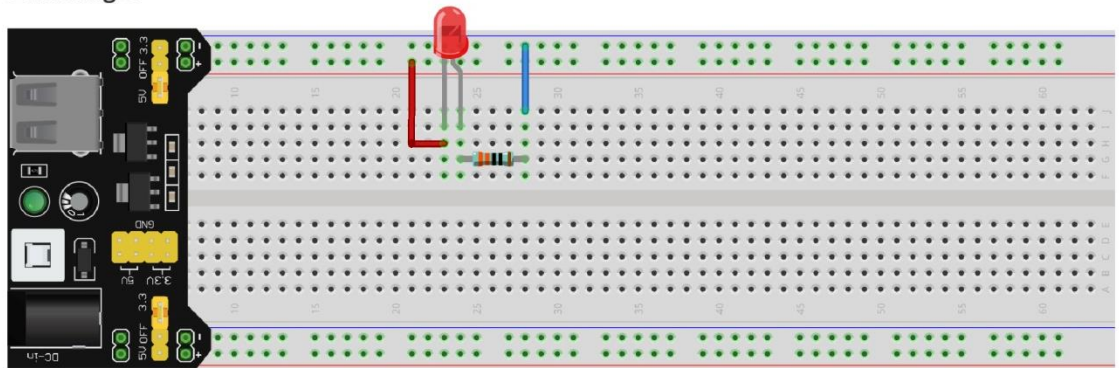


fritzing

Schaltung 2:



Schaltung 3:





### 3. Was bedeutet digitales Messen?

Bevor wir richtig loslegen können, müssen wir uns zuerst damit befassen, wie der Raspberry Pi mit seiner Umwelt kommuniziert. Der Raspberry Pi verfügt über **GPIO-Pins** (**g**eneral **p**urpose **i**nput/**o**utput). Über diese kann er mit seiner Umgebung kommunizieren. Die GPIO-Pins sind durchnummeriert und über das bunte, mehrfarbige Flachbandkabel mit dem Breadboard verbunden. Es gibt zum einen Pins zur Spannungsversorgung mit 5V und 3,3V sowie GND (0V) und klassische GPIO-Pins, die zur Kommunikation dienen. Jeder Pin kann die digitalen **Zustände 1 (true = wahr) oder 0 (false = falsch)** annehmen und sowohl als **Eingang (input)** als auch als **Ausgang (output)** des Raspberry Pi verwendet werden.

Damit wir über die GPIO-Pins mit dem Raspberry Pi kommunizieren können, müssen wir zuerst untersuchen, wie der Raspberry Pi zwischen den beiden Zuständen 0 und 1 unterscheidet. Dazu bauen wir nun eine Schaltung auf und schreiben unser erstes kleines Programm.

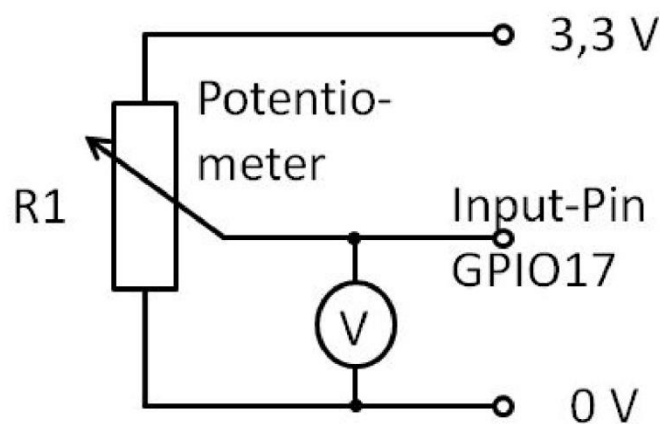
#### GPIO-Pin

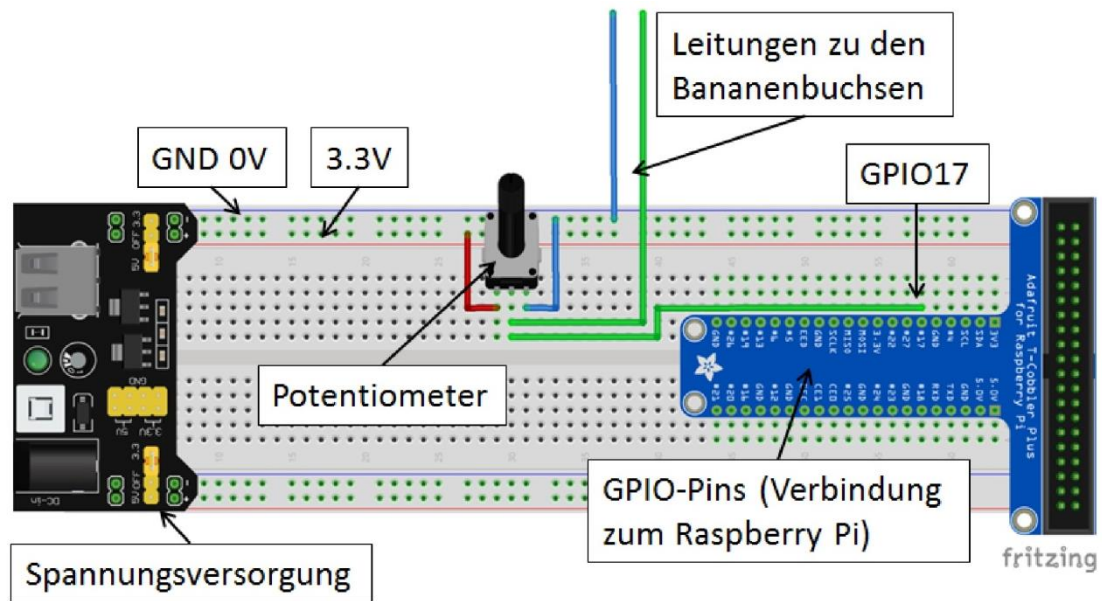
##### Material:

- 10 kΩ Potentiometer
- Breadboard mit Spannungsversorgung und Netzteil
- Breadboard-Leitungen in verschiedenen Farben
- Voltmeter
- Raspberry Pi
- Flachbandkabel

##### Durchführung:

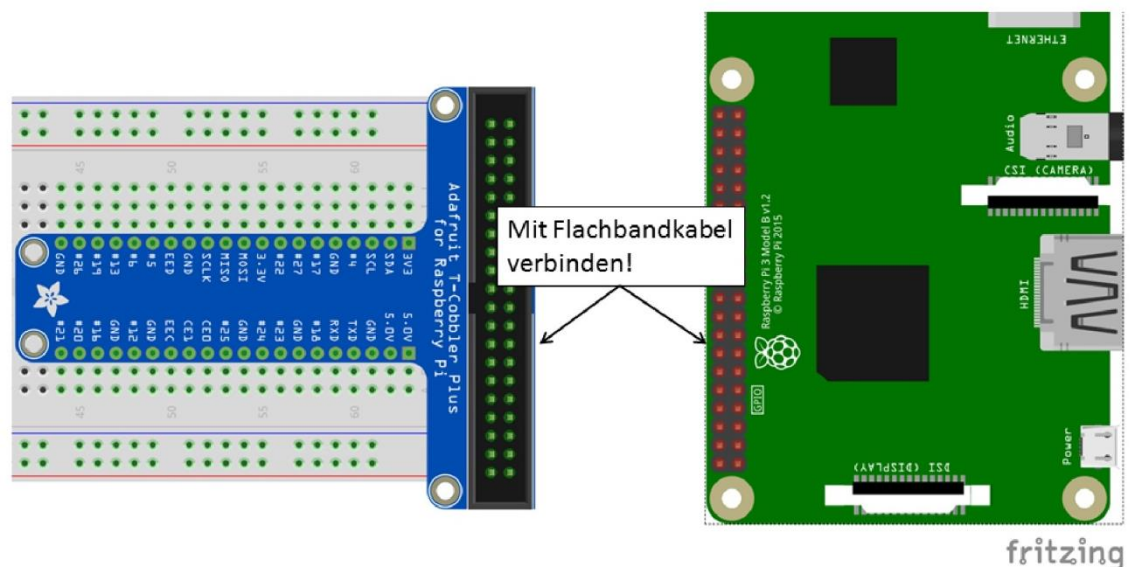
1. Stecken Sie die Schaltung gemäß des nachfolgenden Schaltplans und der Abbildung des Schaltungsaufbaus auf dem Breadboard und und schalten Sie nach einer Kontrolle des Schaltungsaufbaus die Spannungsversorgung des Breadboards an (grüne LED auf Spannungsversorgung leuchtet). Mit Hilfe des Potentiometers kann die elektrische Spannung am Eingangspin GPIO17 in einem Bereich zwischen 0 und 3.3V eingestellt werden. Das Voltmeter wird über die beiden Leitungen zu den Bananenbuchsen so angeschlossen, dass die Spannung zwischen dem Schleifer (dem mittleren Pin) des Potentiometers und GND (0V) gemessen werden kann.





2. Für alle, die am Raspberry Pi mit Bildschirm, Tastatur und Maus arbeiten wollen (wer stattdessen mit dem VNC-Viewer per Fernzugriff arbeiten möchte, kann direkt zu Schritt 3 übergehen): Schließen Sie Bildschirm, Tastatur und Maus an den Raspberry Pi an.

3. Nun müssen wir den Raspberry Pi über das Flachbandkabel mit dem Breadboard verbinden. Der Raspberry Pi hat keinen Ein-/Ausschalter, sondern wird einfach durch Verbinden mit der Spannungsversorgung gestartet.



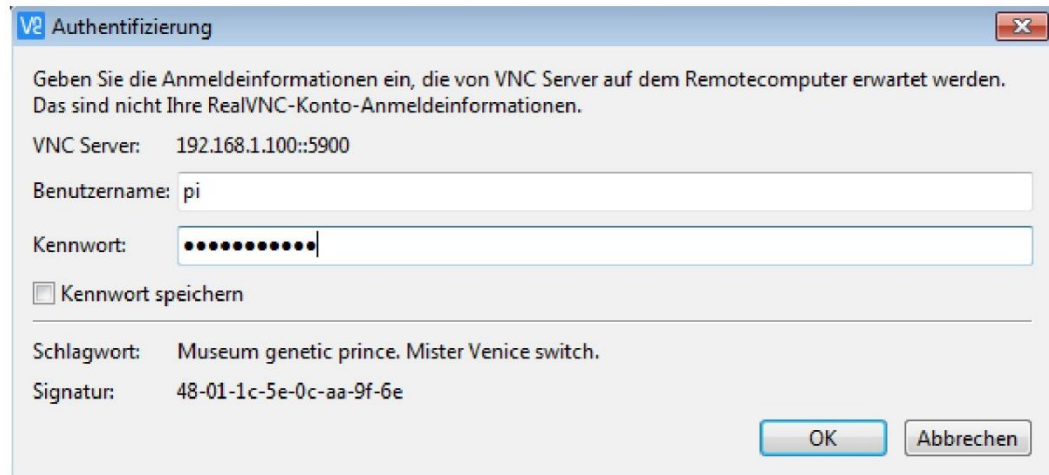
4. Für alle, die mit dem VNC-Viewer per Fernzugriff arbeiten möchten (wer stattdessen mit Bildschirm etc. direkt am Raspberry Pi arbeitet, kann direkt zu Schritt 5 übergehen):

Wenn der Raspberry Pi gestartet ist, können wir uns vom Laptop (oder einem anderen Anzeigegerät) aus über den VNC-Viewer mit dem Raspberry Pi verbinden:

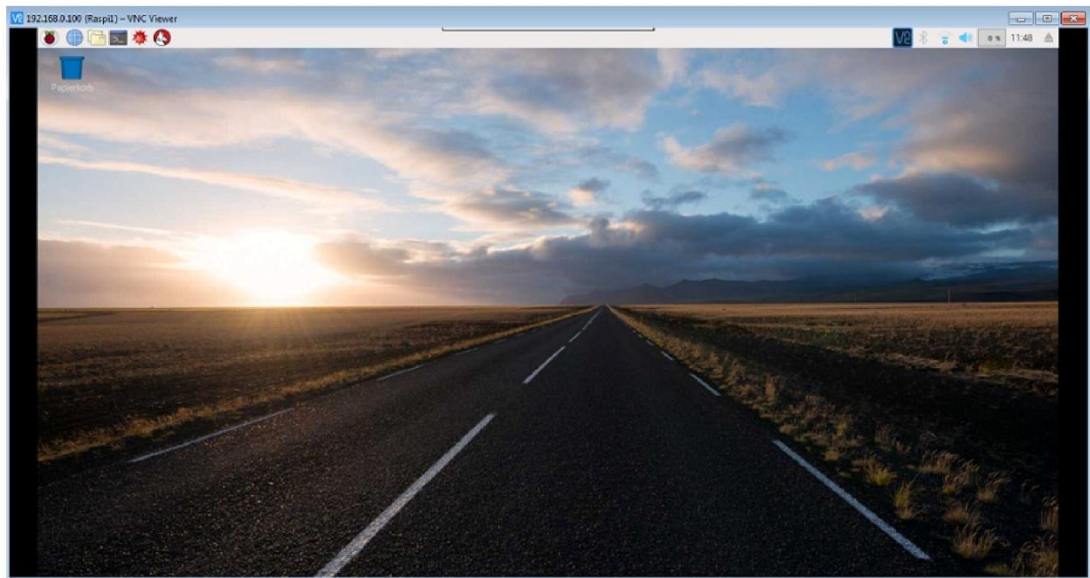
- Als erstes den VNC-Viewer aufrufen.



- Als nächstes oben in die Zeile die IP-Adresse des verwendeten Raspberry Pi eingeben (steht auf einem Zettel auf dem Raspberry Pi) und mit Enter bestätigen.
- Nun wird über das WLAN mit dem Raspberry Pi eine Verbindung aufgebaut und es sollte das nachfolgend dargestellte Fenster auftauchen. Hier muss nur noch der Benutzername pi und das Kennwort (steht auf dem Raspberry Pi) angegeben werden und die Verbindung mit OK gestartet werden.

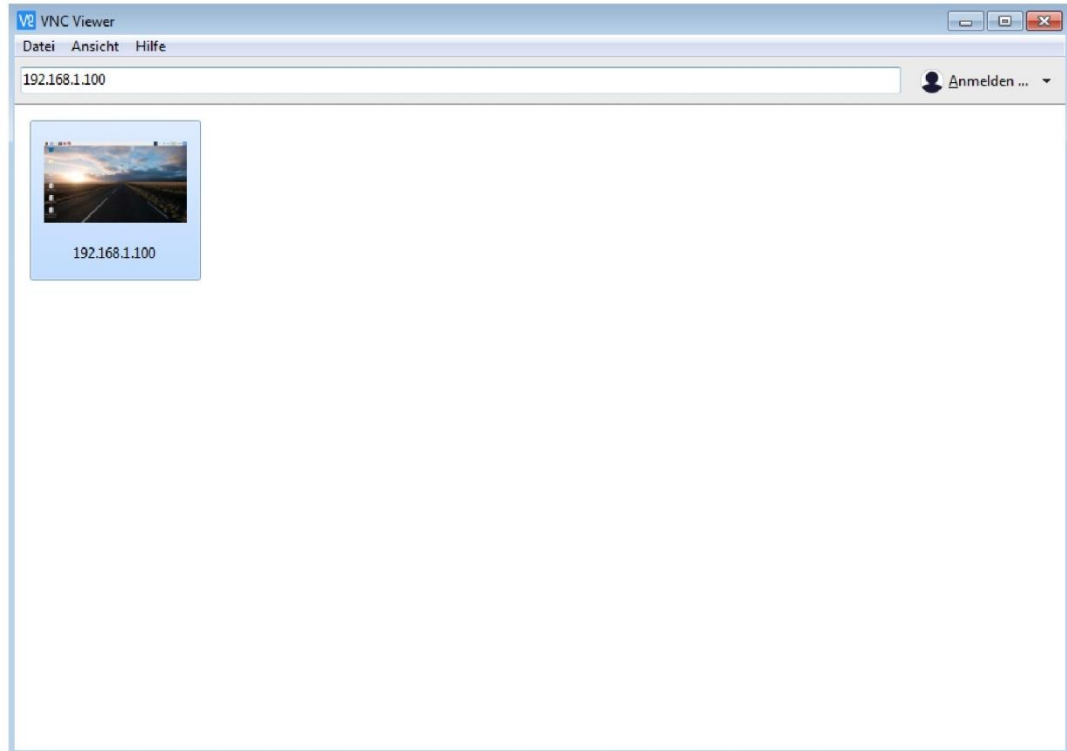


- Wenn alles richtig angegeben wurde, sieht man jetzt die Bildschirmansicht des Raspberry Pi und kann über den VNC-Viewer mit dem Raspberry Pi arbeiten.



- Für das nächste Mal ist die Verbindung jetzt schon angelegt und kann zukünftig mit einem Doppelklick auf das Bildschirmsymbol mit der passenden IP-Adresse gestartet werden.





5. Um herauszufinden, welchen Zustand der GPIO-Pin 17 hat und uns diesen Zustand anzeigen zu lassen, schreiben wir nun unser erstes kleines Programm:

- Dazu öffnen zuerst über das **Ordnersymbol** oben links das Verzeichnis **PhyPi** und erstellen in diesem ein Verzeichnis **MeineProgramme**, in dem wir unsere Programme speichern.
- Über die **Himbeere** (oben links) und den Reiter **Entwicklung** öffnen wir das Programm **Python 3 (IDLE)**.
- Jetzt müssen wir uns noch über **File** und **New File** eine Datei für unser erstes Programm erzeugen.
- In diese Datei schreiben wir unseren ersten Programmcode:

Alles was im Programm hinter einem Hashtag # - Symbol steht ist ein erklärender Kommentar zur Programmzeile davor und keine Aufforderung zu twittern.

```
import RPi.GPIO as GPIO # Wir importieren die Bibliothek GPIO.
import time # Wir importieren die Bibliothek "time".
GPIO.setmode(GPIO.BCM) # Wir geben an, wie die GPIO-Pins nummeriert sind.
GPIO.setup(17, GPIO.IN) # GPIO-Pin 17 wird als Eingang festgelegt.

try: # Ausführen des Programmcodes, solange es keine Unterbrechung gibt.
    while True: # Dauerschleife (alles eingerückte danach wird wiederholt).
        print("Status GPIO17:") # Wir geben den Text "Status GPIO17:" aus.
        print(GPIO.input(17)) # Wir geben den Zustand des GPIO-Pin 17 aus.
        time.sleep(0.1) # Wir warten 0.1 s (Raspberry Pi "schläft").
except KeyboardInterrupt: # Wenn das Programm mit Strg + C unterbrochen wird,
    GPIO.cleanup() # ... wird noch aufgeräumt.
```

6. Bevor wir unser Programm starten können, müssen wir unsere Datei noch über **File** und **Save** unter dem Namen **digital.py** in unser Unterverzeichnis **MeineProgramme** im Verzeichnis **PhyPi** speichern.

7. Mit **Run** oder **F5** starten wir unser Programm und bekommen jetzt alle 0,1 Sekunden den Zustand des GPIO-Pins 17 angezeigt.

8. Drehen Sie am Potentiometer und verändern Sie damit die Spannung am GPIO-Pin 17. Notieren Sie Ihre Beobachtungen.

---

---

---

9. Alles was eingerückt (nach Zeile 7) in unserer Dauerschleife `while(True):` steht, wird jetzt immer weiter wiederholt. Wenn wir unser Programm beenden wollen, müssen wir also unsere Dauerschleife unterbrechen. Dafür drücken wir gleichzeitig `Strg + c`.

10. Formulieren Sie einen Merksatz: Was muss für die Spannung zwischen dem GPIO-Pin 17 und GND (0V) gelten, wenn der GPIO-Pin 17 den Zustand 1 (true) bzw. 0 (false) besitzt?

---

---

---

---

11. Was bedeutet also digitales Messen? Wählen Sie aus den folgenden Begriffen die passenden aus und vervollständigen Sie den Lückentext.

abzählbare, analog, digital, false, kontinuierliche, ganzzahlige, GPIO-Pin, Raspberry Pi, true, stufenlose

Digitales Messen bedeutet, dass Messwerte in Stufen erfasst werden. Ein digitaler \_\_\_\_\_ ist digital, da er nur eine \_\_\_\_\_ und \_\_\_\_\_ Anzahl an Zuständen annehmen kann. Er kann entweder den Zustand 0 ( \_\_\_\_\_ ) oder den Zustand 1 ( \_\_\_\_\_ ) annehmen.

## 4. Lichtautomatik (Hell-Dunkel-Sensor)

Nun wissen wir, wie der Zustand eines GPIO-Pins festgelegt ist und können das nutzen, um unseren ersten eigenen digitalen Sensor zu bauen.

Jeder kennt bei neueren Autos die Lichtautomatik, die das Licht automatisch anschaltet, wenn es draußen dunkel wird oder wenn man in einen Tunnel fährt. Die Beleuchtung von Zugängen zu Häusern oder die Beleuchtung von Wegen ist ebenfalls häufig mit einer Lichtautomatik ausgestattet. Um zu verstehen, wie so etwas funktionieren kann, bauen wir nun unsere eigene Lichtautomatik.

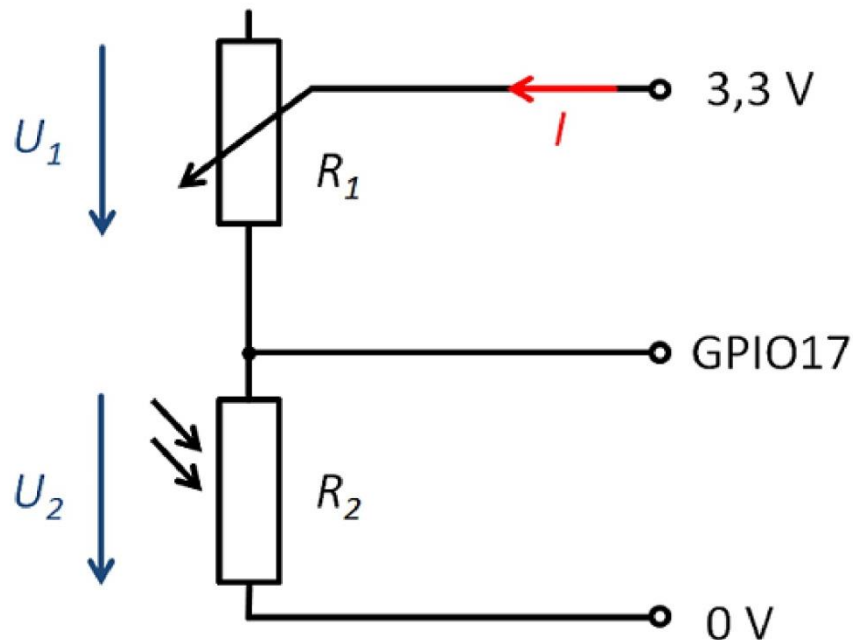
### Schaltungsentwurf und Realisierung

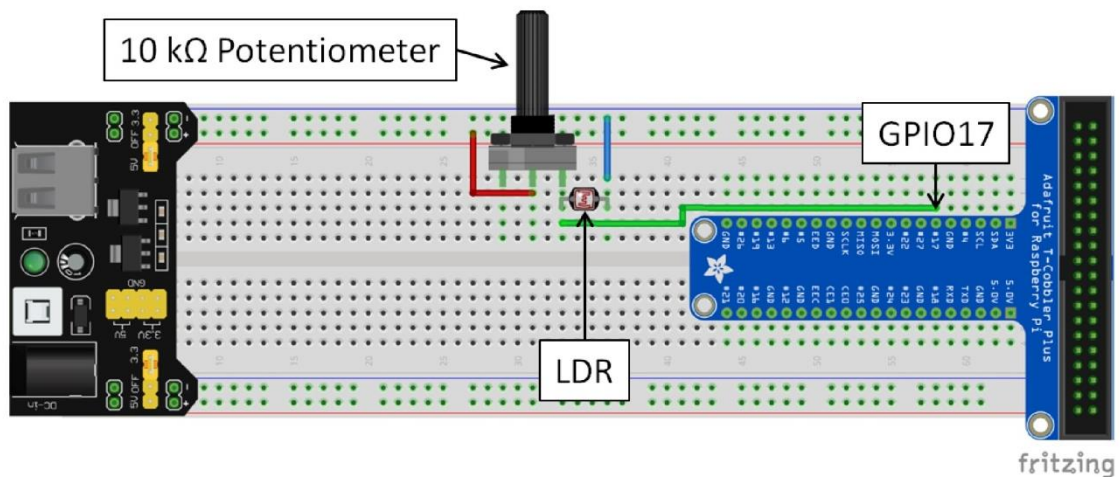
#### Material:

- 10 k $\Omega$  Potentiometer
- 220  $\Omega$  Vorwiderstand für LED (Farbcode: rot, rot, schwarz, schwarz, braun)
- Fotowiderstand (LDR Typ5516)
- weiße LED
- Breadboard mit Spannungsversorgung und Netzteil
- Breadboard-Leitungen in verschiedenen Farben
- Raspberry Pi
- Flachbandkabel

#### Durchführung:

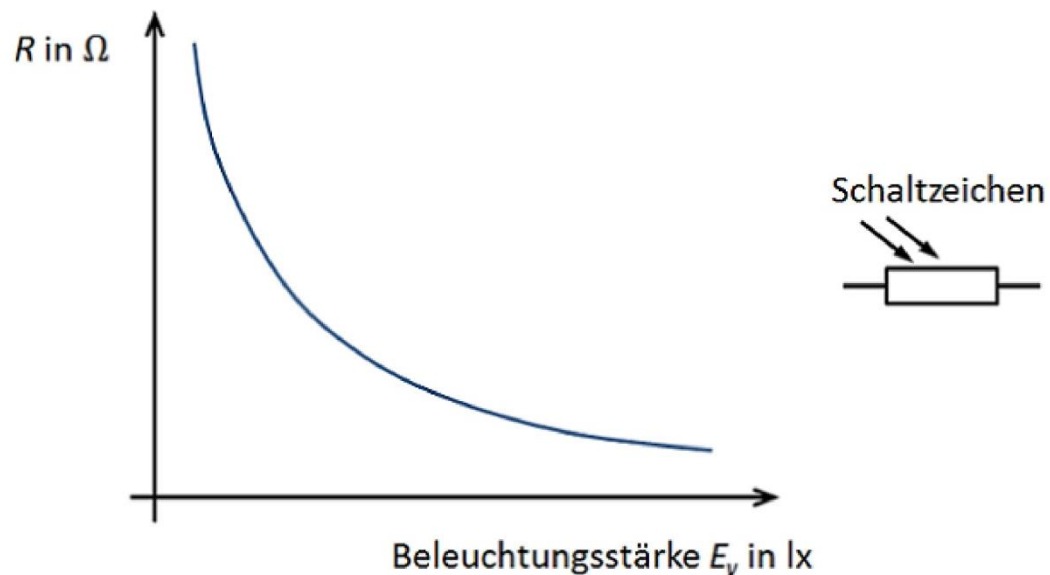
1. Stecken Sie die abgebildete Schaltung gemäß des nachfolgenden Schaltplans und der Abbildung des Schaltungsaufbaus auf dem Breadboard und schalten Sie nach einer Kontrolle des Schaltungsaufbaus die Spannungsversorgung des Breadboards an.





2. Öffnen Sie wieder das Programm **Python 3 (IDLE)** und die zuvor erstellte Programmdatei **digital.py** im Verzeichnis **MeineProgramme**. Starten Sie nun mit **Run** oder **F5** das zuvor erstellte Programm. Dunkeln Sie den Fotowiderstand (LDR) mit der Hand ab. Wechseln Sie mehrfach zwischen abgedunkeltem und hellem Zustand ab und notieren Sie Ihre Beobachtungen. Mit **strg + c** können Sie das Programm wieder beenden.

3. Wie kommt es zu dem beobachteten Verhalten? Schauen wir uns dazu den Fotowiderstand LDR (Light Dependent Resistor) genauer an:



Formulieren Sie auf Grundlage der Abbildung einen Merksatz, wie sich der ohmsche Widerstand des Fotowiderstands in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke verhält.

---



---



---

4. Noch einmal zurück zu unserer Beobachtung aus 3. Wie kommt es zu diesem Verhalten? Dazu müssen wir uns die verwendete Schaltung genauer anschauen. Wir haben einen einfachen Spannungsteiler (Reihenschaltung aus zwei Widerständen) verwendet. Die Widerstände werden vom selben Strom  $I$  durchflossen, sodass der Spannungsteiler die Gesamtspannung  $U_{ges}$  im Verhältnis der Widerstände aufteilt, d.h. das Verhältnis zwischen den Spannungen  $U_1$  und  $U_2$  ist gleich dem Verhältnis zwischen den Widerständen.

Die Widerstände werden vom selben Strom  $I$  durchflossen, sodass der Spannungsteiler die Gesamtspannung  $U_{ges}$  im Verhältnis der Widerstände aufteilt, d.h. das Verhältnis zwischen den Spannungen  $U_1$  und  $U_2$  ist gleich dem Verhältnis zwischen den Widerständen  $R_1$  und  $R_2$ :

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2} \quad (1)$$

Genauso kann auch über das Verhältnis des Teilwiderstands ( $R_1$  oder  $R_2$ ) zum Gesamtwiderstand ( $R_{ges} = R_1 + R_2$ ), auf das Verhältnis zwischen der Teilspannung ( $U_1$  oder  $U_2$ ) und der Gesamtspannung  $U_{ges}$  geschlossen werden.

$$\frac{U_1}{U_{ges}} = \frac{R_1}{R_{ges}} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (2)$$

bzw.

$$\frac{U_2}{U_{ges}} = \frac{R_2}{R_{ges}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (3)$$

Allgemein lässt sich für den Spannungsteiler festhalten, dass sich die Spannungen wie die zugehörigen Widerstände verhalten.

Vervollständigen Sie auf Grundlage der Zusammenhänge für den Spannungsteiler und der Kennlinie aus drittens den nachfolgenden Merksatz:

Je größer die Beleuchtungsstärke, desto \_\_\_\_\_ wird der Widerstand  $R_2$  des Fotowiderstands. Die Spannung  $U_1$  wird dadurch \_\_\_\_\_ und die Spannung  $U_2$ , die am GPIO-Pin 17 anliegt, \_\_\_\_\_.

Was hat das nun mit dem Zustand des GPIO-Pins 17 zu tun, also damit, ob uns eine 0 oder eine 1 angezeigt wird?

Schauen wir uns dazu ein Beispiel an: Der Fotowiderstand hat im beleuchteten Fall einen Widerstand von  $R_2 = 2 \text{ k}\Omega$  und im abgedunkelten Fall einen Widerstand von  $R_2 = 30 \text{ k}\Omega$ . Was bedeutet das für die Spannung  $U_2$  am GPIO-Pin 17 und den Zustand des Pins? Bearbeiten Sie hierzu folgende Aufgabe.

**beleuchteter Fall:**

Welche Spannung liegt am GPIO-Pin 17 an? Berechnen Sie.

Welchen Zustand besitzt der GPIO-Pin 17 in diesem Fall? Begründen Sie.

---

---

---

**abgedunkelter Fall:**

Welche Spannung liegt am GPIO-Pin 17 an? Berechnen Sie.

Welchen Zustand besitzt der GPIO-Pin 17 in diesem Fall? Begründen Sie.

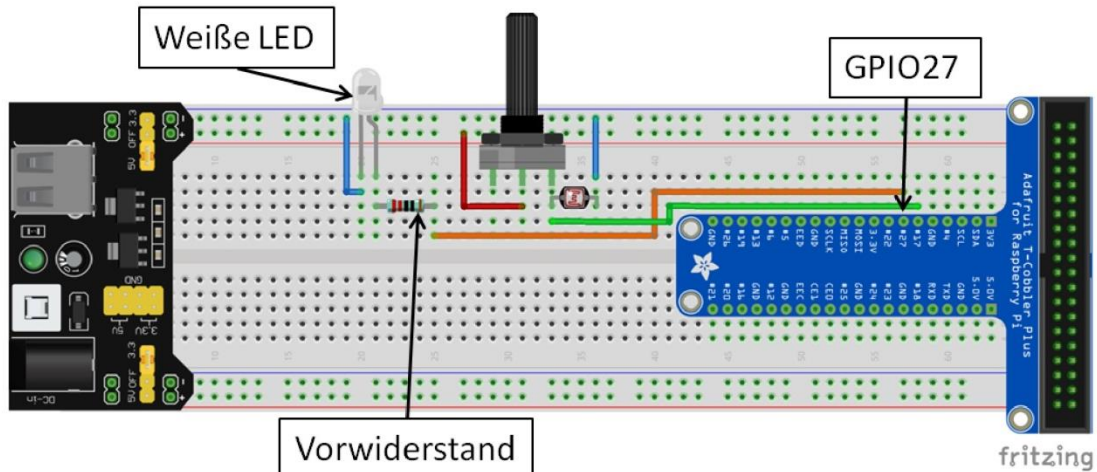
---

---

---



5. Wir haben also aus einem Fotowiderstand und einem zweiten Widerstand einen einfachen Sensor gebaut, mit dem wir nach der Digitalisierung zwischen hell und dunkel unterscheiden können. Damit wir eine Lichtautomatik haben, fehlt uns noch eine Beleuchtung, die abhängig von unserem Sensor ein- bzw. ausgeschaltet wird. Dafür ergänzen wir unsere Schaltung um eine weiße LED (Polung beachten) mit Vorwiderstand (220  $\Omega$ ), die wir an den GPIO-Pin 27 anschließen.



6. Jetzt müssen wir nur noch unser Programm anpassen, sodass die LED abhängig vom Zustand des GPIO-Pins 17 an- bzw. ausgeschaltet wird.

- Wir öffnen wieder das Programm **Python 3 IDLE** und erzeugen dort eine Datei **lichtautomatik.py** für unser neues Programm, die wir im Verzeichnis **MeineProgramme** speichern.
- In diese Datei schreiben wir unseren Programmcode für die Lichtautomatik:

```
import RPi.GPIO as GPIO # Wir importieren die Bibliothek GPIO.
import time # Wir importieren die Bibliothek "time".
GPIO.setmode(GPIO.BCM) # Wir geben an, wie die GPIO-Pins nummeriert sind.
GPIO.setup(17, GPIO.IN) # GPIO-Pin 17 wird als Eingang festgelegt.
GPIO.setup(27, GPIO.OUT) # GPIO-Pin 27 wird als Ausgang festgelegt.
try: # Ausführen des Programmcodes, solange es keine Unterbrechung gibt.
    while True: # Dauerschleife (alles eingerückte danach wird wiederholt).
        statusGPIO17 = GPIO.input(17) # Abfrage des Zustands von GPIO-Pin 17
        if statusGPIO17 == 1: # Wenn (if) der Zustand 1 ist, dann...
            GPIO.output(27, GPIO.HIGH) # ...schalten wir die LED ein.
        if statusGPIO17 == 0: # Wenn (if) der Zustand 0 ist, dann...
            GPIO.output(27, GPIO.LOW) # ...schalten wir die LED aus.
        time.sleep(0.1) # Wir warten 0.1 s (Raspberry Pi "schläft").
except KeyboardInterrupt: # Wenn das Programm mit Strg + C unterbrochen wird,
    GPIO.cleanup() # ... wird noch aufgeräumt.
```

Das Programm sieht unserem ersten Programm sehr ähnlich. Für die LED brauchen wir aber einen GPIO-Pin, der als Ausgang geschaltet ist. Dessen Zustand wir also im Programm bestimmen können und mit dem wir die LED ein- bzw. ausschalten können. Der GPIO-Pin kann auch wieder die Zustände 1 (HIGH = 3,3 V = LED-EIN) und 0 (LOW = 0 V = LED-AUS) annehmen.

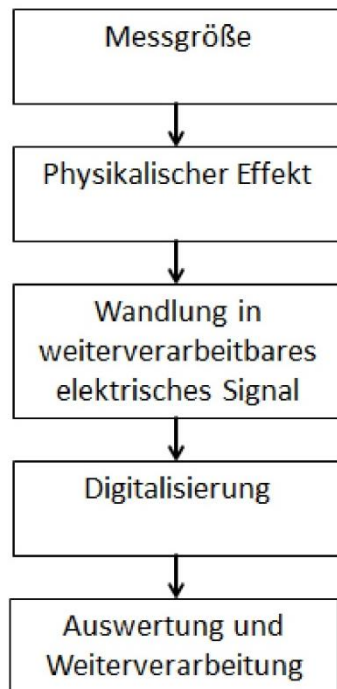
- Nun speichern wir unser Programm und starten es mit **Run** oder **F5**.

- Jetzt können wir unsere Lichtautomatik testen. Beim Abdunkeln müsste die LED jetzt eingeschaltet werden.
- Wenn wir das Programm beenden wollen, können wir einfach wieder `Strg + c` drücken und unsere Dauerschleife wird gestoppt.

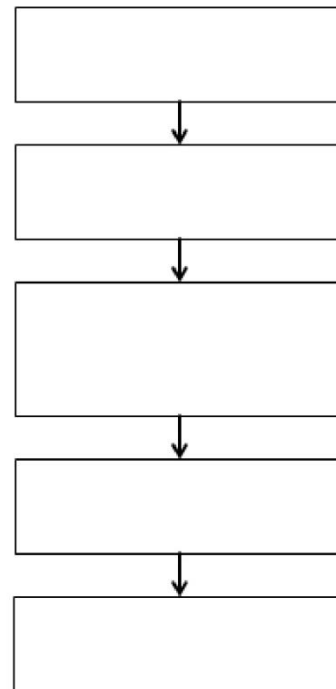
7. Aufgrund unserer Beobachtungen der vergangenen Versuche lässt sich ein Grundprinzip der digitalen Messwerterfassung erkennen, das in der nachfolgenden Abbildung links dargestellt ist. Ergänzen Sie die allgemeine Darstellung mit den folgenden Begriffen aus dem Beispiel der Lichtautomatik:

beleuchtungsabhängiger Widerstand, Beleuchtungsstärke, GPIO-Pin, LED-Ein / LED-Aus, Spannungsteiler

**Grundprinzip der digitalen  
Messwerterfassung**



**konkretes Beispiel  
(Lichtautomatik)**





## 5. Wir bauen ein digitales Thermometer



Bevor wir gleich zum Thermometer kommen, müssen wir zuerst ein bisschen ausholen. Wenn die Person am Boden wissen möchte, wo genau sich ihr Freund befindet, hilft ihr die Antwort "Auf Stufe 10!" sicher mehr weiter als "In der Baumkrone!".

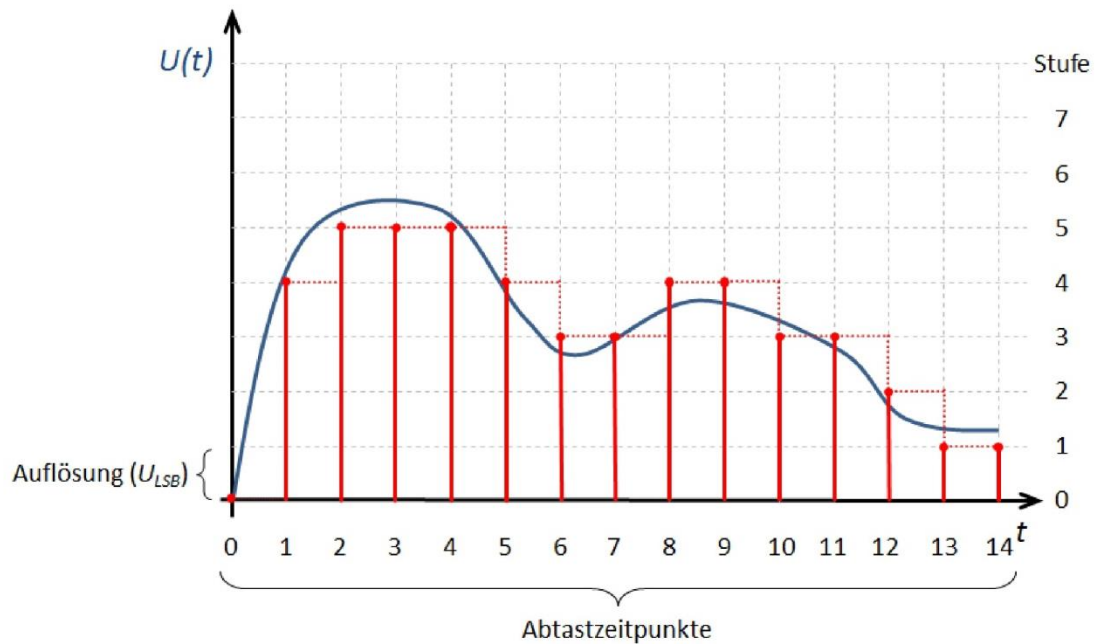
Wir haben in diesem Beispiel auch digitale Werte:

- im Falle der Antwort "In der Baumkrone!" genau zwei ("In der Baumkrone" = 1, "Nicht in der Baumkrone" = 0).
- im Falle der Antwort "Auf Stufe 10!" genau so viele mögliche Werte, wie die Leiter Stufen hat.

Noch präziser wüsste die Person am Boden Bescheid, wenn die Leiter extrem viele dicht beieinander liegende Stufen hätte. Wir könnten die Höhe also noch besser auflösen (d.h. präziser angeben).

Was hat das aber jetzt mit unserem digitalen Thermometer zu tun? Im Beispiel unserer Lichtautomatik haben wir gesehen, dass wir mittels der GPIO-Pins eine Digitalisierung (0 und 1) vornehmen können. Für ein Thermometer wäre so eine Form der Digitalisierung jedoch nicht wirklich zufriedenstellend. Wir könnten ja nur zwei Werte unterscheiden (warm und kalt). Wir brauchen also etwas mit der Leiter Vergleichbares, das uns eine fein gestufte Digitalisierung ermöglicht, sodass wir Temperaturwerte ermitteln können.

## Die Analog-Digital-Wandlung (AD-Wandlung)



Der Analog-Digital-Wandler wandelt ein analoges in ein digitales Signal. Das heißt er wandelt ein kontinuierliches Signal mit unendlich vielen Signalwerten in eine Folge von Wertepaaren aus einem Zeitwert und einem Signalwert um. Es wird zu festen Zeitpunkten (Abtastung) je ein Signalwert erfasst. Die Signalwerte können dabei nur die Werte festgelegter Stufen (Quantisierung) annehmen. Dabei wird immer zur nächstgelegenen Stufe gerundet.

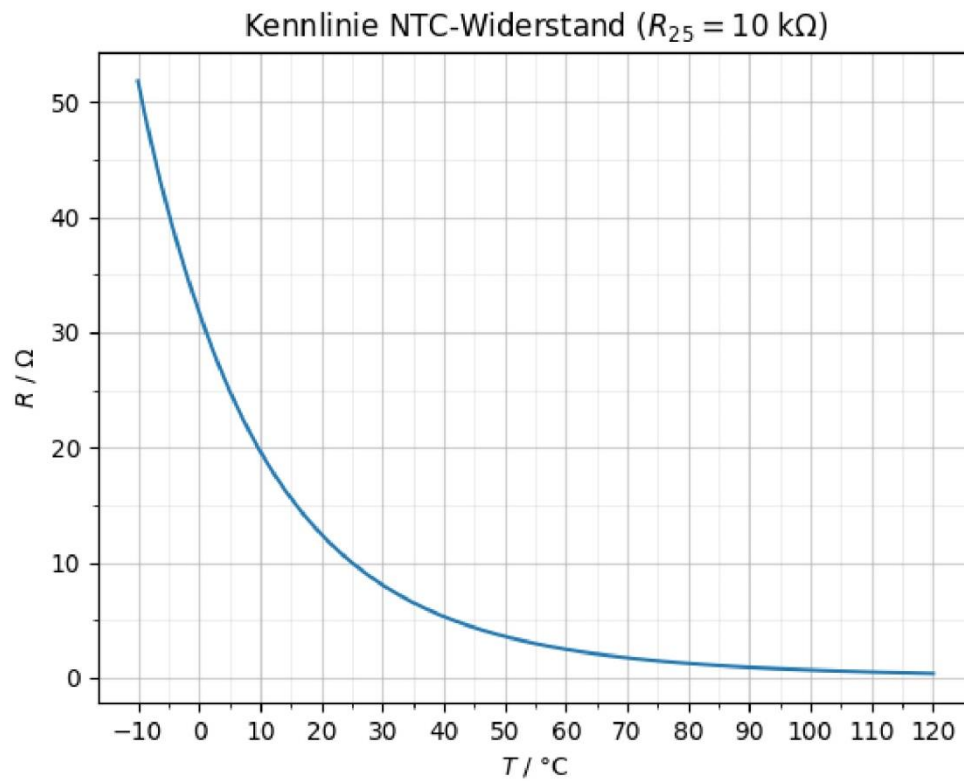
Da die Signalwerte nur in Stufen erfasst werden können, entsteht bei der Analog-Digital-Wandlung immer ein Fehler, der Quantisierungsfehler. Dieser ist, wie beim Beispiel der Leiter, umso kleiner, je geringer der Abstand zwischen den Stufen (Auflösung  $U_{LSB}$ ) ist. Auch durch die Abtastung gehen uns Informationen verloren. Wir kennen immer nur zu diskreten Zeitpunkten den Signalwert und können über den Signalwert zwischen zwei Abtastzeitpunkten keine Aussage treffen.

**Aufgabe 1:** Beschriften Sie die beiden oben abgebildeten Signale mit den Begriffen "analoges Signal" bzw. "digitales Signal".

## Schaltungsentwurf

Nun aber zum Bau unseres digitalen Thermometers. Wie auch bei der Lichtautomatik kommt auch hier wieder ein veränderlicher Widerstand, der NTC-Widerstand, zum Einsatz. Dieser ist temperaturabhängig.

Betrachten wir zuerst seine Kennlinie.



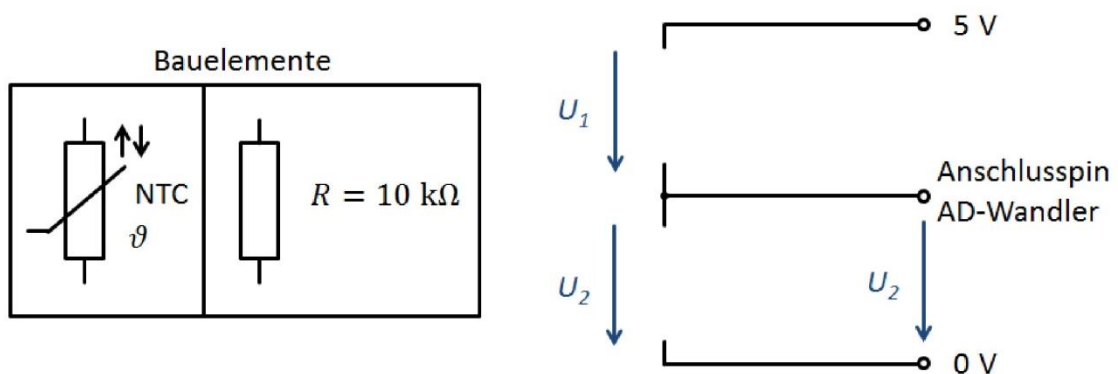
**Aufgabe 2:** Formulieren Sie auf Grundlage der Abbildung einen Merksatz, wie sich der ohmsche Widerstand des NTC-Widerstands in Abhängigkeit von der Temperatur verhält.

---

---

---

**Aufgabe 3:** Ergänzen Sie die nachfolgende Schaltung so, dass sich die am Anschlusspin des AD-Wandlers anliegende elektrische Spannung  $U_2$  erhöht, wenn die Temperatur steigt (Tipp: Spannungsteiler).



Mit der entworfenen Schaltung haben wir nun die Grundlage für unser Thermometer gelegt. Der Spannungsteiler mit dem NTC-Widerstand stellt uns ein temperaturabhängiges analoges Spannungssignal zur Verfügung. Nun müssen wir uns noch um die Digitalisierung dieses Spannungssignals und die Berechnung des Temperaturwerts kümmern.

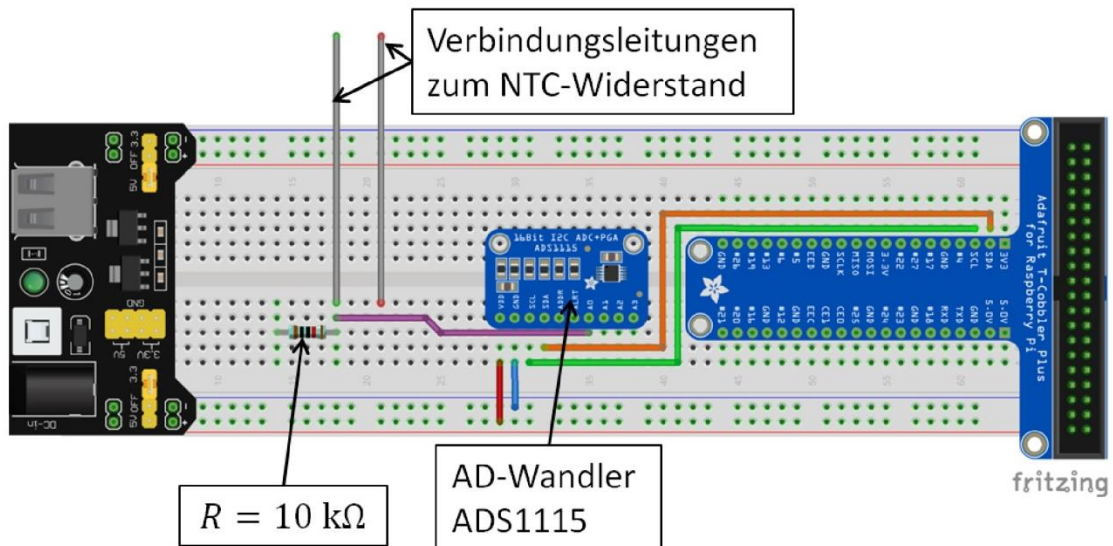
## Realisierung des digitalen Thermometers

### Material:

- 10 k $\Omega$  Widerstand (Farbcode: braun, schwarz, schwarz, rot, braun)
- NTC-Widerstand (**N**egative **T**emperature **C**oefficient)  $R_{25} = 10\text{ k}\Omega$
- AD-Wandler ADS1115
- Breadboard mit Spannungsversorgung und Netzteil
- Breadboard-Leitungen in verschiedenen Farben
- Raspberry Pi
- Flachbandkabel
- Wasserkocher
- Bechergläser
- Flüssigkeitsthermometer
- Glasstab zum Rühren

**Durchführung:**

1. Ergänzen Sie den nachfolgenden Schaltungsaufbau auf dem Breadboard durch Leitungen, sodass der Spannungsteiler aus 10 k $\Omega$  Widerstand und NTC-Widerstand der oben entworfenen Schaltung entspricht.



2. Bauen Sie die Schaltung auf dem Breadboard auf. Aus der nachfolgenden Tabelle kann entnommen werden, wie der AD-Wandler auf dem Breadboard anzuschließen ist.

Anschlüsse AD-Wandler ADS1115	Anschlüsse Breadboard / GPIO-Pin
VDD	5 V
GND	0 V
SDL	GPIO-Pin SCL
SDA	GPIO-Pin SDA
A0	Spannungsteiler (zwischen 10 k $\Omega$ - und NTC-Widerstand)

3. Nun haben wir unsere Schaltung für das digitale Thermometer aufgebaut und können uns um ein Programm zur Auswertung kümmern:

- Dazu öffnen wir wieder das Programm **Python 3 (IDLE)** und erstellen eine Programmdatei **thermometer.py**.
- Nun können wir unseren Programmcode zur Auswertung erstellen:

```
import Adafruit_ADS1x15 # Wir importieren die Bibliothek für den AD-Wandler.
import time # Wir importieren die Bibliothek "time".
adwandler = Adafruit_ADS1x15.ADS1115() # Wir nennen unseren ADS1115 adwandler.

while True: # Dauerschleife.
    adwert = adwandler.read_adc(0,2/3) # Wir lesen den aktuellen Wert des AD-
    wandlers am Anschluss A0 und speichern diesen in "adwert".
    print("Aktueller Wert AD-Wandler:") # Wir geben den Text "Aktueller Wert des
    Ad-Wandlers:" aus.
    print(adwert) # Wir geben den aktuellen Wert des AD-Wandlers aus.
    time.sleep(1) # Wir warten 1 s (Raspberry Pi "schläft").
```

Unser Programm macht nun Folgendes: Es fragt den digitalisierten Signalwert am Anschluss A0 des AD-Wandlers ab und gibt diesen aus. Dann wartet es eine Sekunde und fragt anschließend den nächsten Wert ab, usw..

- Wir speichern unser Programm und starten es mit **Run** oder **F5**.
- Notieren Sie den angezeigten Wert (ungefähr) bei Zimmertemperatur. Was passiert, wenn der NTC-Widerstand zwischen den Handflächen auf Handtemperatur gebracht wird? Notieren Sie Ihre Beobachtungen.

- Danach unterbrechen wir unsere Dauerschleife und damit unser Programm wieder mit **Strg + c**.

4. Eigentlich interessiert uns ja der Spannungswert am Anschluss A0 des AD-Wandlers, um aus diesem Wert eine Temperatur bestimmen zu können. Was haben die beobachteten Werte aber jetzt mit diesem Spannungswert zu tun?

Die Werte geben Auskunft darüber, welche Stufe dem Signal am Anschluss A0 bei der Digitalisierung zugeordnet wurde. Wir müssen also diesen Wert noch einer Spannungsstufe zuordnen.

Dazu müssen wir zunächst einmal die Auflösung unseres AD-Wandlers kennen, also wissen, "wie hoch" eine einzelne Stufe ist. Unser AD-Wandler (ADS1115) verfügt über 32767 Stufen. Bei jeder Abtastung ordnet er dem analogen Signal am Anschluss A0 eine bestimmte Stufe zu. Jetzt müssen wir also nur noch wissen, welcher Spannungsdifferenz eine Stufe entspricht. Unser AD-Wandler (ADS1115) ist so programmiert, dass er Spannungswerte von 0 V bis 6,14 V digitalisieren kann.

- Berechnen Sie mit den gegebenen Informationen:  
Welcher Spannungsdifferenz entspricht eine Stufe ( $\triangleq$  Auflösung  $\triangleq U_{LSB}$ )? Vervollständigen Sie dazu die nachfolgende Gleichung und berechnen Sie die Auflösung.

$$\text{Auflösung} = U_{LSB} = \quad (4)$$



- Wie wir feststellen ist dieser Wert sehr klein, sodass die zu messende Spannung in sehr kleinen Stufen aufgelöst werden kann.
- Ergänzen Sie die fehlenden Werte in der nachfolgenden Tabelle.

Stufe	⇒	digitalisierte Spannung in V
0	⇒	0
32767	⇒	6,114
1	⇒	
518	⇒	
16383	⇒	

- Jetzt müssen wir noch unser Programm so ergänzen, dass wir nicht mehr den Wert der Stufe, sondern den Wert der digitalisierten Spannung angezeigt bekommen. Dazu müssen wir das nachfolgende Programm noch so ergänzen, dass in Zeile 4 die Auflösung berechnet wird und der Variablen `aufloesung` zugewiesen wird. Außerdem müssen wir noch in Zeile 6 die Berechnung des digitalisierten Spannungswerts ergänzen.
- Ergänzen Sie das Programm **thermometer.py** entsprechend.

**Achtung:** Beim Programmieren entspricht ein Punkt einem Komma ( also  $6.114 \triangleq 6,114$  )!

```
import Adafruit_ADS1x15 # wir importieren die Bibliothek für den AD-Wandler.
import time # wir importieren die Bibliothek "time".
adwandler = Adafruit_ADS1x15.ADS1115() # wir nennen unseren ADS1115 adwandler.
aufloesung = 6.114/32767 # Hier berechnen wir die Auflösung.
while True: # Dauerschleife.
    adwert = adwandler.read_adc(0,2/3) * aufloesung # wir lesen den aktuellen Wert
    des AD-Wandlers und rechnen diesen in eine digitalisierte Spannung um.
    print("Aktueller Wert AD-Wandler:") # wir geben den Text "Aktueller Wert des
    AD-Wandlers:" aus.
    print(adwert) # wir geben den Wert der digitalisierten Spannung aus.
    print("V") # wir geben die Einheit V aus.
    time.sleep(1) # wir warten 1 s (Raspberry Pi "schlaeft").
```

- Jetzt können wir unser Programm testen. Dazu speichern wir die Programmdatei und starten diese mit **Run** oder **F5**.
- Notieren Sie den ungefähren Spannungswert bei Zimmertemperatur. Was passiert, wenn der NTC-Widerstand zwischen den Handflächen auf Handtemperatur gebracht wird? Notieren Sie Ihre Beobachtungen.

5. Auf unserem Weg zu einem digitalen Thermometer fehlt uns noch etwas. Der Raspberry Pi gibt uns bisher nur digitalisierte Spannungswerte aus. Wir müssen uns also noch darum kümmern, dass wir diese Spannungswerte in Temperaturen umrechnen können. Diesen Schritt nennt man Kalibrierung.

Bei der Kalibrierung müssen wir unsere digitalisierten Spannungswerte mit den zugehörigen Temperaturwerten verknüpfen. Wir erhalten so Wertepaare aus einem Spannungs- und einem Temperaturwert. Auf Grundlage dieser Wertepaare kann der Raspberry Pi dann aus den digitalisierten Spannungswerten die zugehörige Temperatur berechnen.

Führen wir also die Kalibrierung durch:

- Dazu nehmen wir im Bereich zwischen 20 °C und 50 °C in Intervallen von ca. 10 °C die zugehörigen digitalisierten Spannungswerte auf:

Die benötigten Wassertemperaturen erhalten wir durch entsprechendes Mischen von Wasser aus dem Wasserkocher und dem Wasserhahn. Die Temperatur messen wir mit dem Flüssigkeitsthermometer. Füllen Sie die nachfolgende Tabelle aus.

	1.	2.	3.	4.
Temperatur $T$ in °C				
Spannung $U$ in V				

- Zeichnen Sie die Wertepaare in ein Diagramm ein und verbinden Sie die Messpunkte sinnvoll zu einer Kurve (nachfolgende Lücke).

- Lesen Sie aus dem Diagramm den ungefähr erwarteten digitalisierten Spannungswert für eine Temperatur von 35 °C ab und notieren Sie diesen.
-



6. Die ermittelten Kalibrationswerte können wir nun nutzen, um mit der digitalisierten Messspannung des AD-Wandlers Temperaturwerte zu berechnen. Dabei gehen wir ähnlich vor wie beim sinnvollen Verbinden der Messwerte von Hand im Diagramm (vergleiche Aufgabe zuvor).

Wir lassen den Raspberry Pi eine Funktion berechnen, deren Verlauf unsere Messpunkte möglichst günstig verbindet. Mit dieser Funktion können wir dann für jeden gemessenen digitalen Spannungswert die zugehörige Temperatur berechnen. Je mehr Wertepaare man für die Kalibrierung besitzt und je genauer diese bestimmt wurden, desto genauer sind auch die ermittelten Temperaturwerte.

Ergänzen wir also die Berechnung der Temperatur:

- Dazu öffnen wir wieder unser Programm **thermometer.py**.
- Nun können wir unser Programm um die Berechnung der Temperaturwerte ergänzen. Wir müssen für Wert1 bis Wert4 die Werte aus der Kalibrierung für Spannung bzw. für die Temperatur angeben (ohne Einheiten). **Achtung: Aufsteigende Reihenfolge der Werte anwenden!**

```
import Adafruit_ADS1x15 # Wir importieren die Bibliothek für den AD-Wandler.
from scipy.interpolate import UnivariateSpline # Wir importieren die Bibliothek für
die Interpolation.
import time # Wir importieren die Bibliothek "time".

adwandler = Adafruit_ADS1x15.ADS1115() # Wir nennen unseren ADS1115 adwandler.
aufloesung = 6.114/32767 # Wir berechnen die Aufloesung des AD-Wandlers.
U = [Wert1, Wert2, Wert3 , Wert4] # Spannungswerte aus der Kalibrierung.
T = [Wert1, Wert2, Wert3 , Wert4] # Temperaturwerte aus der Kalibrierung.
kalibFunkt = UnivariateSpline(U,T) # Wir berechnen die Kalibrierungsfunktion.

while True: # Dauerschleife.
    adwert = adwandler.read_adc(0,2/3) * aufloesung # Wert Ad-Wandler.
    temperatur = kalibFunkt(adwert) # Wir berechnen aus der digitalisierten
    Spannung des AD-Wandlers die Temperatur.
    temperatur = round(float(temperatur),1) # Wir runden den Temperaturwert
    # auf eine Nachkommastelle.
    print("Temperatur:") # Wir geben den Text "Temperatur" aus.
    print(temperatur) # Wir geben den Wert der Temperatur aus.
    print("°C") # Wir geben die Einheit °C aus.

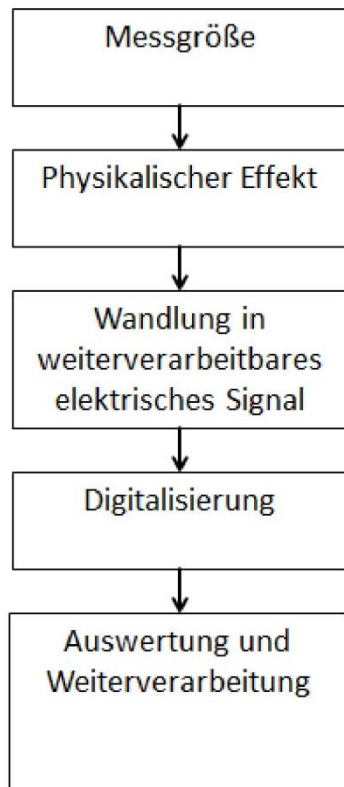
    time.sleep(1) # Wir warten 1 s (Raspberry Pi "schlaeft").
```

- Wir speichern unsere Programmdatei wieder und starten das Programm mit **Run** oder **F5**.
- Nun können wir unser digitales Thermometer testen.
- Das Programm beenden wir wieder mit **Strg + C**.

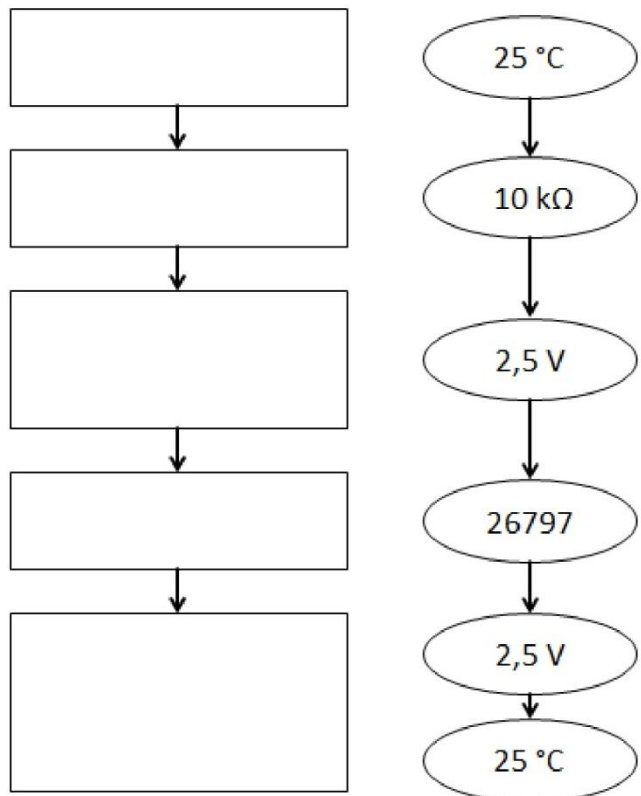
**Aufgabe 4:** Das im Beispiel der Lichtautomatik kennengelernte Grundprinzip der digitalen Messwerterfassung lässt sich auch auf unser digitales Thermometer übertragen.

Ergänzen Sie die fehlenden Begriffe für unser Beispiel des digitalen Thermometers.

### Grundprinzip der digitalen Messwerterfassung



### konkretes Beispiel (Thermometer)

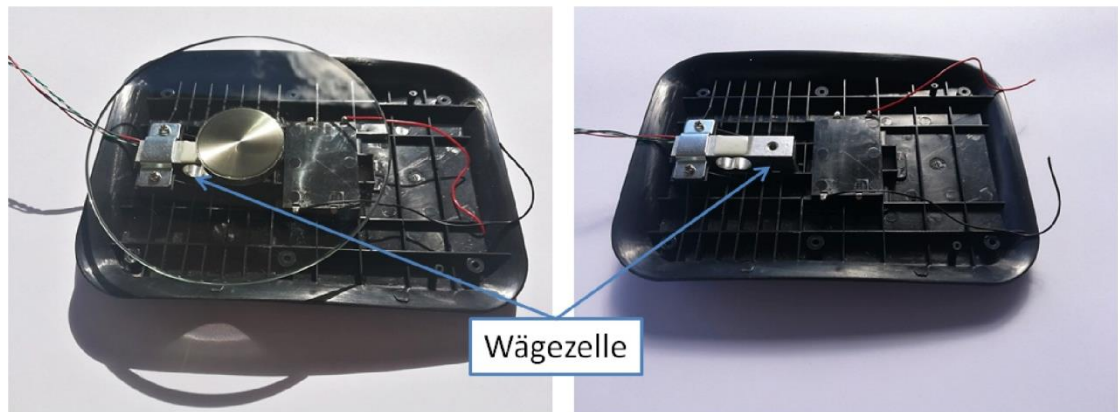


## 6. Wir bauen einen digitalen Kraftsensor

Wir alle kennen digitale Waagen aus der Küche oder aus dem Bad. Wie funktioniert aber eine solche Waage und wie können wir Komponenten aus einer handelsüblichen Küchenwaage nutzen, um einen digitalen Kraftsensor für Physikexperimente zu bauen?

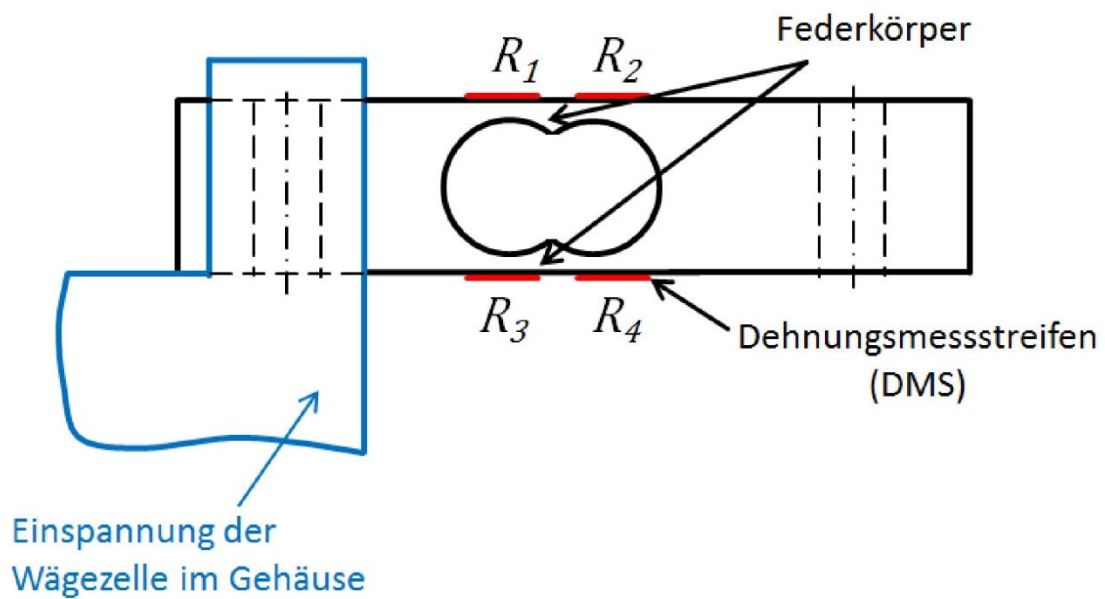
**Aufgabe 1:** Geben Sie die physikalische Größe an, die bei einer Waage gemessen wird.

Nachfolgend ist eine handelsübliche günstige Küchenwaage von innen zu sehen. Der längliche Aluminiumstab ist das Herzstück der Waage, eine sogenannte Wägezelle.

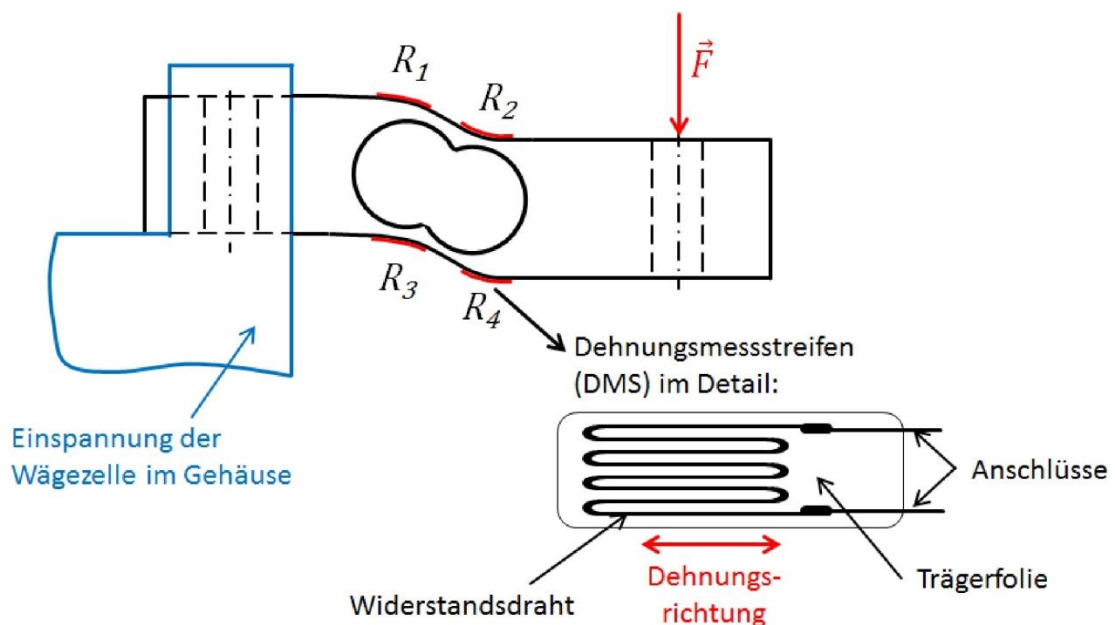


Wie funktioniert aber eine solche Wägezelle und wie können wir uns daraus einen digitalen Kraftsensor bauen?

Die Wägezelle besteht aus einem Federkörper (Doppelbiegebalken), dem Aluminiumstab mit den zwei überlappenden Bohrungen. Dieser verformt sich abhängig von der Größe der eingeleiteten Kraft, vergleichbar mit einer Schraubenfeder (z.B. in einem Federkraftmesser), die sich abhängig von der an ihr ziehenden Kraft verlängert bzw. verkürzt.

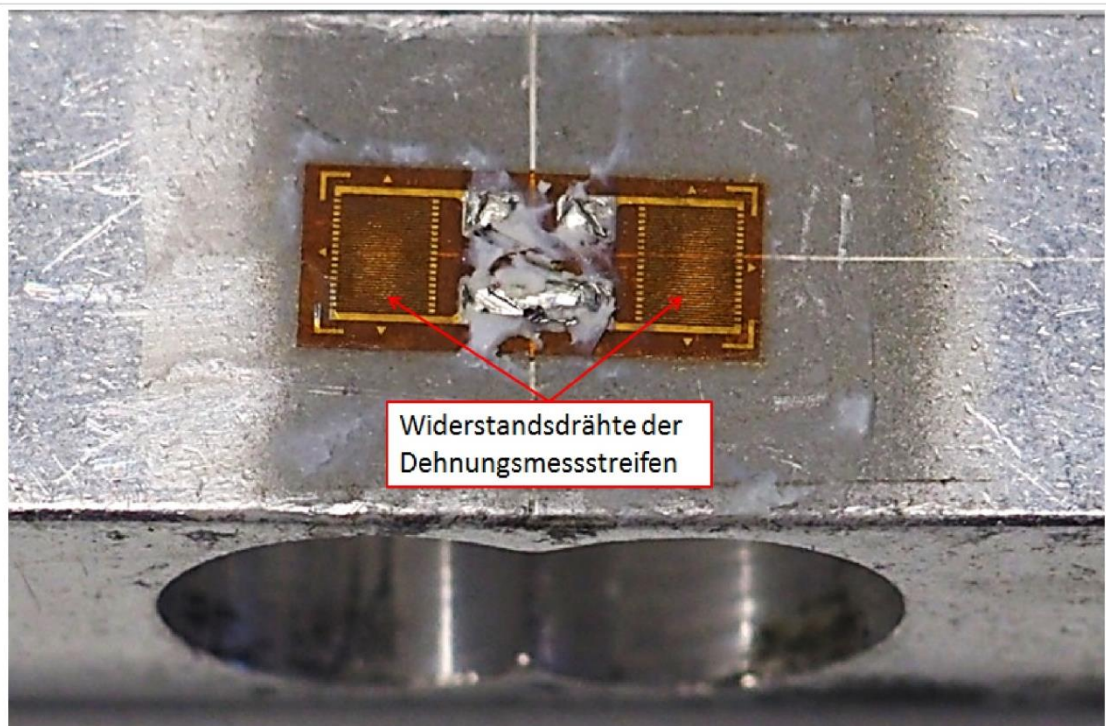


Nachfolgend ist eine Prinzipskizze einer solchen Waagezelle dargestellt, in der die durch die eingeleitete Kraft hervorgerufene Verformung stark übertrieben dargestellt ist. Wie bei den vorherigen Sensoren brauchen wir ein auswertbares elektrisches Signal, mit dessen Hilfe wir auf die Größe der eingeleiteten Kraft schließen können. Dazu müssen wir die kraftabhängige Verformung des Federkörpers elektrisch auswerten können. In einer solchen Waagezelle kommen sogenannte Dehnungsmessstreifen zum Einsatz, die aus einem gewundenen Widerstandsdraht mit zwei Anschlüssen bestehen und auf einer Trägerfolie aufgebracht sind. Vier dieser Dehnungsmessstreifen sind so auf dem Federkörper aufgeklebt, dass diese sich Kräfteinwirkung gemeinsam mit dem Federkörper verformen.





Die folgende Abbildung zeigt zwei benachbarte, auf einer Wägezelle aufgeklebte Dehnungsmessstreifen. Man kann den gewundenen Widerstandsdraht (Messgitter) jeweils gut an den dicht beieinander liegenden waagerechten Linien erkennen.



**Aufgabe 2:** Streichen Sie unter Berücksichtigung der Prinzipskizze die falschen Aussagen durch.

Bei Krafteinwirkung werden die Dehnungsmessstreifen  $R_1$  und  $R_4$  *gedehnt / gestaucht*. Der Widerstandsdraht der Dehnungsmessstreifen wird also *länger und dünner / kürzer und dicker*. Die Länge des Drahtes  $L$  *vergrößert / verkleinert* sich also, während sich der Durchmesser  $D$  und damit die Querschnittsfläche  $A$  des Drahtes *vergrößert / verkleinert*.

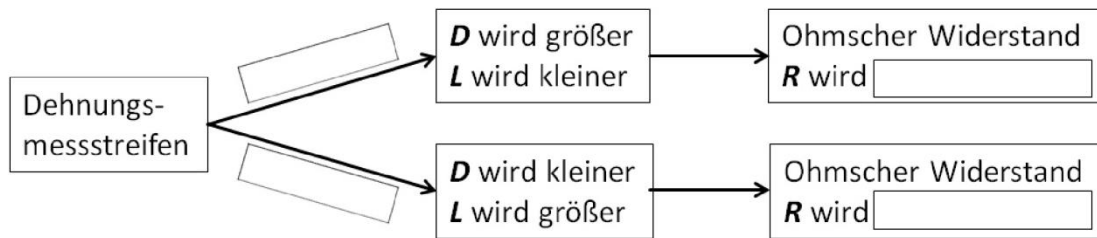
Bei Krafteinwirkung werden die Dehnungsmessstreifen  $R_2$  und  $R_3$  *gedehnt / gestaucht*. Der Widerstandsdraht der Dehnungsmessstreifen wird also *länger und dünner / kürzer und dicker*. Die Länge des Drahtes  $L$  *vergrößert / verkleinert* sich also, während sich der Durchmesser  $D$  und damit die Querschnittsfläche  $A$  des Drahtes *vergrößert / verkleinert*.

## Aufgabe 3:

Für den unbelasteten Dehnungsmessstreifen ergibt sich mit dem spezifischen Widerstand des Drahtes  $\rho$  für den Widerstand  $R$ :

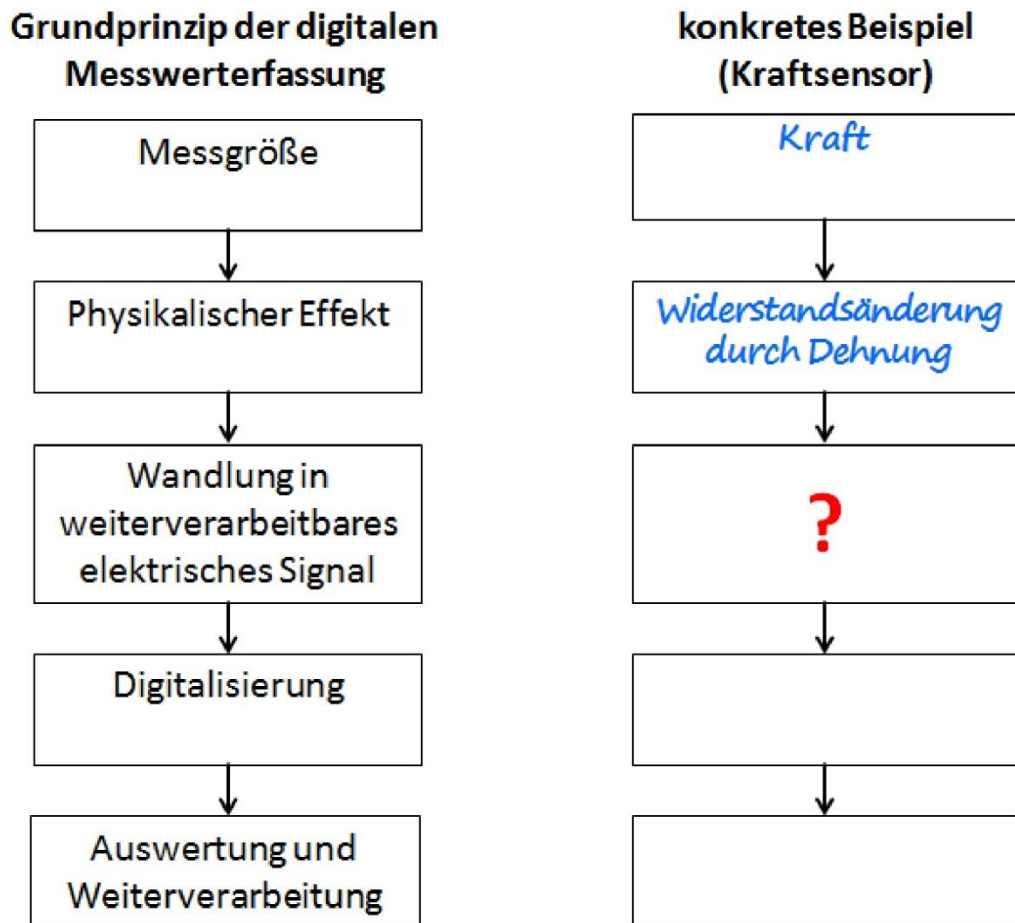
$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} = \rho \cdot \frac{4 \cdot L}{D^2 \cdot \pi} \quad (5)$$

Ergänzen Sie das folgende Schema mit Hilfe der Gleichung oben. Setzen Sie dazu folgende Begriffe passend ein: *gedehnt, gestaucht, größer, kleiner*



## Schaltungsentwurf

Unser digitaler Kraftsensor folgt dem gleichen Grundprinzip der digitalen Messwerterfassung wie die Lichtautomatik oder das digitale Thermometer.

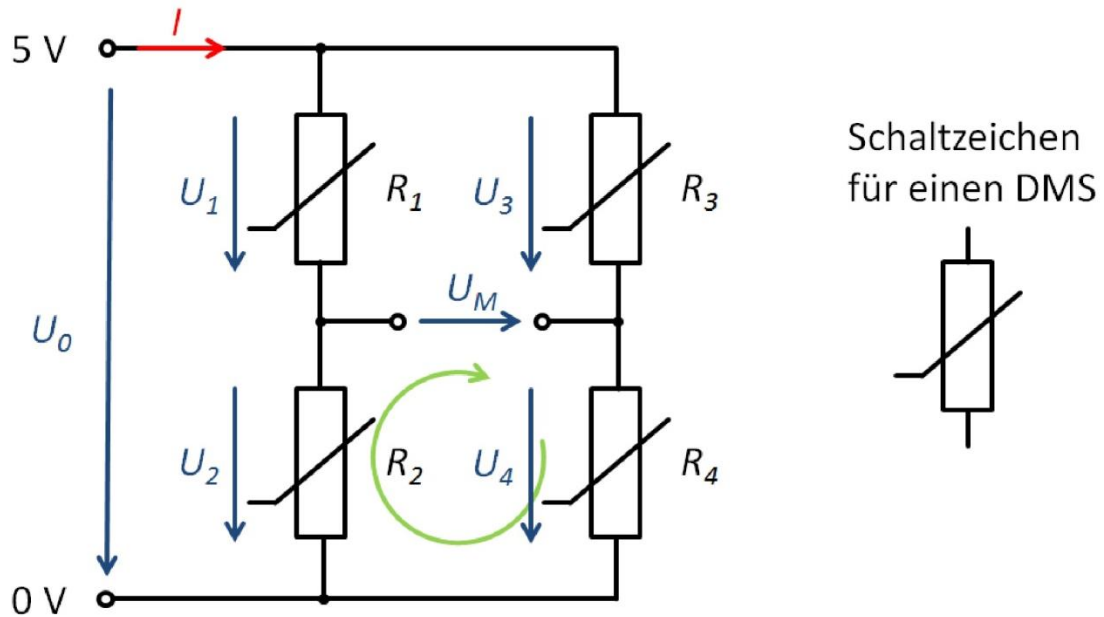


Zur Erinnerung: Unser Ziel ist es ja, Kräfte digital messen zu können. Durch die Dehnungsmessstreifen dem Federkörper der Wägezelle sind wir in der Lage, die durch die Krafteinwirkung verursachte Dehnung eine Widerstandsänderung zu wandeln. Damit wir diese Widerstandsänderung digitalisieren können, müssen wir diese noch in ein weiterverarbeitbares elektrisches Signal wandeln, das wir mit unserem A-Wandler digitalisieren können.

**Problem:** Die Widerstandsänderung der Dehnungsmessstreifen ist sehr klein. Mit einem Spannungsteiler wie beim digitalen Thermometer erhalten wir kein auswertbares Spannungssignal.

**Lösungsansatz:** Wir brauchen eine Schaltung, die empfindlich auf kleine Widerstandsänderungen reagiert und diese in eine auswertbare Spannung wandelt. In der Messtechnik kommt dabei eine Brückenschaltung (Wheatstonesche Messbrücke) zum Einsatz.

Dazu benutzt man zwei parallele Spannungsteiler aus insgesamt vier Widerständen, die zusammen eine Brückenschaltung bilden.



**Aufgabe 4:** Berechnen Sie die Spannungsverhältnisse für die beiden Spannungsteiler für den Fall, dass die Wägezelle unbelastet ist und alle vier Widerstände  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R = 1000 \, \Omega$  groß sind. Zur Erinnerung: Die Spannungen in einem Spannungsteiler verhalten sich immer wie die zugehörigen Widerstände. Damit ergeben sich für die Verhältnisse folgende Gleichungen:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2} \quad (6)$$

bzw.

$$\frac{U_3}{U_4} = \frac{R_3}{R_4} \quad (7)$$

**Aufgabe 5:** Notieren Sie: Was ergibt sich damit für die Spannungen  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  und  $U_4$ , wenn die Gesamtspannung  $U_0 = 5 \, \text{V}$  beträgt?



**Aufgabe 6:** Aus den Teilspannungen können wir nun mit Hilfe der Maschenregel (2. Kirchhoffsches Gesetz), die für uns relevante Messspannung  $U_M$  berechnen. Dazu schauen wir uns die Masche aus  $U_2$ ,  $U_4$  und  $U_M$  an (grüner Pfeil in der Abbildung der Schaltung).

Zur Erinnerung hier noch einmal die Maschenregel:

Die Summe aller Teilspannungen längs einer geschlossenen Masche ist gleich null.

Stellen Sie mit Hilfe der Maschenregel die Gleichung für die Messspannung  $U_M$  in Abhängigkeit von  $U_2$  und  $U_4$  auf.

**Aufgabe 7:** Notieren Sie: Was gilt für die Messspannung  $U_M$  mit den Ergebnissen für die Spannungen  $U_2$  und  $U_4$  aus Aufgabe 5?

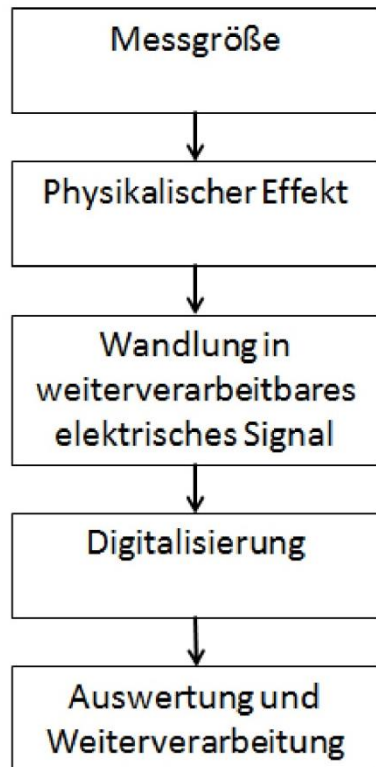
**Aufgabe 8:** Denken wir noch einmal zurück an die Dehnungsmessstreifen auf der Wägezelle. Wirkt eine Kraft auf die Wägezelle, so werden die Dehnungsmessstreifen  $R_1$  und  $R_4$  gedehnt und ihr ohmscher Widerstand erhöht sich. Die Dehnungsmessstreifen  $R_2$  und  $R_3$  werden hingegen gestaucht und ihr ohmscher Widerstand verringert sich.

Beschreiben Sie, wie sich die Spannungen  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  und  $U_4$  verändern, wenn eine Kraft auf die Wägezelle wirkt. Notieren Sie die Gleichungen, mit deren Hilfe Sie zu den Ergebnissen gekommen sind.

**Aufgabe 9:** Beschreiben Sie: Wie verändert sich mit den Ergebnissen aus Aufgabe 8 (belastete Wägezelle) die Messspannung  $U_M$  gegenüber Aufgabe 7 (unbelastete Wägezelle)?

Unsere Erkenntnis aus den Aufgaben zuvor ist also, dass man mit Hilfe einer Brückenschaltung (Wheatstonesche Messbrücke) kleine Widerstandsänderungen detektieren und in ein weiterverarbeitbares Spannungssignal wandeln kann. Ergänzen wir nun also unser Schema zum Grundprinzip der digitalen Messwerterfassung.

### Grundprinzip der digitalen Messwerterfassung



### konkretes Beispiel (Kraftsensor)



Auf unserem Weg zu einem digitalen Kraftsensor steht nun also die Digitalisierung an. Damit wir für die weiteren Schritte auf unsere Messergebnisse zugreifen können, nutzen wir das Programm `phypi.py`. Hier haben wir die Möglichkeiten uns die digitalisierten Messwerte grafisch anzeigen zu lassen und können diese zur Auswertung abspeichern. Im Hintergrund laufen dabei dieselben Schritte ab, wie wir sie beim digitalen Thermometer in unseren eigenen Programmen durchgeführt haben.

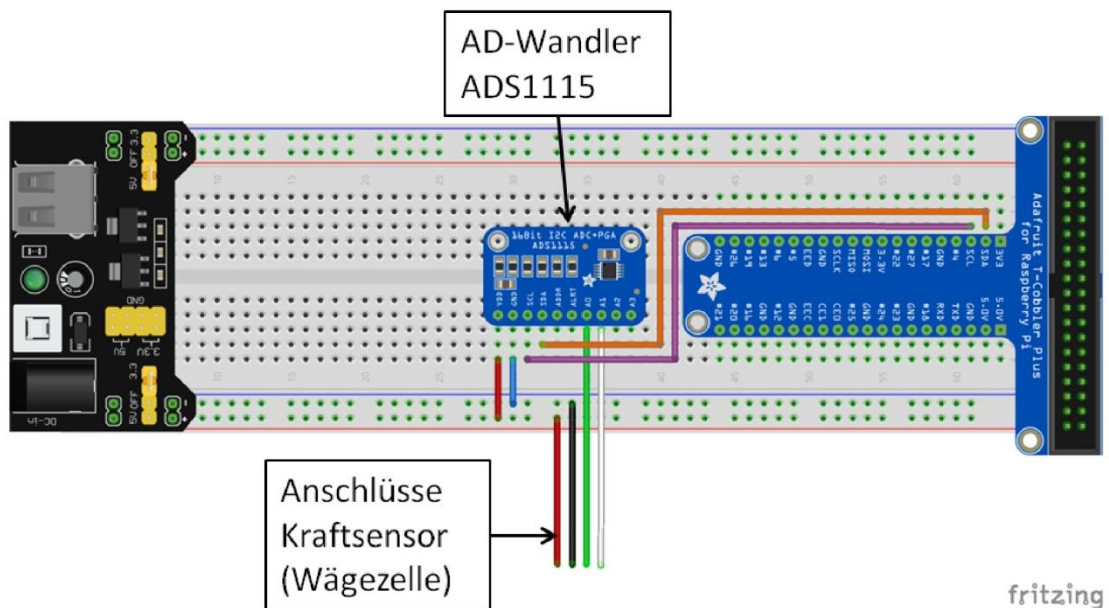
## Realisierung des digitalen Kraftsensors

### Material:

- Kraftsensor, Wägezelle TAL220B
- AD-Wandler ADS1115
- Breadboard mit Spannungsversorgung und Netzteil
- Breadboard-Leitungen in verschiedenen Farben
- Raspberry Pi
- Flachbandkabel
- Instrumentenverstärker AD 623 ANZ
- 2 x 10 k $\Omega$  Widerstand (Farbcode: braun, schwarz, schwarz, rot, braun)
- 200  $\Omega$  Widerstand (Farbcode: rot, schwarz, schwarz, schwarz, braun)
- Keramikkondensator 0,1  $\mu$ F
- Elektrolytkondensator 10  $\mu$ F
- 5 x Massestück 100 g
- Schraubenfeder  $D = 10$  N/m

### Durchführung:

1. Bauen Sie die nachfolgende Schaltung auf dem Breadboard auf. Aus den Tabellen kann entnommen werden, wie der AD-Wandler und die Wägezelle auf dem Breadboard anzuschließen ist. Zwischen der grünen und der weißen Messleitung können wir die Messspannung  $U_M$  unserer Brückenschaltung messen.



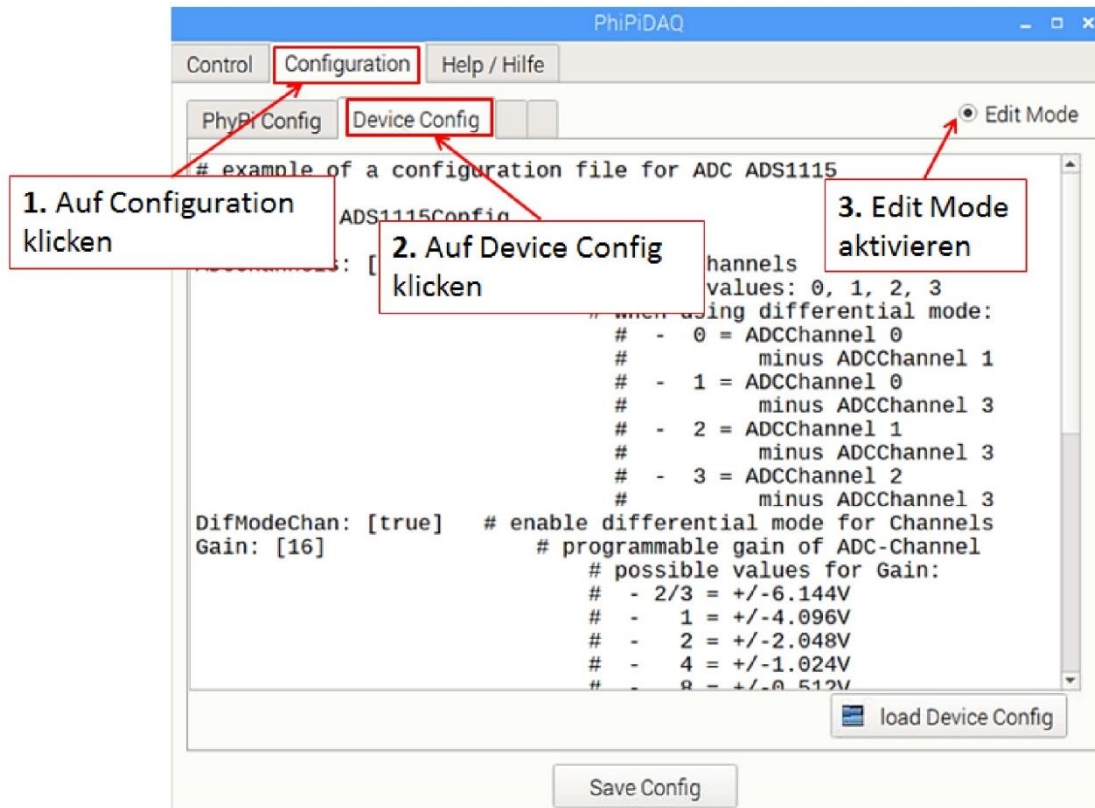
Anschlüsse Wägezelle	Anschlüsse Breadboard / GPIO-Pin
rote Anschlussleitung	5 V
schwarze Anschlussleitung	0 V
grüne Anschlussleitung	A0 (AD-Wandler ADS1115)
weiße Anschlussleitung	A1 (AD-Wandler ADS1115)

Anschlüsse AD-Wandler ADS1115	Anschlüsse Breadboard / GPIO-Pin
VDD	5 V
GND	0 V
SDL	GPIO-Pin SCL
SDA	GPIO-Pin SDA
A0	grüne Leitung der Wägezelle
A1	weiße Signalleitung der Wägezelle

2. Befestigen Sie die Wägezelle an einem Stativ so, dass der auf der Stirnseite abgebildete Pfeil nach unten zeigt. Wir benutzen eine Wägezelle, die in Waagen bis 500 g eingesetzt wird. Diese hat im Gegensatz zur Wägezelle aus der 5 kg - Küchenwaage nicht nur zwei Bohrungen, sondern einen länglichen Schlitz zwischen den Bohrungen, sodass ebenfalls oben und unten Biegebalken entstehen. Diese Konstruktion ist nur notwendig, um eine höhere Empfindlichkeit zu ermöglichen, funktioniert aber genauso wie bei der Wägezelle oben. Das folgende Bild zeigt einen möglichen Aufbau (hier bereits mit Massestücken belastet).



3. Wenn wir die Schaltung aufgebaut haben und die Wägezelle am Stativ angebracht haben, können wir unseren digitalen Kraftsensor das erste mal testen. Dazu starten wir das Programm "PhyPi" auf dem Desktop des Raspberry Pi mit einem Doppelklick.
4. Jetzt können wir uns die mit Hilfe des AD-Wandlers die digitalisierte Messspannung  $U_M$  anzeigen lassen. Dafür müssen wir zuerst noch den AD-Wandler passend konfigurieren. Dazu gehen wir über den Reiter Configuration auf die Device Config des ADS1115 und aktivieren den Edit Mode oben rechts.



5. Da wir bereits wissen, dass die Widerstandsänderungen der Dehnungsmessstreifen und auch unserer Messspannung sehr klein sind, machen wir uns noch eine Eigenschaft des von uns verwendeten AD-Wandlers ADS1115 zunutze. Er ist in der Lage ein Eingangssignal mit einer Verstärkung von bis zu Faktor 16 zu verstärken. Außerdem müssen wir den AD-Wandler noch so konfigurieren, dass er die Spannungsdifferenz zwischen den Anschlüssen A0 und A1, also die Messspannung  $U_M$  misst. Dazu passen wir die Konfigurationsdatei an:

1. Unter `ADCChannels:` in Zeile 5 geben wir in der eckigen Klammer mit `ADCChannels: [0]` an, welchen Kanal wir nutzen wollen.
2. Unter `DifModeChan:` in Zeile 16 geben wir in der eckigen Klammer mit `DifModeChan: [true]` an, dass wir die Differenz von A0 und A1 digitalisieren möchten.
3. Unter `Gain:` in Zeile 17 geben wir in der eckigen Klammer mit `Gain: [16]` an, dass wir das Eingangssignal mit dem Faktor 16 verstärken wollen.



Nachfolgend ist die Konfiguration dargestellt, die sich daraus ergibt.

```
# example of a configuration file for ADC ADS1115

DAQModule: ADS1115Config

ADCChannels: [0]      # active ADC-Channels
                        # possible values: 0, 1, 2, 3
                        # when using differential mode:
                        #   - 0 = ADCChannel 0
                        #       minus ADCChannel 1
                        #   - 1 = ADCChannel 0
                        #       minus ADCChannel 3
                        #   - 2 = ADCChannel 1
                        #       minus ADCChannel 3
                        #   - 3 = ADCChannel 2
                        #       minus ADCChannel 3
DifModeChan: [true]   # enable differential mode for Channels
Gain: [16]            # programmable gain of ADC-Channel
                        # possible values for Gain:
                        #   - 2/3 = +/-6.144V
                        #   - 1 = +/-4.096V
                        #   - 2 = +/-2.048V
                        #   - 4 = +/-1.024V
                        #   - 8 = +/-0.512V
                        #   - 16 = +/-0.256V
sampleRate: 860       # programmable Sample Rate of ADS1115
                        # possible values for SampleRate:
                        # 8, 16, 32, 64, 128, 250, 475, 860
```

6. In der PhyPi Config können wir noch Einstellungen für die grafische Ausgabe, das Messintervall und weitere Einstellungen für die Ausgabe der Messwerte angeben. Hier passen wir noch den dargestellten Wertebereich für die grafische Darstellung an, damit wir nur den für uns interessanten Wertebereich angezeigt bekommen.

1. Dazu löschen wir die beiden `##` vor `ChanLimits:` in Zeile 26, um die Einstellung des dargestellten Wertebereichs zu aktivieren.
2. Da unsere Messspannung  $U_M$  sehr klein und bei einer einwirkenden Kraft von oben positiv ist, lassen wir uns einen Bereich von - 1 mV bis 5 mV anzeigen. Dazu entfernen wir die beiden `##` in Zeile 27 und passen die Werte in der eckigen Klammer entsprechend an `- [-0.001, 0.005]`.

```

# Configuration Options for PhyPiDAQ

# device configuration files
DeviceFile: config/ADS1115Config.yaml
#DeviceFile: config/MCP3008Config.yaml
#DeviceFile: config/PSConfig.yaml
#DeviceFile: config/MAX31865Config.yaml
#DeviceFile: config/GPIOCOUNT.yaml

## an example of multiple devices
#DeviceFile: [config/ADS1115Config.yaml, config/GPIOCOUNT.yaml]

DisplayModule: DataLogger
# DisplayModule: DataGraphs # text, bar-graph, history and xy-view
Interval: 0.1 # logging interval
XYmode: false # enable/disable XY-display

# channel-specific information
ChanLabels: [U, U] # names for channels
ChanUnits: [V, V] # units for channels
ChanColors: [darkblue, sienna] # channel colours in display

# eventually overwrite Channel Limits obtained from device config
ChanLimits:
  - [-0.001, 0.005] # chan 0
## - [0., 1.] # chan 1
## - [0., 1.] # chan 2

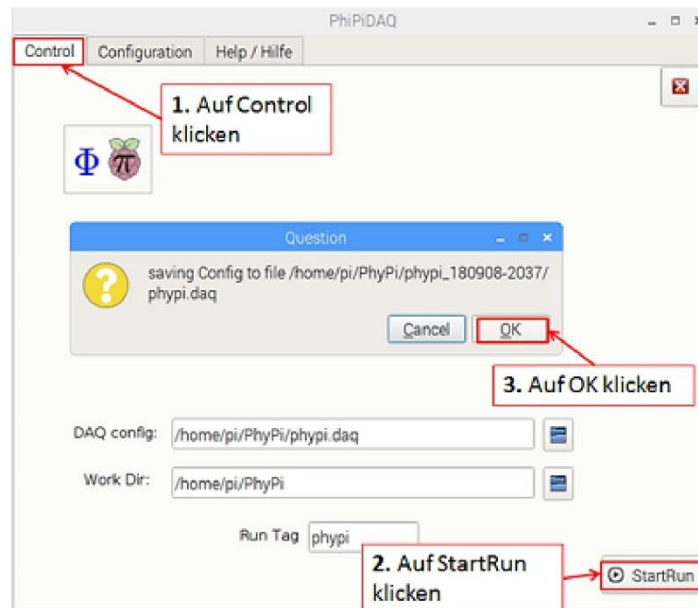
# calibration of channel values
# - null or - <factor> or - [ [ <true values> ], [ <raw values> ] ]
#ChanCalib:
# - 1. # chan0: simple calibration factor
# - [ [0.,1.], [0., 1.] ] # chan1: interpolation: [true]([<raw>] )
# - null # chan2: no calibration

# apply formulae to calibrated channel values
#ChanFormula:
# - c0 + c1 # chan0
# - c1 # chan1
# - null # chan2 : no formula

# name of output file
DataFile: null # file name for output file
#DataFile: testfile.csv # file name for output file
#CSVseparator: ';'

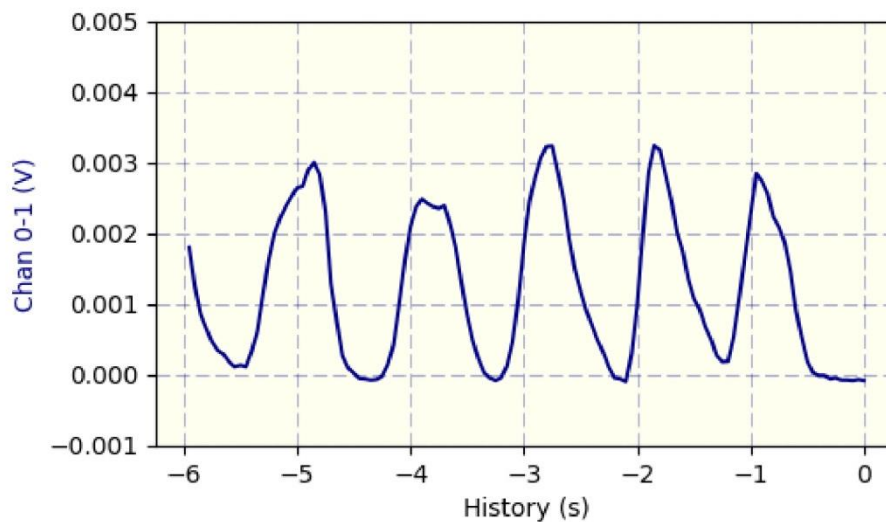
```

7. Über den Reiter Control, anschließendes Klicken auf StartRun und Bestätigen mit OK können wir nun PhyPiDAQ starten und uns die digitalisierte Messspannung über der Zeit anzeigen lassen.



8. Jetzt können wir durch Belasten und Entlasten der Wägezelle mit den Fingern testen, ob wir eine digitalisierte Messspannung angezeigt bekommen und ob sich diese wie erwartet verändert.

Die nachfolgende Abbildung zeigt beispielhaft eine solche Messung.

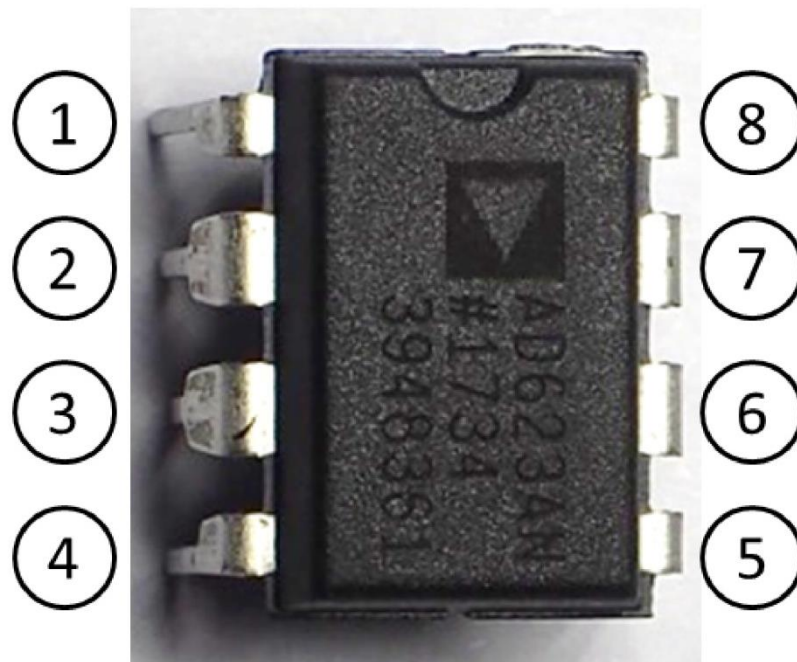




**9. Problem:** Die sehr kleine Messspannung bringt mehrere Nachteile mit sich: Zum einen sind solch kleine Spannungssignale sehr störanfällig. Bereits kleine Störspannungen wirken sich massiv auf das Messergebnis aus. Zum anderen können wir die Messspannung nur schlecht auflösen (wir können nur wenige der Digitalisierungsstufen des AD-Wandlers nutzen).

**Lösungsansatz:** Wir verstärken die analoge Messspannung  $U_M$ , bevor wir diese digitalisieren. Dadurch beeinflussen Störungen die Messspannung wesentlich weniger, wenn diese nach der Verstärkung auftreten. Für die Digitalisierung mit dem AD-Wandler ist für uns entscheidend, dass wir die Digitalisierungsstufen des AD-Wandlers gut ausnutzen, damit wir unsere Messspannung möglichst gut auflösen. Deshalb wählen wir eine Verstärkung, die so groß ist, dass wir den Messbereich des AD-Wandlers gut ausnutzen.

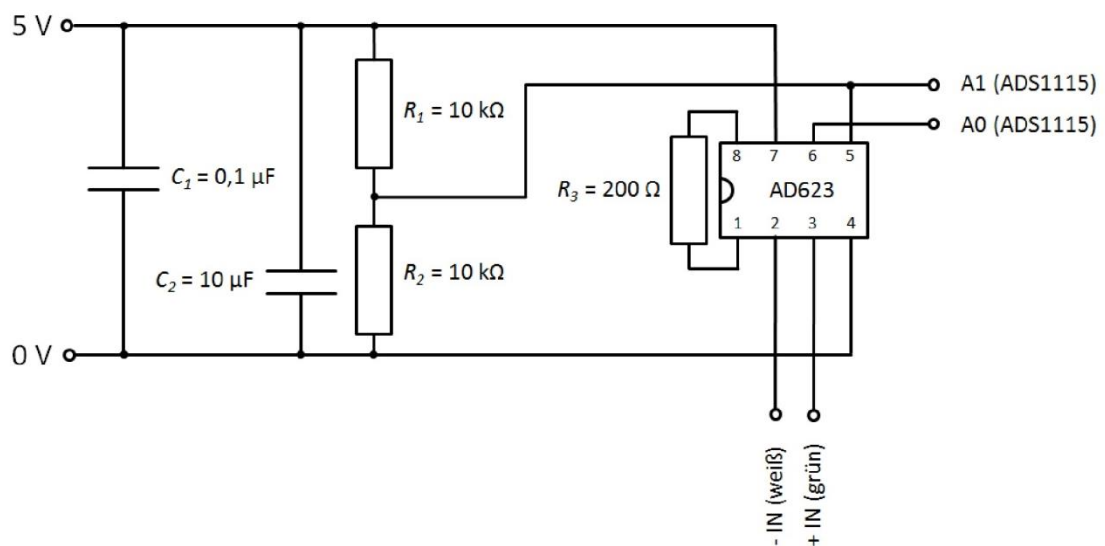
**10. Der Instrumentenverstärker:** Für die Verstärkung verwenden wir einen sogenannten Instrumentenverstärker, der es uns ermöglicht unsere Messspannung mit einem einstellbaren Verstärkungsfaktor zu verstärken. Die Einstellung erfolgt durch einen Widerstand, der an den Instrumentenverstärker angeschlossen wird. In unserem Fall wählen wir einen Verstärkungsfaktor von 500, indem wir an den Instrumentenverstärker einen Widerstand von  $200\ \Omega$  anschließen. Die Messspannung wird also 500 Mal größer als ohne Verstärkung. Der Instrumentenverstärker AD623 ist ein elektronisches Bauelement mit insgesamt acht Pins (Anschlüssen). In der nachfolgenden Abbildung ist die Pinbelegung für den Instrumentenverstärker AD623 dargestellt. Das Gehäuse des Instrumentenverstärkers hat an einer Seite eine Einkerbung. Die Pins sind so nummeriert, dass von oben gesehen der Pin links dieser Einkerbung die Nummer 1 und der Pin rechts von der Einkerbung die Nummer 8 bekommt. Die anderen Pins sind dann entsprechend durchnummeriert. Beim Einbau des Instrumentenverstärkers in eine Schaltung muss unbedingt darauf geachtet werden, dass die Pins des Instrumentenverstärkers korrekt angeschlossen werden.



Aus der Tabelle kann entnommen werden, welche Funktionen die einzelnen Pins des Instrumentenverstärkers haben und wie dieses angeschlossen werden müssen.

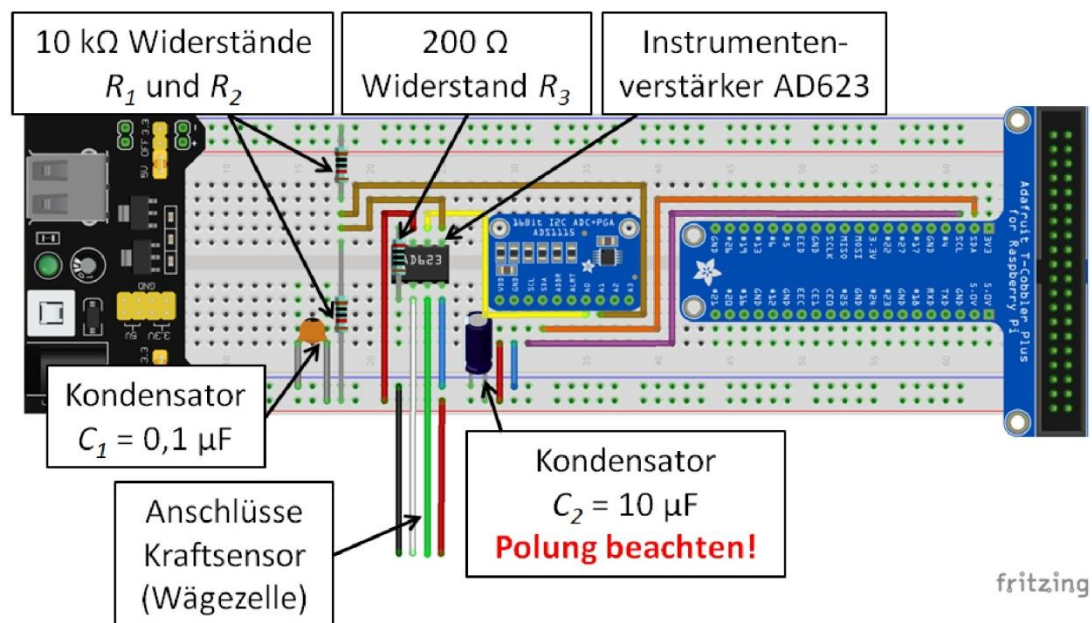
Pin (Anschluss)	Beschreibung
1	- $R_G$ : Anschluss für den Widerstand zur Einstellung des Verstärkungsfaktors.
2	- IN: Negativer Anschluss des Messsignals (grüne Leitung des Kraftsensors).
3	+ IN: Positiver Anschluss des Messsignals (weiße Leitung des Kraftsensors).
4	- $V_S$ : Negative Versorgungsspannung 0 V.
5	REF: Über diesen Eingang kann eine Referenzspannung zum Messsignal addiert werden.
6	OUTPUT: Verstärkte Messspannung als Ausgangssignal.
7	+ $V_S$ : Positive Versorgungsspannung 5 V.
8	+ $R_G$ : Anschluss für den Widerstand zur Einstellung des Verstärkungsfaktors.

11. Bauen Sie die nachfolgende Schaltung auf dem Breadboard auf. Achten Sie während des Aufbaus darauf, dass die Spannungsversorgung des Breadboards ausgeschaltet ist (grüne LED leuchtet nicht). Da die Schaltung komplizierter ist, sollte auf jeden Fall sehr gründlich kontrolliert werden, ob alle Bauelemente richtig angeschlossen sind, bevor die Spannungsversorgung des Breadboards eingeschaltet wird. Der AD-Wandler ADS-1115 und die Wägezelle sind im nachfolgenden Schaltplan nicht dargestellt. Die Anschlussbelegung dieser Komponenten kann den Tabellen unter dem Schaltplan entnommen werden.



Anschlüsse Wägezelle	Anschlüsse Breadboard / GPIO-Pin
rote Anschlussleitung	5 V
schwarze Anschlussleitung	0 V
grüne Anschlussleitung	+IN Instrumentenverstärker AD623 (Pin 3)
weiße Anschlussleitung	-IN Instrumentenverstärker AD623 (Pin 2)

Anschlüsse AD-Wandler ADS1115	Anschlüsse Breadboard / GPIO-Pin
VDD	5 V
GND	0 V
SDL	GPIO-Pin SCL
SDA	GPIO-Pin SDA
A0	OUTPUT Instrumentenverstärker AD623 (Pin 6)
A1	2,5 V (zwischen $R_1$ und $R_2$ )



#### Zusatzinformation zur Schaltung für Interessierte:

Die beiden Kondensatoren  $C_1$  und  $C_2$  sind dazu da, Störsignale in unserer Schaltung zu unterdrücken. Mit dem Spannungsteiler aus den Widerständen  $R_1$  und  $R_2$  halbieren wir die Versorgungsspannung von 5 V, sodass wir zwischen den beiden Widerständen eine Spannung von 2,5 V abgreifen können. Diese addieren wir über den Pin 5 des Instrumentenverstärkers zur verstärkten Messspannung. Dieser Schritt ist notwendig, da wir sonst sehr kleine Messspannungen und negative Messspannungen nicht verstärken könnten. Da wir diesen Offset von 2,5 V in unserem digitalisierten Wert der Messspannung nicht mehr





```

# - [ [0.,1.], [0., 1.] ] # chan1: interpolation: [true](<raw> )
# - null # chan2: no calibration

# apply formulae to calibrated channel values
#ChanFormula:
# - c0 + c1 # chan0
# - c1 # chan1
# - null # chan2 : no formula

# name of output file
DataFile: null # file name for output file
#DataFile: testfile.csv # file name for output file
#CSVseparator: ';'

```

3. Außerdem müssen wir noch den AD-Wandler ADS1115 passend konfigurieren: Dazu wechseln wir über den Reiter **Device Config** in die Konfigurationsdatei des ADS1115.
4. Hier passen wir die Konfiguration für unsere Messung an: Zum einen müssen wir den AD-Wandler so konfigurieren, dass dieser uns die Spannungsdifferenz zwischen den Anschlüssen A0 und A1, also unsere verstärkte Messspannung digitalisiert. Dazu ändern wir Zeile 5 in `ADCChannels: [0]` und Zeile 16 in `DifModeChan: [true]`. Zum anderen passen wir die interne Verstärkung und damit den Messbereich des AD-Wandlers so an, dass wir den Messbereich möglichst gut ausnutzen. Dazu ändern wir Zeile 17 in `Gain: [2]`, sodass unsere Messspannung noch mal um den Faktor zwei verstärkt wird und wir Spannungen in einem Bereich von +2,048 V und -2,048 V digitalisieren können.

```

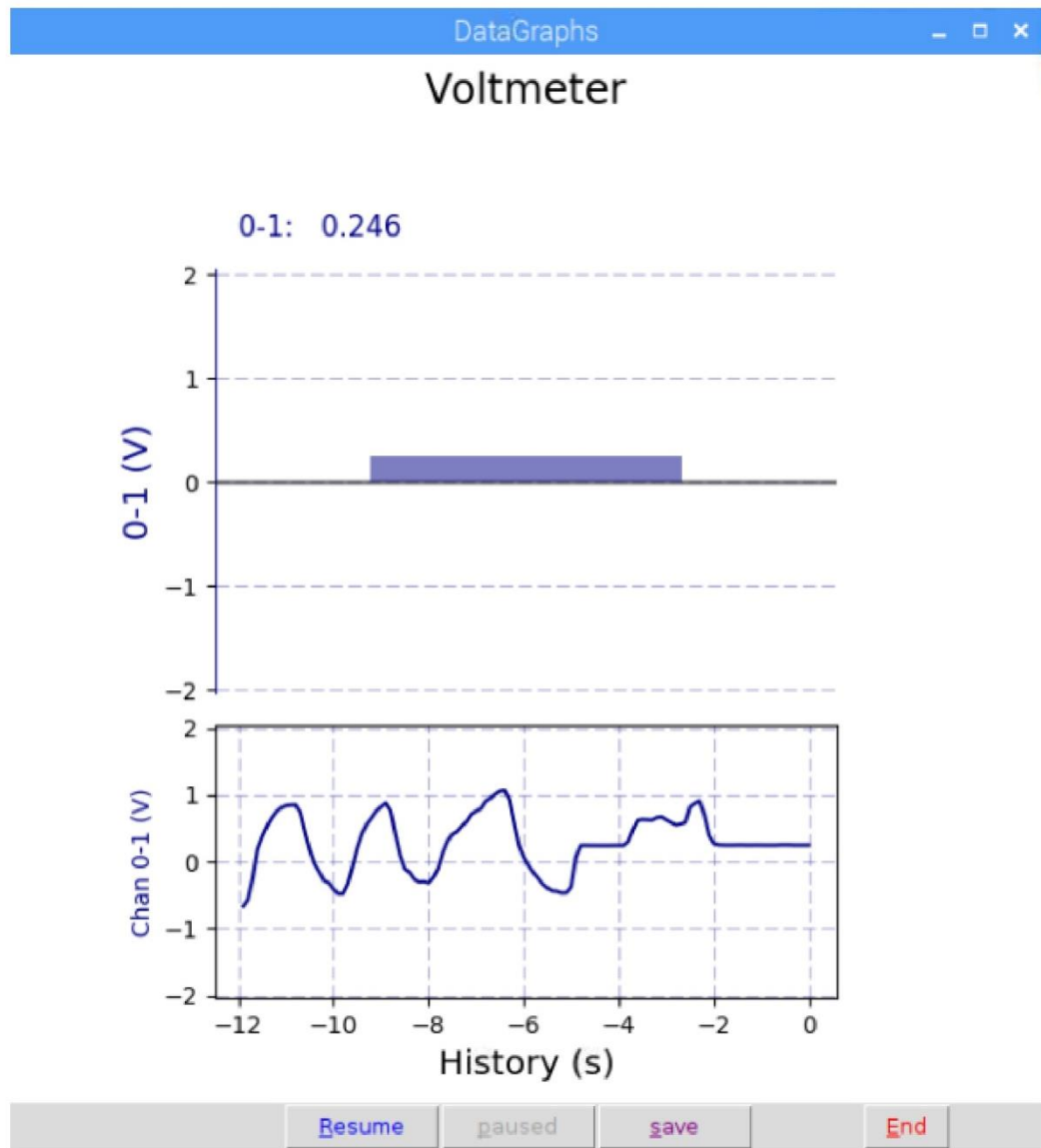
# example of a configuration file for ADC ADS1115

DAQModule: ADS1115Config

ADCChannels: [0] # active ADC-Channels
                  # possible values: 0, 1, 2, 3
                  # when using differential mode:
                  # - 0 = ADCChannel 0
                  #   minus ADCChannel 1
                  # - 1 = ADCChannel 0
                  #   minus ADCChannel 3
                  # - 2 = ADCChannel 1
                  #   minus ADCChannel 3
                  # - 3 = ADCChannel 2
                  #   minus ADCChannel 3
DifModeChan: [true] # enable differential mode for Channels
Gain: [2] # programmable gain of ADC-Channel
           # possible values for Gain:
           # - 2/3 = +/-6.144V
           # - 1 = +/-4.096V
           # - 2 = +/-2.048V
           # - 4 = +/-1.024V
           # - 8 = +/-0.512V
           # - 16 = +/-0.256V
sampleRate: 860 # programmable Sample Rate of ADS1115
                 # possible values for SampleRate:
                 # 8, 16, 32, 64, 128, 250, 475, 860

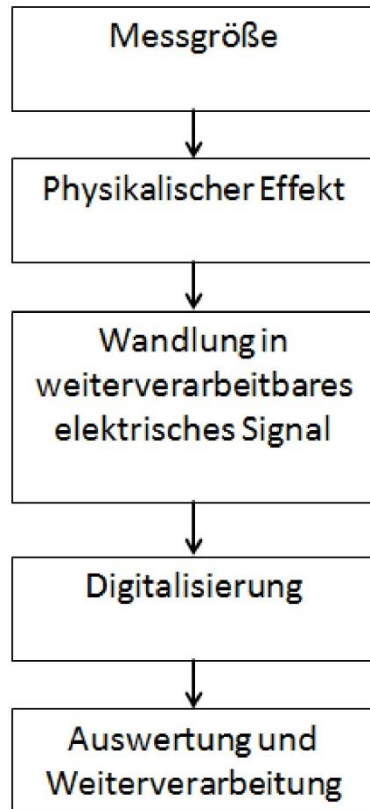
```

5. Nun können wir unseren Test starten: Dazu wechseln wir zu **Control** und starten die Messung mit **StartRun**. Mit den Fingern können wir nun sanft von oben oder unten auf den Kraftsensor drücken und testen, ob sich das Messsignal wie gewünscht verändert. Das Bild unten zeigt beispielhaft einen erfolgreichen Test.



6. Wir können nun unser Schema zum Grundprinzip der digitalen Messwerterfassung um die Verstärkung der Messspannung durch den Instrumentenverstärker und die Analog-Digital-Wandlung ergänzen.

### Grundprinzip der digitalen Messwerterfassung



### konkretes Beispiel (Kraftsensor)



13. Nach der Digitalisierung haben wir nun eine digitalisierte Messspannung, aber keinen digitalisierten Wert der auf den Kraftsensor wirkenden Kraft. Uns fehlt also noch die Umrechnung und Weiterverarbeitung unserer digitalisierten Messspannung. Um wirklich Kräfte zu messen, müssen wir unseren digitalen Kraftsensor also noch kalibrieren. Dazu nehmen wir für die Gewichtskraft verschiedener bekannter Massen die digitalisierte Messspannung auf.

Füllen Sie die nachfolgende Tabelle aus. Wiegen Sie dafür zunächst die benötigten Massestücke mit einer Laborwaage ab und tragen Sie das Messergebnis in die Tabelle ein. Berechnen Sie die zugehörige Gewichtskraft  $F_G$  aus der gemessenen Masse  $m$  und der Gravitationsfeldstärke  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ .

$$F_G = m \cdot g \quad (8)$$

Um die Messspannung  $U_M$  zu ermitteln, führen Sie die Schritte 1. bis 11. für jede zu messende Masse aus.

	0 g	100 g	200 g	300 g	400 g
gemessene Masse $m$ in g					
Gewichtskraft $F$ in N					
Messspannung $U_M$ in V					

- Wir starten wieder das Programm **PhyPi** und nutzen die Konfiguration unserer eben durchgeführten Messung. Dazu klicken wir in der Zeile **DAQ config** auf das Ordnersymbol.

- Wir öffnen links oben **Persönliche Ordner** und wechseln dann in das Verzeichnis **PhyPi**. Im neuesten phypi-Ordner liegt die Konfiguration unseres Tests bzw. unserer letzten Messung. Mit einem Doppelklick auf die **.daq-Datei** laden wir diese Konfiguration in PhyPi.
- Damit uns bei der Kalibrierung nur ein sinnvoller Wertebereich angezeigt wird, gehen wir über den Reiter **Configuration** wieder auf die **PhyPi Config** und aktivieren in Zeile 26 durch Entfernen der beiden `##` vor `ChanLimits` die Anzeigebereichseinstellung. Jetzt können wir durch Entfernen der beiden `##` in der nachfolgenden Zeile einen Wertebereich für die Anzeige vorgeben `- [-0.5, 2.] # chan 0`.
- Damit wir nicht nur Daten angezeigt bekommen, sondern diese auch zur Auswertung gespeichert werden, müssen wir in Zeile 45 unter `DataFile:` einen Dateinamen `kalibrierung_<hier verwendete Masse eintragen>.csv` anstatt `null` angeben. Unsere Messdaten werden dann im PhyPi-Verzeichnis im neuesten Ordner abgelegt.
- Nun hängen wir das entsprechende Massestück an den Kraftsensor und achten darauf, dass dieses nicht pendelt, wenn wir die Messung beginnen.
- Wir klicken auf den Reiter **Control** und starten die Messung mit **StartRun**.
- Nach etwas mehr als 10 Sekunden beenden wir die Messung über **End**.
- Jetzt können wir unsere aufgenommenen Messwerte für die Kalibrierung auswerten. Damit wir die Daten nachher zuordnen können, benennen wir den jeweils neuesten Ordner im Verzeichnis PhyPi in `kalibrierung_<jeweilige Masse>` um.
- Nun lesen wir die Daten in das Tabellenkalkulationsprogramm **LibreOffice Calc** (ähnlich Excel) ein. Zunächst öffnen wir das Programm: Dazu klicken wir auf dem Startbildschirm links oben auf die **Himbeere**, dann auf **Büro** und auf **LibreOffice Calc**.
- Wir öffnen unsere Messdaten aus dem eben umbenannten Ordner und lesen diese in LibreOffice Calc ein.



11. Nun können wir für unsere Kalibrierung den Mittelwert aus 100 Messwerten für die Messspannung  $U_M$  berechnen und in unsere Tabelle oben übernehmen.

Berechnung eines Mittelwerts mit LibreOffice Calc:

- Wir klicken auf eine beliebige leere Zelle in der Tabelle.
- Wir berechnen mit `= MITTELWERT(A4:A103)` den Mittelwert aus den Zellen A4 bis A103.
- Den errechneten Mittelwert für die Messspannung  $U_M$  tragen wir nun in die Tabelle oben ein.

14. Nun können wir die Kalibrierung abschließen, indem wir PhyPi starten und als Basis für die Konfiguration die .daq-Datei unserer letzten Messung im PhyPi-Verzeichnis öffnen. Wir wechseln wieder in die PhyPi Config und können nun unsere Kalibrierung vornehmen:

1. Durch Entfernen der beiden `##` in Zeile 33 aktivieren wir die Kalibrierungsfunktion `chanCalib:`.
2. In Zeile 32 fügen wir unsere Werte für die Gewichtskraft  $F_G$  und die zugehörige Messspannung  $U_M$  ein, mit deren Hilfe PhyPi dann eine Funktion für die gemessene Kraft in Abhängigkeit von der Messspannung  $U_M$  berechnet. Mit dieser Funktion kann dann für jeden beliebigen Zwischenwert ein zugehöriger Kraftwert berechnet werden.
3. Damit wir den passenden Wertebereich angezeigt bekommen, passen wir in Zeile 27 den Anzeigebereich entsprechend an `-[0., 5.]`.
4. Da unser angezeigter Messwert nun keine Spannung mehr ist, passen wir Zeile 21 an die Messgröße Kraft `ChanLabels: [N]` und Zeile 22 an die entsprechende Einheit `ChanUnits: [N]` an.

```
# Configuration Options for PhyPiDAQ

# device configuration files
DeviceFile: config/ADS1115Config.yaml
#DeviceFile: config/MCP3008Config.yaml
#DeviceFile: config/PSConfig.yaml
#DeviceFile: config/MAX31865Config.yaml
#DeviceFile: config/GPIOCCount.yaml

## an example of multiple devices
#DeviceFile: [config/ADS1115Config.yaml, config/GPIOCCount.yaml]

# DisplayModule: DataLogger
DisplayModule: DataGraphs # text, bar-graph, history and xy-view
Interval: 0.1              # logging interval
XYmode:      false        # enable/disable XY-display

# channel-specific information
ChanLabels: [F]            # names for channels
ChanUnits: [N]             # units for channels
ChanColors: [darkblue, sienna] # channel colours in display

# eventually overwrite Channel Limits obtained from device config
ChanLimits:
- [0., 5.] # chan 0
## - [0., 1.] # chan 1
## - [0., 1.] # chan 2
```

```

# calibration of channel values
# - null or - <factor> or - [ [ <true values> ], [ <raw values> ] ]
ChanCalib:
- [[FG0, FG100, FG200, FG300, FG400], [UM0, UM100, UM200, UM300, UM400]]
# - 1. # chan0: simple calibration factor
# - [ [0.,1.], [0., 1.] ] # chan1: interpolation: [true]([<raw>] )
# - null # chan2: no calibration

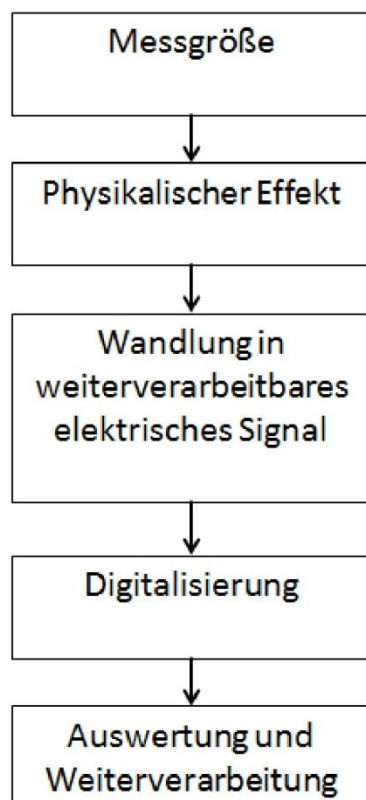
# apply formulae to calibrated channel values
#ChanFormula:
# - c0 + c1 # chan0
# - c1 # chan1
# - null # chan2 : no formula

# name of output file
DataFile: null # file name for output file
#DataFile: testfile.csv # file name for output file
#CSVseparator: ';'

```

5. Mit der Kalibrierung können wir unser Schema zum Grundprinzip der digitalen Messwerterfassung um den letzten Schritt, die Umrechnung der digitalisierten Messspannung in eine Kraft, ergänzen.

### Grundprinzip der digitalen Messwerterfassung



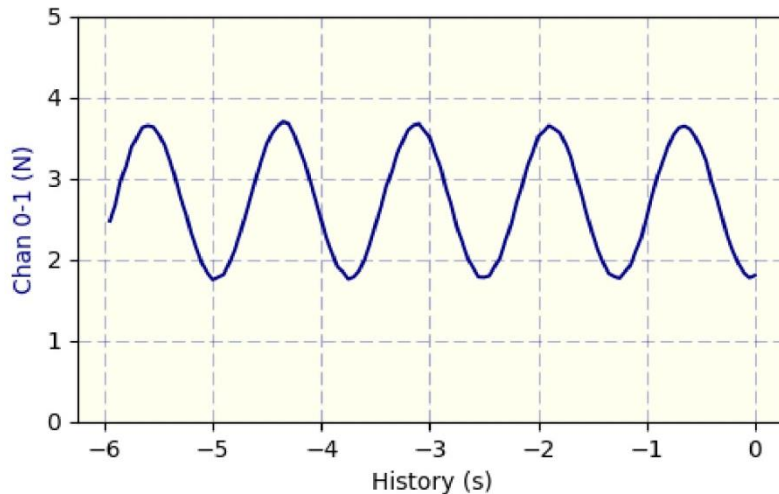
### konkretes Beispiel (Kraftsensor)



15. Jetzt können wir unseren digitalen Kraftsensor abschließend in einem Physikexperiment testen. Dazu lassen wir uns den Kraftverlauf im Aufhängepunkt eines Federpendels anzeigen:

1. Wir hängen die Schraubenfeder mit einer angehängten Masse von  $m = 300\text{ g}$  an unserem Kraftsensor ein und versetzen das System in Schwingung.
2. Nun können wir die Messung wie gewohnt starten.

Nachfolgend ist beispielhaft der zeitliche Kraftverlauf im Aufhängepunkt eines Federpendels dargestellt.



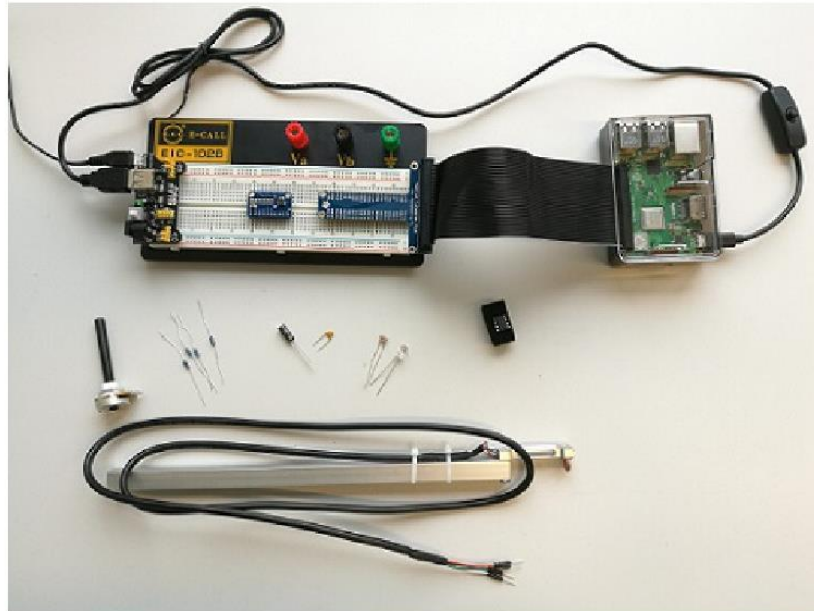
Auf eine quantitative Auswertung verzichten wir an dieser Stelle. Trotzdem können wir einige grundsätzliche Beobachtungen festhalten.

Die Kraft im Aufhängepunkt ist am oberen Umkehrpunkt des Federpendels am kleinsten und am unteren Umkehrpunkt am größten. Das Messsignal schwingt um einen Gleichgewichtszustand. Dieser Gleichgewichtszustand entspricht der Gewichtskraft von Feder und angehängter Masse.

## Anhang 2: Komponenten für den Einführungskurs

# Komponenten für den Einführungskurs

Nachfolgend sind sämtliche Komponenten für eine Grundausstattung des Raspberry Pi für PhyPiDAQ und den Einführungskurs mit möglichen Bezugsquellen aufgeführt. Die beiden folgenden Abbildungen zeigen den Grundaufbau und die benötigten Komponenten im Überblick sowie den zugehörigen Messkoffer.



## 1. Grundausrüstung Raspberry Pi

	Komponente	mögliche Bezugsquelle	Art.Nr.:	Preis in €
1.	Breadboard EIC -102B	<a href="#">reichelt</a>	<a href="#">STECKBOARD START</a>	10,10
2.	Breadboard EIC-404 ( <b>Alternative zu 1.</b> )	<a href="#">reichelt</a>	<a href="#">STECKBOARD 2K4V</a>	11,70
3.	T-Cobbler Plus	<a href="#">reichelt</a>	<a href="#">RPI T-COBBLER P</a>	8,99
4.	Spannungsversorgung Breadboard & Raspberry Pi	<a href="#">reichelt</a>	<a href="#">DEBO BREAD POWER</a>	4,90
5.	Raspberry Pi 3 B+	<a href="#">reichelt</a>	<a href="#">RASPBerry PI 3B+</a>	33,90
6.	Gehäuse Raspberry Pi	<a href="#">reichelt</a>	<a href="#">RPI CASE BASE BK</a>	8,99
7.	MicroSDHC-Speicherkarte 16GB	<a href="#">reichelt</a>	<a href="#">SDSQUAR016GGN6MA</a>	8,95
8.	5,1V/2,5A Universal-Netzteil micro-USB	<a href="#">Eckstein</a>	<a href="#">CP07048</a>	8,95
9.	USB/Micro USB - Kabel mit Schalter für Spannungsversorgung des Raspberry Pi	<a href="#">reichelt</a>	<a href="#">USB KABELSWITCH</a>	3,95
10.	65 Breadboard-Leitungen (Drahtbrücken)	<a href="#">Eckstein</a>	<a href="#">ZB02029</a>	2,95
11.	Aufbewahrungsbox PhyPi-Schülerst (Stanley Maschinenkoffer mit Organizer)	<a href="#">Bauhaus</a>	<a href="#">20266712</a>	11,90



## 2. Grundausrüstung Komponenten (Einführungskurs)

	Komponente	Ausreichend für ... PhyPi-Schülersets	mögliche Bezugsquelle	Art.Nr.:	Preis in €
1.	Widerstandssortiment 20 $\Omega$ - 1 M $\Omega$ (600 Stück)	10	<a href="#">Eckstein</a>	<a href="#">ZB58001</a>	2,95
2.	ELKO Kondensatoren Sortiment 0,22 $\mu$ F - 470 $\mu$ F (120 Stück)	10	<a href="#">Eckstein</a>	<a href="#">ZB51002</a>	1,95
3.	Keramikkondensatoren Sortiment 20 pF - 1 $\mu$ F (180 Stück)	10	<a href="#">Eckstein</a>	<a href="#">ZB51003</a>	2,77
4.	LED-Sortiment (rot, gelb, grün, blau)	5	<a href="#">Eckstein</a>	<a href="#">SF12062</a>	2,95
5.	NTC 3950 $R_{25} = 10\text{k}\Omega$ (wasserdicht)	1	<a href="#">roboter bausatz shop</a>	<a href="#">RBS12462</a>	1,40
6.	Drehpotentiometer 10 k $\Omega$	1	<a href="#">reichelt</a>	<a href="#">PO6M- LIN 10K</a>	1,60
7.	LED 5 mm warmweiß	1	<a href="#">reichelt</a>	<a href="#">LED 5- 18000 WW</a>	0,25
8.	AD-Wandler ADS1115 (Adafruit)	1	<a href="#">reichelt</a>	<a href="#">DEBO AMP 16BIT</a>	15,60
9.	Instrumentenverstärker AD 623 ANZ	1	<a href="#">reichelt</a>	<a href="#">AD 623 ANZ</a>	6,35
10.	Massestücke / Hakengewichte 100 g (10 Stück) *	2	<a href="#">Christiani</a>	<a href="#">86785</a>	30,90
11.	Schraubenfeder 10 N/m *	1	<a href="#">LEYBOLD</a>	<a href="#">352 07</a>	4,05

\*Nur notwendig, wenn diese in der Physiksammlung nicht vorhanden sind.

In der folgenden Tabelle sind sämtliche Komponenten aufgeführt, die für den Zusammenbau des Kraftsensors benötigt werden. Dieser ist dann zu gängigem Stativmaterial kompatibel.

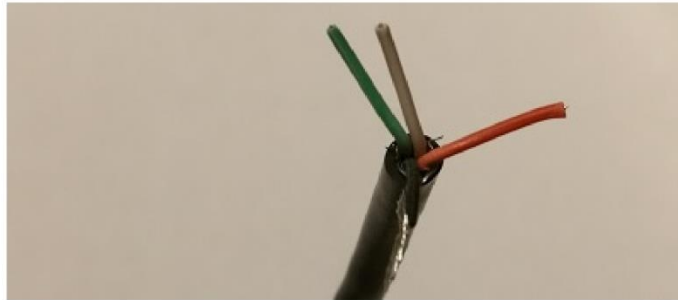
	Komponente	Ausreichend für ... PhyPi- Schülersets	mögliche Bezugsquelle	Art.Nr.:	Preis in €
1.	Kraftsensor TAL221 (Wägezelle, Biegebalken 500 g)	1	<a href="#">Eckstein</a>	<a href="#">SF14728</a>	11,84
2.	USB-Datenkabel als Leitung für den Kraftsensor TAL221	5	<a href="#">reichelt</a>	<a href="#">USB2 DK 5M</a>	5,99
3.	Schrumpfschlauch Ø 2,4 mm (50 Stück) für Leitung des Kraftsensors TAL221	10	<a href="#">Hornbach</a>	<a href="#">5071146</a>	1,95
4.	Schrumpfschlauch Ø 6,4 mm (25 Stück) für Leitung des Kraftsensors TAL221	10	<a href="#">Hornbach</a>	<a href="#">5071155</a>	1,95
5.	Vierkantstange Aluminium 12 x 12 mm, 1m für Stativhalterung des Kraftsensors	4	<a href="#">Hornbach</a>	<a href="#">4249111</a>	9,40
6.	Linsenkopfschraube 4.8 m. Kreuzschlitz 3x16 mm galv.verzinkt DIN 7985 100 Stück	10	<a href="#">Hornbach</a>	<a href="#">3831258</a>	2,55
7.	Kabelbinder UV-beständig schwarz 140 x 2,5 mm, 100 Stück	> 10	<a href="#">Hornbach</a>	<a href="#">3883618</a>	2,30
8.	Aderleitung H07 V-U 1G6 mm <sup>2</sup> grün-gelb, Meterware (0,5 m) für Aufhängeöse am Kraftsensor	> 10	<a href="#">Hornbach</a>	<a href="#">3870051</a>	0,60
9.	UHU 2-komponenten-Kleber plus schnellfest 35 g zum Einkleben der Aufhängeöse	> 10	<a href="#">Hornbach</a>	<a href="#">2561731</a>	8,49

## Anhang 3: Bauanleitung für den im Einführungskurs verwendeten Kraftsensor

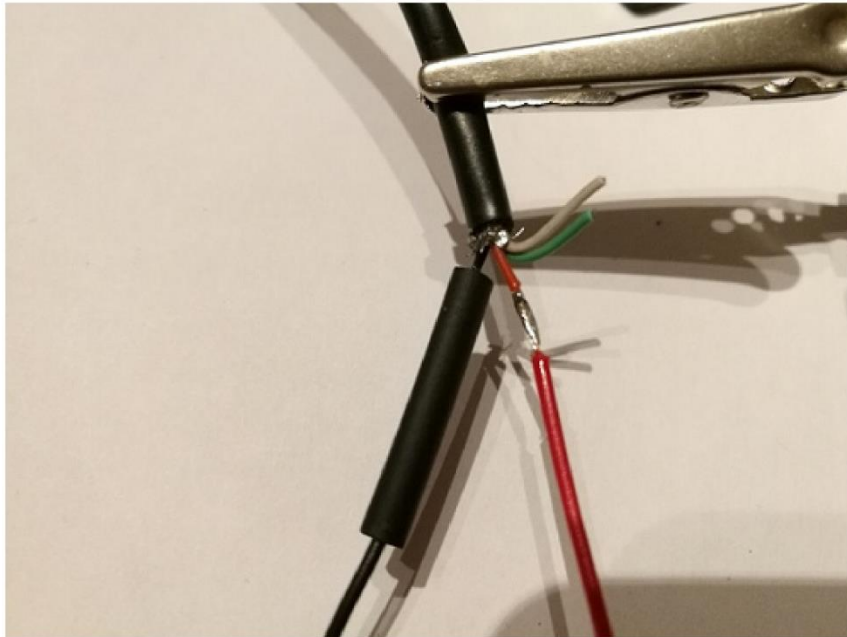
# Bauanleitung eines Kraftsensors auf Basis der Wägezelle TAL221

## 1. Montage der Anschlussleitung an der Wägezelle

1. Schneiden Sie das USB-Kabel in gewünschter Länge als Anschlusskabel für den Kraftsensor ab und entfernen Sie die Ummantelung an einem Ende auf einer Länge von ca. 2 cm.

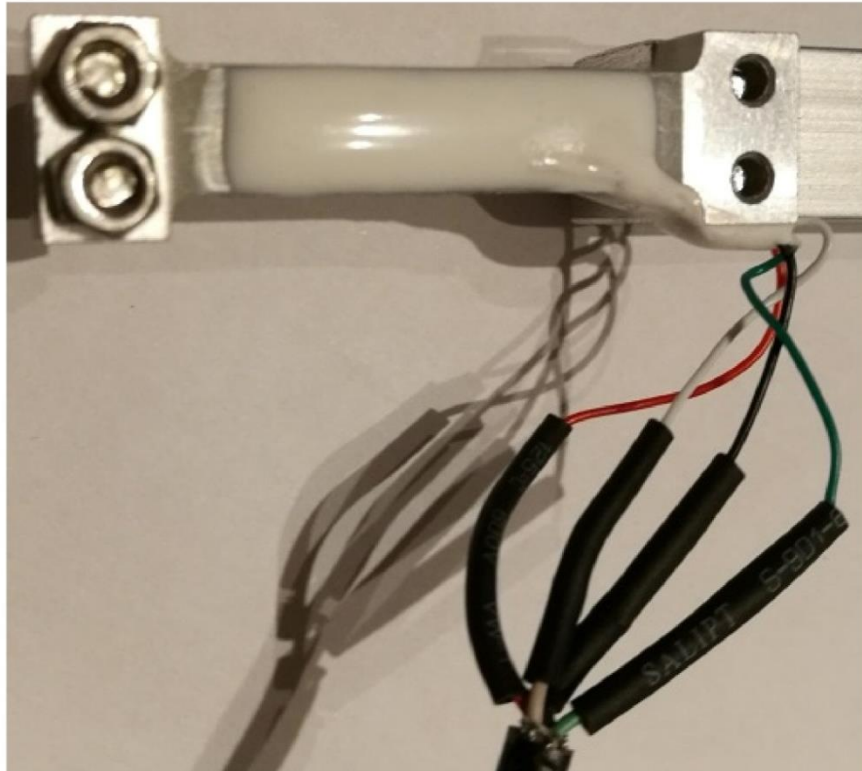


2. Schneiden Sie die Anschlussleitungen der Wägezelle so ab, dass noch ca. 3 bis 4 cm der Leitungslänge übrig bleiben.
3. Isolieren Sie alle Leitungen jeweils auf einer Länge von ca. 3 mm ab und verzinnen Sie diese mit dem Lötkolben.
4. Stülpen Sie für jede Leitung ein kurzes Stück Schrumpfschlauch (Ø 2,4 mm) über das freie Leitungsende der Wägezelle und verbinden Sie durch Lötén die gleichfarbigen Leitungen der Wägezelle und des USB-Kabels.

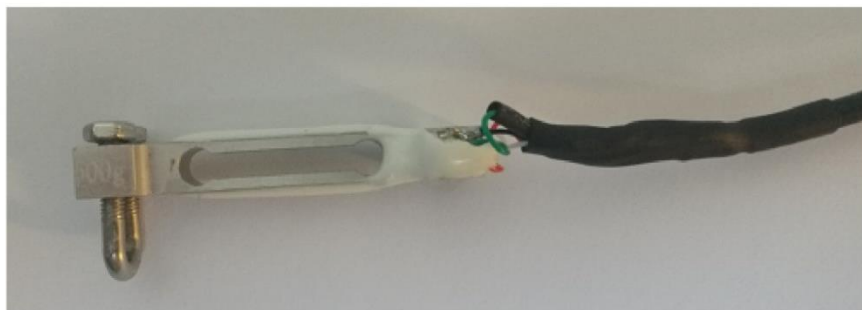




5. Schieben Sie den Schrumpfschlauch über die Lötstelle und schrumpfen Sie diesen mit einem Fön auf.
6. Wiederholen Sie den Vorgang für die anderen drei Anschlussleitungen.

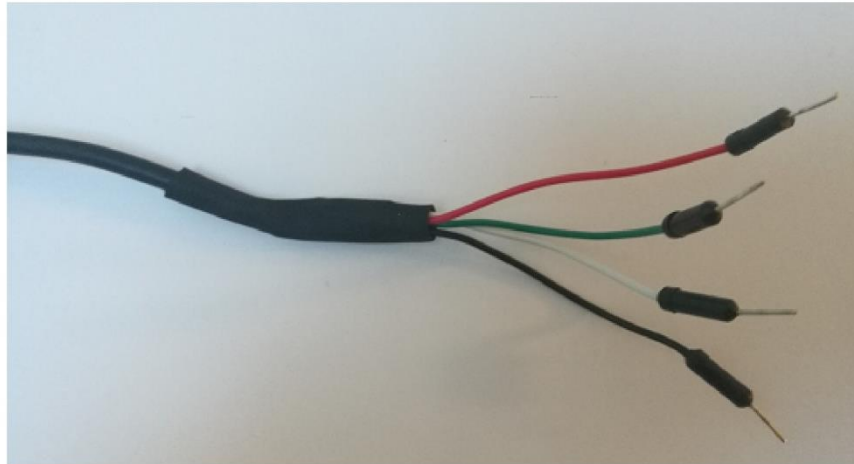


7. Schieben Sie ein ca. 5 cm langes Stück Schrumpfschlauch (Ø 6,4 mm) über die zusammengelöteten Leitungen und schrumpfen Sie diesen mit dem Fön auf.



## 2. Anschlüsse für Breadboard vorbereiten

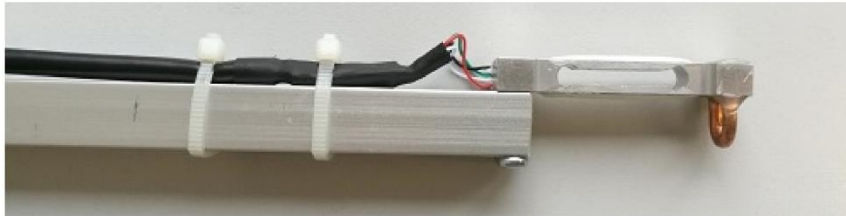
1. Zerschneiden Sie Breadboardleitungen in den Farben der Leitungen des USB-Kabels, sodass Sie Stücke zu je ca. 4 cm Länge zuzüglich des Anschlusspins erhalten und isolieren sie die Enden auf einer Länge von ca. 3 mm ab.
2. Gehen Sie beim Zusammenlöten der Breadboardleitungen mit dem USB-Kabel in gleicher Weise vor wie beim Anschluss an der Wägezelle, sodass Sie als Ergebnis Anschlussleitungen wie nachfolgend dargestellt erhalten.



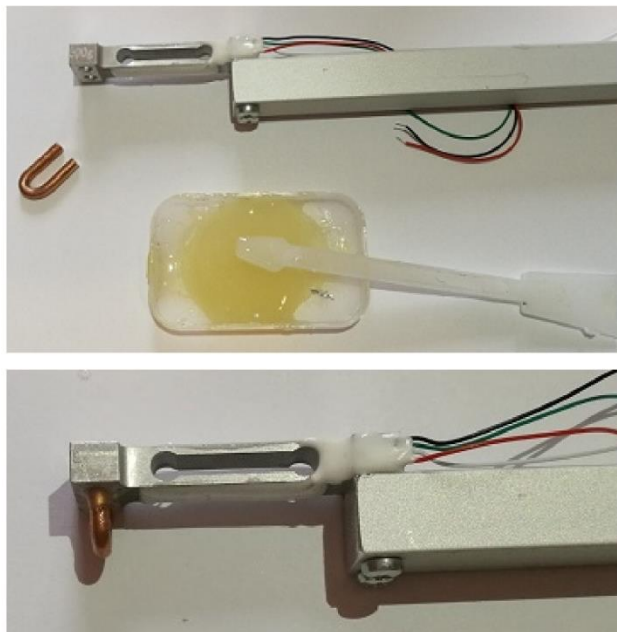


### 3. Montage der Wägezelle am Sensorhalter

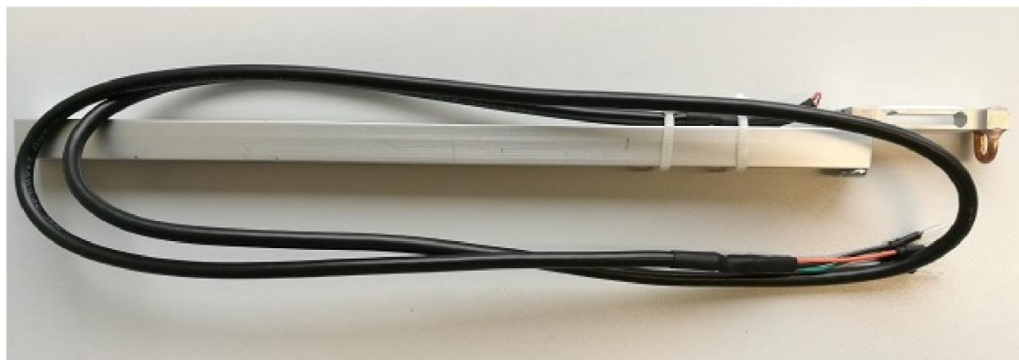
1. Schrauben Sie die Wägezelle mit Linsenkopfschrauben M3 x 16 am Sensorhalter fest.
2. Befestigen Sie das Anschlusskabel mit zwei Kabelbindern am Sensorhalter. Die zwei Kabelbinder dienen als Zugentlastung für die Anschlussleitungen der Wägezelle.



3. Biegen Sie mit einer Spitzzange aus dem Kupferdraht der 6 mm<sup>2</sup> Leitung eine Aufhängeöse und kleben Sie diese anschließend mit Zweikomponentenklebstoff in die Wägezelle ein.



4. Nachfolgend ist der fertig montierte Kraftsensor dargestellt.



## Anhang 4: README zu PhyPiDAQ

# PhyPiDAQ

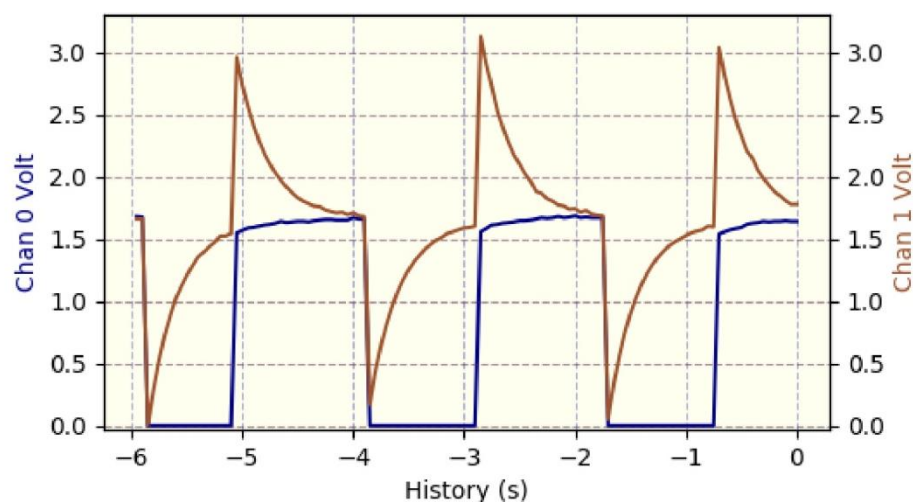
### Datenerfassung und Analyse für die Physikausbildung mit Raspberry Pi

Dieser Code in der Programmiersprache *python3* bietet einige grundlegende Funktionen zur Datenerfassung und -visualisierung wie Datenlogger, Balkendiagramm, XY- oder Oszilloskopanzeige und Datenaufzeichnung auf Festplatte.

Neben den GPIO Ein- und Ausgängen des Raspberry Pi werden die Analog-Digital-Wandler ADS1115 und MCP3008 sowie USB-Oszilloskope (PicoScope der Firma picotech) als Eingabegeräte für analoge Daten sowie eine Reihe von digitalen Sensoren mit Protokollen wie I<sup>2</sup>C oder SPI unterstützt.

Das Paket bietet eine Abstraktionsschicht für Messgeräte und Sensoren, die an einen Raspberry Pi angeschlossen sind. Eigene Klassen für jedes Gerät bieten eine einfache, einheitliche Schnittstelle, die nur die Methoden `init(<config_dictionary>)`, `acquireData(buffer)` und `closeDevice()` enthalten. Einfache Beispiele mit minimalem Code veranschaulichen die Verwendung. Die grafische Benutzeroberfläche `phypi.py` und das Skript `run_phypi.py` bieten eine konfigurierbare Umgebung für komplexere Messprojekte.

Abb. 1: Darstellung der Zeitabhängigkeit von zwei Signalquellen an einem AD-Wandler



## Schnellstart

Nach der Installation - siehe unten - steht eine Reihe von einheitlichen Klassen für die Datenerfassung, Visualisierung und Aufzeichnung aus dem Unterverzeichnis `./phypidaq/` zur Verfügung. Jedes unterstützte Gerät benötigt eine spezifische Konfiguration, die aus Konfigurationsdateien im Unterverzeichnis `./config/` gelesen wird. Die Gesamtkonfiguration wird in Konfigurationsdateien vom Typ `.daq` angegeben, die spezifizieren, welche Geräte und Anzeigemodule verwendet werden sollen, welche Ausleserate, Kalibrierungen oder analytische Formeln für aufgezeichnete Daten gelten sollen, oder auch Bereiche und Achsenbeschriftungen der grafischen Ausgabe.



Die grafische Benutzeroberfläche `phypi.py` hilft bei der Verwaltung der Konfigurationsoptionen und kann zum Starten der Datenerfassung verwendet werden. In diesem Fall werden Konfigurationen und erzeugte Datendateien in einem dedizierten Unterverzeichnis in `$HOME/PhyPi` abgelegt. Der Name des Unterverzeichnisses wird von einem benutzerdefinierten Tag und dem aktuellen Datum und der Uhrzeit abgeleitet.

Die Datenerfassung kann auch über die Kommandozeile gestartet werden:

```
run_phypi.py <config_file_name>\.daq
```

Wenn keine Konfigurationsdatei angegeben ist, wird der Standardwert `PhyPiConf.daq` verwendet.

Das Unterverzeichnis `./examples/` enthält eine Reihe einfacher Python-Skripte, die die Verwendung der bereitgestellten Datenerfassungs- und Anzeigemodule mit minimalem Code veranschaulichen.

## Konfigurationsdateien für PhyPiDAQ

Mit dem Skript `run_phypi.py` können sehr allgemeine Messaufgaben ausgeführt werden, ohne eigenen Code schreiben zu müssen. Die Konfigurationsoptionen für Eingabegeräte und deren Kanäle sowie für die Anzeige- und Datenspeichermodule werden in einer globalen Konfigurationsdatei vom Typ `.daq` angegeben, die Verweise auf Gerätekonfigurationsdateien vom Typ `.yaml` enthält.

Generell entspricht die in den Konfigurationsdateien verwendete Syntax der Markup-Sprache *yaml*. Insbesondere kennzeichnet Text nach einem `#`-Zeichen erklärende Kommentare oder enthält alternative, auskommentierte Konfigurationsoptionen, die durch Löschen des `#`-Zeichens aktiviert werden können.

## Hauptkonfiguration

Ein typisches, ausführlich kommentiertes Beispiel für die Hauptkonfigurationsdatei sieht wie folgt aus:

**Inhalt der Hauptkonfigurationsdatei** `PhyPiConf.daq`

```
# Konfigurations-Optionen fuer PhyPiDAQ

# Konfigurationsdateien fuer Geraete
DeviceFile: config/ADS1115Config.yaml
#DeviceFile: config/MCP3008Config.yaml
#DeviceFile: config/PSConfig.yaml
#DeviceFile: config/MAX31865Config.yaml
#DeviceFile: config/GPIOCCount.yaml
#DeviceFile: config/DS18B20Config.yaml
#DeviceFile: config/MAX31855Config.yaml
## ein Beispiel fuer mehrere Geraete
#DeviceFile: [config/ADS1115Config.yaml, config/ GPIOCCount.yaml]

DisplayModule: DataLogger      # zeitlicher Verlauf der Messgroessen
# DisplayModule: DataGraphs    # text, Balkendiagramm, zeitlicher Verlauf und xy-
Darstellung
Interval: 0.1                  # Datennahme-Intervall in Sekunden
XYmode:      false             # XY-Darstellung ein/aus

# Angaben fuer jeden Kanal
ChanLabels: [U, U]             # Namen fuer jeden Kanal
```

```

ChanUnits: [V, V]          # Einheiten fuer jeden Kanal
ChanColors: [darkblue, sienna] # Farbzuordnung in der Anzeige

# ggf. werden hier die Informationen aus der Geraete-Konfiguration ueberschrieben
##ChanLimits:
## - [0., 1.] # chan 0
## - [0., 1.] # chan 1
## - [0., 1.] # chan 2

# ggf. Kalibration der Rohmessungen
#ChanCalib:
# - null oder - <Faktor> or - [ [ <wahre Werte> ], [ <Rohwerte> ] ]
# - 1. # chan0: ein einfacher Faktor fuer Kanal 0
# - [ [0.,1.], [0., 1.] ] # chan1: Interpolation [wahr]([roh] )
# - null # chan2: Keine Kalibration

# Formel auf Werte anwenden
#ChanFormula:
# - c0 + c1 # chan0 = Summe von Kanal 0 und 1
# - c1 # chan1 := Kanal 1 (Keine Aenderung)
# - null # chan2 : Keine Formel

# Name der Ausgabedatei im CSV-Format
#DataFile: testfile.csv # Dateiname
DataFile: null # null falls keine Ausgabe gewuenscht
#CSVseparator: ';' # Feld-Trenner auf ';' setzen, Vorgabe ist ','

```

## Gerätekonfigurationen

Die Gerätekonfiguration für den sehr flexibel einsetzbaren Analog-Digital-Wandler **ADS1115** mit 16 Bit Auflösung und Ausleseraten bis zu 860 Hz gibt die aktiven Kanäle und deren Wertebereiche an.

**Inhalt der Konfigurationsdatei** `ADS1115Config.yaml`

```

# Beispiel einer Konfiguration fuer den Analog-Digital-Wandler ADS1115

DAQModule: ADS1115Config # relevantes phypidaq-Modul

ADCChannels: [0, 3] # aktive ADC-Kanaele
# moegliche Werte: 0, 1, 2, 3
# in differentiellem Modus:
#   - 0 = ADCChannel 0
#       minus ADCChannel 1
#   - 1 = ADCChannel 0
#       minus ADCChannel 3
#   - 2 = ADCChannel 1
#       minus ADCChannel 3
#   - 3 = ADCChannel 2
#       minus ADCChannel 3

DifModeChan: [true, true] # differentiellen Modus einschalten

```

```

Gain: [2/3, 2/3]      # programmierbarer Verstaerkungsfaktor
                      # moegliche Werte:
                      #   - 2/3 = +/-6.144V
                      #   - 1 = +/-4.096V
                      #   - 2 = +/-2.048V
                      #   - 4 = +/-1.024V
                      #   - 8 = +/-0.512V
                      #   - 16 = +/-0.256V
sampleRate: 860      # programmierbare Datenrate des ADS1115
                      # moegliche Werte:
                      #   8, 16, 32, 64, 128, 250, 475, 860

```

Das **USB-Oszilloskop** PicoScope kann ebenfalls als Datenlogger eingesetzt werden. In diesem Fall wird über eine Anzahl von Messungen mit sehr hoher Ausleserate gemittelt. Wählt man z.B. ein Messintervall von 20 ms, so wird 50 Hz- Rauschen effizient herausgemittelt.

#### Inhalt der Gerätekonfiguration `PSconfig.yaml`

```

# Konfiguration für PicoScope als Datenlogger

DAQModule: PSConfig # relevantes phypidaq-Modul

PSmodel: 2000a      # PicoScope Modell (PS2000a ist die Vorgabe)

# Konfiguration der Kanäle
picoChannels: [A, B] # Kanal A und B
ChanRanges: [2., 2.] # Wertebereich
ChanOffsets: [-1.95, -1.95] # analoger Offset, wird vor Anzeige addiert
ChanModes: [DC, DC] # Kanal-Kopplung (DC oder AC)
sampleTime: 2.0E-02 # Dauer der Datenaufnahme
Nsamples: 100       # Zahl der Messungen

# trigger
trgActive: false # Aufnahme ohne Oszilloskop-Trigger
trgChan: A

# Interner Signalgenerator
frqSG: 0. # aus

```

Beispiele für andere Geräte, wie den Analog-Digital-Wandler MCP3008, für Ratenmessungen über die GPIO - Pins des Raspberry Pi oder Temperaturmessungen mit dem digitalen 1-Wire Thermometer DS18B20, PT100-Sensoren am MAX31865 'Resistance-to-Digital Converter' oder mit Thermoelementen (Typ K) am MAX31855 'Thermocouple-to-Digital Converter' sind im Konfigurationsverzeichnis `./config/` enthalten, siehe `MCP3008Config.yaml`, `GPIOcount.yaml`, `DS18B20Config.yaml`, `MAX31865Config.yaml` oder `MAX31855Config.yaml`.



## Installation von PhyPiDAQ auf dem Raspberry Pi

Dieses Paket basiert auf Code aus anderen Paketen, die die Treiber für die unterstützten Geräte bereitstellen:

- die Adafruit Python MCP3008 Bibliothek  
[https://github.com/adafruit/Adafruit\\_Python\\_MCP3008](https://github.com/adafruit/Adafruit_Python_MCP3008)
- die Adafruit Python ADX1x15 Bibliothek  
[https://github.com/adafruit/Adafruit\\_Python\\_ADS1x15](https://github.com/adafruit/Adafruit_Python_ADS1x15)
- die Adafruit Python MAX31855 Bibliothek  
[https://github.com/adafruit/Adafruit\\_Python\\_MAX31855](https://github.com/adafruit/Adafruit_Python_MAX31855)
- die w1thermsensor Bibliothek von Timo Furrer  
<https://github.com/timofurrer/w1thermsensor>
- Komponenten des picoDAQ-Projekts  
<https://github.com/GuenterQuast/picoDAQ>
- das *python* Interface für die PicoScope Treiber des *pico-python*-Projekts von Colin O'Flynn  
<https://github.com/colinoflynn/pico-python>
- die C-Treiber aus dem Pico Technology Software Development Kit  
<https://www.picotech.com/downloads>

Zur Vereinfachung der Installation werden Installationsdateien für benötigte externe Pakete und für die Module dieses Pakets im *pip*-Wheel-Format im Unterverzeichnis *./whl/* bereitgestellt .

Die Module zur Visualisierung hängen von *matplotlib.pyplot* , *Tkinter* und *pyQt5* ab, die ebenfalls installiert sein müssen.

Nach dem Einrichten Ihres Raspberry Pi mit dem aktuellen Debian-Release *stretch* sollten die folgenden Schritte in einem Konsolenfenster auf der Kommandozeile durchgeführt werden, um alle erforderlichen Pakete zu installieren:

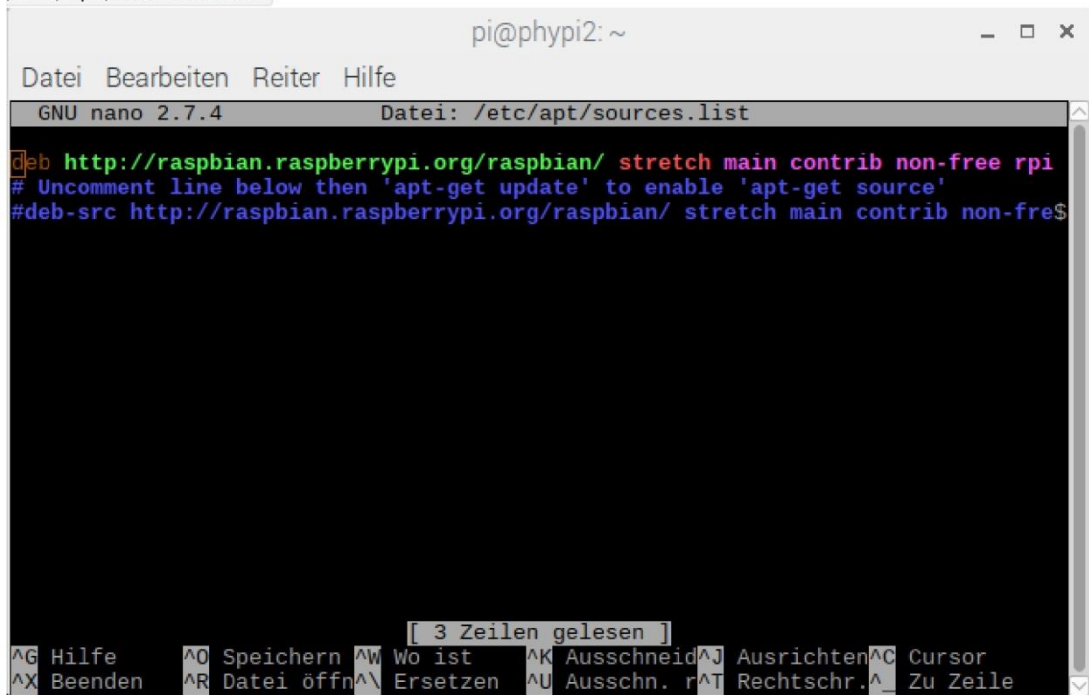
```
sudo apt-get update
sudo apt-get upgrade
sudo apt-get install python3-scipy
sudo apt-get install python3-matplotlib
sudo apt-get install python3-pyqt5
sudo apt-get install libatlas-base-dev # wird benoetigt für neueste Version von numpy

sudo pip3 install pyyaml

# Beziehen des PhyPiDAQ Codes und aller Software-Abhaengigkeiten
mkdir git
cd git
git clone https://github.com/GuenterQuast/PhyPiDAQ
cd PhyPiDAQ/whl
sudo pip3 install *.whl
```

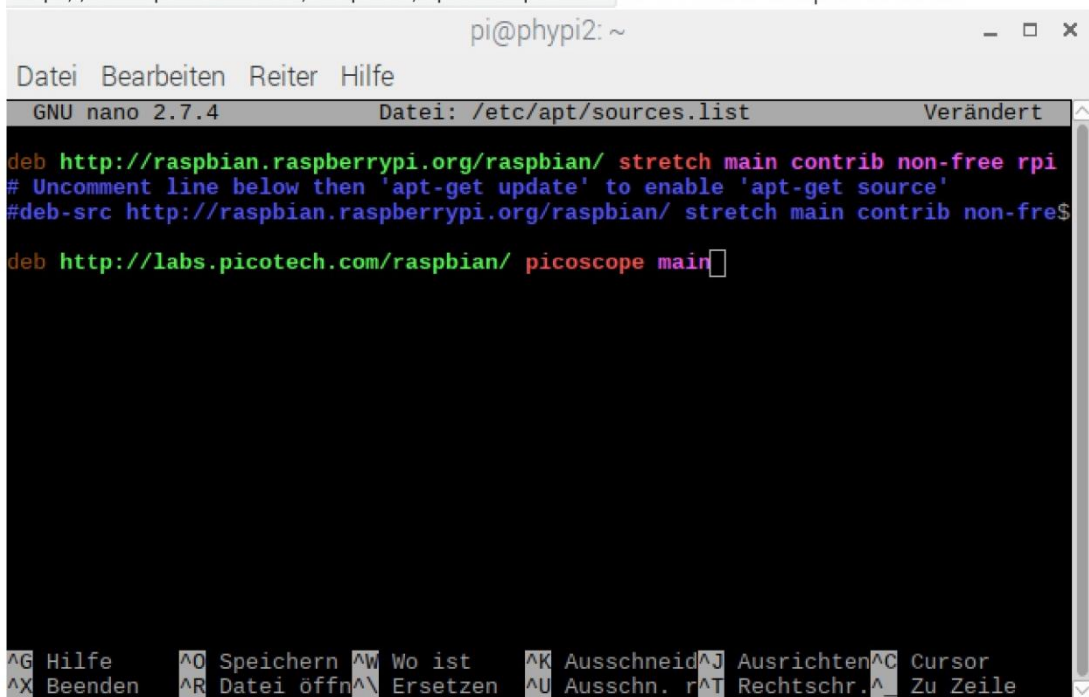
Um die PicoTech-Treiber für PicoScope USB-Geräte zu installieren, muss das *picotech-raspbian*-Repository hinzugefügt werden:

1. Öffnen Sie die Datei `/etc/apt/sources.list` über die Kommandozeile mit `sudo nano /etc/apt/sources.list`.



```
pi@phypi2: ~  
Datei Bearbeiten Reiter Hilfe  
GNU nano 2.7.4 Datei: /etc/apt/sources.list  
deb http://raspbian.raspberrypi.org/raspbian/ stretch main contrib non-free rpi  
# Uncomment line below then 'apt-get update' to enable 'apt-get source'  
#deb-src http://raspbian.raspberrypi.org/raspbian/ stretch main contrib non-free$  
[ 3 Zeilen gelesen ]  
^G Hilfe ^O Speichern ^W Wo ist ^K Ausschneid ^J Ausrichten ^C Cursor  
^X Beenden ^R Datei öffn ^\ Ersetzen ^U Ausschn. r ^T Rechtschr. ^_ Zu Zeile
```

2. Navigieren Sie mit den Pfeiltasten in die nächste freie Zeile und ergänzen Sie den Eintrag `deb http://labs.picotech.com/raspbian/ picoscope main` in der Datei `/etc/apt/sources.list`.



```
pi@phypi2: ~  
Datei Bearbeiten Reiter Hilfe  
GNU nano 2.7.4 Datei: /etc/apt/sources.list Verändert  
deb http://raspbian.raspberrypi.org/raspbian/ stretch main contrib non-free rpi  
# Uncomment line below then 'apt-get update' to enable 'apt-get source'  
#deb-src http://raspbian.raspberrypi.org/raspbian/ stretch main contrib non-free$  
deb http://labs.picotech.com/raspbian/ picoscope main  
^G Hilfe ^O Speichern ^W Wo ist ^K Ausschneid ^J Ausrichten ^C Cursor  
^X Beenden ^R Datei öffn ^\ Ersetzen ^U Ausschn. r ^T Rechtschr. ^_ Zu Zeile
```

3. Speichern Sie die Datei `/etc/apt/sources.list` mit `Strg + o` und `Enter`.
4. Schließen Sie die Datei `/etc/apt/sources.list` mit `Strg + x`.

Nachdem Sie das PicoTech-Repository hinzugefügt haben, sollten die folgenden Schritte auf der Kommandozeile durchgeführt werden.

```
sudo apt-get update
wget -O - http://labs.picotech.com/debian/dists/picoscope/Release.gpg.key | sudo apt-
key add -
sudo apt-get install libps2000
sudo apt-get install libps2000a

# Benutzer pi Zugriff auf den USB-Port ermöglichen
sudo usermod -a -G tty pi
```

**Starten Sie Ihren Raspberry Pi nach der Installation neu!**

## Didaktische Anmerkungen

Schüler oder Studierende zu Beginn mit dem vollen Umfang des Pakets *PhyPiDAQ* zu konfrontieren, ist aus didaktischer Sicht wenig angebracht. Stattdessen wird empfohlen, ein Arbeitsverzeichnis zu erstellen und benötigte Beispiele von dort in ein eigenes Arbeitsverzeichnis zu kopieren. Dies wird durch folgende Befehle erreicht:

```
# Erzeugen eines Arbeitsverzeichnisses PhyPi und Kopieren von Beispielen und
Konfigurationsdateien in das neu erzeugte Verzeichnis.
cd ~/git/PhyPiDAQ
./install_user.sh

# klickbares Symbol auf dem Desktop zum Zugang zu phypi
cp ~/git/PhyPiDAQ/phypi.desktop ~/Desktop
```

Um versehentliches Überschreiben von Dateien im Paket *PhyPiDAQ* zu vermeiden, sollte eine Verschiebung in den Systembereich in Erwägung gezogen werden, z. B. nach */usr/local/*:

```
sudo mv ~/git/PhyPiDAQ /usr/local/
```

Die Pfade in *~/Desktop/phypi.desktop* müssen dann ebenfalls entsprechend angepasst werden. Dies wird am einfachsten durch Klicken mit der rechten Maustaste auf das *phypi*-Symbol erreicht. Im sich dann öffnenden Menü den Dialog "Eigenschaften" wählen und alle Pfade von *~/git/* -> */usr/local/* ändern.

## Übersicht über Dateien im Paket PhyPiDAQ

### Programme

- `run_phypi.py`  
Datennahme und Anzeige wie in Konfigurationsdateien angegeben (Vorgabe `PhyPiConf.daq` und `.yaml`-Dateien im Verzeichnis `config/`)
- `phypi.py`  
graphische Oberfläche zum Editieren der Konfiguration und Starten des Skripts `run_phypi.py`

## Module

- `phypidaq/__init__.py`  
Initialisierung für das Paket *phypidaq*
- `phypidaq/_version_info.py`  
Versionsinformation für das Paket *phypidaq*
- `phypidaq/ADS1115Config.py`  
Klasse zur Handhabung des Analog-Digital-Wandlers ADS1115
- `phypidaq/DS18B20Config.py`  
Klasse zur Handhabung des digitalen Thermometers DS18B20
- `phypidaq/MCP3008Config.py`  
Klasse zur Handhabung des Analog-Digital-Wandlers MCP3008
- `phypidaq/GPIOCount.py`  
Klasse zur Ratenmessung an GPIO-Pins
- `phypidaq/MAX31855Config.py`  
Klasse zur Handhabung des Thermoelement-nach-digital-Wandlers MAX31855
- `phypidaq/MAX31865Config.py`  
Klasse zur Handhabung des Widerstand-nach-digital-Wandlers MAX31865
- `phypidaq/PSConfig.py`  
Klasse für PicoScope USB-Oszilloskope
- `phypidaq/mpTkDisplay.py`  
Hintergrund-Prozess zur Datenvisualisierung
- `phypidaq/DataLogger.py`  
Klasse zur Anzeige von Datenverlauf und xy-Diagrammen
- `phypidaq/DataGraphs.py`  
allgemeine Klasse zur Anzeige von Balkendiagrammen, Datenverläufen und xy-Diagrammen
- `phypidaq/DataRecorder.py`  
Speichern von Daten im CSV-Format

## Konfigurationsdateien

- `PhyPiConf.daq`  
Hauptkonfigurationsdatei, hängt von Dateien im Unterverzeichnis *config/* ab
- `config/ADS1115Config.yaml`
- `config/DS18B20Config.yaml`
- `config/GPIOCount.yaml`
- `config/MAX31855Config.yaml`
- `config/MAX31865Config.yaml`
- `config/MCP3008Config.yaml`
- `config/PSConfig.yaml`

## Beispiele

- `examples/read_analog.py`  
sehr minimalistisches Beispiel zum Auslesen eines Kanals von einem Analog-Digital-Wandler
- `examples/runOsci.py`  
Oszillographenanzeigen wie in *.yaml*-Datei zur Konfiguration angegeben (Vorgabe `psosci.yaml`)
- `examples/poissonLED.py`  
erzeugt ein zufälliges Signal an GPIO-Pin gemäß Poisson-Prozess
- `examples/FreqGen.py`  
erzeugt Signal fester Frequenz an GPIO-Pin

## Dokumentation

- `doc/Kurs_digitale_Messwerterfassung_mit_PhyPiDAQ.md (.pdf)`  
Einführungskurs für Schüler zum Messen mit dem Raspberry Pi
- `doc/Einrichten_des_Raspberry_Pi.md (.pdf)`  
Aufsetzen des Raspberry Pi für dieses Projekt
- `doc/Komponenten_fuer_PhyPi.md (.pdf)`  
empfohlene Komponenten für dieses Projekt



## Anhang 5: Anleitung für das Einrichten des Raspberry Pi

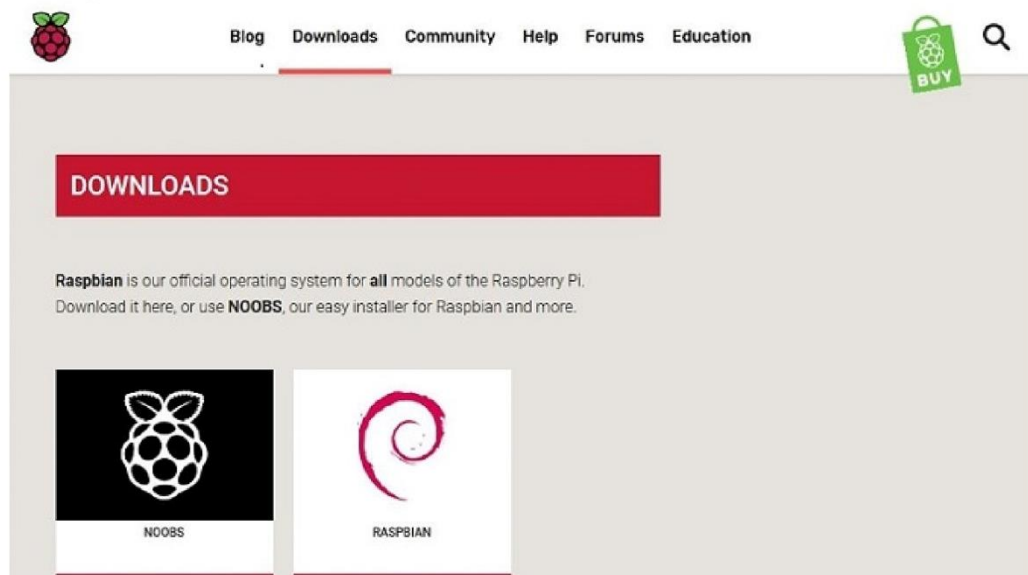
# Einrichten des Raspberry Pi

Die nachfolgende Anleitung befasst sich mit den Vorarbeiten, die vor der Erstinbetriebnahme des Raspberry Pi durchgeführt werden müssen. Das Vorbereiten der Micro-SD-Karten sollte beim Einsatz in der Schule möglichst gesammelt einmal im Vorfeld durchgeführt werden, sodass mit den Schülern direkt gestartet werden kann. Die Anleitung ist sehr ausführlich gehalten. Durch Hervorhebungen ist die Anleitung so gestaltet, dass diese auch durch Überfliegen verständlich ist.

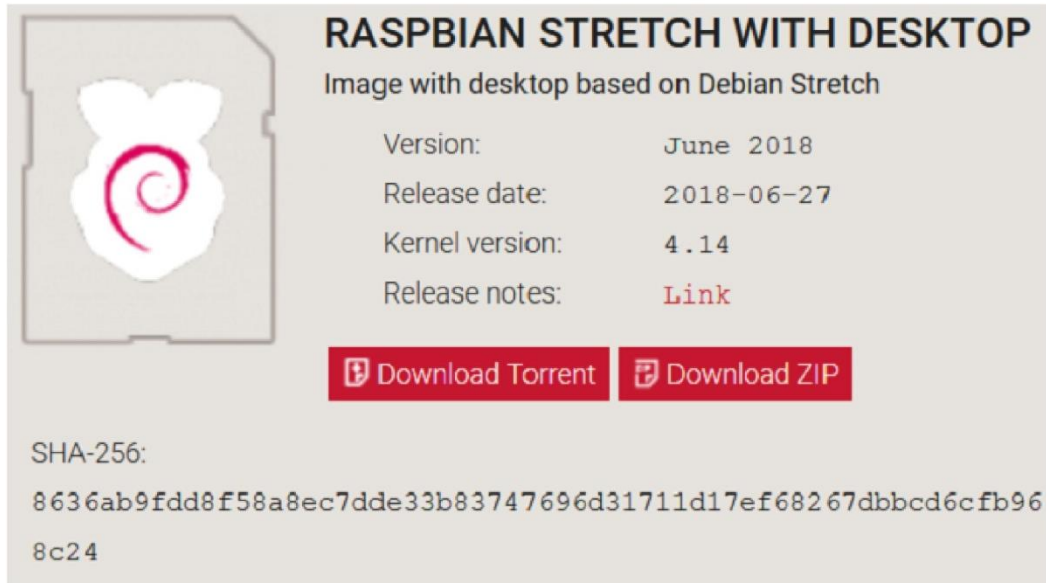
## 1. Micro-SD-Karte mit Raspian Betriebssystem beschreiben

Für die Inbetriebnahme des Raspberry Pi ist es notwendig, das zugehörige **Betriebssystem Raspian** auf die Micro-SD-Karte zu schreiben. Nachfolgend sind die durchzuführenden Schritte aufgeführt:

1. Rufen Sie über den [Link](#) die offizielle Downloadseite des Betriebssystems Raspian auf und laden Sie dieses herunter:
  - o auf **Raspian** klicken.



- unter **RASPIAN STRETCH WITH DESKTOP** auf **Download ZIP** klicken.



**RASPIAN STRETCH WITH DESKTOP**  
Image with desktop based on Debian Stretch

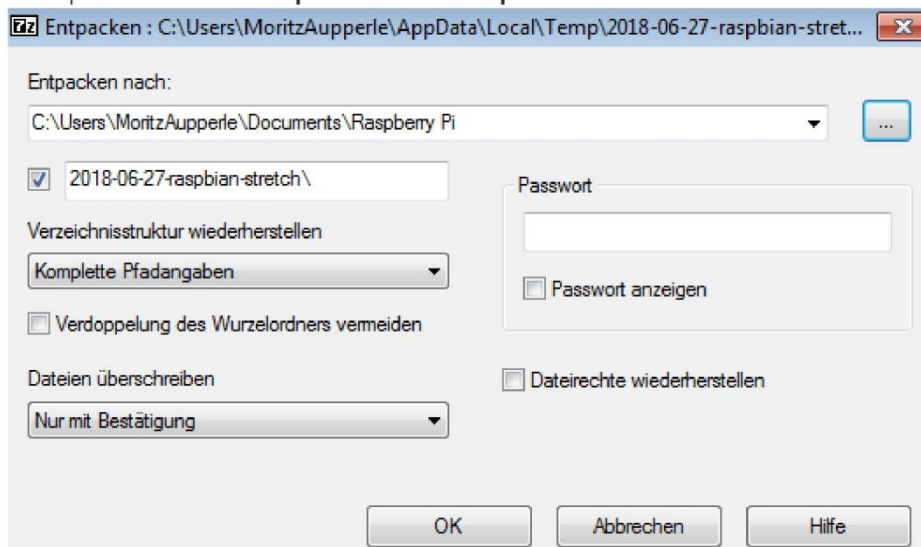
Version: June 2018  
Release date: 2018-06-27  
Kernel version: 4.14  
Release notes: [Link](#)

[Download Torrent](#) [Download ZIP](#)

SHA-256:  
8636ab9fdd8f58a8ec7dde33b83747696d31711d17ef68267dbbcd6cfb968c24

2. Da das heruntergeladene Betriebssystem für den Raspberry als komprimierte ZIP-Datei vorliegt, muss diese vor dem Beschreiben der Micro-SD-Karte entpackt werden. Da es aufgrund der Dateigröße mit verschiedenen Programmen zum Entpacken von ZIP-Dateien zu Problemen kommen kann, wird empfohlen, diesen Schritt mit dem Programm **7Zip** durchzuführen. Sollte das genannte Programm auf Ihrem PC nicht installiert sein, können Sie dieses über diesen [Link](#) herunterladen und darauffolgend installieren.

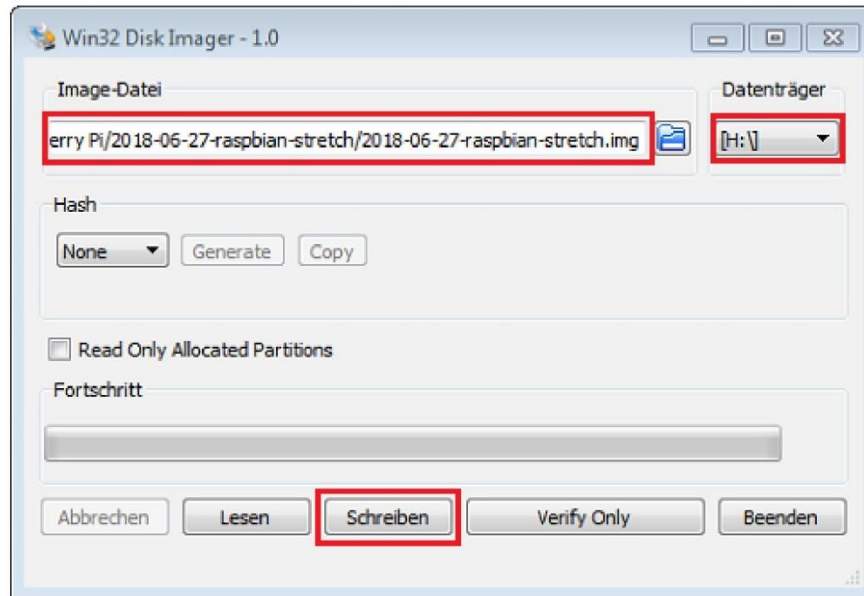
- **Entpacken** Sie mit **Rechtsklick** auf den soeben heruntergeladenen Ordner und Auswahl des Unterpunktes **Dateien entpacken...** unter **7Zip** die **ZIP-Datei** in ein Verzeichnis Ihrer Wahl.



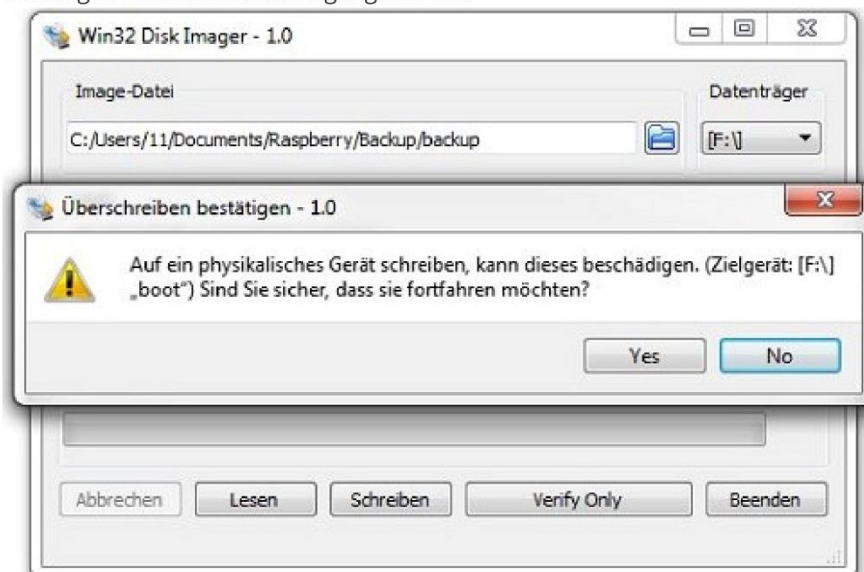


3. Um eine **startfähige Micro-SD-Karte** für den Raspberry zu erhalten, muss diese jetzt noch mit dem entpackten **Image des Betriebssystems** beschrieben werden:

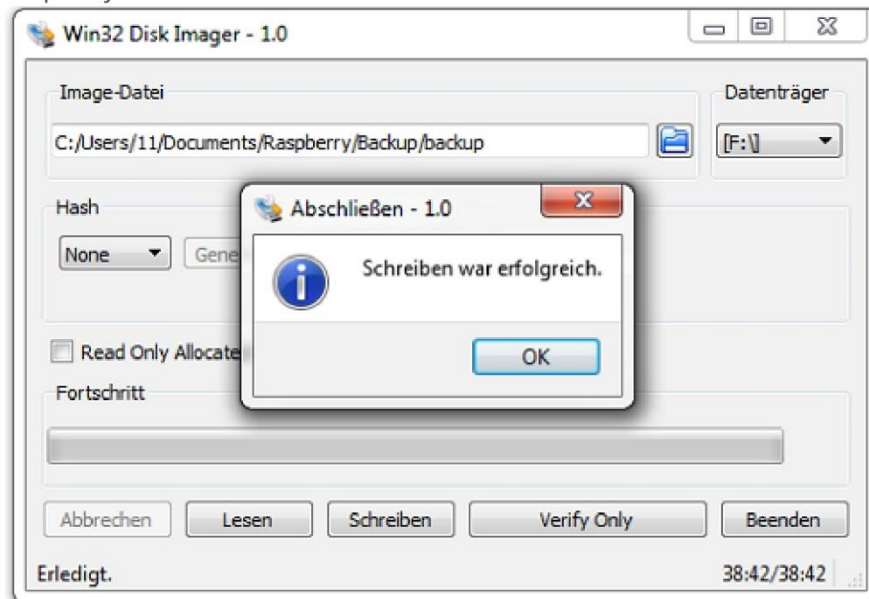
- **Laden** Sie den [Win32-Disk-Imager](#) (alternativ [Etcher](#) für andere Betriebssysteme als Windows) herunter und **installieren** Sie das Programm.
- Führen Sie das Programm **Win32-Disk-Imager** aus. Wählen Sie die entpackte **Image-Datei** und die **Micro-SD-Karte** unter **Datenträger** aus. Starten Sie den **Schreibvorgang**.



- Bestätigen Sie den Schreibvorgang mit **Yes**.



- Bestätigen Sie den erfolgreichen Schreibvorgang mit **OK**. Entnehmen Sie die **Micro-SD-Karte** sicher und stecken Sie diese in den **Micro-SD-Karten-Steckplatz** auf der **Unterseite** des Raspberry Pi.



**Der Raspberry Pi ist jetzt bereit für die Erstinbetriebnahme!**

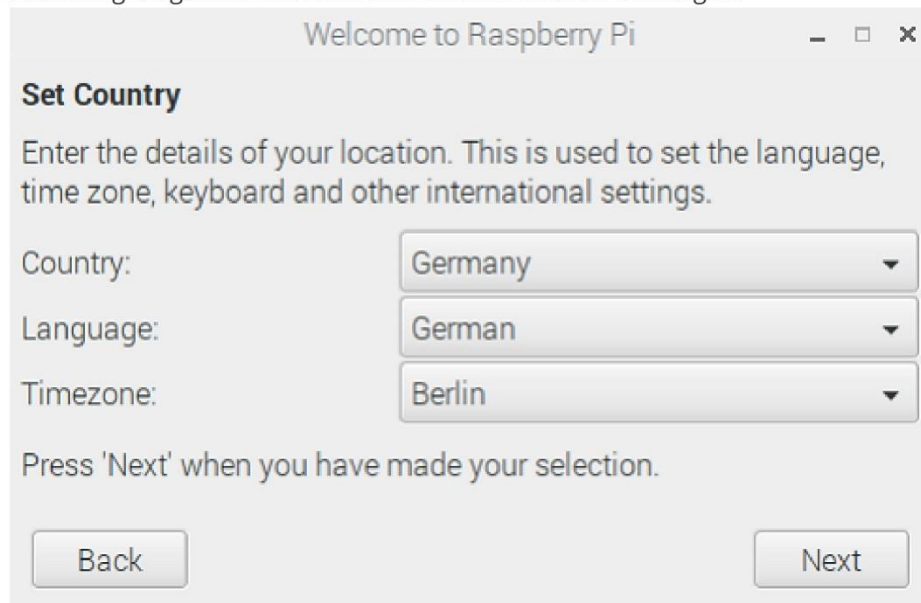
## 2. Erstinbetriebnahme

Für die Erstinbetriebnahme wird der Raspberry Pi über die HDMI-Schnittstelle mit einem Bildschirm verbunden. Außerdem sind eine USB-Tastatur und eine USB-Maus anzuschließen. Nachfolgend sind die einzelnen Schritte für die Inbetriebnahme aufgeführt:

1. Falls noch nicht geschehen, die mit dem **Betriebssystem-Image** beschriebene **Micro-SD-Karte** in den dafür vorgesehenen **Micro-SD-Karten-Steckplatz** auf der Unterseite des Raspberry Pi stecken.
2. Den **Bildschirm**, die **Tastatur** und die **Maus anschließen**.
3. Den Raspberry Pi durch **Verbinden** mit der **Spannungsversorgung** auf dem Breadboard **starten**. Der Raspberry Pi hat keinen Ein- bzw. Ausschaltsschalter, sondern wird durch Verbinden mit der Spannungsversorgung gestartet.
4. Nachdem der Raspberry Pi gestartet ist und sich das Betriebssystem von der Micro-SD-Karte geladen hat, wird man mit dem Startbildschirm begrüßt und es wird die Grundkonfiguration durch Klicken auf **Next** gestartet.



5. Als erstes sind die Einstellungen für **Tastatur**, **Sprache** und **Zeitzone** wie in der nachfolgenden Abbildung dargestellt vorzunehmen und mit **Next** zu bestätigen.



Welcome to Raspberry Pi

### Set Country

Enter the details of your location. This is used to set the language, time zone, keyboard and other international settings.

Country: Germany

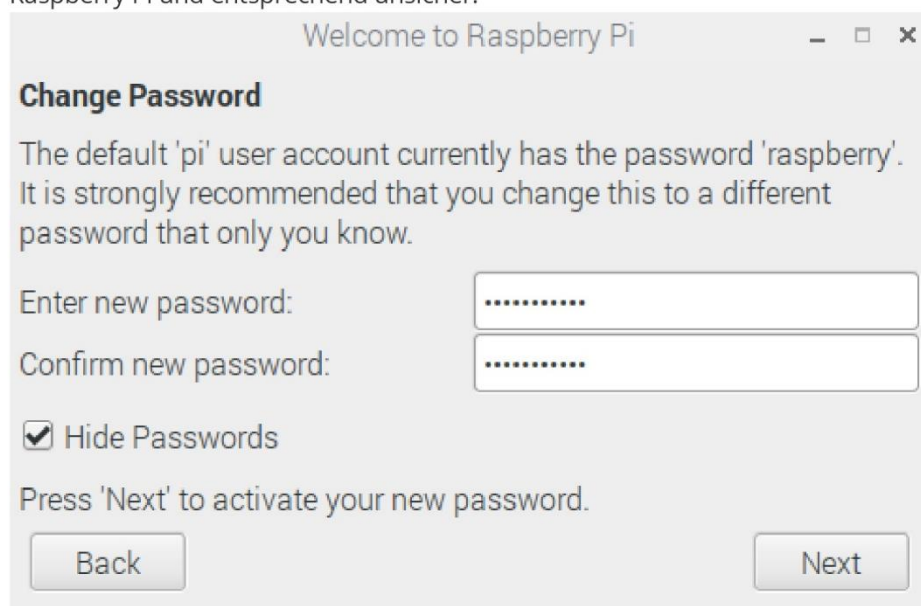
Language: German

Timezone: Berlin

Press 'Next' when you have made your selection.

Back Next

6. Im nächsten Schritt ist ein **neues Passwort** für den Raspberry Pi zu vergeben und mit **Next** zu bestätigen. Verwenden Sie nicht das Passwort raspberry! Dies ist das Standardpasswort aller Raspberry Pi und entsprechend unsicher.



Welcome to Raspberry Pi

### Change Password

The default 'pi' user account currently has the password 'raspberry'. It is strongly recommended that you change this to a different password that only you know.

Enter new password: .....

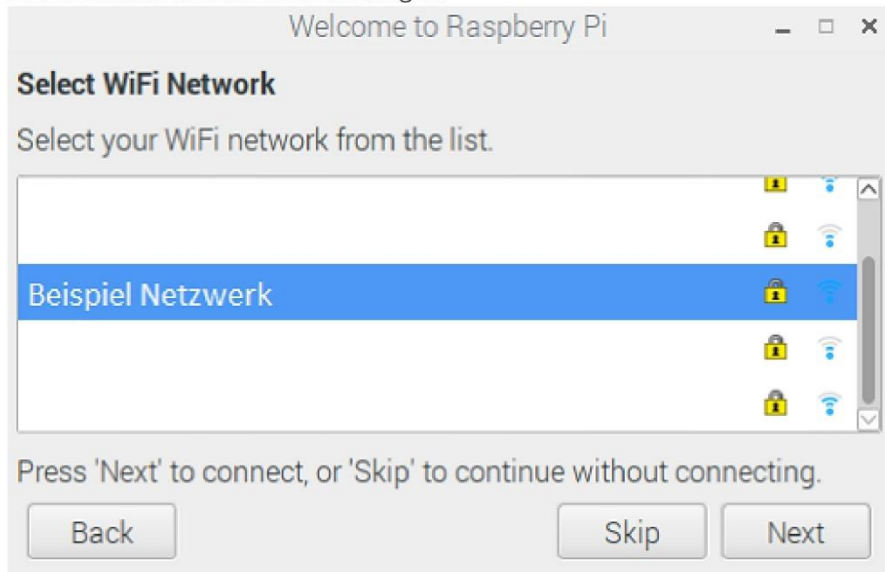
Confirm new password: .....

☒ Hide Passwords

Press 'Next' to activate your new password.

Back Next

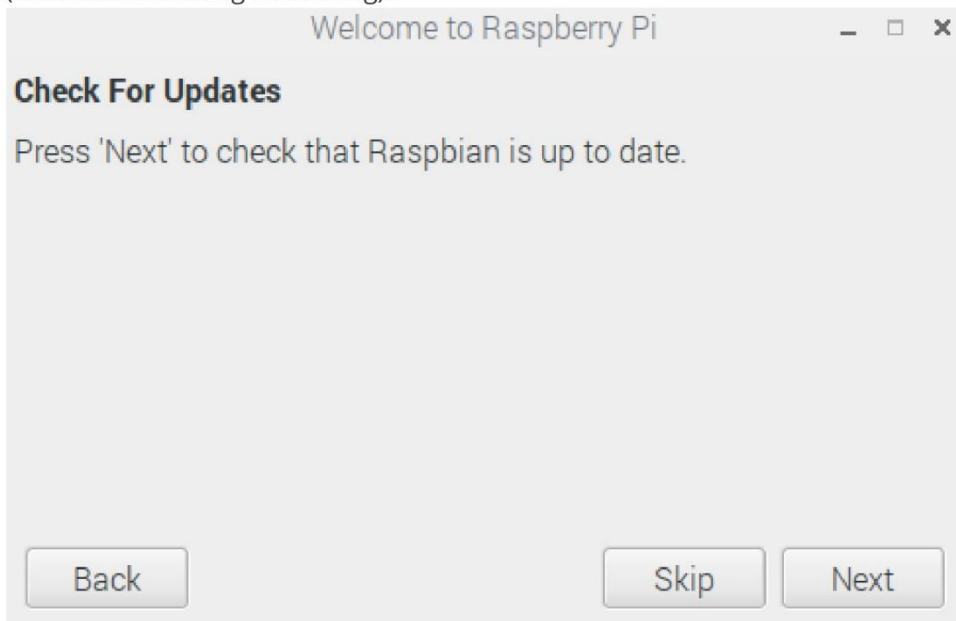
7. **WLAN** wählen und mit **Next** bestätigen.



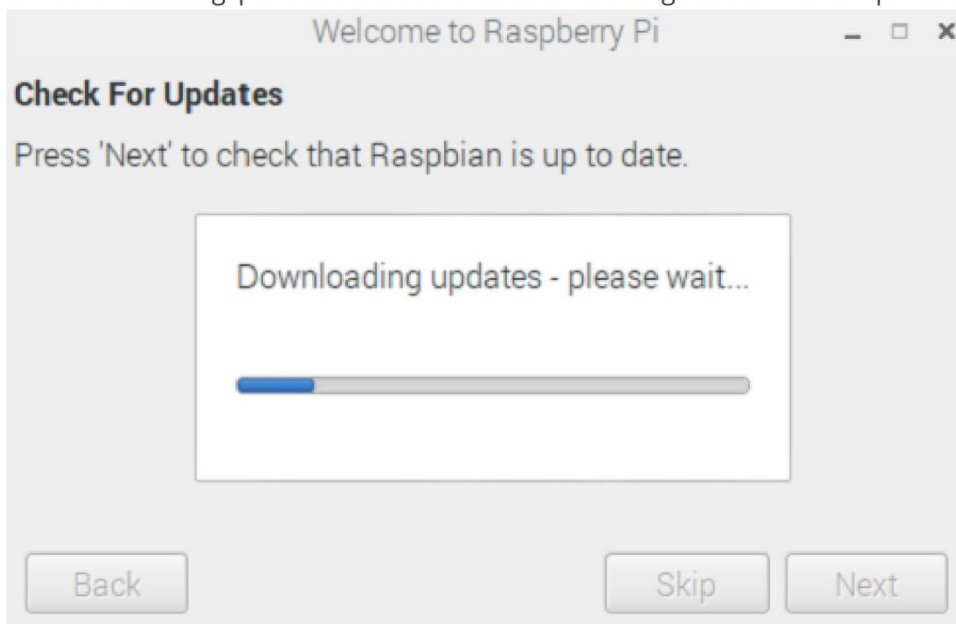
8. **WLAN-Passwort** eingeben und mit **Next** bestätigen.



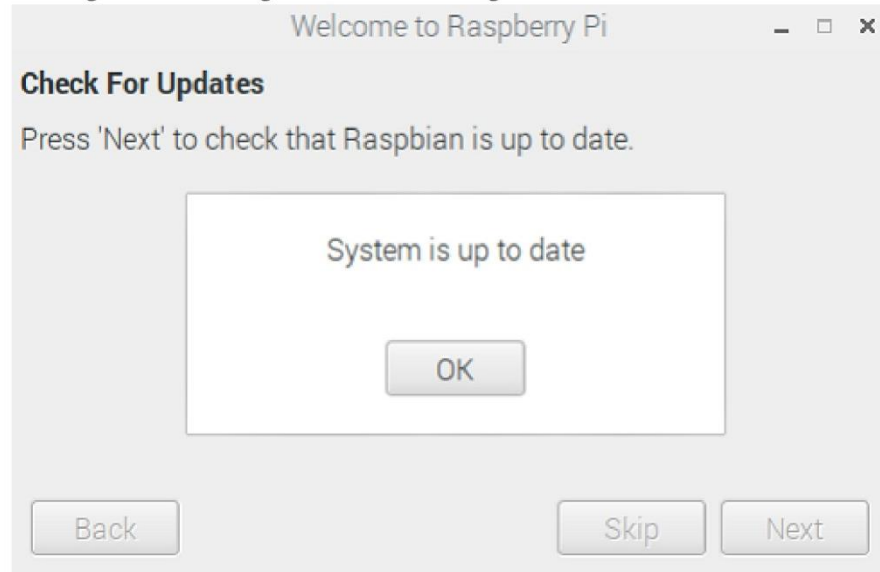
9. Im nächsten Schritt muss das **Betriebssystem** durch Klicken auf **Next aktualisiert** werden (Internetverbindung notwendig).



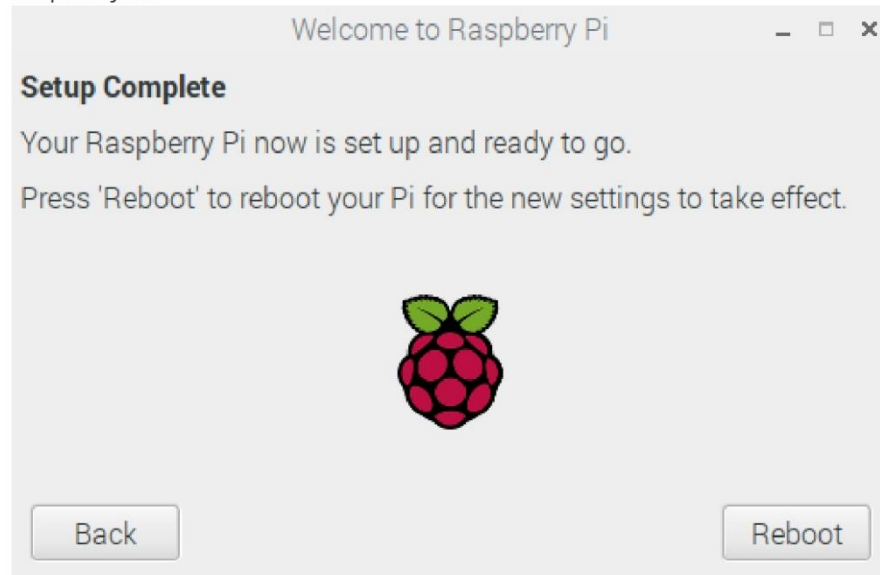
Der Aktualisierungsprozess kann unter Umständen einige Minuten in Anspruch nehmen.



Bestätigen Sie die erfolgreiche Aktualisierung mit **OK**.

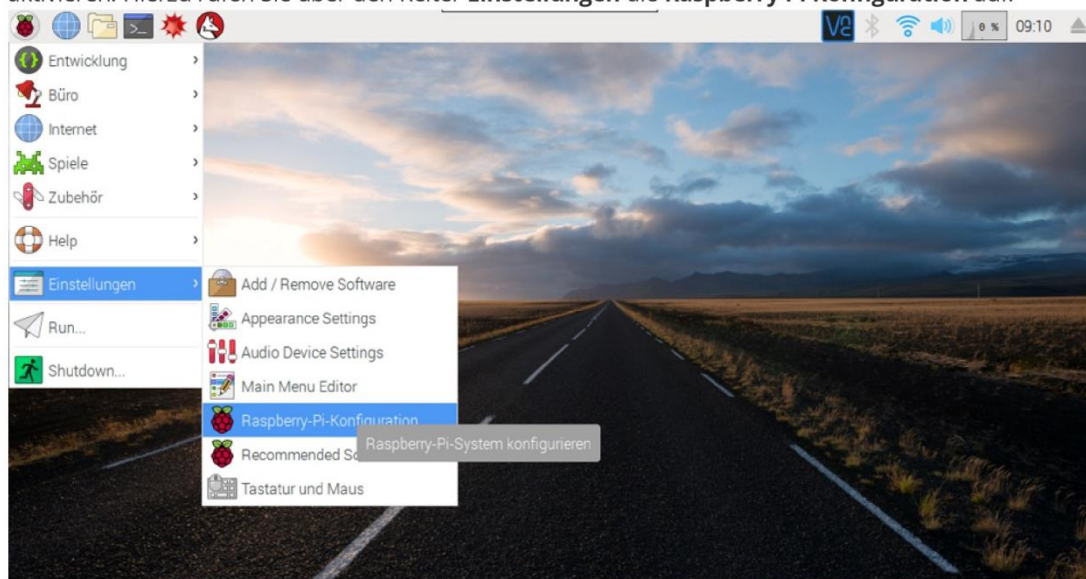


10. **Starten** Sie den Raspberry Pi über **Reboot** neu und beenden Sie damit die Grundkonfiguration des Raspberry Pi.

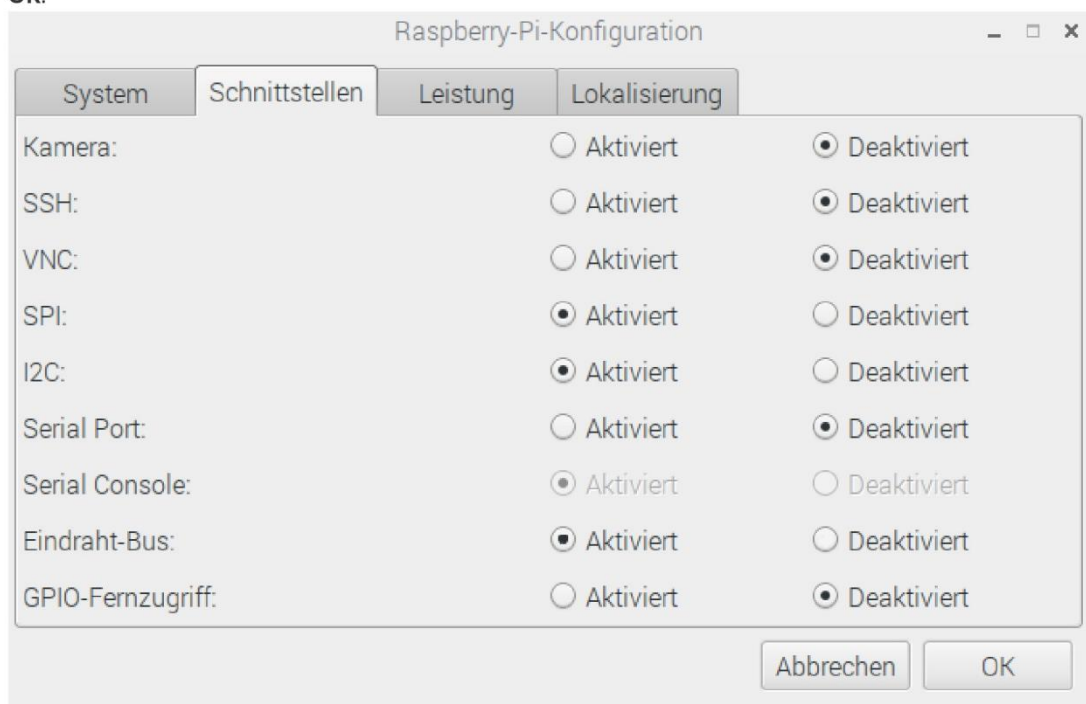




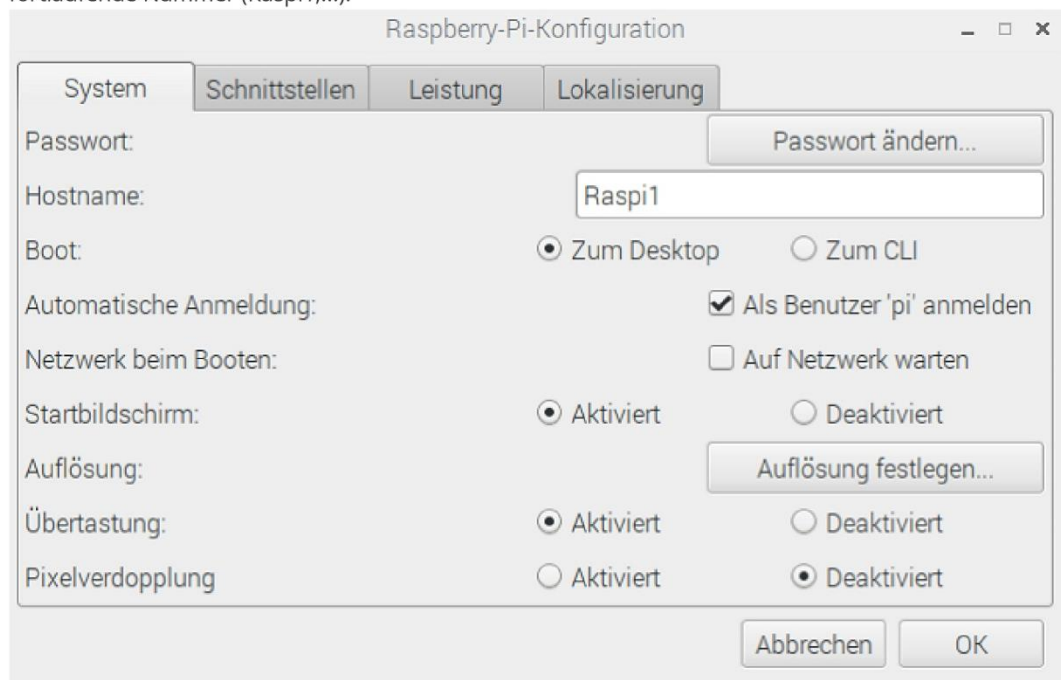
11. Für die Kommunikation des Raspberry Pi mit verschiedenen **Sensoren** sind noch Schnittstellen zu aktivieren. Hierzu rufen Sie über den Reiter **Einstellungen** die **Raspberry Pi Konfiguration** auf.



12. Aktivieren Sie unter **Schnittstellen SPI, I2C** und **Eindraht-Bus** und bestätigen Sie die Konfiguration mit **OK**.



13. **Ändern** Sie unter **System** den **Hostnamen** des Raspberry Pi bspw. in Raspi oder phyphy plus eine fortlaufende Nummer (Raspi1,...).



### 3. Installation von PhyPiDAQ

Die Installation von **PhyPiDAQ** erfolgt über die **Kommandozeile** (siehe 4.). Dazu folgen Sie bitte der Anleitung in der [README\\_de.md](#) bzw. [README\\_de.pdf](#) unter dem Punkt **Installation von PhyPiDAQ auf dem Raspberry Pi**.

### 4. Nutzung des Tabellenkalkulationsprogramms LibreOffice Calc

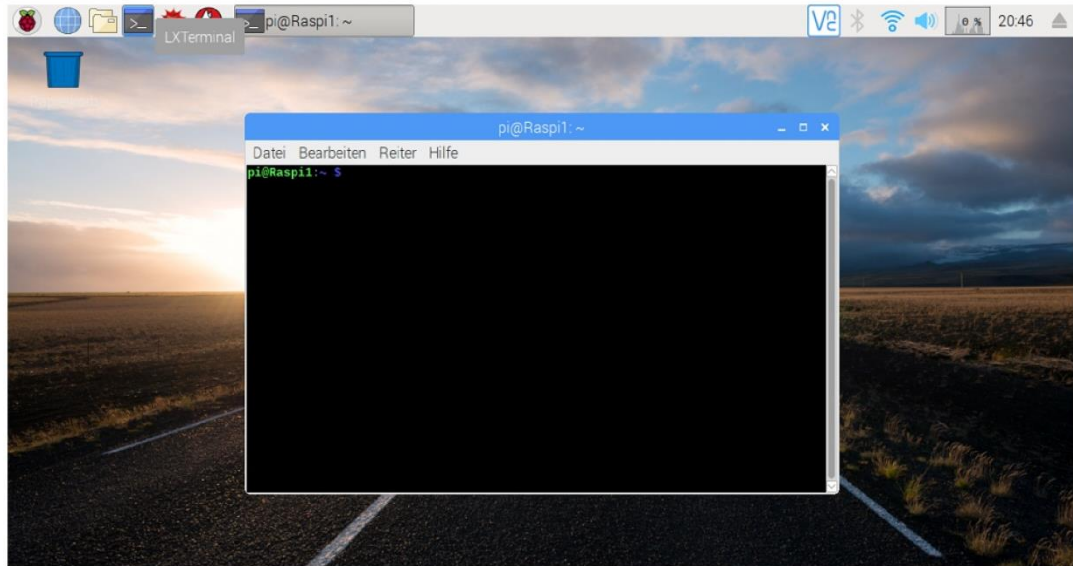
Wenn die mit PhyPi erfassten Messwerte auf dem Raspberry Pi ausgewertet werden sollen, steht mit LibreOffice Calc ein Tabellenkalkulationsprogramm (sehr ähnlich wie Excel) zur Verfügung. Damit die Messdaten fehlerfrei eingelesen werden, sollte in diesem Programm eine Änderung vorgenommen werden.

1. **Öffnen** Sie das Programm **LibreOffice Calc** über das **Himbeerensymbol** und den Reiter **Büro**.
2. Öffnen Sie über das Menü **Extras** den Unterpunkt **Optionen...**
3. Wählen Sie im Menü **Spracheinstellungen** den Punkt **Sprachen** und ändern Sie das **Gebietsschema** in **Englisch (Großbritannien)**.
4. Bestätigen Sie die Änderung mit **OK** und schließen Sie LibreOffice Calc.

## 5. Installation des Programms Mathematica

Der Raspberry Pi bietet die Möglichkeit, das Programm Mathematica kostenlos zu nutzen. Sollten Sie das vorhaben, müssen die Wolfram-Language und Mathematica nachinstalliert werden.

1. Öffnen Sie oben links die **Kommandozeile**.



2. Installieren Sie durch Eingabe des Befehls `sudo apt-get update && sudo apt-get install wolfram-engine` und Bestätigen mit **Enter** die entsprechende Software.

## 6. Deinstallation der vorinstallierten Spiele

Auf dem Raspberry Pi sind wenige einfache Spiele vorinstalliert. Da diese Spiele ein großes Ablenkungspotential besitzen, sollten sie vor Verwendung im Unterricht deinstalliert werden. Dazu sind die nachfolgenden Befehle auf der Kommandozeile auszuführen:

```
sudo apt-get remove --purge python-minecraftpi  
rm -rf ~/python_games
```

Führen Sie danach einen Neustart des Raspberry Pi durch.



## 7. Fernzugriff (VNC) einrichten

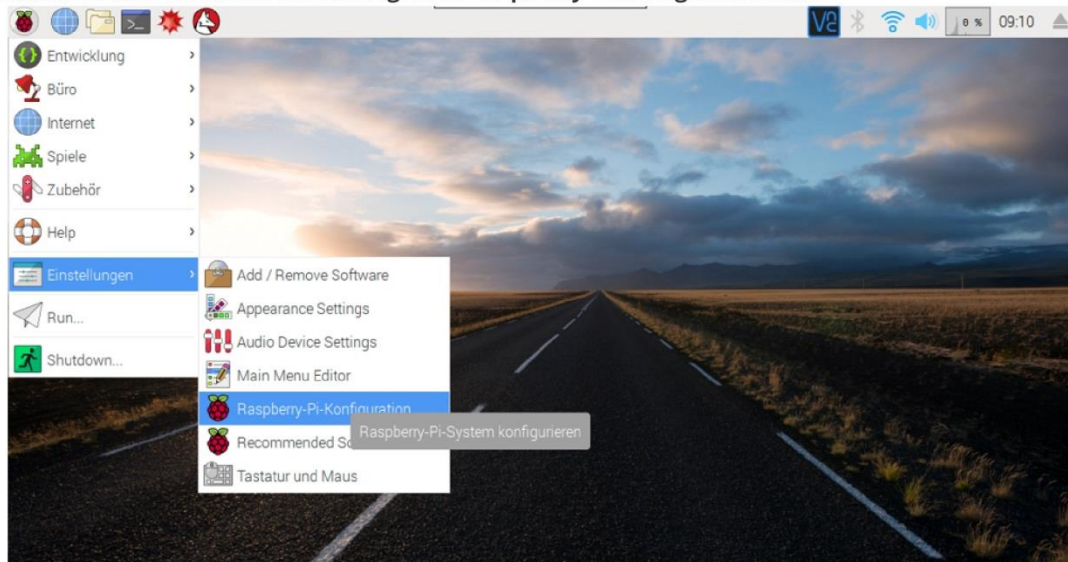
Es besteht die Möglichkeit, bequem von anderen Geräten wie einem Laptop, Tablet oder Smartphone auf den Raspberry Pi aus der Ferne zuzugreifen. So ist es nicht notwendig, für jeden Raspberry Pi einen Bildschirm, eine Tastatur und eine Maus bereitzustellen und das System kann mit einer Powerbank als Spannungsversorgung auch mobil eingesetzt werden.



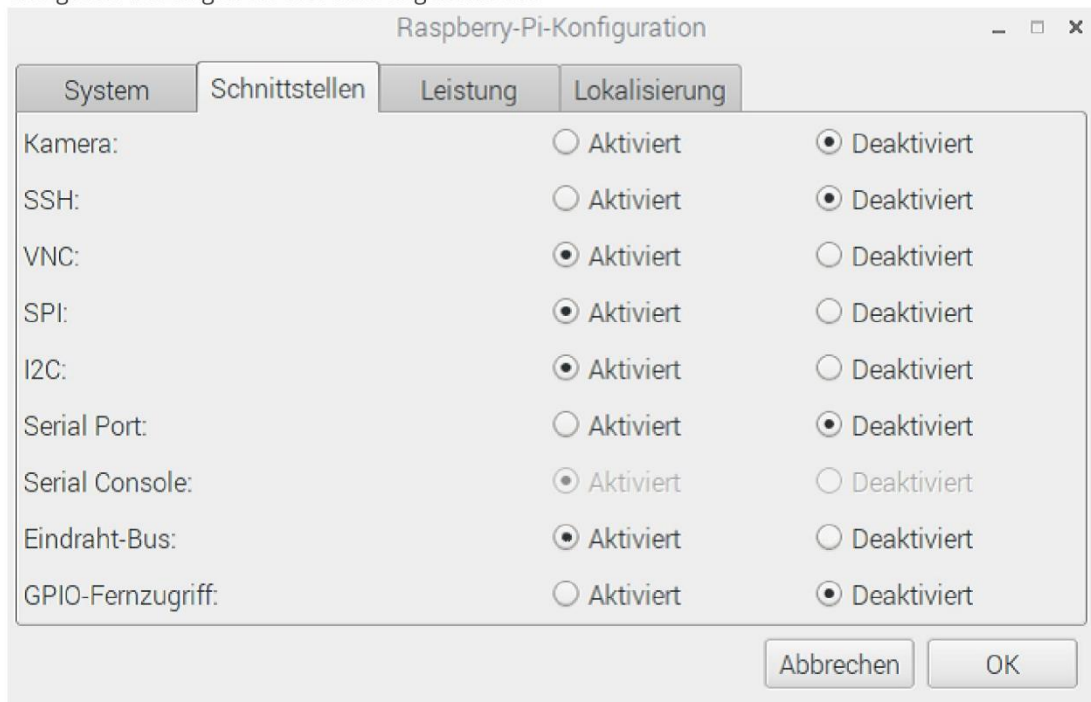
Damit ein Fernzugriff auf den Raspberry Pi erfolgen kann ist es notwendig, dass dieser sich in einem gemeinsamen WLAN mit dem entsprechenden Laptop etc. befindet. Hier bietet es sich an, einen kleinen, tragbaren WLAN-Router, wie den [tragbaren AC750-WLAN-Router TL-WR902AC](#) von tp-link zu verwenden. Dieser kann unabhängig vom Schulnetz betrieben werden und ist durch eine Spannungsversorgung über eine Powerbank mobil einsetzbar. Außerdem ist er sehr handlich und kann bei Bedarf mit dem LAN oder WLAN der Schule verbunden werden, um den Schülern den Zugang zum Internet zu ermöglichen. Um den Fernzugriff auf den Raspberry Pi zu ermöglichen, sind einige Konfigurationsschritte erforderlich, die im Folgenden aufgeführt sind.

### 7.1 Raspberry Pi für VNC konfigurieren

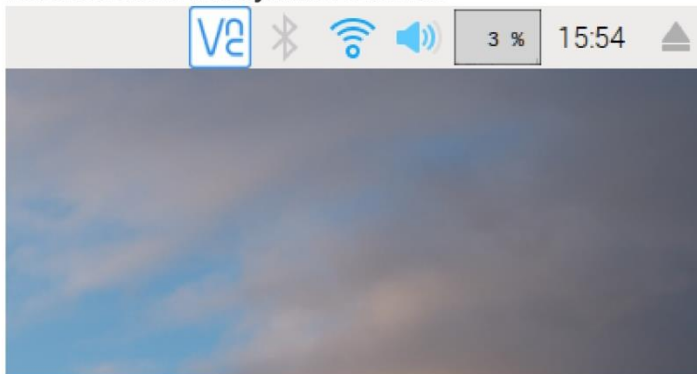
1. Rufen Sie über den Reiter **Einstellungen** die **Raspberry Pi Konfiguration** auf.



2. **Aktivieren** Sie unter **Schnittstellen** den **VNC**-Server des Raspberry Pi, über den später der Fernzugriff erfolgt und bestätigen Sie die Änderungen mit **OK**.



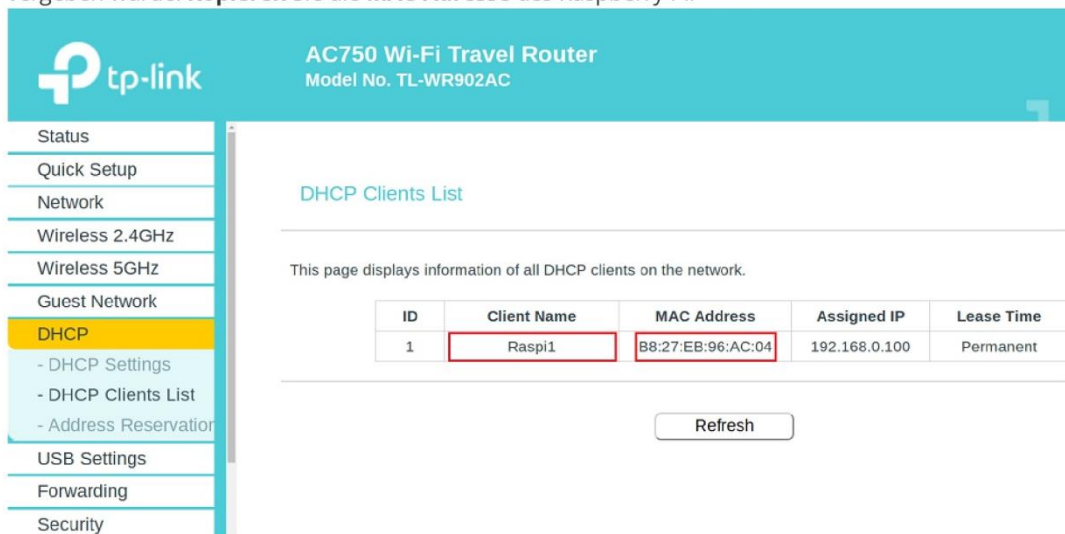
3. Die **erfolgreiche Aktivierung** des VNC-Servers lässt sich oben rechts auf dem Bildschirm durch das neu erschienene **VNC-Symbol** erkennen.



## 7.2 Mobilen WLAN-Router konfigurieren

Grundsätzlich kann der Fernzugriff über jedes LAN oder WLAN erfolgen. Für die sichere und reproduzierbare Verbindung des Raspberry Pi mit dem jeweiligen Anzeigegerät ist es sinnvoll, jedem Raspberry Pi eine feste IP-Adresse zuzuweisen. Da die IP-Adressen in einem Netzwerk im Normalfall dynamisch vergeben werden und somit nach jedem Neustart variieren können, ist es notwendig, Vorkehrungen in der Konfiguration des WLAN-Routers vorzunehmen. Die Beschreibung der Konfiguration erfolgt am Beispiel des empfohlenen tragbaren WLAN-Routers TL-WR902AC.

1. Verbinden Sie den **WLAN-Router** mit der **Spannungsversorgung** und starten Sie ihn damit.
2. **Verbinden** Sie den Raspberry Pi, für den der Fernzugriff eingerichtet werden soll, mit dem **5G-WLAN**, dessen **Namen (SSID)** und **Passwort** auf der **Rückseite** des Routers aufgedruckt sind. Hierfür rechts oben auf dem Bildschirm auf das WLAN-Symbol klicken und das entsprechende Netzwerk auswählen. Das zugehörige Passwort wird darauffolgend abgefragt.
3. **Verbinden** Sie sich über <http://tplinkwifi.net> mit dem **Router** und loggen Sie sich mit dem **Username: admin** und **Password: admin** ein.
4. Um später unerwünschte Zugriffe auf die Konfiguration und damit Störungen zu vermeiden, sollten Sie nun den **Benutzernamen** und das **Passwort** ändern. Wählen sie hierzu **System Tools** und darauffolgend **Password** aus. Nun können Sie einen **neuen Benutzernamen** und ein **neues Passwort** vergeben und mit **Save** speichern.
5. Um nun eine **feste IP-Adresse** für den Raspberry Pi zu **vergeben**, wird zuerst über **DHCP** und den Unterpunkt **DHCP Clients List** eine Liste aller im mit dem Netzwerk verbundenen Geräte aufgerufen. Hier erscheint auch der Raspberry Pi mit dem Hostnamen, der im Vorfeld bei der Konfiguration vergeben wurde. **Kopieren** Sie die **MAC-Adresse** des Raspberry Pi.



The screenshot shows the TP-Link web interface for an AC750 Wi-Fi Travel Router (Model No. TL-WR902AC). The left sidebar contains a menu with options: Status, Quick Setup, Network, Wireless 2.4GHz, Wireless 5GHz, Guest Network, DHCP (highlighted), - DHCP Settings, - DHCP Clients List, - Address Reservation, USB Settings, Forwarding, and Security. The main content area is titled 'DHCP Clients List' and includes a description: 'This page displays information of all DHCP clients on the network.' Below this is a table with the following data:

ID	Client Name	MAC Address	Assigned IP	Lease Time
1	Raspi1	B8:27:EB:96:AC:04	192.168.0.100	Permanent

At the bottom right of the table area, there is a 'Refresh' button.

6. Rufen Sie nun den Unterpunkt **Address Reservation** auf und **reservieren** Sie eine **feste IP-Adresse für den Raspberry Pi**. Klicken Sie hierzu **Add New**.

tp-link AC750 Wi-Fi Travel Router  
Model No. TL-WR902AC

Status  
Quick Setup  
Network  
Wireless 2.4GHz  
Wireless 5GHz  
Guest Network  
**DHCP**  
- DHCP Settings  
- DHCP Clients List  
- Address Reservation  
USB Settings  
Forwarding  
Security

DHCP Address Reservation

This page displays the static IP address assigned by the DHCP Server and allows you to adjust these configurations by clicking the corresponding fields.

	MAC Address	IP Address	Status	Edit
<input type="checkbox"/>				

Add New Enable Selected Disable Selected Delete Selected

Refresh

7. Fügen Sie die zuvor kopierte **MAC-Adresse** ein, vergeben Sie **aufsteigend von 192.168.0.100** IP-Adressen für den verwendeten Raspberry Pi und wählen Sie unter Status **Enabled** aus. Bestätigen Sie den Vorgang mit **Save**.

tp-link AC750 Wi-Fi Travel Router  
Model No. TL-WR902AC

Status  
Quick Setup  
Network  
Wireless 2.4GHz  
Wireless 5GHz  
Guest Network  
**DHCP**  
- DHCP Settings  
- DHCP Clients List  
- Address Reservation  
USB Settings  
Forwarding  
Security

DHCP Address Reservation

The static IP address of the DHCP Server can be configured on this page.

Group: Default

MAC Address: B8:27:EB:96:AC:04

IP Address: 192.168.0.100

Status: Enabled ▼

Save Back

Ab dem nächsten Neustart des Routers wird dem Raspberry Pi nun die reservierte IP-Adresse zugewiesen, sodass er unter dieser zuverlässig im Netzwerk erreichbar ist.

8. Versehen Sie den Raspberry Pi mit einem **Aufkleber**, auf dem der **Hostname** und die **IP-Adresse** vermerkt sind.
9. Reservieren Sie in gleicher Weise **feste IP-Adressen** für **alle weiteren Raspberry Pi**, die verwendet werden sollen und loggen Sie sich anschließend aus.



## 7.3 VNC-Viewer auf dem Anzeigegerät einrichten

Um den Fernzugriff auf den Raspberry Pi vom jeweiligen Anzeigegerät zu ermöglichen, ist ein VNC-Viewer auf diesem notwendig. Im Folgenden wird die Installation und Einrichtung des VNC-Viewers **REALVNC** gezeigt, der für alle gängigen Betriebssysteme verfügbar ist.



Laden Sie VNC Viewer auf das Gerät herunter, über das die Steuerung erfolgen soll.

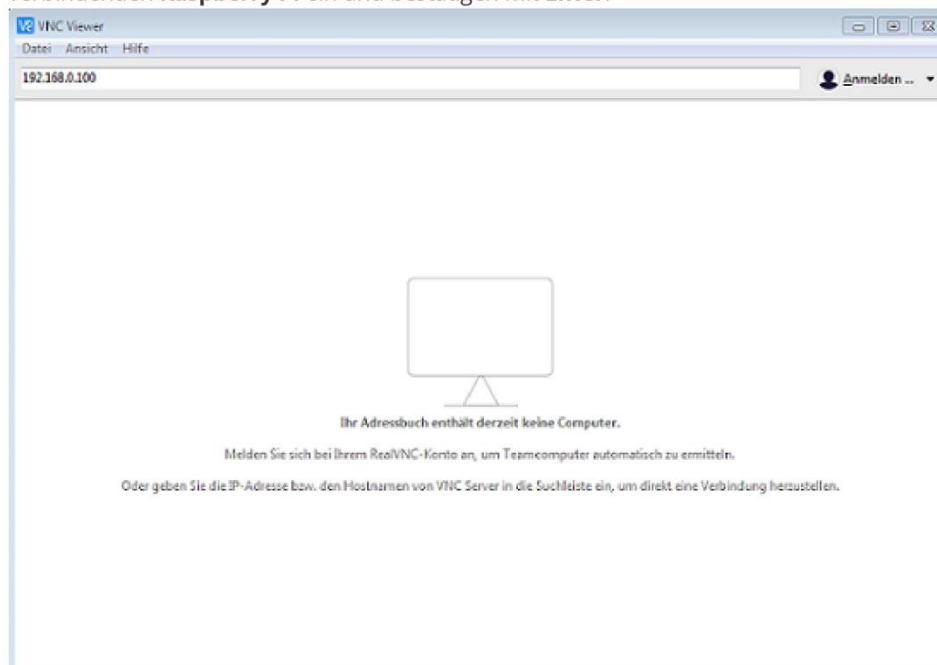
Vergewissern Sie sich, dass Sie **VNC Connect** auf den Computer heruntergeladen haben, den Sie steuern wollen.



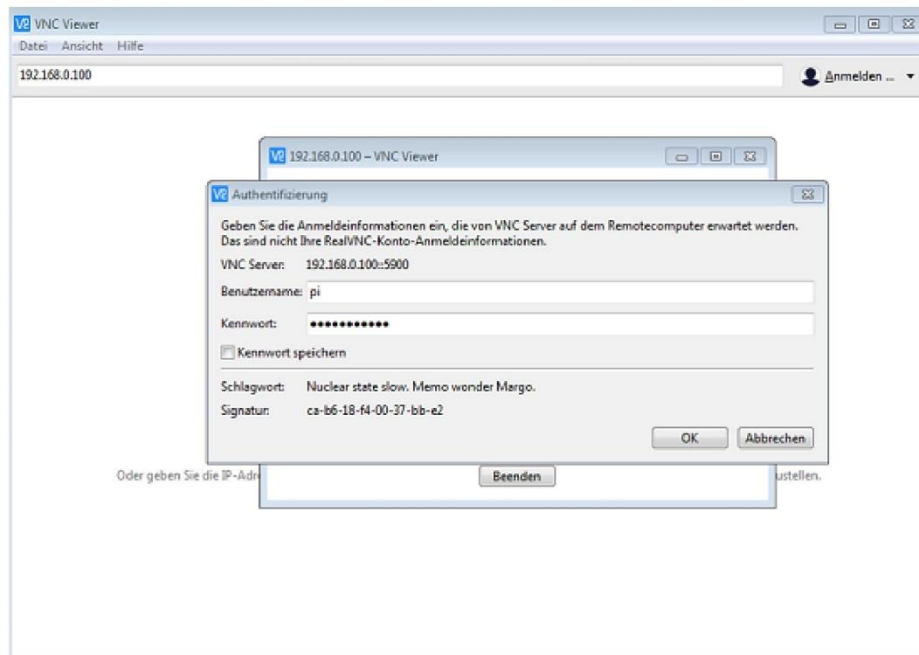
VNC VIEWER HERUNTERLADEN

SHA-256: 644d325026dc2cbaa2701ac726d6abaa434e9754d37508d634d440dc2a37670d

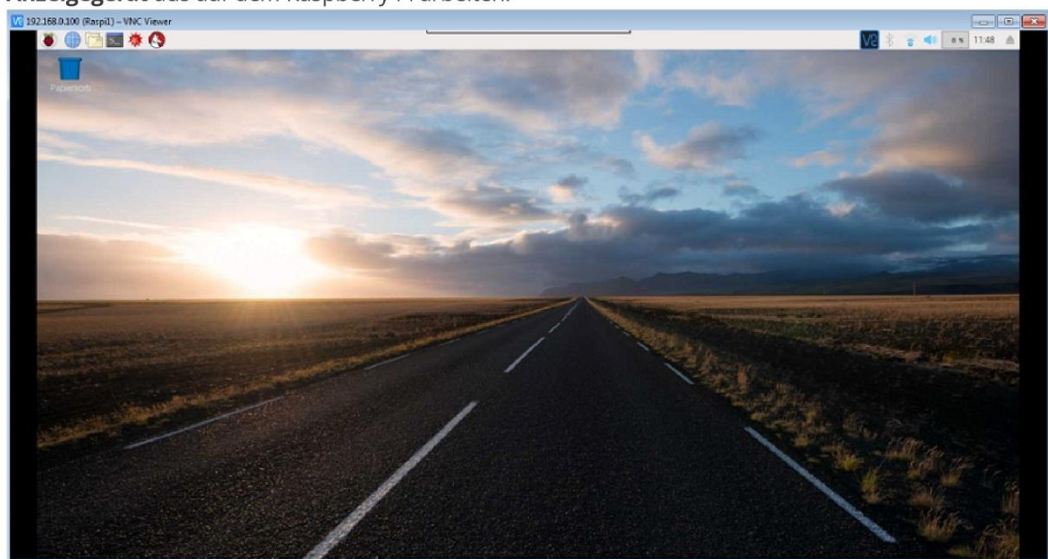
1. **Laden** Sie sich den [REALVNC-Viewer](#) herunter und **installieren** Sie diesen auf dem Anzeigegerät. Bei Verwendung von **Tablets** oder **Smartphones** erfolgt der Download über den **App Store** bzw. den **Google Play Store**. Die nachfolgende Einrichtung bezieht sich auf einen Windows PC. Sie erfolgt aber in allen Systemen in ähnlicher Form.
2. **Installieren** Sie den **VNC-Viewer** und **öffnen** Sie diesen.
3. Geben Sie in die Suchzeile **VNC Server-Adresse eingeben oder suchen** die **IP-Adresse** des zu verbindenden **Raspberry Pi** ein und bestätigen mit **Enter**.



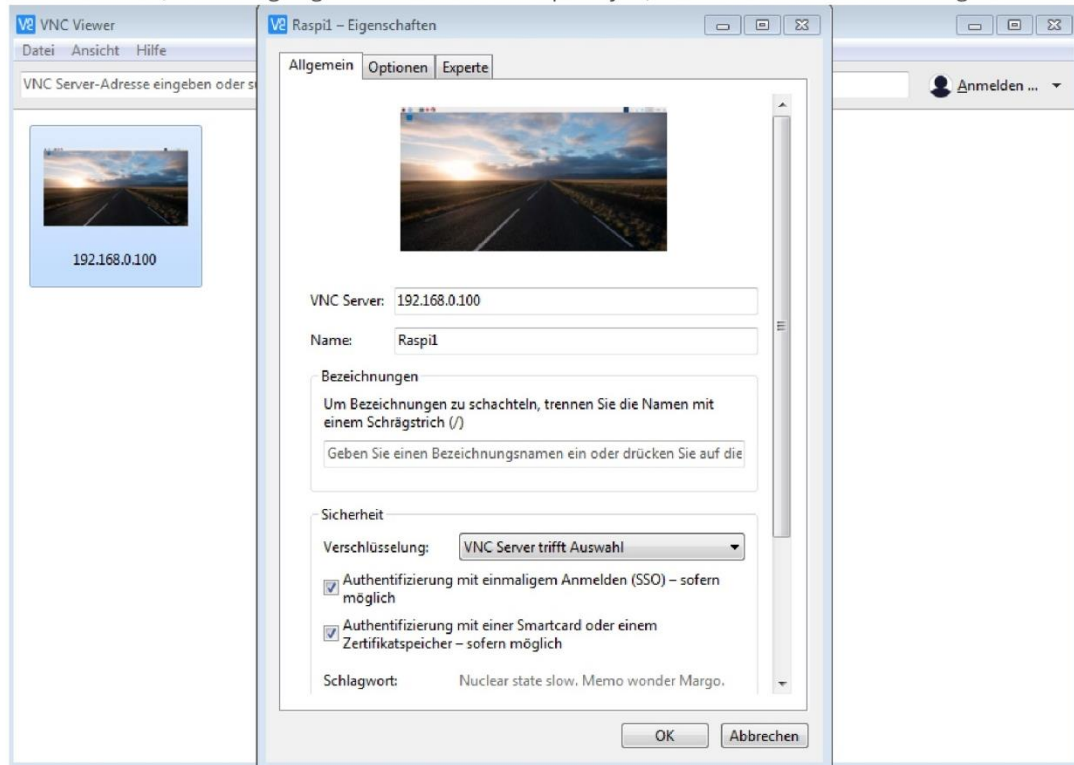
4. **Authentifizieren** Sie sich mit dem **Benutzer pi** und dem jeweiligen **Passwort** und bestätigen Sie mit **OK**.



5. Jetzt haben Sie über VNC **Fernzugriff** auf den **Raspberry Pi** und können komfortabel vom jeweiligen **Anzeigegerät** aus auf dem Raspberry Pi arbeiten.



6. Wenn Sie nun wieder auf die **Hauptseite** des VNC-Viewers wechseln, können Sie über **Rechtsklick** auf die gerade angelegte Verbindung und Auswahl des Unterpunktes **Eigenschaften** der Verbindung noch einen **Namen** (zuvor festgelegter Hostname des Raspberry Pi) zuweisen und mit **OK** bestätigen.

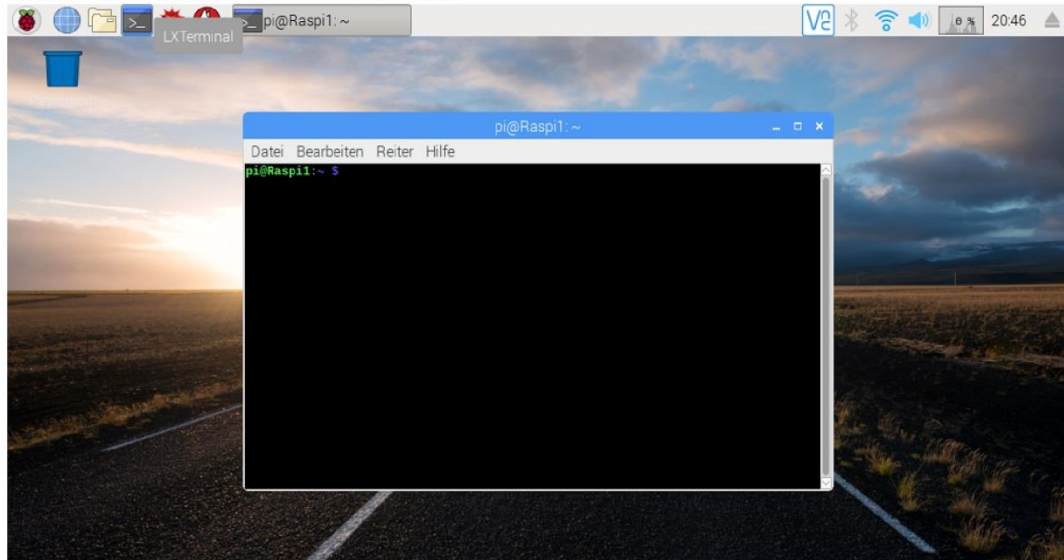


Auf diese Weise lassen sich über die festgelegten IP-Adressen für jeden Raspberry Pi Verbindungen anlegen, die sich durch **Doppelklick** auf die jeweilige **Verbindung starten** lassen.

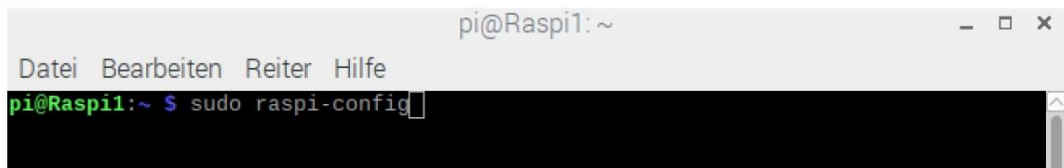
## 8. Bildschirmauflösung an das Anzeigegerät anpassen

Da bei einer Verbindung des Anzeigegeräts über **VNC** mit dem Raspberry Pi die **Bildschirmauflösung nicht automatisch angepasst** wird, muss diese so festgelegt werden, dass **angenehm** gearbeitet werden kann.

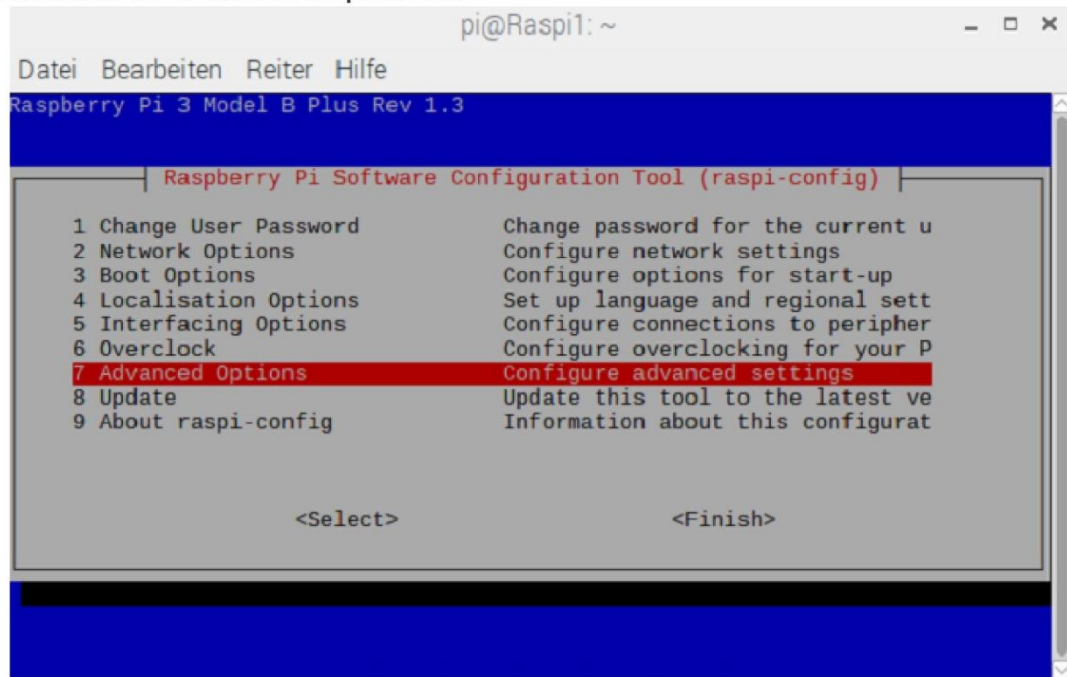
1. Öffnen Sie oben links die **Kommandozeile**.



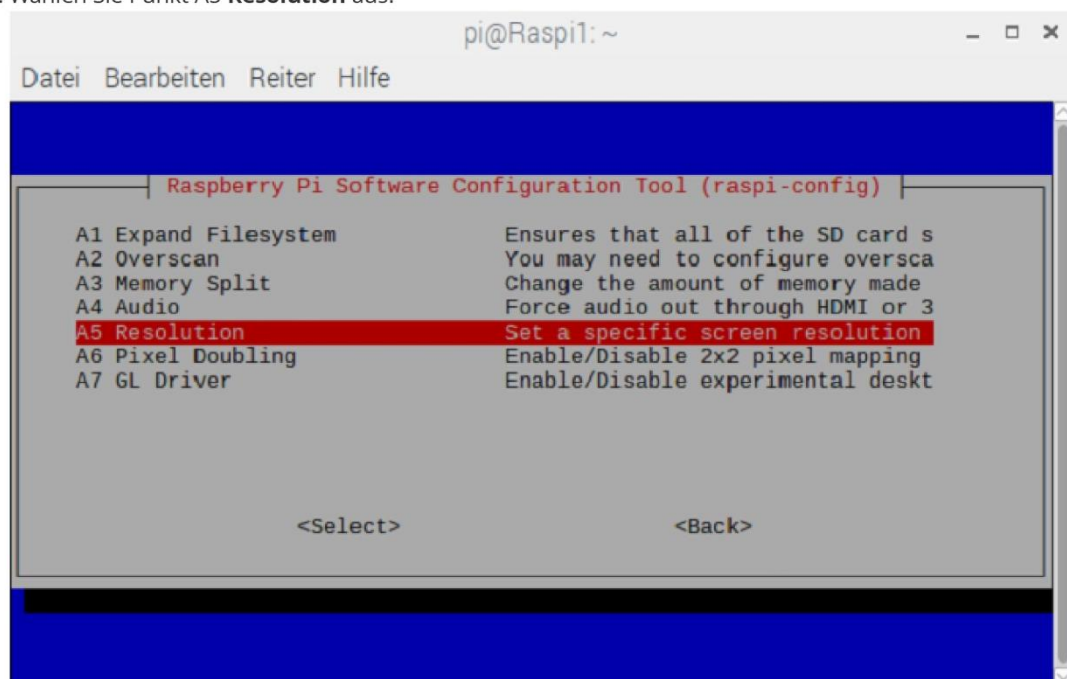
2. Wechseln Sie mit dem nachfolgenden Befehl `sudo raspi-config` in die **Konfiguration** des Raspberry Pi.



3. Wählen Sie Punkt 7 **Advanced Options** aus.

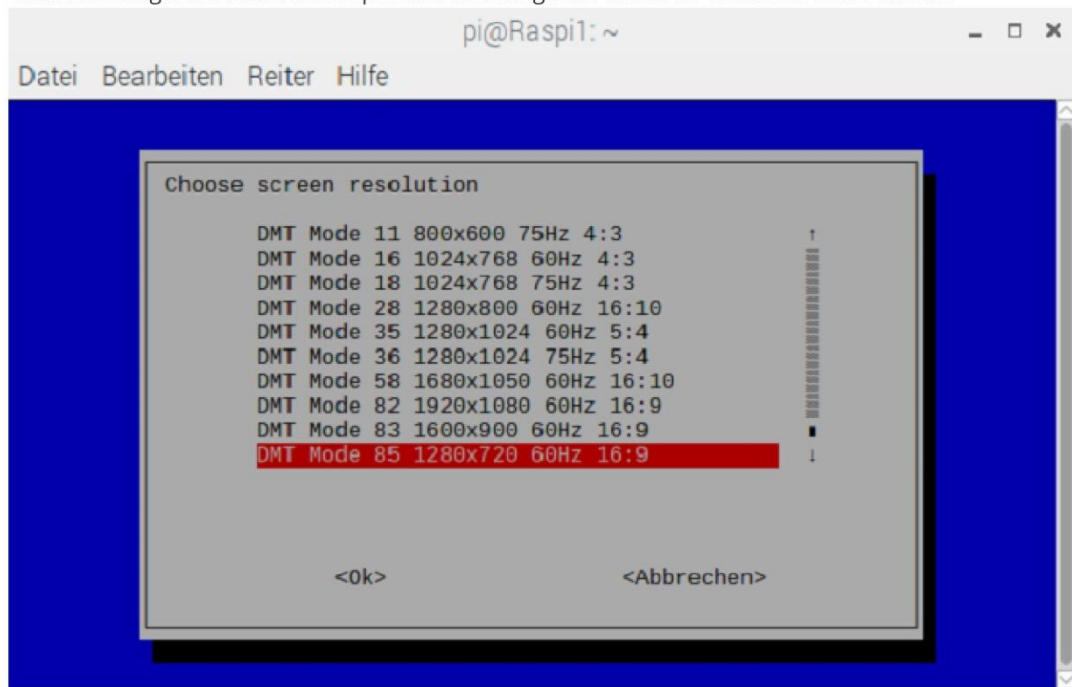


4. Wählen Sie Punkt A5 **Resolution** aus.

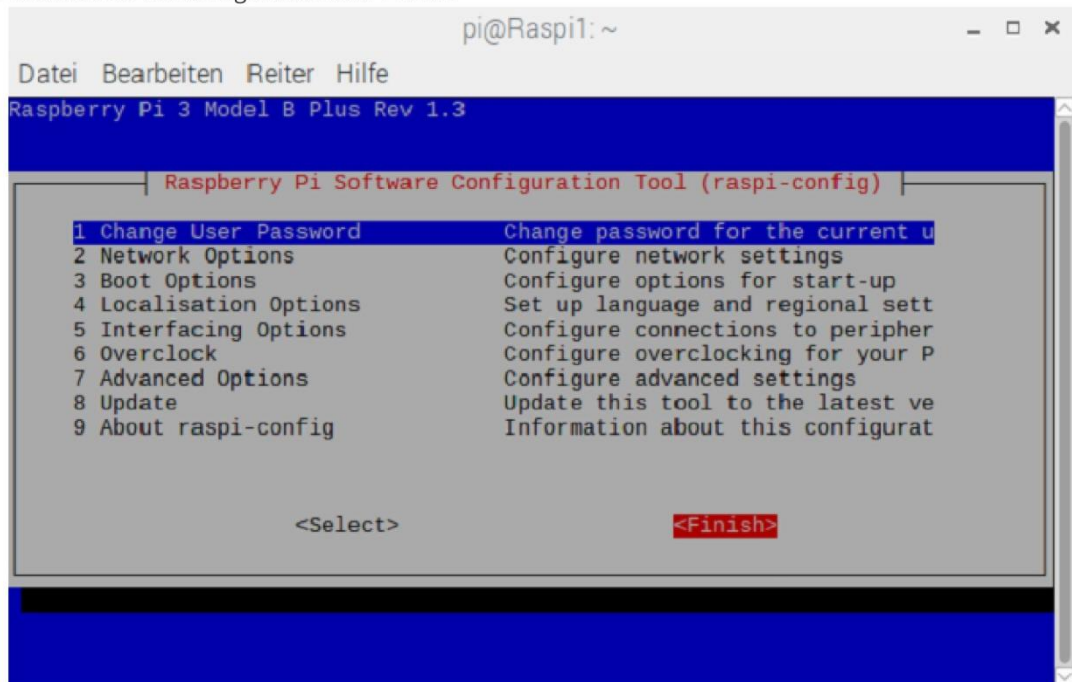




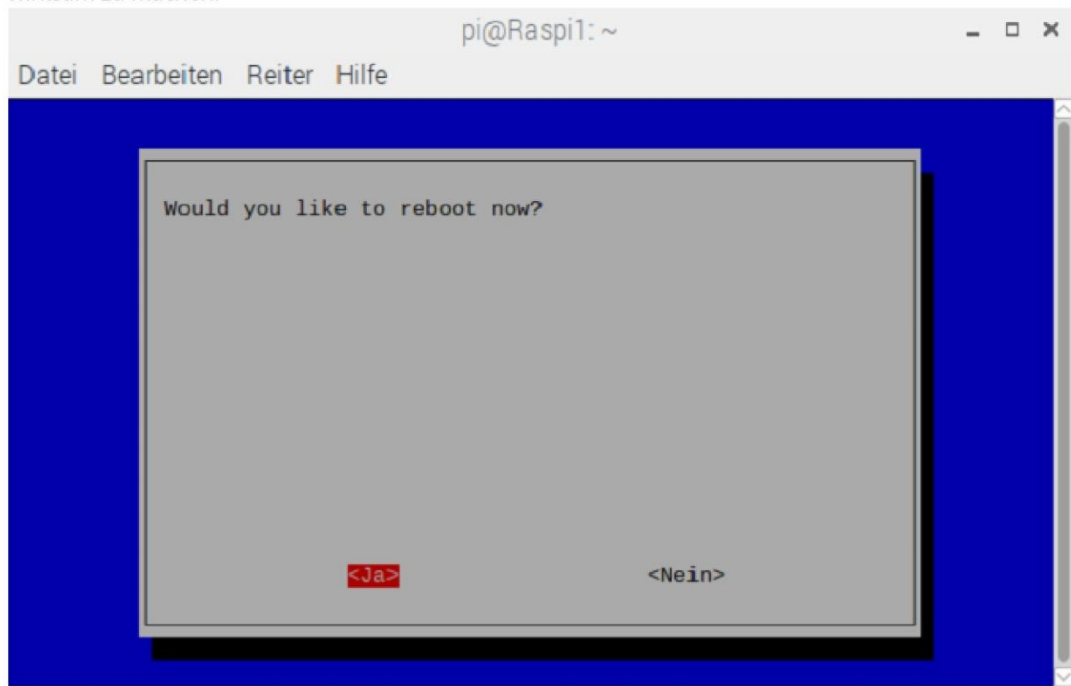
5. Unter den aufgeführten **Auflösungen** ist nun eine Auflösung zu **wählen** und mit **OK** zu bestätigen. Die zu wählende Auflösung richtet sich nach dem verwendeten Anzeigegerät und sollte so festgelegt werden, dass an diesem angenehm gearbeitet werden kann. Für einen Laptop mit 14 Zoll Bildschirmdiagonale bietet sich bspw. die Auflösung **DMT Mode 85 1280x720 60Hz 16:9** an.



6. Beenden Sie die Konfiguration über **Finish**.



7. Anschließend muss der Raspberry Pi über **Ja** neu gestartet werden, um die vorgenommene Änderung wirksam zu machen.

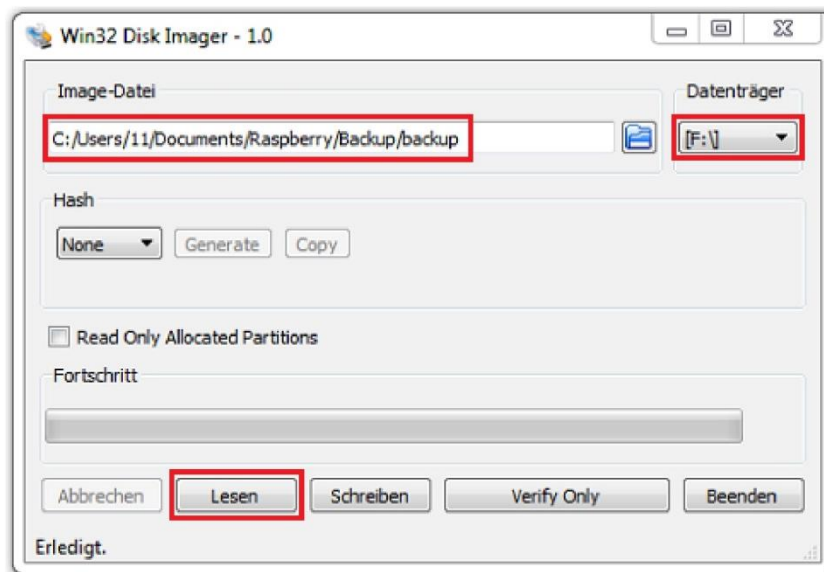


## 9. Systemabbild als Backup und für die Installation mehrerer Raspberry Pi mit identischer Konfiguration

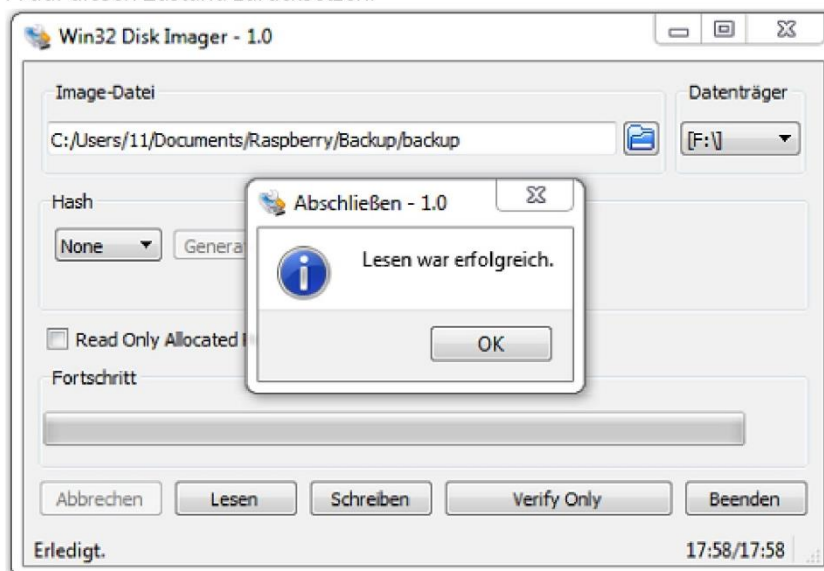
Um nicht für jeden einzurichtenden Raspberry Pi alle Konfigurationsschritte durchführen zu müssen und eine Sicherung des konfigurierten Zustandes vorzunehmen, ist es sinnvoll, ein Systemabbild (Image) zu erzeugen und zu sichern. Da die meisten Lehrer und Schulen mit Windows Computern arbeiten, wird das Vorgehen anhand dieses Betriebssystems erläutert.

1. Stecken Sie die **Micro-SD-Karte**, von der das Systemabbild erzeugt werden soll, in den vorgesehenen **Steckplatz** Ihres Computers oder in einen entsprechenden USB-Adapter.
2. **Führen** Sie den **Win32-Disk-Imager** aus und legen Sie eine **Image-Datei** an. Wählen Sie unter **Datenträger** die **Micro-SD-Karte** aus und starten sie das Erzeugen des Systemabbilds über **Lesen**.





3. Das Erzeugen des Systemabbilds nimmt einige Minuten in Anspruch. Bestätigen Sie das erfolgreiche Erzeugen des Systemabbilds mit **OK**. Sie können nun Micro-SD-Karten mit diesem Systemabbild beschreiben und sich so eine bestimmte Konfiguration eines Raspberry Pi klonen bzw. einen Raspberry Pi auf diesen Zustand zurücksetzen.



## 10. Systemabbild auf Micro-SD-Karte schreiben

Nachfolgend wird beschrieben, wie Sie ein gesichertes **Systemabbild (Image)** auf eine Micro-SD-Karte **schreiben** können. Dies ist auch dann sinnvoll, wenn Sie weitere Raspberry Pi mit **identischer Grundkonfiguration** verwenden wollen. Hier bietet es sich an, ein zuvor erstelltes **Systemabbild** (siehe 6.) eines einzelnen Raspberry Pi auf eine entsprechende Anzahl an **Micro-SD-Karten** zu **klonen**, um sich den Aufwand des mehrmaligen Konfigurierens zu ersparen.

1. Starten Sie den **Win32-Disk-Imager**. Wählen Sie das zuvor gesicherte **Systemabbild** unter **Image-Datei** und die zu beschreibende **Micro-SD-Karte** unter **Datenträger** aus. Starten Sie daraufhin den Schreibvorgang über **Schreiben**.
2. Entfernen Sie die **Micro-SD-Karte** sicher, stecken Sie diese in den **Micro-SD-Karten-Steckplatz** auf der **Unterseite** des Raspberry Pi und starten Sie den Raspberry Pi.
3. Wenn Sie einen Raspberry Pi nur auf einen zuvor gesicherten Systemzustand zurücksetzen wollen, sind Sie an dieser Stelle fertig. Wollen Sie hingegen ein **Systemabbild klonen** und auf einem anderen Raspberry Pi verwenden, muss noch der **Hostname** geändert werden (**siehe 3.1**). Wenn Sie von einem anderen Gerät über VNC auf den Raspberry Pi zugreifen wollen, sollten Sie dem geklonten Raspberry Pi außerdem in der **Konfiguration des WLAN-Routers** eine **feste IP-Adresse** zuweisen (**siehe 3.2**).

## Anhang 6: Rohdaten Beschleunigung während einer Aufzugfahrt im Physikhochhaus des KIT

```
1 # PhyPiDAQ Data recorder 181115-2250
2 # logging interval 0.05
3 # 0-1:a
4 Rohwerte a in m/s²
5 -0.1646
6 -0.2653
7 -0.3317
8 -0.1916
9 -0.2751
10 -0.4115
11 -0.2494
12 -0.3194
13 -0.1597
14 0.008598
15 0.08107
16 0.05282
17 0.1277
18 0.1671
19 0.00737
20 0.1585
21 0.172
22 0.2322
23 0.3955
24 0.581
25 0.6731
26 0.5245
27 0.5835
28 0.6572
29 0.7063
30 0.6768
31 0.651
32 0.6879
33 1.015
34 0.5208
35 0.4103
36 0.5392
37 0.7198
38 0.3476
39 0.3218
40 0.5012
41 0.328
42 0.1216
43 0.1732
44 0.03439
45 0.2236
46 0.1941
47 0.04422
48 -0.1535
49 -0.2125
50 -0.0565
51 -0.1216
52 -0.2137
53 -0.2186
54 -0.1462
55 -0.06019
56 -0.2678
57 -0.2899
58 -0.03194
59 -0.2592
60 -0.3304
61 -0.2383
62 -0.1621
63 -0.2285
64 -0.2936
65 -0.2064
66 -0.2494
67 -0.3587
68 -0.1916
69 -0.2248
70 -0.2555
71 -0.2616
72 -0.3574
73 -0.3783
```

---

74	-0.3255
75	-0.2002
76	-0.3734
77	-0.3439
78	-0.1216
79	-0.2432
80	-0.3771
81	-0.2764
82	-0.4361
83	-0.7063
84	-0.995
85	-0.9606
86	-1.161
87	-1.462
88	-1.306
89	-1.338
90	-1.475
91	-1.4
92	-1.323
93	-1.402
94	-1.296
95	-1.021
96	-1.08
97	-0.952
98	-0.7223
99	-0.6989
100	-0.7051
101	-0.7014
102	-0.4754
103	-0.5515
104	-0.4643
105	-0.2236
106	-0.1621
107	-0.2837
108	-0.3783
109	-0.3673
110	-0.3292
111	-0.2973
112	-0.296
113	-0.296
114	-0.3722
115	-0.2788
116	-0.2874
117	-0.2862
118	-0.2027
119	-0.2076
120	-0.3009
121	-0.3427
122	-0.2186
123	-0.3796
124	-0.1855
125	-0.2309
126	-0.3231
127	-0.3181
128	-0.183

## Literaturverzeichnis

- Analog Devices. (2009). *Datenblatt ADXL335. Small, Low Power, 3-Axis  $\pm 3$  g Accelerometer*. Zugriff am 16.11.2018. Verfügbar unter <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adxl335.pdf>
- Analog Devices. (2018). *Datenblatt AD623. Single and Dual-Supply, Rail-to-Rail, Low Cost Instrumentation Amplifier*. Zugriff am 05.11.2018. Verfügbar unter <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad623.pdf>
- Aupperle, M. & Quast, G. (2018). PhyPiDAQ (Version 0.9.1) [Computer software]. Verfügbar unter <https://github.com/GuenterQuast/PhyPiDAQ>
- Baumann, P. (2015). *Ausgewählte Sensorschaltungen. Vom Datenblatt zur Simulation*. Wiesbaden: Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-08558-2>
- Beland, L.-P. & Murphy, R. (2015). *Ill Communication: Technology, Distraction & Student Performance*, Centre for Economic Performance. Zugriff am 13.11.2018. Verfügbar unter <http://cep.lse.ac.uk/pubs/download/dp1350.pdf>
- Bendel, O. (2018). *Digitalisierung*. Zugriff am 13.10.2018. Verfügbar unter <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/digitalisierung-54195/version-277247>
- Berger, V. (2010). Im Physikunterricht experimentieren. In H. F. Mikelskis (Hrsg.), *Physik-Didaktik. Praxishandbuch für die Sekundarstufe I und II* (2. Aufl., S. 149–167). Berlin: Cornelsen Scriptor.
- Bosch Sensortec GmbH. (2018). *Datenblatt BMP280. Digital Pressure Sensor*. Zugriff am 13.11.2018. Verfügbar unter [https://ae-bst.resource.bosch.com/media/\\_tech/media/datasheets/BST-BMP280-DS001-19.pdf](https://ae-bst.resource.bosch.com/media/_tech/media/datasheets/BST-BMP280-DS001-19.pdf)
- Charity Commission for England and Wales. (2018). *1129409 - RASPBERRY PI FOUNDATION*. Zugriff am 28.10.2018. Verfügbar unter <http://apps.charitycommission.gov.uk/Showcharity/RegisterOfCharities/CharityWithPartB.aspx?RegisteredCharityNumber=1129409&SubsidiaryNumber=0>
- Coliz, J. (2011). RF24 [Computer software]. Verfügbar unter <https://github.com/nRF24/RF24>
- Dembowski, K. (2013). *Raspberry Pi - Das Handbuch. Konfiguration, Hardware, Applikationserstellung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-03167-1>
- Devantech Limited. Zugriff am 22.11.2018. Verfügbar unter <https://robot-electronics.co.uk/>
- Duden. (2018a). *digital*. Zugriff am 13.10.2018. Verfügbar unter <https://www.duden.de/rechtschreibung/digital>

- Duden. (2018b). *Digitalisierung*. Zugriff am 13.10.2018. Verfügbar unter <https://www.duden.de/suchen/dudenonline/Digitalisierung>
- Eckstein GmbH. Zugriff am 30.10.2018. Verfügbar unter <https://eckstein-shop.de>
- Euler, M. (2010). Schülerlabore: Lernen durch Forschen und Entwickeln. In E. Kircher, R. Girwidz & P. Häußler (Hrsg.), *Physikdidaktik. Theorie und Praxis* (Springer-Lehrbuch, 2. Aufl., S. 799–818). Berlin: Springer.
- Giancoli, D. C. (2010). *Physik. Lehr- und Übungsbuch* (ph - Physik, 3., aktualisierte Auflage). München: Pearson Studium.
- Girwidz, R. (2015a). Medien im Physikunterricht. In E. Kircher, R. Girwidz & P. Häußler (Hrsg.), *Physikdidaktik. Theorie und Praxis* (Springer-Lehrbuch, 3. Aufl., S. 193–246). Berlin: Springer Spektrum.
- Girwidz, R. (2015b). Neue Medien und Multimedia. In E. Kircher, R. Girwidz & P. Häußler (Hrsg.), *Physikdidaktik. Theorie und Praxis* (Springer-Lehrbuch, 3. Aufl., S. 401–427). Berlin: Springer Spektrum.
- Hamamatsu Photonics. (2017). *Datenblatt One-dimensional PSD S3931, S3932, S3270*. Zugriff am 21.10.2018. Verfügbar unter [https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s3931\\_etc\\_kpsd1002e.pdf](https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s3931_etc_kpsd1002e.pdf)
- Haus, J. (2010). *Optical sensors. Basics and Applications*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. <https://doi.org/10.1002/9783527629435>
- Huhnke, D. (2006). *Temperaturmesstechnik* (Atp Praxiswissen kompakt, Bd. 4). München: Oldenbourg-Industrieverl.
- Kauertz, A. & Fischer, H. E. (2010). Standards und Physikaufgaben. In E. Kircher, R. Girwidz & P. Häußler (Hrsg.), *Physikdidaktik. Theorie und Praxis* (Springer-Lehrbuch, 2. Aufl., S. 663–687). Berlin: Springer.
- Kircher, E. (2015a). Elementarisierung und didaktische Rekonstruktion. In E. Kircher, R. Girwidz & P. Häußler (Hrsg.), *Physikdidaktik. Theorie und Praxis* (Springer-Lehrbuch, 3. Aufl., S. 107–137). Berlin: Springer Spektrum.
- Kircher, E. (2015b). Methoden im Physikunterricht. In E. Kircher, R. Girwidz & P. Häußler (Hrsg.), *Physikdidaktik. Theorie und Praxis* (Springer-Lehrbuch, 3. Aufl., S. 141–190). Berlin: Springer Spektrum.
- Kircher, E. (2015c). Ziele und Kompetenzen im Physikunterricht. In E. Kircher, R. Girwidz & P. Häußler (Hrsg.), *Physikdidaktik. Theorie und Praxis* (Springer-Lehrbuch, 3. Aufl., S. 75–105). Berlin: Springer Spektrum.
- Landesakademie für Fortbildung und Personalentwicklung an Schulen. (2018). *Didaktische und methodische Überlegungen zur Messwerterfassung im*

- Physikunterricht*. Zugriff am 14.10.2018. Verfügbar unter [https://lehrerfortbildung-bw.de/u\\_matnatech/physik/gym/weiteres/nm/messwerterfassung/Messwerterfassung\\_Didaktik.html](https://lehrerfortbildung-bw.de/u_matnatech/physik/gym/weiteres/nm/messwerterfassung/Messwerterfassung_Didaktik.html)
- LD DIDACTIC GmbH. (2018a). *Mobile-CASSY 2*, LD DIDACTIC GmbH. Zugriff am 13.11.2018. Verfügbar unter <https://www.leybold-shop.de/mobile-cassy-2-524005.html>
- LD DIDACTIC GmbH. (2018b). *Mobile-CASSY 2 – Das ultimative Schülermessgerät*, LD DIDACTIC GmbH. Zugriff am 13.11.2018. Verfügbar unter <https://www.ld-didactic.de/produkte-loesungen/cassy-datalogging-und-messtechnik/cassy-fuerschuelerversuche/mobile-cassy-2.html>
- Lerch, R. (2012). *Elektrische Messtechnik* (Springer-Lehrbuch, 6., neu bearb. Aufl.). Berlin: Springer Vieweg.
- Maxim Integrated. (2015). *Datenblatt MAX31855. Cold-Junction Compensated Thermocouple-to-Digital Converter*. Zugriff am 07.11.2018. Verfügbar unter <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX31855.pdf>
- Maxim Integrated. (2018). *Datenblatt DS18B20. Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer*. Zugriff am 07.11.2018. Verfügbar unter <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>
- Mikelskis, H. F. (2010). Den Physikunterricht reflektiert vorbereiten. In H. F. Mikelskis (Hrsg.), *Physik-Didaktik. Praxishandbuch für die Sekundarstufe I und II* (2. Aufl., S. 11–51). Berlin: Cornelsen Scriptor.
- Mikelskis-Seifert, S. & Leisner-Bodenthin, A. (2007). Unterrichtsansätze zu den Methoden physikalischer Erkenntnisgewinnung. In S. Mikelskis-Seifert & T. Rabe (Hrsg.), *Physik-Methodik. Handbuch für die Sekundarstufe I und II* (S. 15–43). Berlin: Cornelsen.
- Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg. (2003). *Bildungsplan für das berufliche Gymnasium der dreijährigen Aufbauform Physik*. Zugriff am 14.10.2018. Verfügbar unter [https://www.ls-bw.de/site/pbs-bw-new/get/documents/KULTUS.Dachmandant/KULTUS/Dienststellen/ls-bw/Bildungspl%C3%A4ne/Berufliche%20Schulen/bg/bg\\_allgemein/BG1-AF3\\_Physik-TG\\_LPH-1-2003.pdf](https://www.ls-bw.de/site/pbs-bw-new/get/documents/KULTUS.Dachmandant/KULTUS/Dienststellen/ls-bw/Bildungspl%C3%A4ne/Berufliche%20Schulen/bg/bg_allgemein/BG1-AF3_Physik-TG_LPH-1-2003.pdf)
- Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg. (2016). *Bildungsplan des Gymnasiums Physik*. Zugriff am 14.10.2018. Verfügbar unter [http://www.bildungsplaene-bw.de/site/bildungsplan/get/documents/lsbw/export-pdf/depot-pdf/ALLG/BP2016BW\\_ALLG\\_GMSO\\_PH.pdf](http://www.bildungsplaene-bw.de/site/bildungsplan/get/documents/lsbw/export-pdf/depot-pdf/ALLG/BP2016BW_ALLG_GMSO_PH.pdf)



- Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg. (2017). *Konzeptpapier zur Umsetzung der Digitalisierungsstrategie von Baden - Württemberg im Schulbereich*. Zugriff am 13.01.2018. Verfügbar unter <https://www.km-bw.de/site/pbs-bw-new/get/documents/KULTUS.Dachmandant/KULTUS/KM-Homepage/Artikelseiten%20KP-KM/Schulart%C3%BCbergreifende%20Themen/Konzeptpapier%20Layout.pdf>
- Möser, M. (Hrsg.). (2018). *Digitale Signalverarbeitung in der Messtechnik* (Fachwissen Technische Akustik). Berlin: Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-56613-8>
- NXP Semiconductors. (2017a). *Datenblatt MMA8451Q. 3-axis, 14-bit/8-bit digital accelerometer*. Zugriff am 16.11.2018. Verfügbar unter <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MMA8451Q.pdf>
- NXP Semiconductors. (2017b). *Datenblatt MPX4250D. 0 to 250 kPa, Differential, gauge pressure sensor, on-chip signal conditioned, temperature compensated and calibrated*. Zugriff am 06.11.2018. Verfügbar unter <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MPX4250D.pdf>
- OECD. (2015). *Programme For International Student Assessment (PISA). PISA 2015 Ergebnisse - Ländernotiz Deutschland*. Zugriff am 10.11.2018. Verfügbar unter [https://www.oecd.org/berlin/themen/pisa-studie/PISA\\_2015\\_Laendernotiz-Deutschland.pdf](https://www.oecd.org/berlin/themen/pisa-studie/PISA_2015_Laendernotiz-Deutschland.pdf)
- Plate, J. (2018). *Luftdruckmessung mit Bosch BMP280*, Hochschule München. Zugriff am 13.11.2018. Verfügbar unter <http://www.netzmafia.de/skripten/hardware/RasPi/Projekt-BMP280/index.html>
- Prenzel, M. (2008). Ergebnisse des Ländervergleichs bei PISA 2006 im Überblick. In M. Prenzel, C. Artelt, J. Baumert, W. Blum, M. Hamann, E. Klieme et al. (Hrsg.), *PISA 2006 in Deutschland. Die Kompetenzen der Jugendlichen im dritten Ländervergleich* (S. 15–30). Münster: Waxmann.
- Python Foundation. *Python documentation. What is Python? Executive Summary*. Zugriff am 28.10.2018. Verfügbar unter <https://www.python.org/doc/essays/blurb/>
- Raspberry Pi Foundation. (2018). *Raspberry Pi 3 Model B+*. Zugriff am 28.10.2018. Verfügbar unter <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/>
- Reichelt elektronik GmbH & Co. KG. Zugriff am 25.10.2018. Verfügbar unter <https://www.reichelt.de>
- Roedel, W. & Wagner, T. (2017). *Physik unserer Umwelt. Die Atmosphäre* (Lehrbuch, 5. Auflage). Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54258-3>

- RWTH Aachen University. (2018). *Dein Smartphone ist ein mobiles Labor*, RWTH Aachen University. Zugriff am 13.11.2018. Verfügbar unter <https://phyphox.org/de/home-de/>
- Schnotz, W. (2011). *Pädagogische Psychologie kompakt* (Anwendung Psychologie, 2., überarb. und erw. Aufl.). Weinheim: Beltz.
- Scholz, I. (2016). *Das heterogene Klassenzimmer. Differenziert unterrichten* (2., unveränderte Auflage). Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht.
- Sensing and Control Honeywell Inc. (2018, 25. Oktober). *Datenblatt linearer analoger Hallsensor SS495 A1*. Verfügbar unter [https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/B400/DATASHEET\\_SERIE\\_SS490.pdf](https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/B400/DATASHEET_SERIE_SS490.pdf)
- Sharp Devices Europe GmbH. (2006). *Datenblatt SHARP GP2Y0A02YK0F*. Zugriff am 22.10.2018. Verfügbar unter [https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/B400/DS\\_GP2Y0A02YK0F.pdf](https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/B400/DS_GP2Y0A02YK0F.pdf)
- Siegwart, R. & Nourbakhsh, I. R. (2004). *Introduction to autonomous mobile robots* (Intelligent robotics and autonomous agents). Cambridge, Mass: MIT Press.
- Siemens AG. (2015). *Wägesysteme. Betriebsanleitung Wägezellen SIWAREX WL200*. Zugriff am 04.11.2018. Verfügbar unter [https://cache.industry.siemens.com/dl/files/622/32466622/att\\_851004/v1/Betriebsanleitung\\_Waagezellen\\_SIWAREX\\_WL200\\_A5E02199611A-07.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/622/32466622/att_851004/v1/Betriebsanleitung_Waagezellen_SIWAREX_WL200_A5E02199611A-07.pdf)
- Stern, F. (2016). *Funkkommunikation zwischen Raspberry Pi's und Arduinos (2.4 GHz)*. Zugriff am 15.11.2018. Verfügbar unter <https://tutorials-raspberrypi.de/funkkommunikation-zwischen-raspberry-pis-und-arduinis-2-4-ghz/>
- STMicroelectronics. (2018). *Datenblatt ToF Laserdistanzsensor VL53L0X*. Zugriff am 21.10.2018. Verfügbar unter <https://www.st.com/resource/en/datasheet/vl53l0x.pdf>
- T3n digital pioneers. (2017). *Bald noch mehr deutsche Bosch-Sensoren im I-Phone?*, yeebase media GmbH. Zugriff am 13.11.2018. Verfügbar unter <https://t3n.de/news/bosch-sensoren-iphone-821162/>
- TDK Electronics AG. (2018). *NTC thermistors for temperature measurement*. Zugriff am 08.11.2018. Verfügbar unter [https://www.mouser.de/datasheet/2/400/NTC\\_Leaded\\_disks\\_M891-1317157.pdf](https://www.mouser.de/datasheet/2/400/NTC_Leaded_disks_M891-1317157.pdf)
- Texas Instruments Cooperation. (2018, 23. Oktober). *Datenblatt ADS1115*. Verfügbar unter <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1115.pdf>
- Townsend, K. (2012). *Adafruit\_MMA8451\_Library* [Computer software]. New York: Adafruit Industries. Verfügbar unter [https://github.com/adafruit/Adafruit\\_MMA8451\\_Library](https://github.com/adafruit/Adafruit_MMA8451_Library)

- Tränkler, H.-R. & Reindl, L. M. (Hrsg.). (2014). *Sensortechnik. Handbuch für Praxis und Wissenschaft* (VDI-Buch, 2., völlig neu bearb. Aufl.). Berlin: Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-29942-1>
- Wendemuth, A. & Andelic, E. (2005). *Grundlagen der digitalen Signalverarbeitung. Ein mathematischer Zugang* (Springer-Lehrbuch). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/b138044>
- Wolff, D. & Göbel, R. (Hrsg.). (2018). *Digitalisierung. Segen oder Fluch*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

## **Danksagung**

Herrn Prof. Dr. Quast gilt mein besonderer Dank für die außergewöhnliche Betreuung und Zusammenarbeit während meiner Masterarbeit.

Außerdem möchte ich mich bei Frau Dr. Bergmann für die Zweitkorrektur der vorliegenden Arbeit bedanken.

Ein großer Dank geht an meine Frau, die mich während der Zeit der Masterarbeit mit großer Geduld unterstützt hat und ohne die ich diese Arbeit nicht in dieser Form hätte anfertigen können. Meinem Sohn möchte ich für seine Ungeduld danken, die für zahlreiche nicht geplante Pausen gesorgt hat.

Zudem möchte ich den beteiligten Schülern und Lehrern der Carl-Engler-Schule Karlsruhe danken, die am Test des erstellten Materials beteiligt waren.