

Masterarbeit

Konzept zur Integration von digitaler Messtechnik in den Physikunterricht zur Thermodynamik

*Concept for the integration of digital measurement technology into physics lessons on
thermodynamics*

Autor:	Pierre Robert Lang
Gutachter:	Prof. Dr. Günter Quast
Zweitgutachterin	Fr. Dr. Antje Bergmann
Fakultät	Institut für experimentelle Teilchenphysik
Bearbeitungszeitraum, von - bis:	15.11.2022 – 15.05.2023
vorgelegt am:	30.04.2023

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	1
Kurzfassung.....	3
Abstract	4
1 Einleitung	5
2 Das Experiment und die digitale Messwerterfassung im Unterricht	7
2.1 Der Physikunterricht und das Experimentieren in der Schule	7
2.2 Vergleich möglicher Verfahren der Messwerterfassung und -verarbeitung	12
2.3 „Physical Computing“ und Digitale Messwerterfassung	19
3 PhyPiDAQ als Instrument zur digitalen Messwerterfassung.....	24
3.1 Oberflächliche Einführung in das Programm PhyPiDAQ	24
3.2 Mehrwert des Programms im Physikunterricht.....	29
3.3 Bereits existierende Projekte mit PhyPiDAQ	31
3.4 Mögliche Unterrichtsthemen und Vorschläge zur Integration der digitalen Messwerterfassung in der Thermodynamik mittels PhyPiDAQ	32
4 Ausarbeitung eines Konzepts zur Überprüfung des idealen Gasgesetzes mit PhyPiDAQ	33
4.1 Physikalische Grundlagen zum idealen Gasgesetz	33
4.2 Konzeption und Zielsetzung.....	38
4.3 Didaktische und methodische Rahmung	40
4.4 Konzipierung von Experimenten für die Veranschaulichung von thermodynamischen Zustandsänderungen idealer Gase	42
5.1 Isothermer Prozess	53
5.2 Isobarer Prozess und Wärmeleitung.....	57
5.3 Isochorer Prozess.....	62
5.4 Adiabatische beziehungsweise isentrope Zustandsänderung.....	67
5.5 Quasi-Adiabatische Expansion und isobare Erwärmung	75
6 Erstellung von Anleitungen, Screencasts und Handouts für Lehrkräfte	80
6.1 Ziel und Vorgabe der Gestaltung	80
6.2 Konstruktionsanleitung	80
6.3 Vorbereitung und Durchführung von Experimenten	80
6.4 Erstellung von Erklärvideos für Lehrkräfte	81
7 Evaluation des Konzeptes	82
8 Resümee und Schlusswort.....	83
Anhang 01 – Überprüfung und Auswahl passender Temperatursensoren.....	A

Anhang 02 – Kalibrierung des Drucksensors	M
Anhang 03 – Konzipierung von und Versuche mit Prototyp 1	V
Anhang 04 – Konstruktion von und Versuche mit Prototyp 2.....	CC
Anhang 05 – Konstruktion und Fertigung des Prototyps 3.....	HH
Anhang 06 – Quantifizierung des Druckverlusts des Prototyps 3	NN
Anhang 07 – Differenzierte Betrachtung der Wärmeleitung des Prototyps 3	QQ
Anhang 08 – Berechnung der Variablen der polytropen Zustandsänderung	VV
Anhang 09 - Überlegungen zu Antrieb des Kolbens des Prototyps 3 und der Volumenmessung	WW
Anhang 10 – Nebenexperiment: Spraydose mit BMP280	AAA
Anhang 11 – Leitfaden für die Vorbereitung und Durchführung von Experimenten mit PhyPiDAQ	FFF
Anhang 12 - Weitere Informationen zur eingesetzten Sensorik und elektrischen Bauteilen	BBBB
Literaturverzeichnis.....	FFFF
Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	MMMM

Kurzfassung

Digitalisierung ist in aller Munde. Jedoch ist sie bisweilen kaum im Unterricht beruflicher Schulen in Form von digitaler Messtechnik angekommen (T³ Deutschland & MNU e.V., 2018, S. 89). Zwar wird digitale Messtechnik vereinzelt eingesetzt, jedoch wird das Messsystem und der Messprozess für sich als „Black Box“ betrachtet, obwohl ihre Offenlegung viel Potential für das Lernen bieten könnte. Diese Offenlegung lässt sich am deutlichsten vollziehen durch den Einsatz von Mikrocontrollern oder Einplatinen-Computern. Ihre Eignung für die Bildung ist durch zahlreiche Schülerprojekte und Evaluationen bereits allgemein bekannt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde hierauf aufbauend ein Konzept für die digitale Messwerterfassung, -visualisierung und -auswertung von Abhängigkeiten des idealen Gasgesetzes auf Basis eines Einplatinen-Computers entwickelt. Hierbei werden mithilfe eines selbstkonstruierten Versuchsaufbaus in mehreren Experimenten verschiedene Zustandsänderungen durchgeführt, um die Verhältnismäßigkeiten zeigen zu können und über die Ergebnisse Transferwissen zu Phänomenen und Anwendungen in der Natur und Technik zu motivieren. Leitlinie dieses Konzepts bilden die Maximierung des didaktischen Mehrwerts für das Lernen und das möglichst einfache Setting der Experimente, zum Ziele eines tieferen Verständnisses der Thematik und ihrer Relevanz in Natur und Technik. Wie das Konzept zu bewerten ist und inwieweit es dieser Leitlinie entspricht, wurde aus der anschließenden Evaluation unter Ausbilderinnen und Ausbildern von Lehrkräften, sowie Lehramtskandidaten gewonnen.

Abstract

Everyone is talking about digitization. However, it has hardly arrived in the classroom at vocational schools in the way of digital measurement technology (T³ Deutschland & MNU e.V., 2018, p. 89). Although digital measurement technology is used sporadically, the measurement system and the measurement process itself are considered a "black box", although their disclosure could offer a lot of potential for learning. This disclosure can be most clearly accomplished through the use of microcontrollers or single board computers. Their suitability for education is already widely known through multiple student projects and evaluations. In the context of this work a concept was developed for the digital data acquisition, visualization and -evaluation of dependencies of the ideal gas law based on a single-board computer. With the help of a self-constructed experimental set-up, various changes of state are carried out in several experiments in order to be able to show the proportionalities and to motivate transfer knowledge to phenomena and applications in nature and technology through the results. The guideline of this concept is the maximization of the didactic benefit for learning and the simplest possible setting of the experiments, in order to achieve a deeper understanding of the topic and its relevance in nature and technology. The assessment of the concept and the conformity to this guideline was obtained from the subsequent evaluation among teacher trainers and teacher candidates.

1 Einleitung

Archimedes soll gesagt haben:

„Miss alles, was sich messen lässt und mach alles messbar,
was sich nicht messen lässt.“

(Archimedes von Syrakus)

Obwohl diese Aussage über 2000 Jahre alt sein soll, trifft sie heutzutage mehr denn je zu. Bereits in der klassischen Physik wurden vehement Wege gesucht, physikalische Phänomene in messbare Größen zu fassen und zu quantifizieren. Während der Grundgedanke gleichgeblieben ist, hat sich das Methoden-Repertoire erweitert. Beispielsweise wäre es ohne erheblichen informationstechnischen Aufwand am CERN¹ nicht möglich, die Kollisionen der Teilchen durchzuführen, ihre Tochterpartikel und weitere Produkte zu detektieren, ihre Bahn zu bestimmen und die Ergebnisse zu veranschaulichen. Unter anderem hierfür sind am CERN aktuell über 450 000 Prozessorkerne und 10 000 Server zuständig (CERN, 2023).

Während die Wissenschaft und Forschung bereits die Vorteile der Nutzung von digitaler Messtechnik für sich entdeckt hat, scheint der Fortschritt von analoger zu digitaler Messtechnik im Physikunterricht deutscher Schulen laut diversen Umfragen kaum oder noch nicht angekommen zu sein (Hampe & Katja, 2015), (T³ Deutschland & MNU e.V., 2018). Sind digitale Messwerterfassungssysteme für den Physikunterricht vorhanden, so stellen diese meist kommerzielle Systeme von diversen Lehrmittelfirmen dar. Alle derzeitig erwerbbar Systemen von Lehrmittelherstellern und auch die zunehmend im Unterricht eingesetzten digitalen Endgeräte wie Smartphones und Tablets haben einen „Black-Box“-Charakter in dem Sinne, dass die eigentliche Messtechnik inklusive der Sensorik, Datenaufbereitung, Kalibration, Auswertung und Speicherung dem Nutzer verborgen bleiben. Vorteilhaft ist dies zu sehen im Sinne der didaktischen Reduktion (Fokussieren auf die Messergebnisse) und Vereinfachung der Nutzung, birgt jedoch auch die Gefahr der Simplifikation des Messvorgangs und des unbedachten Einsatzes, da die jeweiligen Hintergründe unbekannt sind. Da zwar mit den erläuterten Systemen die Messung, Auswertung und Veranschaulichung zumindest begrenzt möglich ist, die jeweilige Messtechnik dem Lernenden jedoch verborgen ist, bietet es sich an, diese nachzubauen und den Lernenden zugänglich zu machen. Der mögliche Zuwachs an didaktischem Mehrwert rechtfertigt diesen Ansatz ebenso, wie die daraus hervorgehenden

¹ (franz.): Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (Europäische Organisation für Kernforschung)

Vorteile wie beispielsweise die kostengünstige Anschaffung. Hierbei wurden in der Vergangenheit hauptsächlich der Mikrocontroller Arduino Uno und der Einplatinen-Computer Raspberry Pi erfolgreich eingesetzt, unter anderem im Rahmen von Schülerprojekten, welche sich mit dem Bau von Wetterstationen oder Robotern befassen. Während der Arduino Uno lediglich ein reiner Mikrocontroller ist, ist mit dem Einplatinen-Computer Raspberry Pi eine multiplere Anwendung im schulischen Einsatz möglich. Beide Modelle haben eine GPIO-Steckleiste², über welche verschiedene Geräte wie Sensoren oder Aktoren angeschlossen werden können. Die hieraus hervorgehende Multifunktionalität lässt sich im privaten Bereich in Form von Waschmaschinen/Kühlschranksteuerungen, (Media-)Servern und Smart-Home-Systemen wiederfinden und ist in der Industrie unter dem Schlagwort „Embedded Systems“ ein wachsendes Tätigkeitsfeld. Mithilfe dieses vielfältig einsetzbaren Systems bietet es sich an, die im Unterricht oft vorherrschende, analoge Messtechnik zu digitalisieren. Zur Auswertung, Darstellung, Speicherung und ggf. Exportierung der Messwerte soll das kostenlose Software-Paket PhyPiDAQ³ eingesetzt werden. Durch Editieren von simplen Befehlen ist ein einfacher Einsatz im Unterricht ohne vertiefte Programmierkenntnisse möglich. Im Rahmen dieser Masterarbeit soll ein Versuchsaufbau unter didaktisch-methodischen Gesichtspunkten für den Einsatz von PhyPiDAQ im Thermodynamik-Unterricht mit dem Schwerpunkt „Ideales Gasgesetz“ entworfen und die dazugehörigen Anleitungen entwickelt werden. Die Evaluation soll zum einen über die Rückmeldung von Ausbilderinnen und Ausbildern von Lehrkräften und Lehramtskandidaten und zum anderen durch Rückmeldungen von Anwendenden erfolgen, welche die online zur Verfügung gestellten Ergebnisse kritisch reflektiert und gegebenenfalls im schulischen Einsatz umgesetzt haben. Die Zielgruppe betreffend gründet die Ausarbeitung auf dem aktuellen Lehrplan der Eingangsklassen der beruflichen Oberstufe des technischen Gymnasiums im Themengebiet der Vertiefungsrichtung 3 (Klimaphysik) im Fach „Physikalische Laborübungen“.

Konkludierend lautet somit die Forschungsfrage:

Wie kann die Integration digitaler Messtechnik mittels einer Software auf Mikrocontrollerbasis in den Physikunterricht der beruflichen Oberstufe anhand des idealen Gasgesetzes erfolgen zum Ziele der Förderung des Verständnisses thermodynamischer Gesetzmäßigkeiten von Schülerinnen und Schülern?

² GPIO (engl.): General Purpose for Input and Output – Kontakte (Pin's) des Boards

³ PhyPiDAQ (engl.): Data Acquisition for Physics Education with Raspberry Pi

2 Das Experiment und die digitale Messwerterfassung im Unterricht

Um der Forschungsfrage nachgehen zu können, soll vorerst in diesem Kapitel der Frage nachgegangen werden, worin das Wesen des Experiments im schulischen Unterricht der beruflichen Oberstufe prinzipiell begründet ist und auf welchem didaktisch-methodischen Fundament es aufbaut. Weiterhin soll thematisiert werden, wie ein Experiment gestaltet werden kann, sowohl in seiner Form als auch von seiner Durchführung und der Art (digital oder analog). Abschließend soll ein qualitativer Überblick über digitale Möglichkeiten der Messwerterfassung gegeben und diskutiert werden.

2.1 Der Physikunterricht und das Experimentieren in der Schule

2.1.1 Der Physikunterricht im Bildungsplan

Friedrich Dürrenmatt schrieb in seinen „21 Punkten zu Physikern“:

„Der Inhalt der Physik geht die Physiker an, die Auswirkung alle Menschen.“
(Friedrich Dürrenmatt, 2017)

Obwohl der Wahrheitsgehalt dieses Zitates unverkennbar ist, impliziert er auf der anderen Seite auch eine Trennung zwischen Physiker und „normaler“ Mensch. Der Physikunterricht in der gymnasialen Oberstufe des beruflichen Gymnasiums hat den Sinn, dass „die Schülerinnen und Schüler grundlegende physikalische Kenntnisse und Fähigkeiten [erwerben]“ (Ministerium für Kultur, Jugend und Sport). Die **Bildungsziele** sind somit vorgegeben:

- Erwerb einer Allgemeinbildung für eine verantwortungsvolle Teilhabe an gesellschaftlichen Entscheidungsprozessen
- Erwerb der Fähigkeit, die Bedeutung der Physik für bestimmte interdisziplinäre und moderne Anwendungs- und Forschungsbereiche in unserer hochtechnisierten Welt erkennen zu können
- Erwerb der Fähigkeit, Chancen und Risiken technischer Entwicklungen für Umwelt und Gesellschaft erkennen und bewerten zu können

(Ministerium für Kultur, Jugend und Sport)

Der aktuell gültige Bildungsplan ist **kompetenzorientiert** ausgerichtet. Die Lernenden sollen sich in der Schulzeit ein breites Repertoire an Kompetenzen aneignen können, welches sie befähigt, „Wissen, Fähigkeiten und Fertigkeiten selbstständig und nachhaltig aufzubauen, zu reflektieren und in verschiedenen Situationen verantwortungsvoll einzusetzen“ (Ministerium für Kultur, Jugend und Sport). Diese Kompetenzen setzen sich

aus der Sach-, Erkenntnisgewinnungs-, Kommunikations- und Bewertungskompetenz zusammen, wobei diese einander durchdringen und zusammen die Fachkompetenz bilden (Ministerium für Kultur, Jugend und Sport). Die Lehrkraft soll daher bei der Vorbereitung des Physikunterrichts stets die Kompetenzen im Blick haben und durch zielgerichteten Medien-, Methoden- und Experimentiereinsatz diese gezielt zu fördern wissen.

2.1.2 Das Experiment als Instrument der Erkenntnisgewinnung

In der Physik hat das Experiment einen besonderen Stellenwert als Mittel zur Überprüfung und Falsifizierung von Hypothesen und Modellen. Demtröder et al. stellt das Experiment als „eine gezielte Frage an die Natur“ dar, „auf die bei geeigneter experimenteller Anordnung eine eindeutige Antwort erhalten werden kann“ (Demtröder, 2018, S. 7). Zudem erlaubt das Experiment bei richtiger didaktisch-methodischer Anwendung einen Einblick in das „Wesen der Naturwissenschaften“. Dieses sagt im Kern aus, dass die theoretische Beschreibung eines Phänomens in der Physik immer die **Beschreibung eines Modells** ist, welches sich das jeweilige, modellschaffende Individuum von der Natur macht. (Demtröder, 2018, S. 8). Diese Modelle bilden die Natur oder Wirklichkeit nur in einem eng abgesteckten Raum ab, wobei „der Gültigkeitsbereich einer physikalischen Theorie durch Experimente geprüft [wird]“ (Demtröder, 2018, S. 7). Wird somit ein beobachtetes Phänomen mithilfe von Abstraktion und Mathematisierung zu einer Hypothese geformt, kann sie mit einem geeigneten Experiment überprüft werden und durch die Messergebnisse ein Eindruck über die Wirklichkeit erlangt werden. Dieser Eindruck muss infolgedessen interpretiert werden, um die Hypothese gegebenenfalls zu verbessern und erneut experimentell überprüfen zu können. Dieses **Wechselspiel** soll die nachfolgende Abbildung veranschaulichen.

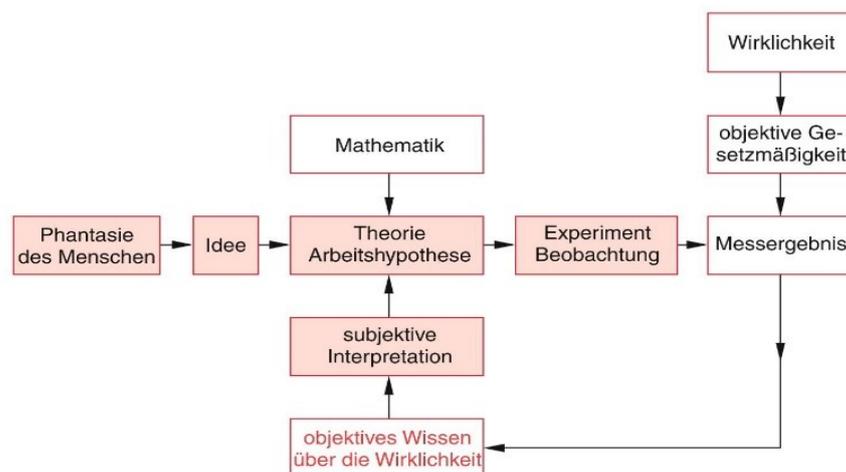


Abbildung 1: Zyklus des experimentellen Forschens (Demtröder, 2018, S. 10)

Ebenso, wie das Experiment in der Wissenschaft eine bedeutende Position einnimmt, wird es auch im Bildungsplan der beruflichen Oberstufe als Medium der Erkenntnisgewinnung explizit aufgeführt. Speziell für das Experimentieren inklusive der zugehörigen Vor- und Nachbereitung ist Zeit in Form von Laborunterricht in Höhe von 224 Unterrichtsstunden, über 3 Jahre verteilt, vorgesehen (Ministerium für Kultur, Jugend und Sport).

2.1.3 Das Experiment nach didaktisch-methodischen Leitgedanken

Ohne die fachdidaktische Theorie an dieser Stelle erschöpfend zu behandeln, soll im Folgenden ein kleiner Einblick in die **fachdidaktische Planung** des Experimentierens gegeben werden mit Blick auf das Thema dieser Arbeit.

Ist zu einem Thema im Physikunterricht ein Experiment sinnvoll einsetzbar, so sind neben schul- und unterrichtsspezifischen Rahmenbedingungen (Zeit, Ausstattung, Vorwissen etc.) folgende **Aspekte** zu beachten:

- Welches Ziel soll verfolgt werden?
- Welcher Schwerpunkt soll gesetzt werden beziehungsweise welche Funktionen sollen adressiert werden?
- Wie soll die Durchführung des Experiments gestaltet werden?
- Was sind die Anforderungen an die Lehrperson und an die Lernenden?

Ein eindeutiges Ziel ist für jedes Experiment entscheidend. Bereits Hodson erkannte vor drei Jahrzehnten die Wichtigkeit zielgerichteten Experimentierens und übte Kritik an der gängigen Experimentierpraxis in der Art, dass viele Experimente unüberlegt durchgeführt und oft keinen bildenden Wert beinhalten würden (Hodson, 1993).

Zu der Frage, was bei der Planung eines Experiments zu beachten sei, bezieht der genannte Bildungsplan Stellung, wenn auch nicht in dem Maße, als dass er als eine Art „Anleitung“ zu verstehen wäre. Besonders wurde Wert daraufgelegt zu betonen, dass auf eine entsprechende Schwerpunktsetzung je nach zu motivierenden Kompetenzen der Lernenden geachtet werden sollte. Hierbei werden die folgenden **Schwerpunkte** aufgezählt:

- Umgang mit Messgeräten und Experimentieranordnungen
- Erkennen gesetzmäßiger Zusammenhänge
- Auswerten und kritisches Reflektieren der Ergebnisse

(Ministerium für Kultur, Jugend und Sport)

Neben Hodson als historischer Vertreter eines zielgerichteten Experimentierens übt gegenwärtig Prof. Rincke von der Universität Regensburg Kritik an der derzeitigen Experimentierpraxis. Er beobachte, dass meist **ohne eine klare Funktionszuweisung** im

Physikunterricht experimentiert werde. Neben dem Wunsch, dass die Experimente möglichst alle relevanten Aspekte naturwissenschaftlichen Handelns widerspiegeln sollten, werde auch des Öfteren allgemeingültigen Rezepten gefolgt, welche auf „nicht hinterfragten Annahmen darüber [beruhen], wie Lernen bestmöglich funktioniert“ (Rincke, 2016). Weiterhin führt er in seiner Veröffentlichung folgende Funktionen auf, die für das Experimentieren im Interesse des Lernens sind und die im Bildungsplan genannten **Schwerpunkte** zusätzlich erweitern:

- Hypothesen testen
 - Hypothesen generieren
 - Den Umgang mit Material schulen
 - Phänomene oder Begriffe kontrastieren
 - Zusammenhänge zu Anwendungen herstellen
 - Durch Analogien Vorstellungen veranschaulichen
- (Rincke, 2016)

Herr Rincke sieht es als entscheidend für den Erfolg eines Experiments und des Lernzuwachses, dass bei der Unterrichtsvorbereitung der **Fokus auf einzelne Funktionen** gelegt wird, anstatt so viele Funktionen wie möglich adressieren zu wollen. Ebenso sieht es auch Girwidz und erweitert die sechs Funktionen von Rincke auf 14, welche weitere, auch psychologische Aspekte aufgreifen, wie in nachfolgender Abbildung ersichtlich ist.

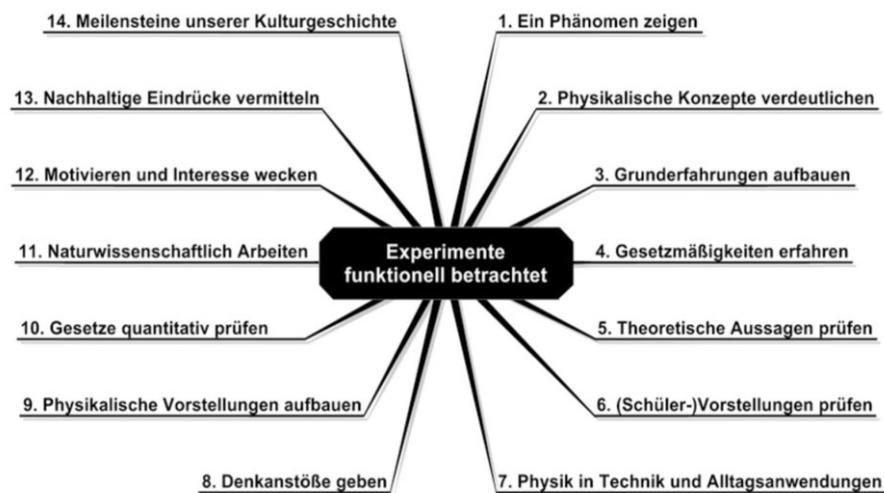


Abbildung 2: Auswahl möglicher Funktionen eines Experiments im Physikunterricht (Kircher et al., 2020, S. 267)

Bei der Frage, wie ein Experiment gestaltet werden kann, hilft die **Klassifikation** von Girwidz weiter, welcher die möglichen Arten in folgende fünf Überbegriffe gliedert:

- Qualitativ – quantitativ (Art der Datenerfassung)
- Demonstrationsversuch oder Schülerversuch (Art der Durchführung)
- Einordnung in Phasen des Unterrichts (Ausrichtung des Experiments abhängig von Vorwissen, Vorarbeit und methodischem Gesamtkonzept, beispielsweise Einstiegsversuch vs. Erarbeitungsversuch)
- Ausführungsform (Quantität des Versuchs, beispielsweise Einzel- vs. Parallelversuch, bei welchem mehrere Abläufe nebeneinander gezeigt werden)
- Geräteinsatz (Gegenstand der Veranschaulichung)

(Kircher et al., 2020, S. 271)

Jede der genannten möglichen Arten ein Experiment durchzuführen, birgt auch neue Anforderungen an die Lehrkraft und die Lernenden. Hier ist die jeweils adäquateste Methode zu wählen und in den Unterrichtsverlauf sinnvoll einzubetten. Zur Veranschaulichung von demselben physikalischen Phänomen sind oftmals mehrere **Methoden und Werkzeuge** möglich. Girwidz unterscheidet hierbei folgende vier Arten:

- Freihandversuche
- Versuche mit physikalischen Apparaturen und Messgeräten
- Simulationsexperimente
- Gedankenexperimente

(Kircher et al., 2020, S. 272)

Während jede der genannten Arten ihre Berechtigung hat, sind sie nicht alle gleichsam für alle Situationen verwendbar. Sollen die Messgrößen eines Phänomens quantisiert, aufgenommen und in Diagrammen veranschaulicht werden, ist ein Freihandversuch oder Gedankenexperiment hierfür nicht geeignet.

Im Folgenden soll ein Einblick in die Messwerterfassung gegeben werden und eine Unterscheidung in Form von analoger und digitaler Messwerterfassung erfolgen, um das Kapitel mit der Vorstellung des im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Messsystems abzuschließen.

2.2 Vergleich möglicher Verfahren der Messwerterfassung und -verarbeitung

Messwerte können im Physikunterricht auf verschiedene Weise aufgenommen und verarbeitet werden. Am Beispiel der freien, harmonischen Schwingung eines Fadenpendels kann dies beispielsweise durch folgende Mittel erfolgen:

- Analog durch händisches Stoppen der Zeit einer Periode und Notieren an der Tafel
- Digital durch Nutzung eines Systems von Lehrmittelfirmen, welches über angeschlossene Sensorik die Periode der Schwingung aufnimmt
- Digital durch Nutzung eines Mikrocontroller- oder Einplatinen-Computer-gestützten Messwerterfassungssystems, welches über angeschlossene Sensorik die Periode der Schwingung aufnimmt
- Digital durch Programme oder sog. Apps (Applikationen) auf digitalen Endgeräten, welche beispielsweise über Videoanalyse die Bewegung aufzeichnen

Mit der Anzahl der Möglichkeiten, Messwerte eines Experiments aufzunehmen und zu verarbeiten, wächst auch die Entscheidungslast der Lehrkraft, **das jeweilige richtige Mittel** unter didaktischen und methodischen Gesichtspunkten zu wählen. Altbewährte, analoge Messwerterfassungsmethoden haben den Vorteil, dass sie den Messvorgang offenlegen und es bei einer geringen Anzahl an Messpunkten die schnellste Art ist, Messwerte zu erfassen. Allerdings kommt diese Art der Messwerterfassung bei einer größeren Anzahl an Messpunkten und bei sich schneller wiederholenden oder langwierigen Messungen an ihre Grenzen. Auch die Datenanalyse und -veranschaulichung erfolgt in der Regel händisch oder durch Nutzung eines Tabellenverarbeitungsprogramms wie beispielsweise Microsoft Excel, was einen zusätzlichen Aufwand darstellt. Hinzu kommt, dass das Auswerten der Messwerte, wenn es Aufgabe der Lernenden ist, zumindest grundlegende Kompetenzen in analytischer, mathematischer und funktionaler Hinsicht voraussetzt.

Die computerunterstützte Messwerterfassung hingegen ermöglicht durch die selbstständige Erfassung, Speicherung und Veranschaulichung in Form von Tabellen und Grafiken durch vorhandene Regressionsfunktionen eine schnelle qualitative und auch quantitative Analyse der Messdaten. Somit können auch Schülerinnen und Schüler trotz eventuell vorhandener mathematischer Defizite Auswertungen vornehmen, da z. B. Steigungen und funktionale Zusammenhänge nicht per Hand ermittelt werden müssen (Hans- Ulrich Lampe et al., 2015, S. 8). Beim Einsatz digitaler Messwerterfassung tritt das Messen selbst in den Hintergrund, ein **Mehrwert für den naturwissenschaftlichen Unterricht** entsteht vor

allem durch neue Möglichkeiten, Daten zu erfassen und diese auszuwerten. (Hans- Ulrich Lampe et al., 2015, S. 5). Hieraus ergeben sich die folgenden **Vorteile**:

- Zeitspareffekt: Schülerinnen und Schüler sind nicht längere Zeit damit beschäftigt, per Hand Daten aus Messtabellen in Grafiken umzusetzen, sondern können sich ausführlicher der Interpretation der Daten und weiterführenden Fragestellungen widmen (Hans- Ulrich Lampe et al., 2015, S. 8)
- Erweiterung des Physikunterrichts: Durch den Einsatz von Sensoren eröffnen sich grundsätzlich neue Möglichkeiten für Schulexperimente, da die Messung bisher nicht zugänglicher naturwissenschaftlicher Größen möglich wird (Hans- Ulrich Lampe et al., 2015, S. 5)
- Hohe Abtastrate: Bei der Messung zeitabhängiger Größen ist die hohe, sensorspezifische Abtastrate möglich (Hans- Ulrich Lampe et al., 2015, S. 7)
- Einfache Bedienung: Bei kommerziell vertriebenen Systemen von Lehrmittelherstellern genügt es häufig, den Sensor über ein Interface⁴ an einen Computer oder anderes Gerät anzuschließen und den START-Button zu betätigen, (Hans- Ulrich Lampe et al., 2015, S. 5)
- Zeitpunkt und Dauer der Messung irrelevant: Wie bei sich sehr schnell verändernden Größen kann eine Messung auch über eine längere Zeitdauer hinweg, beispielsweise über Nacht erfolgen, wie der exponentielle Abfall der Temperatur oder des Druckes
- Einsatz moderner Medien ist im Bildungsplan explizit aufgeführt: Medienbildung im Physikunterricht befähigt die Schülerinnen und Schüler zu einer zielgerichteten und reflektierten Nutzung von digitalen Medien und Informationen (Ministerium für Kultur, Jugend und Sport)

Der **Bildungsplan** beschreibt allgemein als Lernziel in Bezug zur Messtechnik:

„Die Schülerinnen und Schüler werten gewonnene Daten bzw. Ergebnisse aus, verallgemeinern diese mithilfe der Mathematik, überprüfen Hypothesen und beantworten ihre Fragestellungen. Dabei reflektieren sie kritisch ihr Vorgehen und diskutieren Ursachen möglicher Messfehler.“ (Ministerium für Kultur, Jugend und Sport)

Auch die **digitale Messtechnik** wird in Bezug auf das Schülerexperiment mit den folgenden Bildungszielen erwähnt:

- Messwerte mit Sensoren erfassen und mit digitalen Werkzeugen auswerten

⁴ Interface: Ein Bauteil, mit dem Daten von einem Gerät in ein anderes geleitet werden können

- Computeranimationen und -simulationen zur Untersuchung physikalischer Phänomene gezielt durch Variation von Parametern nutzen
- digitale Medien und Werkzeuge zur Dokumentation und Präsentation, zur Strukturierung von Fachwissen sowie zur Kommunikation und Kollaboration nutzen

(Ministerium für Kultur, Jugend und Sport)

Wie bereits angedeutet, sind im Bereich der digitalen Messtechnik unterschiedliche Systeme einsetzbar, welche sich in mehreren Aspekten unterscheiden. Hierbei sind neben weitgehend bekannten Lehrmittelherstellern wie Leybold, Vernier, Phywe und Pasco auch Hersteller von grafischen Taschenrechnern, Mikrocontrollern und Einplatinen-Computern beispielhaft zu nennen. Softwarebasierte Programme und Apps vervollständigen das Spektrum der möglichen Medien.

Einen Einblick in die Art und den Umfang der eingesetzten Messwerterfassung gab die **Umfrage des T³-Netzwerkes und des MNU e.V.** unter Physik-Lehrkräften in Deutschland in Bezug auf die schulische Praxis der Messwerterfassung. Ein Teil der Ergebnisse ist in folgender Abbildung dargestellt.

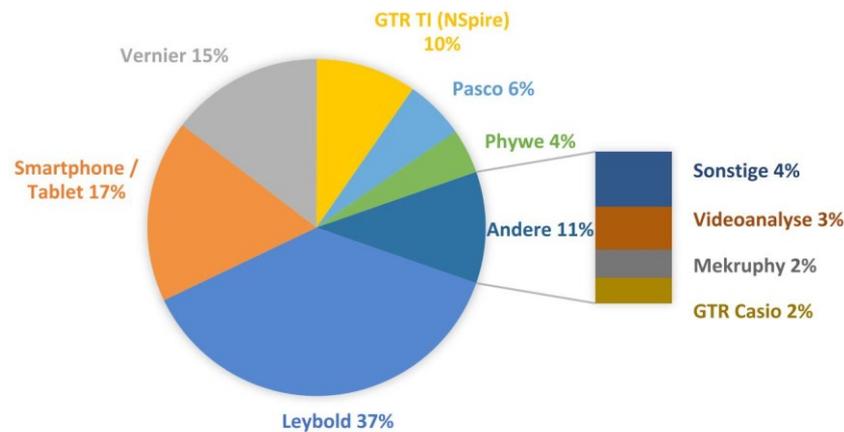


Abbildung 3: Verteilung des Einsatzes verschiedener Messwerterfassungssysteme (T³ Deutschland & MNU e.V., 2018, S. 85)

Die meisten Lehrkräfte bedienen sich der Messtechnik von Leybold, wobei als zweithäufigstes die Nutzung von mobilen Endgeräten angegeben wurde. Nach anderen Lehrmittelherstellern und grafischen Taschenrechnern (GTR) bilden Messsysteme auf Basis von Mikrocontrollern und Einplatinen-Computern das Schlusslicht (In „Sonstiges“ enthalten).

Teil der Umfrage war ebenso, welchen Aspekten der digitalen Messwerterfassung die Lehrkräfte hohe Zukunftsaussichten zusprechen. Hierbei wurde die Verwendung von

mobilen Endgeräten (BYOD⁵) und drahtlosen Mess-Systemen die höchste Bedeutung zugesprochen, gefolgt von Webtools und der Vernetzung der Messwertsysteme. Auch hier bildeten die Elemente des „Physical Computing⁶“ das Schlusslicht, wie die folgende Grafik zeigt.

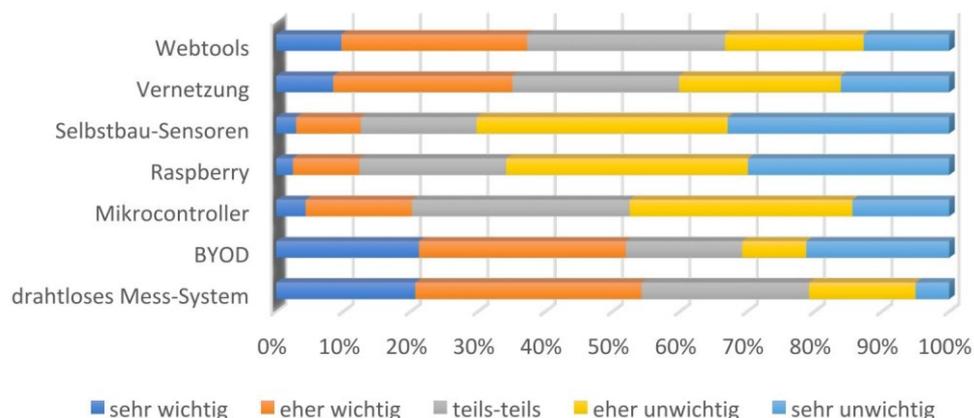


Abbildung 4: Einschätzung von Lehrkräften in Bezug zum zukünftigen Stellenwert bestimmter Aspekte der digitalen Messwerterfassung (T³ Deutschland & MNU e.V., 2018, S. 89)

In Bezug auf das gewählte Thema dieser Arbeit liegt die Frage nahe, warum anscheinend Messwerterfassungssysteme auf Basis von Mikrocontrollern wie dem Arduino Uno und Einplatinen-Computern wie dem Raspberry Pi einen solch **unscheinbaren Stellenwert** einnehmen, wobei durch diese Art des Experimentierens mehrere Vorteile ausgeschöpft werden könnten. Eine mögliche Begründung ist, dass die Lehrkräfte selbst noch keine Berührungspunkte damit hatten und im Zuge dessen eine objektive Abwägung, ob diese Messtechnik für sie infrage komme, nicht stattgefunden hat. Andererseits kann eine einschlägige Beschäftigung mit diesen Systemen und dem Verwerfen zugunsten eines anderen Systems zu solch einer Haltung geführt haben.

Im Folgenden sollen bekannte und **in Schulen verbreitete Messsysteme** von Lehrmittelherstellern mit Eigenbau-Lösungen wie dem Arduino Uno und Raspberry Pi anhand ausgewählter Spezifika **für den Versuch einer Temperaturmessung** verglichen werden. In dem Vergleich wurde bewusst getrennt zwischen reiner Messwerterfassung und -auswertung, da dies meist preislich einen Unterschied darstellt.

⁵ BYOD (engl.): Bring your own device – Nutzung privater oder schulischer Endgeräte im Unterricht

⁶ Physical Computing (engl.): Erstellung interaktiver physischer Systeme durch Hard- und Softwareeinsatz auf Basis von beispielsweise Mikrocontrollern und Einplatinen-Computern

Tabelle 1: Vergleich ausgewählter Systeme zur Messwerterfassung und -verarbeitung

Spezifika	Messwerterfassungssystem				
	Arduino Uno	Raspberry Pi	Leybold Cassy 2	Phywe Cobra SMARTsense	Pasco SparkVue
Preis (Messwert- erfassung)	Ca. 25 € (Board)	Ca. 40 € (Board)	595 € (Mobile)	Kostenlos (MeasureAPP)	Kostenlos (App)
Preis (Messwert- verarbeitung)	Keine Zusatzkosten	Keine Zusatzkosten	638 € (Lab 2)	ab 419 € (MeasureLAB)	483 € (Schullizenz)
Preis Sensorik	Ca. 20 €	Ca. 20 €	42 €	79 €	76 €
Plug & Play	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja
Live-Ansicht der Daten	Begrenzt ⁷	Ja	Ja	Ja	Ja
Rohdaten- Export	Begrenzt ⁸	Ja	Begrenzt ⁹	Ja (CSV)	Ja (CSV)
Zugriff	Open Source	Open Source	Closed Source	Closed Source	Closed Source
Programmier- Kenntnisse	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein
Mobilität	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja

Die genannten (derzeitigen) Preise für die Messwerterfassung und -verarbeitung beziehen sich hierbei lediglich auf die elementaren Basis-Geräte ohne Sensorik. Nicht eingerechnet sind Zubehörteile wie Netzteile oder Kabel. Die vorgestellten Varianten der Lehrmittelhersteller stellen jeweils die derzeit günstigsten Möglichkeiten dar, die Temperatur zu messen. Im Folgenden sollen die **Besonderheiten der jeweiligen Systeme** kurz diskutiert werden.

⁷ Die Live-Ansicht ist nur in Verbindung mit einem PC und zusätzlicher Software wie PLXDAQ möglich

⁸ Das Exportieren der Messdaten ist nur in Verbindung mit zusätzlicher Software wie puTTY möglich

⁹ Das Exportieren der Messdaten ist nur als XML-Datei möglich, welche durch ein externes Programm in eine CSV-Datei exportiert werden muss. Alternativ können die Daten mit einem Texteditor entnommen werden.

Leybold

Als Leybold-System wurde das Cassy 2 gewählt, welches zur reinen Temperaturmessung das Gerät „Mobile-CASSY 2 WLAN“ und den Temperatursensor benötigt, während für die Speicherung, Auswertung und Visualisierung die PC-Software „CASSY Lab 2“ benötigt wird. Das System benötigt eine funktionierende WLAN-Verbindung, um Daten zwischen dem Sensor und dem PC austauschen zu können. Das ursprünglich kabelgebundene System hat sich in der Vergangenheit durch seine Funktionalität bewährt und sollte den meisten Lehrkräften zumindest softwareseitig ein Begriff sein. Nachteilig ist neben dem hohen Preis die schlechte Exportierbarkeit der Daten, welche (derzeit) nur in ein XML-Format erfolgen kann.

Phywe

Das System Cobra SMARTsense von Phywe benötigt zur Ausgabe der Messwerte der Temperaturmessung außer dem Sensor lediglich die kostenlos installierbare App „MeasureAPP“. Zur weiteren Auswertung wird die kostenpflichtige Software „MeasureLAB“ benötigt. Weitere, den Unterricht unterstützende Software ist zu deutlich höheren Preisen erwerbbar und wurde hierbei nicht eingerechnet.

Pasco

Die Messwertnahme ist wie beim Kontrahenten Phywe mit einem Temperatursensor und einer kostenlosen App auf einem tragbaren Endgerät möglich. Für die weitere Auswertung, Speicherung und das Exportieren ist auch hier eine kostenpflichtige Software nötig.

Mikrocontroller Arduino Uno

Das günstigste Temperatur-Messsystem, welches aus einem Mikrocontroller, gegebenenfalls einem Thermoelement-Verstärker-Board und einem Thermoelement als Sensor besteht, ist in seiner Standardausführung ohne größeren Programmieraufwand für die Temperatúrauslesung geeignet und kann kabellos an einer Batterie oder einem Akkumulator mit einem LC-Display betrieben werden. Durch eine hardware- und softwareseitige Implementierung einer Bluetooth-Verbindung kann die Messung auch kabellos erfolgen. Plug&Play ist durch das nötige vorherige Verkabeln des Sensors und des Programmierens nicht in der Art möglich, wie es bei einem Gerät von beispielsweise Phywe (durch Knopfdruck) möglich ist, jedoch kann das System im Voraus so vorbereitet

werden, dass durch das Herstellen der Energieversorgung die Messung gestartet wird. Durch die frei verfügbare, kostenlose Software auf Open-Source – Basis und die große Entwickler-Community kann auf eine Fülle an Wissen, Ideen, zusätzlicher Software und Lösungen über das Internet zugegriffen werden. Programmiert wird in einer C-ähnlichen Programmiersprache über eine Arduino-spezifische IDE¹⁰.

Einplatinen-Computer Raspberry Pi

Der Raspberry Pi ist ähnlich aufgestellt wie der Arduino Uno, allerdings handelt es sich hierbei um einen kompletten Einplatinen-Computer mit Betriebssystem. Daraus hervorgehend sind auch bekannte Features wie die Benutzerkontensteuerung, Ordnerstruktur, Browser und Open-Office-Programme integriert. Zur Ansteuerung von Sensoren ist eine GPIO-Leiste vorhanden. Die Ansteuerung des Temperatursensors muss wie beim Arduino Uno über ein Programm erfolgen, welches den verfassten Python-Code ausführen kann (Python-Interpreter). Auch hier ist eine mobile Messung und Übertragung durch den Einsatz eines Akkumulators möglich, allerdings gestaltet sich die Übertragung der Echtzeit-Messungen per WLAN/Bluetooth derzeit noch schwierig. Die Messwert-Weiterverarbeitung ist hingegen wie beim Arduino Uno nur mit einem zusätzlichen Programm möglich. Als Lösung wird in nachfolgenden Kapiteln das Software-Paket „PhyPiDAQ“ vorgestellt, welches kostenlos und über github.com als Open-Source-Projekt verfügbar ist. Neben dem erwähnten Projekt kann im Internet wie beim Arduino Uno auf eine große Fülle an Wissen, Ideen, zusätzlicher Software und Lösungen zurückgegriffen werden.

Trotz der offensichtlichen Defizite der Selbstbau-Systeme in Punkto Plug&Play¹¹, Konnektivität und Echtzeit-Data-Sharing (Apps für mobile Engeräte Smartphones und Tablets), lohnt es sich, einen Blick auf die Möglichkeiten ihrer Etablierung in den Physikunterricht zu werfen. Im folgenden Kapitel soll deshalb genauer betrachtet werden, woher die Idee stammt, Mikrocontroller oder Einplatinen-Computer im Physikunterricht zu verwenden, wo das Potential an diesem Ansatz liegt, wie er umgesetzt und welche Kritik hieran geübt werden kann.

¹⁰ IDE (engl.): Integrated Development Environment (Oberfläche, die das Programmieren erlaubt)

¹¹ Plug&Play (engl.): Beschreibt die Eigenschaft eines Gerätes, ohne weitere Installationen oder Modifikationen am System betriebsbereit zu sein

2.3 „Physical Computing“ und Digitale Messwerterfassung

2.3.1 „Physical Computing“ im Alltag, der Gesellschaft und der Berufswelt

Die Bedeutung von **fachübergreifenden Kompetenzen** in MINT-Fächern¹² ist mit der Digitalisierung und dem technologischen Fortschritt stark gewachsen. Da nahezu kein modernes Gerät mehr ohne Sensorik und Aktorik auskommt, ist es von bedeutendem Vorteil für das private wie für das berufliche Umfeld, hierin grundlegende Kenntnisse und Kompetenzen erworben zu haben. Die Schule als berufs- und lebensvorbereitende Institution sollte dies ebenfalls im Blick haben und mit gezielten Lernangeboten und Projekten unterstützen. Eine Möglichkeit, die sich hierfür anbietet und bereits mehrfach im schulischen Einsatz bewährt hat, ist das Konzept des „**Physical Computing**“, durch welches Lernenden einen Einblick in die Digitaltechnik, Automatisierung und vielen weiteren alltagsnahen Themen geboten werden kann.

"Physical Computing" stellt das Interagieren mit Geräten dar, welche durch Programmieren von Befehlen und Verändern der Hardwarekonfiguration eine physische Interaktion mit der Umwelt erlauben (University of New York, 2023). Als Plattform für die „Hardwarekonfigurationen“ können unterschiedliche Geräte verwendet werden, angefangen vom klassischen Mikrocontroller Arduino Uno über das neuere ESP32 bis hin zum Einplatinen-Computer Raspberry Pi. Welche der Plattformen verwendet werden sollte, hängt vom Einsatzzweck ab, näheres hierzu wird im Kapitel 4.1 und 4.2 thematisiert. Die **Geräte**, die mit der physischen Umwelt und der Plattform interagieren, können unterschiedlichster Art sein:

- Mit Sensoren wie beispielsweise (Luft-)Druck-, Temperatur-, Magnetfeld- Feuchte- oder Lichtstärkesensoren können physische Werte detektiert werden
- Mit Aktoren wie Servo- oder Schrittmotoren können definierte mechanische Vorgänge ausgeführt werden
- Mit Displays können Informationen direkt ausgegeben werden
- Viele weitere Geräte wie Tastatur/Fernbedienung oder NFC-Chip-Leseboard können in das System integriert werden

Da selbst komplexe Maschinen und Geräte wie Drucker, Computer, 3D-Drucker, CNC-Fräsmaschinen ihre Funktionsfähigkeit nur durch solche Sensoren und Aktoren erlangen, ist durch den einfachen Nachbau einzelner Prozessschritte **forschend-entdeckendes Lernen mit Alltagsbezug** möglich, wie beispielsweise im Folgenden dargestellt:

¹² MINT: Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik (Sammelbegriff)

- Raumluftüberwachung: Sensor liest Temperatur und CO₂-Gehalt aus und gibt diese auf einem Display aus
- Bewegungsmelder: Bewegungssensor detektiert eine Bewegung und schaltet eine Leuchtdiode ein
- Mähroboter: Schrittmotor dreht sich so lange, bis der Abstandssensor eine kritische Entfernung detektiert
- CNC-Maschine: Wenn die Türe geschlossen (der Schalter gedrückt) ist, wird das Programm gestartet
- Smart-Home: Wenn der richtige NFC-Chip vom Sensor erkannt wird, wird die Türe entriegelt

Die Fülle an möglichen Anwendungen in der Praxis sind unerschöpflich, ebenso die Vielfalt an möglichen Einsatzszenarien in der Schule und speziell im Physikunterricht.

2.3.2 „Physical Computing“ im Physikunterricht

Neben der Umsetzung in interdisziplinären Schulprojekten ist dieses Konzept speziell für den Physikunterricht in vielerlei Hinsicht bedeutsam. Hierbei kann zum einen kostengünstig ein Messsystem aufgebaut und für Experimente eingesetzt oder zum anderen durch die **offene Konzipierung** speziell das Messsystem erforscht werden. Im Zuge dessen bieten sich neue Möglichkeiten für die Lernenden, die Funktionsweisen von Computern, Sensoren, Aktoren zu verstehen und sich gegebenenfalls, je nach didaktischer Reduktion, im einfachen Programmieren auszuprobieren. Weiterhin kann das Verständnis der Lernenden für **praktische Anwendungen grundlegender physikalischer Gesetze und Prinzipien** erweitert und so ihr Interesse für das Ingenieurwesen und die Wissenschaft geweckt werden (Kotseva et al., 2019). Zudem wird die Möglichkeit geboten, dass die Lernenden ihre Kreativität in einem geeigneten Umfeld einbringen können und Verantwortung für ihre wissenschaftlichen Erkundungen übernehmen (Moya, 2019). Die **finanzielle Hürde** für Schulen zur Bereitstellung von „Physical Computing“-Komponenten ist sehr gering in Anbetracht der Möglichkeiten der Gestaltung von Lehr- und Lernarrangements (Moya, 2019). Ein Mikrocontroller-Einsteigerset ist bereits für 50-60 € erhältlich (Funduino GmbH, 2023), was die Anschaffung nicht nur für Schulen, sondern auch privat für interessierte Lernende ermöglicht.

Thornton und Sokoloff sahen in diesem Konzept folgende **Aspekte**, die sie als **größte Treiber des Lerngewinns** bei mikrocontroller-basierten Lernsettings verstanden:

- Die Schüler fokussieren sich hauptsächlich auf die reale Welt, indem sie diese beobachten, anstatt die Diskussion von Abstraktionen zu suchen
- Sofortiges Feedback ist verfügbar und hilft dabei, das Abstrakte konkreter zu machen
- Es wird zu gemeinschaftlicher Arbeit und einem Diskurs ermutigt, wodurch das Verständnis profitieren kann
- Leistungsfähige Hard- und Software erleichtert die Messnahme und Auswertung der Daten und spart Zeit ein
- Die Lernenden verstehen das unmittelbar wahrnehmbare Bekannte und Spezifische, bevor sie zur Abstraktion und der Generalisierung übergehen. Zwar ist die Umwelt direkt erfahrbar, jedoch sind die vorliegenden Zustände oft so komplex, dass sich ihnen erst mithilfe von Abstraktion wissenschaftlich angenähert werden kann (Thornton & Sokoloff, 1990)

Auch wenn diese Aspekte bereits viel über ein mögliches Lernsetting offenbaren, ist das didaktische Vorgehen und die Unterrichtsgestaltung bei der Einbindung in den Unterricht keinesfalls vorgegeben und verlangen von der Lehrkraft eine **klare Funktionszuweisung**, was Inhalt, Form, Sinn und Ziel des entsprechenden Experiments betrifft, sowie eine Definition des **didaktischen Mehrwerts für das Lernen**. Wie bereits beschrieben sind beim „Physical Computing“ selbst allein im Physikunterricht zwei Verwendungsmöglichkeiten denkbar: Entweder als „Werkzeug“ bei beispielsweise der Datenerfassung, -auswertung und gegebenenfalls -visualisierung von Messwerten bei einem Experiment, oder als Unterrichtsgegenstand selbst. Diese beiden Verwendungsmöglichkeiten sollen im Folgenden näher beleuchtet werden.

2.3.2.1 Verwendung als Werkzeug für Experimente

Elemente des „Physical Computing“-Konzepts können zumindest hardwareseitig als ebenbürtigen, wenn nicht sogar als besseren, aber deutlich günstigeren Ersatz für Geräte verwendet werden, welche von Lehrmittelherstellern entwickelt und vertrieben werden. Aufgrund der Anschlussmöglichkeit verschiedenster Sensoren ist eine vielseitige Verwendbarkeit möglich. Durch die maximale Spannung von 5 Volt bei einem Einsatz beispielsweise im Schülerexperiment ist der **Einsatz ungefährlich** und entspricht hierbei der Vorschrift der RiSu (Richtlinie für Sicherheit im Unterricht). Die verwendeten Bauteile

des Systems und der Programmcode/aufbau können unkommentiert verwendet werden. Im Gegensatz zu den meist „Out of the Box“ funktionierenden Messgeräten der Lehrmittelhersteller fällt jedoch die Einarbeitungs- und Vorbereitungszeit für dieses System meist höher aus. Dies ist begründet in dem Aufwand, der das Aufsetzen des Systems (Auswahl und Verkabelung der Bauteile, sowie die Programmierung) beansprucht und für Lehrkräfte eine zusätzliche Belastung darstellen kann. Falls die hierfür erforderlichen Grundkenntnisse fehlen, ist es laut Walkowiak et al. fraglich, ob trotz der hervorstechenden Vorteile eines selbstgebauten digitalen Messwertsystems ein Zugewinn im Unterricht zu erwarten ist. Hierbei müsse der Aufwand gegenüber dem fachdidaktischen Nutzen betrachtet werden (T³ Deutschland & MNU e.V., 2018, S. 61). Falls jedoch die Lehrkraft die entsprechenden Grundkenntnisse besitzt und sich den zeitlichen Freiraum nehmen kann, spricht vieles für den Einsatz als Werkzeug im Unterricht als günstige Alternative mit Mehrwert zu einem offiziell vertriebenen Messgerät.

2.3.2.2 Verwendung als Lerngegenstand

Die Natur des „Physical Computing“ – Konzepts legt es nahe, dass Mikrocontroller oder Einplatinen-Computer nicht nur als Hilfsmittel für die Experimentierpraxis, sondern selbst als Lerngegenstand dienen können. Speziell durch die Verwendung als digitale Messwerterfassung erschließen sich **mehrere Potentiale**, wie das T³-Netzwerk in Kooperation mit der MNU herausgearbeitet hat:

- Umgang mit Daten: Möglichkeit der Diskussion von Datenformen, -darstellungen und -qualitäten
 - Einsatz in der Erkenntnisgewinnung: Möglichkeit des Thematisierens der zielgerichteten Auswahl von Sensoren, des weiteren Designs und der Planung der Messung
 - Programmieren als Kulturtechnik: Im Zuge der Digitalisierung sind programmiertechnische Fähigkeiten oder zumindest konzeptionelles Wissen von Programmroutinen eine wichtige Kompetenz
 - Möglichkeiten der Differenzierung: Das System kann als solches als Blackbox betrachtet, oder auch ein partieller Einblick in die Messwerterfassung gegeben werden. Alternativ kann zwischen gesteckten und gelöteten Systemaufbauten gewechselt werden und der Programmcode teilweise oder ganz vorgegeben werden (T³ Deutschland & MNU e.V., 2018, S. 55–57)
-

Beispielsweise können bei einer Temperaturmessung mehrere Sensoren zum Einsatz kommen und im Anschluss an die Messung oder bereits währenddessen thematisiert werden, warum sie eine unterschiedliche Latenz zeigen. Die gesammelten Vermutungen könnten im weiteren Verlauf als Brücke zur Wärmekapazität und -leitung dienen.

Wie im Kapitel 3.2 thematisiert wurde, ist entgegen der reinen Messwertnahme die Messwertspeicherung, -auswertung und -visualisierung, vor allem bei mehreren Messgrößen, ohne größerem Programmieraufwand nicht mehr möglich, wodurch auf weitere Bibliotheken oder Programme zurückgegriffen werden muss. Das folgende Kapitel soll einen Einblick in ein solches Programm geben, welches als Basis der Messwerterfassung und -auswertung dieser Arbeit genutzt wurde.

3 PhyPiDAQ als Instrument zur digitalen Messwerterfassung

Das Softwarepaket „PhyPiDAQ“¹³ wurde maßgeblich von Herrn Prof. Günter Quast am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) entwickelt. Ziel war und ist es, Physiklehrkräften eine Möglichkeit zu bieten, **ohne vertiefte Programmierkenntnisse** durch die Verwendung eines Raspberry Pi **Messwerte zu erfassen, zu verarbeiten und zu visualisieren**. Im ersten Unterkapitel soll ein oberflächlicher Einblick in das Programm selbst gegeben werden, um im nächsten Unterkapitel die Chancen und Hürden für den Einsatz im Physikunterricht beleuchten zu können. Abschließend soll der Nutzen des Programms anhand bereits existierender Projekte evaluiert und ein Ausblick auf künftige Themen vorgenommen werden.

3.1 Oberflächliche Einführung in das Programm PhyPiDAQ

Dieses Kapitel soll einen oberflächlichen Blick in das Programm PhyPiDAQ geben, ohne den Anspruch zu erheben, einen Benutzerleitfaden darzustellen. Hierbei wird auf die Dokumentation im „Educator’s Guide“ verwiesen, welche über github.com abrufbar ist. Es folgt ein Einblick in die Programmstruktur, in die Konfigurationsdateien und abschließend in den Messvorgang selbst.

3.1.1 Programmstruktur und Aufbau

Das Softwarepaket PhyPiDAQ ist in Python und HTML geschrieben, welche weit verbreitete Programmiersprachen darstellen und vor allem Python durch seine einfache und effektive Syntax in vielfältigsten Bereichen Anwendung findet (Roczniewski und Schwede GbR, 2020). Wie in der Programmierung von Anwendungen üblich, wird das Programm in Schichten unterteilt: Die Benutzeroberfläche (engl.: GUI – Graphical User Interface) stellt die oberste Schicht dar und hat den Zweck, eine einfache Bedienung zu ermöglichen. Diese Schicht nimmt der Benutzer (engl.: User) direkt wahr. Bilder und Farben als optisch ansprechende Elemente gehören ebenso zu einem professionellen Erscheinungsbild, wie eine logische Anordnung der Schaltflächen. Die folgende Abbildung zeigt die Startseite von PhyPiDAQ mit diversen Auswahl- und Einstellmöglichkeiten, welche im Programmcode vordefiniert wurden.

¹³ PhyPiDAQ (engl.): Data AcQuisition for Physics Experiments with Raspberry Pi – (dt.): Datenerfassung bei Physikexperimenten auf Basis des Raspberry Pi)

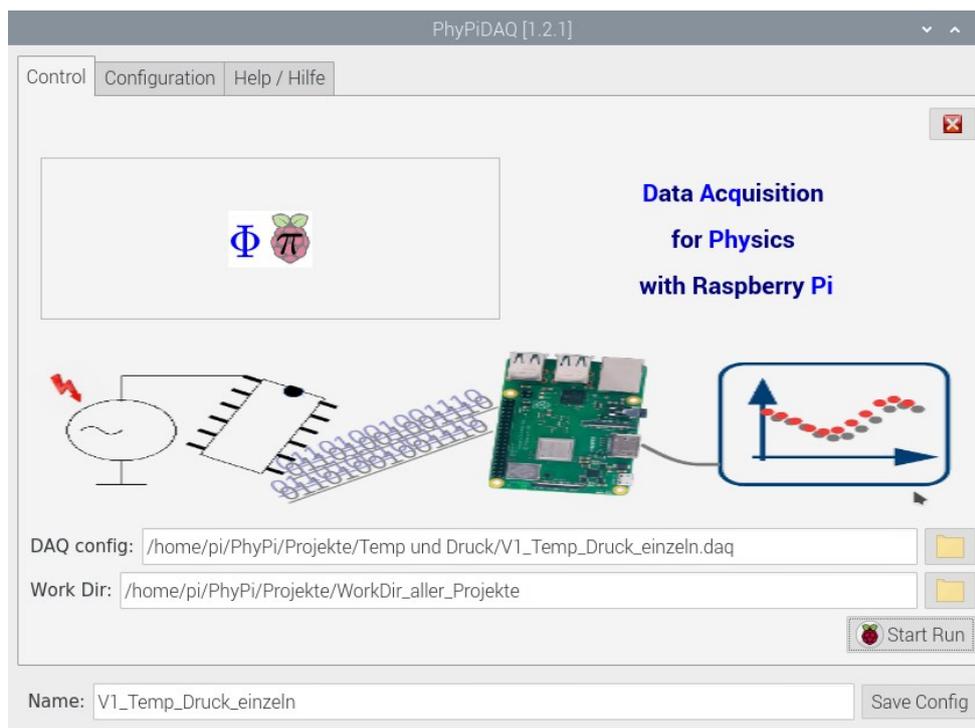


Abbildung 5: Startseite / Benutzeroberfläche PhyPiDAQ

Auf der dem User verborgenen Ebene wird die eigentliche Programmierung der Software vorgenommen. Hier werden die entsprechenden Bausteine, wie Klassen, Variablen, Objekte und Bibliotheken, welche zur Lauffähigkeit der Software beitragen, programmiert und Funktionalitäten, auf die der User auf seiner GUI Zugriff hat, festgelegt. Die im folgenden Unterkapitel thematisierten Konfigurationsdateien stellen zwar im klassischen Sinne keine GUI's dar, jedoch sind sie ebenfalls in der Form vereinfacht, dass kein aufwändiger Programmcode geschrieben werden muss. Die entsprechenden Befehle werden durch das Programm selbst eingelesen und führen unter Nutzung von weiteren Programmbefehlen (engl.: Code) die gewünschten Aktionen aus, wie beispielsweise die Initialisierung eines Sensor-Treibers. Wurde das Programm gestartet, wird im nächsten Schritt über den Ordner-Button „DAQ config“ entweder eine Muster-Konfigurationsdatei oder eine vorab erstellte Konfiguration aufgerufen. Damit im Nachhinein die verwendeten Konfigurationen und die gegebenenfalls gespeicherten Daten abgerufen werden können, ist ein Pfad als „Work Dir“ (Work Direction) oder „Arbeitsordner“ anzugeben.

3.1.2 Konfigurationsdateien

Jede Messung über PhyPiDAQ benötigt **grundlegende Befehle** zur Ausführung, welche in der **Haupt-Konfigurationsdatei** aufgeführt sind. Diese ist in der folgenden Abbildung beispielhaft abgebildet.

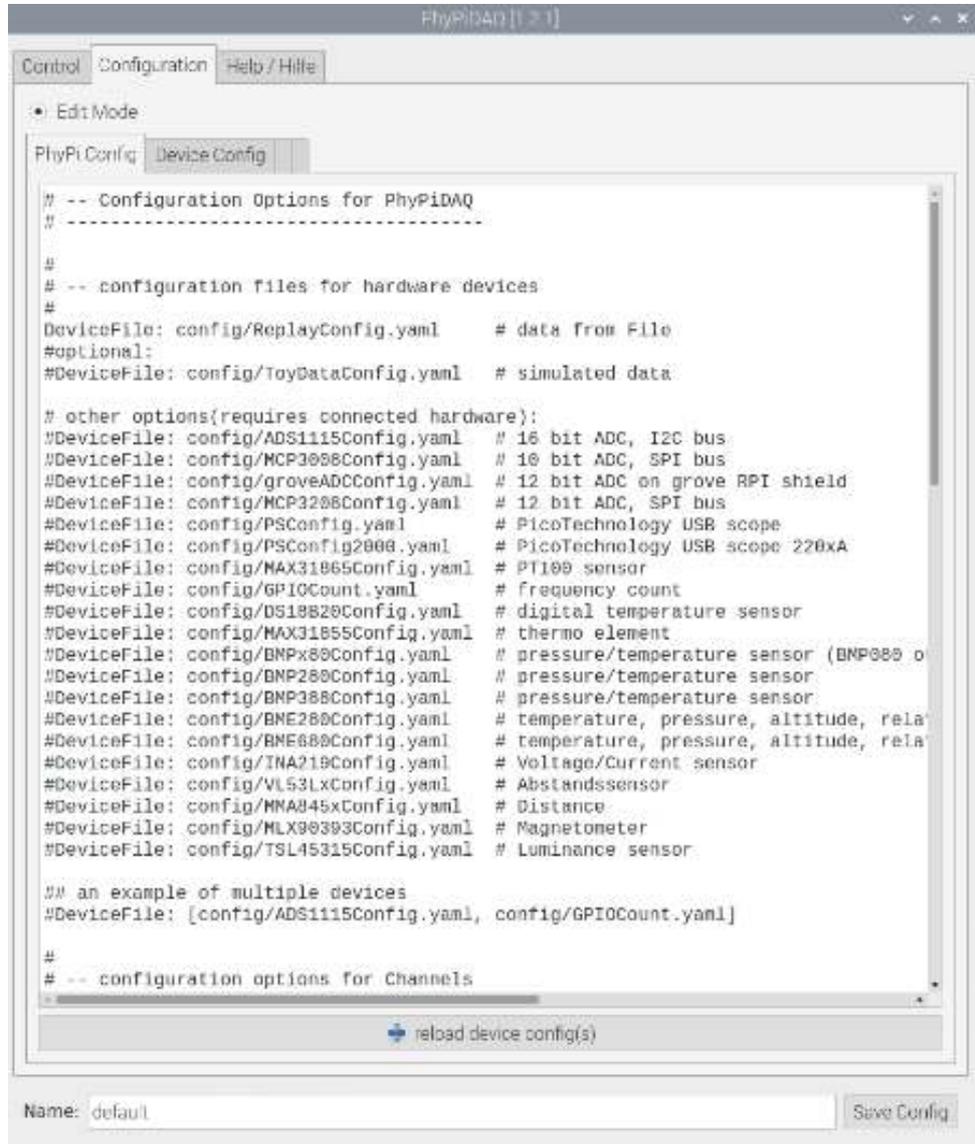


Abbildung 6: Beispielhafter Ausschnitt aus einer Haupt-Konfigurationsdatei

Werden Sensoren verwendet, müssen diese zuerst in der Haupt-Konfigurationsdatei angegeben werden, indem die entsprechenden Devices aufgeführt und aktiviert werden. Werden bestimmte Befehle nicht benötigt, so können sie durch Auskommentieren (ein Rautenzeichen # vor den Codeblock setzen) von der Ausführung ausgeschlossen werden. Weiterhin zu beachten ist, dass jeder Mess-Kanal (engl.: Channel) für sich einzeln definiert werden muss. Die jeweiligen Befehle in den Konfigurationsdateien sind dem versierten Nutzer ausreichend kommentiert, und sollen an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt werden. Eine vertiefte Sicht hierauf wird im [Anhang](#) gegeben.

Die **Geräte-Konfigurationsdateien**, in welchen die Einstellungen der jeweiligen Geräte/Sensoren verändert werden können, sind hingegen meist kürzer, wie das Beispiel in der folgenden Abbildung zeigt, da lediglich einzelne Parameter an die Treiber der Devices übergeben werden müssen.

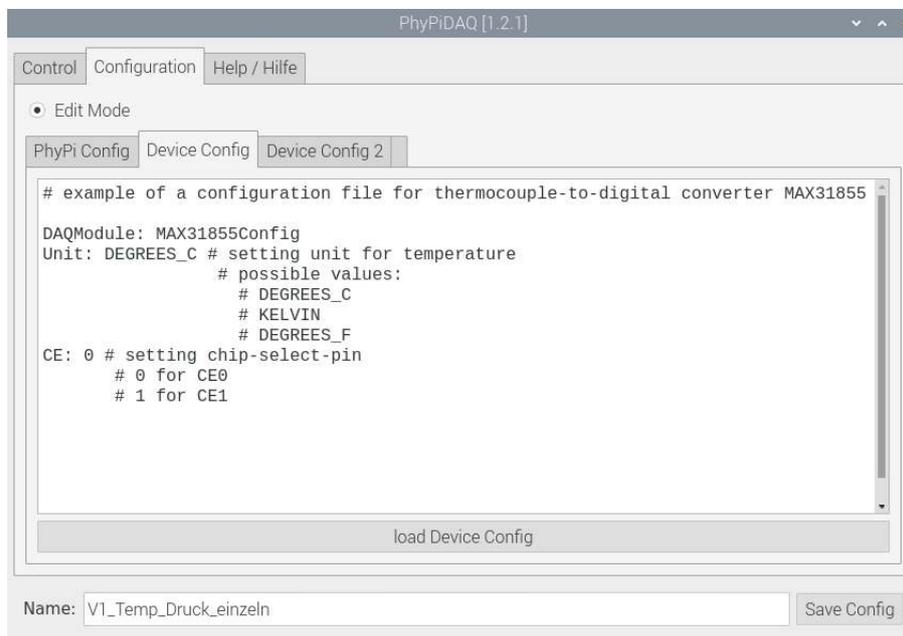


Abbildung 7: Beispielhafte Geräte-Konfigurationsdatei

Die benötigten Devices werden über den Programm-Browser im Ordner „config“ ausgewählt und geladen, ehe eventuell einzelne Befehle innerhalb der Geräte-Konfiguration angepasst werden. Wenn die Haupt- und die Geräte-Konfigurationsdateien angepasst und der Arbeits-Ordner ausgewählt wurde, kann die Messung gestartet werden.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird die Haupt- und Geräte-Konfigurationsdatei zwecks der besseren Lesbarkeit und der Nähe zum Programm, welche in englischer Sprache verfasst wurde, Haupt- und Device-Config abgekürzt.

3.1.3 Messvorgang

Wird die Messung über den im Startmenü integrierten Button „Start Run“ gestartet, beginnt das Programm je nach Einstellung in der Haupt-Konfigurationsdatei entweder sofort oder erst nach Betätigung des Buttons „Run“ die Messung. Die **laufende Messung** soll die folgende Abbildung veranschaulichen.

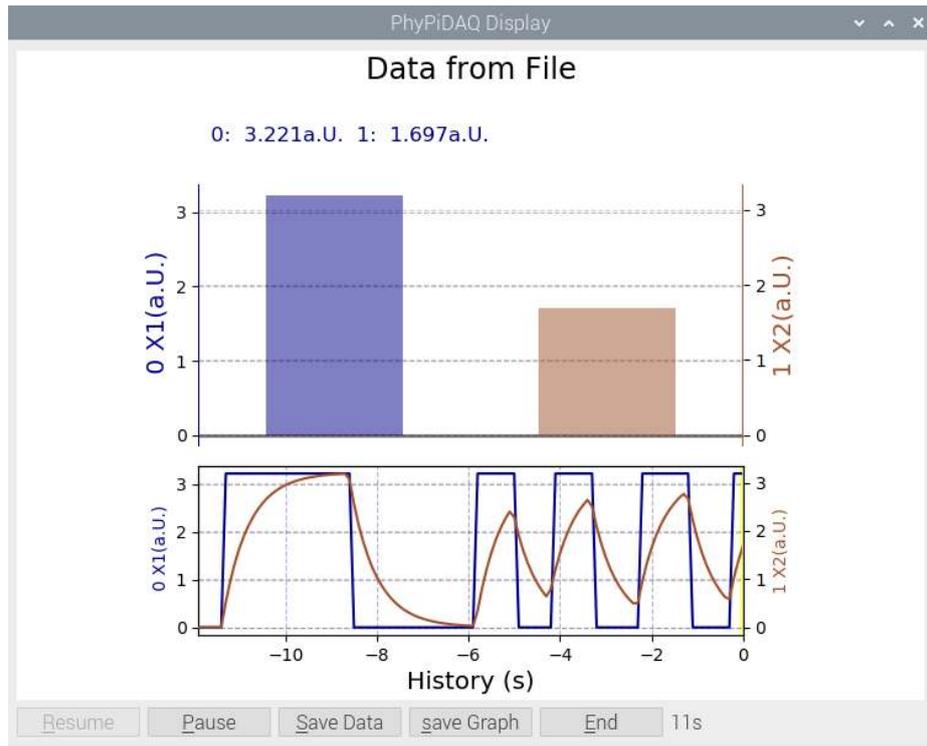


Abbildung 8: Beispielhafter Messvorgang beim Laden und Entladen eines Kondensators in PhyPiDAQ

Das Bild ist aus einem laufenden Demonstrations-Messvorgang entnommen, bei welchem die Auf- und Entladung eines Kondensators veranschaulicht werden soll. Im oberen Bereich sind die Signalstärken in Form von Säulendiagrammen dargestellt, wobei in diesem Fall die blaue Säule die Versorgungsspannung und die braune Säule die Kondensatorspannung kennzeichnet. Im unteren Bereich ist der Verlauf über der Zeit dargestellt. Die Farben der Signale, der anzuzeigende Wertebereich, die Achsenbeschriftungen und die Signalbezeichnungen wurden zuvor in der Haupt-Config festgelegt. Während der Messung können über die Buttons diverse Aktionen getätigt werden:

- **Pause** unterbricht die Messung
- **Resume** lässt die Messung fortfahren (Die Zeitanzeige Stoppuhr startet von neu)
- **Save Data** veranlasst das Speichern der letzten Datenpunkte, deren Anzahl in der Haupt-Config durch „NHistoryPoints“ festgelegt wurde, in einer .dat-Datei
- **Save Graph** dient dazu, den aktuellen Ausschnitt des Fensters als .png-Datei zu speichern
- **End** dient dazu, das Messprogramm zu beenden

Mit diesen Möglichkeiten ist die Steuerung der Messung möglich.

3.2 Mehrwert des Programms im Physikunterricht

Die folgenden Punkte sollen im Folgenden darstellen, worauf sich der **(didaktische) Mehrwert dieses Programms** (in Verbindung mit der erforderlichen Hardware) stützt und seine Anwendung im schulischen Rahmen rechtfertigt.

- **Kostengünstig für die Anwender:** Da die Einplatinen-Computer und Sensorik in der Regel günstig erhältlich sind und die Software kostenlos zur Verfügung gestellt wird, stellt dies eine Alternative zu den höherpreisigen Geräten bekannter Lehrmittelhersteller dar. Somit ist auch eine Anschaffung mehrerer Sets für eine Schülergruppe möglich
 - **Keine Programmierkenntnisse erforderlich:** Durch die einfach gehaltene Benutzeroberfläche sind für die reine Anwendung keine Programmierkenntnisse erforderlich, da durch intuitives Verändern von Befehlen das Programm gesteuert werden kann. Fortgeschrittenen Anwendern steht es jedoch offen, den Programmcode umzuschreiben, um zielgerichtete Ergebnisse zu erhalten
 - **Gute Dokumentierung:** Die Schritte von der Installation des Betriebssystems und PhyPiDAQ über die Anwendung bis zur Erklärung einzelner Code-Blöcke im Programm selbst sind hinreichend ausführlich dokumentiert, meist in Form eines Benutzerleitfadens
 - **Darstellungsfreiheit:** Die Messgrößen können über die Zeit oder auch gegeneinander aufgetragen und visualisiert werden (Beispielsweise I gegen U einer Dioden-Kennlinie). Auch mehrere Sensor-Eingänge sind gleichzeitig darstellbar
 - **Speicherung und Exportierung:** Die Messwerte werden auf Wunsch in eine textbasierte DAT-Datei gespeichert, können aber auch als CSV-Datei auf Knopfdruck exportiert werden
 - **Erweiterbare Schnittstelle für eine Vielzahl an Sensoren:** Durch das Entfernen der Auskommentierung der benötigten Sensoren in der Konfigurationsdatei werden automatisch die entsprechenden Treiber geladen und Bibliotheken eingebunden, welche für die Nutzung der Sensoren erforderlich sind. Somit entfällt ein kontinuierliches Pflegen der Treiber-Versionen und zusätzlicher Aufwand
 - **Manipulierbarkeit der Anzeige und der Messdaten:** Durch Verändern von Parametern in der Konfigurationsdatei wie dem anzuzeigenden Wertebereich, gegebenenfalls der auf die Messwerte anzuwendende Formel oder weiterem wird die Personalisierbarkeit ermöglicht
-

- **Mehrzweck durch „Physical Computing“-Charakter:** Durch das Programm ist es nun möglich, mit einem kostengünstigen System den Geräten der Lehrmittelhersteller eine ebenbürtige Messtechnik entgegenzusetzen. Hinzu kommt die Möglichkeit, die Messtechnik zum Lerngegenstand zu machen, indem der Messvorgang als solcher untersucht und die „Black Box“ „Messgerät“ den Lernenden geöffnet wird. Hierdurch ergeben sich vielfältige Möglichkeiten, die dahinterliegende Physik im Alltag und im Beruf wiederzufinden und somit die Motivation der Lernenden zu steigern
- **Vereinfachen der Vorbereitung:** Die Programmstruktur erlaubt das Vorbereiten von Experiment-Messungen durch Anlegen einer Konfigurationsdatei, welche alle erforderlichen Befehle zur Durchführung enthält und zum Start der Messung lediglich aufgerufen werden muss. Eine wachsende Auswahl an vorbereiteten Konfigurationen ist bereits verfügbar
- **Geeignet für Schülerexperimente:** Durch die Benutzerkontensteuerung des Betriebssystems können die Zugriffsrechte der Nutzer*innen eingeschränkt werden, wodurch das Messsystem auch für Schülerexperimente genutzt werden kann. Durch das Anlegen der entsprechenden Konfigurationsdatei im jeweiligen Benutzer-Verzeichnis ist den Lernenden eine klare Handlungsrichtung vorgegeben
- **Open-Source-Ansatz:** Durch den Open-Source-Ansatz und die Verfügbarkeit auf github.com ist der Anschluss an Programm-Updates, neue Geräte-Treiber (engl.: Devices) und Beispielprogramme gegeben. Weiterhin kann bei reproduzierbaren Problemen mit dem Programm über github.com eine Fehlermeldung (sog. „issue“) geöffnet werden, damit der Fehler, falls er am Programm liegt, behoben werden kann. Fortgeschrittene Benutzer sind dazu eingeladen, eigene Veränderungen vorzunehmen und ebenfalls an der Weiterentwicklung des Programms mitzuwirken

Neben den Chancen und Vorteilen sollen auch die **Hürden für den Einsatz** im schulischen Unterricht thematisiert werden. Die möglichen Schwierigkeiten bei der Verwendung eines solchen selbstgebaute Messsystems betreffen im Vergleich zu modernen Plug&Play-Geräten der genannten Lehrmittelhersteller hauptsächlich die Natur des „Physical Computing“-Konzeptes als das Programm PhyPiDAQ selbst:

- **Fehleranfälligkeit:** Da die Soft- und Hardware nicht abgekapselt und durch den Nutzer beeinflussbar sind, ist die Fehleranfälligkeit höher: Bereits unscheinbare Fehler wie ein nicht verbundenes Kabel oder ein falscher Befehl in der
-

Konfigurationsdatei können zu einer Störung/Verzögerung der Messung führen. Eine Störung des Unterrichts kann umgangen werden, indem in der Vorbereitungszeit ein Testlauf durchgeführt wird

- **Zeitbedarf:** Im Gegensatz zu Plug&Play-Geräten ist das Experimentieren mit einem solchen Messsystem aufwändiger vorzubereiten. Zwar muss die Lehrkraft sich auch mit einem Plug&Play-Gerät vertraut machen, jedoch ist der Zeitaufwand für das Verkabeln der Sensoren, das Anlegen der Konfigurationsdatei, das Testen und die eventuelle Fehlersuche meist höher
- **Persönliche Eignung der Lehrkraft:** Neben dem fachlichen Wissen ist für das „Auf sich nehmen“ des Mehraufwandes eine persönliche, intrinsische Motivation für das Auseinandersetzen mit dem Thema essentiell. Auch ist eine grundlegende EDV-Kompetenz sinnvoll, um eventuelle Fehlerquellen selbstständig, in der Vorbereitung und gegebenenfalls im Unterricht selbst, beheben zu können

3.3 Bereits existierende Projekte mit PhyPiDAQ

Dass das vorgestellte System, bestehend aus Raspberry Pi, Sensorik und PhyPiDAQ, nicht nur in der Theorie zu einem lernspezifischen Mehrwert führen kann, sondern dies auch in der schulpraktischen Anwendung unter Beweis gestellt hat, zeigt die Erprobung im Unterricht und seine Evaluation (Moritz Aupperle, 2018). Aufbauend auf diesem Konzept wurden und werden mehrere Projekte beziehungsweise mögliche Anwendungen für den Unterricht entwickelt, um die **Möglichkeiten dieses Konzepts** aufzuzeigen:

- Einführungskurs zum Thema „digitale Messtechnik mit dem Raspberry Pi“: Anhand eines didaktisch auf Schülerniveau herunter gebrochenen Einführungskurses machen Lernende erste Erfahrungen mit dem Raspberry Pi und dem Erfassen von Messgrößen
- LED-Musikübertragung: Mithilfe einfacher Elektrik kann auf anschauliche Art gezeigt werden, dass mit Hilfe von Leucht-Signalen, die von einer Leuchtdiode gesendet und von einer Fotodiode empfangen werden, Musik kabellos übertragen werden kann
- Telemetriesensor für die Digitalisierung von Beschleunigungen in der Mechanik: Mit Hilfe eines Arduino Nano's, welcher über einen eingebauten Beschleunigungssensor verfügt und die gemessenen Daten an einen Raspberry Pi sendet, können aufgrund der kleinen Bauweise in verschiedensten Settings die Beschleunigungen gemessen werden

3.4 Mögliche Unterrichtsthemen und Vorschläge zur Integration der digitalen Messwerterfassung in der Thermodynamik mittels PhyPiDAQ

Im Bereich der **Thermodynamik** sind **vielfältige Einsatzmöglichkeiten** denkbar:

- Temperaturmessungen verschiedener Gegenstände (Thermometer)
- Bestimmung der spezifischen Wärmekapazitäten von unterschiedlichen Materialien, wie Pinheiro Junior und Soares bereits mit einem Arduino Uno zeigten (Pinheiro Junior & Soares, 2021)
- Bestimmung des absoluten Nullpunktes und Kennenlernen der Temperaturskalen °C, °F und K
- Wärmeübertragungs-Möglichkeiten: Wärmestrahlung, Wärmeleitung und Konvektion
- Qualitative und quantitative Analyse des Newton'schen Abkühlungsgesetzes und Diskussion der Wärmeverluste eines Stoffes
- Inkompressibilität von Flüssigkeiten darstellen
- Erkunden des Idealen Gasgesetzes durch qualitative und quantitative Analyse der Abhängigkeiten einzelner Größen (Druck, Temperatur und Volumen), wie A. Moya unter Verwendung eines Mikrocontrollers zeigen konnte (Moya, 2019)

Das letztgenannte Beispiel, die Erkundung des idealen Gasgesetzes, weist viele Synergieeffekte mit dem aktuellen Lehrplan und der Umwelt-Thematik auf. Beispielsweise ist hier der **Einblick in Phänomene** wie Wetter, Windströmungen und Zustandsänderungen **und technische Prozesse** wie Kühlschränke, Wärmepumpen und Kraftwerke zu nennen. Um die fundamentalen Zusammenhänge und Grundlagen dieser Phänomene und der technischen Anwendungen offen zu legen, wurde ein Konzept zur Integration digitaler Messtechnik in den Physikunterricht entwickelt, dessen Entwicklung, Ausbau und Umsetzung im folgenden Kapitel beschrieben werden soll.

4 Ausarbeitung eines Konzepts zur Überprüfung des idealen Gasgesetzes mit PhyPiDAQ

4.1 Physikalische Grundlagen zum idealen Gasgesetz

Zu Beginn dieses Kapitels sollen die Grundlagen an thermodynamischem Wissen aufgegriffen werden, welche zum Verständnis der im [Kapitel 5](#) folgenden Konzipierung als sinnvoll erachtet werden. Hierbei handelt es sich nicht um eine das Thema erschöpfende Ausführung und erhebt damit keinen Anspruch auf detaillierte Vollständigkeit.

4.1.1 Modellerklärung

Zur Erklärung des Verhaltens von sich ändernden Zustandsgrößen soll die **kinetische Gas-Theorie** herangezogen werden. Demnach sind thermodynamische Größen wie der Druck und die Temperatur auf mittlere Zustände (Energie, Impuls) von einer großen Anzahl an submikroskopischen Teilchen (Atome und Moleküle eines Gases) zurückführbar. Im Falle des idealen Gases werden die Stöße der Teilchen untereinander als ideal-elastisch, ihr Eigenvolumen und die Wechselwirkungen untereinander als vernachlässigbar klein betrachtet. Trockene Luft als Mischung von realen (Edel-) Gasen kann vereinfachend als ideales Gas betrachtet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird ausschließlich Luft als Arbeitsmedium genutzt und daher die Modellannahme des idealen Gases für alle Berechnungen und Betrachtungen herangezogen. Wie die Kepler'schen Gesetze für die Astronomie stellen die **Hauptsätze der Thermodynamik** wichtige Eckpunkte für die Betrachtung von thermodynamischen Zustandsänderungen dar. Mit Blick auf die in Kapitel 5.4 folgende Konzipierung sollen diese im Folgenden kurz erläutert werden.

4.1.2 Hauptsätze der Thermodynamik

Der Nullte Hauptsatz der Thermodynamik sagt aus, dass ein System A, welches im thermischen Gleichgewicht mit einem System B ist, welches wiederum im thermischen Gleichgewicht mit einem System C ist, auch mit diesem System C im thermischen Gleichgewicht stehen muss.

Der Erste Hauptsatz der Thermodynamik ist eine spezielle Form des Energieerhaltungssatzes, wie er aus der Mechanik bekannt ist. Für ein für Stoffströme

geschlossenes System sagt dieser aus, dass die Änderung der inneren Energie gleich der Summe der Änderung der Wärme und der Änderung der Arbeit ist:

$$dU = \delta Q + \delta W \quad (4.1)$$

oder vereinfacht bei konstantem Druck:

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W. \quad (4.2)$$

Für ein offenes System mit Massenströme summieren sich die kinetischen und potentiellen Energien der Teilchen und die Enthalpie hinzu, was hier jedoch nicht behandelt werden soll. Das in Kapitel 5.4 verwendete System ist als solches gegen Massenströme hinreichend gut geschlossen, wodurch die Verwendung der vereinfachten Form ausreichend ist.

Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik sagt aus, dass Wärme nie ohne weiteres Eingreifen von einem Ort niedriger Temperatur zu einem Ort höherer Temperatur transportiert werden kann, sondern immer vom wärmeren Ort zum kühleren Ort fließt. Dies impliziert, dass jeder Wärmeaustausch irreversibel ist. Als Maß der Irreversibilität wurde die Zustandsgröße der **Entropie** S eingeführt. Ein reversibler Prozess, welcher im Realem höchstens näherungsweise, aber nie vollständig stattfindet (Demtröder, 2018, S. 302), ist nur durch eine unendlich langsame Zustandsänderung realisierbar, sodass stets in allen Systemen die gleiche Temperatur und der gleiche Druck vorliegen (Durchlaufen von Gleichgewichtszuständen). Für die Änderung der Entropie folgt in diesem Fall bei gleichbleibender Temperatur $\Delta S = \frac{\Delta Q_{rev}}{T}$.

4.1.3 Abhängigkeiten einzelner Zustandsgrößen

Wird ein ideales Gas der Stoffmenge n in einem einseitig geschlossenen Zylinder betrachtet, welches ein Volumen V einnimmt und eine Temperatur T hat, wird im Kräftegleichgewicht ein Druck $p = \frac{F}{A}$ auf den Kolben ausgeübt, welcher von der offenen Seite des Zylinders her die Gasmenge begrenzt. Durch die Variation einzelner Zustandsgrößen wurde von verschiedenen Forschern ein Zusammenhang zwischen diesen festgestellt, welche nach ihnen benannt wurden (Demtröder, 2018, S. 191):

- Bei **konstanter Temperatur** und Stoffmenge zeigt sich: $p \propto \frac{1}{V}$ (Boyle-Mariotte)
- Bei **konstantem Druck** und Stoffmenge zeigt sich: $V \propto T$ (Gay-Lussac)
- Bei **konstantem Volumen** und Stoffmenge zeigt sich: $p \propto T$ (Amontons)
- Bei **konstanter Temperatur und Druck** zeigt sich: $V \propto n$ (Avogadro)

Die Zusammenführung der einzelnen Abhängigkeiten ist in Form des **idealen Gasgesetzes** gegeben, welches im folgenden Unterkapitel hergeleitet wird.

4.1.4 Ideales Gasgesetz

Durch Kombination von $p \propto \frac{1}{V}$ und $p \propto T$ ergibt sich ein Zusammenhang $V \propto \frac{T}{p}$, wodurch sich, umgestellt, ein Zusammenhang $p * V \propto C * T$ ergibt. Das C stellt hierbei eine Konstante dar. Durch thermodynamische Überlegungen lässt sich der Wert der Konstanten herleiten, sodass die Proportionalität aufgelöst werden kann und zur idealen Gasgleichung $p * V = n * k_b T$ umgestellt werden kann. Durch Eliminieren der Boltzmann-Konstante k_b mit der Beziehung $k_b = \frac{\bar{R}}{N_A}$ und $N_A = \frac{N}{n}$ kann die Gleichung zu der bekannteren Form $p * V = n * \bar{R} * T$ umgestellt werden, wobei \bar{R} die universelle Gaskonstante, N_A die Avogadro-Konstante, N die Teilchenzahl und n die Molzahl darstellt. Wird mit Luftmassen gerechnet, kann über die Beziehung $\bar{R} = R * M$ und $m = n * M$ die Formel zu

$$p * V = m * R * T \quad (4.3)$$

umgestellt werden, wobei R die spezifische Gaskonstante (für Luft), M die Molmasse und m die Masse der Luft darstellt. Diese Form des idealen Gasgesetzes wird in späteren Berechnungen und Modellierungen ausschließlich verwendet werden.

4.1.5 Zustandsänderungen

Isotherm: Eine isotherme Zustandsänderung liegt vor, wenn die Temperatur während des Prozesses konstant gehalten wird. Diese Bezeichnung ist die direkte Folgerung der Proportionalität nach Boyle-Mariotte. Dies kann beispielsweise durch Komprimieren eines Gases und die gleichzeitige Wärmeabfuhr realisiert werden. In diesem Fall gilt

$$p * V = \text{const.} \quad (4.4)$$

Isochor: Eine isochore Zustandsänderung liegt vor, wenn das Volumen konstant gehalten wird. Diese Bezeichnung ist die direkte Folgerung der Proportionalität nach Amontons.

Dies kann beispielsweise durch Arretieren eines Kolbens und die Erwärmung des Gases im Zylinder realisiert werden. In diesem Fall gilt

$$\frac{p}{T} = \text{const.} \quad (4.5)$$

Isobar: Eine isobare Zustandsänderung liegt vor, wenn der Druck während des Prozesses konstant gehalten wird. Diese Bezeichnung ist die direkte Folgerung der Proportionalität nach Gay-Lussac. Dies kann beispielsweise durch das Erhöhen der Temperatur und gleichzeitiges Expandieren-lassen des Gases realisiert werden. In diesem Fall gilt

$$\frac{V}{T} = \text{const.} \quad (4.6)$$

Adiabatisch: Ist das System ideal isoliert, treten keine Wärmeströme auf, wodurch $\Delta Q = 0$ gesetzt werden kann und die Energie, die beispielsweise durch Hub/Kompressionsarbeit ΔW in das System eingebracht wird, sich in innere Energie ΔU und Entropie ΔS umwandelt. Wie stark sich hierdurch die Temperatur erhöht, ist mit der Beziehung $\Delta U = C_v * \Delta T$ und der massebezogenen Wärmekapazität C_v ermittelbar. Dieser Vorgang ist trotz Wärme-Isolation irreversibel.

Isentrop: Diese Zustandsänderung bezeichnet die Kombination aus einer adiabatischen und reversiblen Zustandsänderung. Mathematisch wird diese Zustandsänderung durch die folgenden allgemeinen Beziehungen beschrieben:

$$p * V^\kappa = \text{const.} \quad (4.7)$$

$$p^{1-\kappa} * T^\kappa = \text{const} \quad (4.8)$$

$$T * V^{\kappa-1} = \text{const.} \quad (4.9)$$

Hierbei bezeichnet κ den Isentropenexponenten, welcher mit den spezifischen Wärmekapazitäten c_p und c_v zusammenhängt:

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} \quad (4.10)$$

Für ein ideales Gas, zu welchem hinreichend genau auch trockene Luft zählt, beträgt der Isentropenexponent $\kappa \cong 1,4$. Aus diesen Beziehungen lassen sich Zusammenhänge zwischen Ein- und Ausgangsgrößen herstellen, welche ebenfalls aus dem ersten Hauptsatz hergeleitet werden können:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\kappa-1} \quad (4.11)$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1-\kappa}{\kappa}} \quad (4.12)$$

$$p_2 = p_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\kappa} \quad (4.13)$$

Polytrop:

Zur Beschreibung von realitätsnahen Prozessen wird in der Fachliteratur bei Kompression/Expansion eines Gases die polytrope Zustandsänderung definiert (Hering et al., 2016, S. 184). Hierbei werden alle aus der isentropen Zustandsänderung bekannten Formeln wiederverwendet unter Neu-Indizierung des Exponenten (hier: n statt κ):

$$p * v^n = const. \quad (4.14)$$

$$p^{1-n} * T^n = const \quad (4.15)$$

$$T * v^{n-1} = const. \quad (4.16)$$

Für $n = 1$ ist die Zustandsänderung laut Definition isotherm, für $n = \kappa \cong 1,4$ isentrop, für $n = 0$ isobar und für $n = \infty$ isochor. Das polytrope Modell wird in Kapitel 5 nochmals zur Erklärung des Verhaltens von Zustandsänderungen aufgegriffen.

4.2 Konzeption und Zielsetzung

Zielgruppe

Zielpersonen dieses Konzeptes sollen die Schülerinnen und Schüler der beruflichen Oberstufe des baden-württembergischen beruflichen Gymnasiums in technischer Richtung sein. Die Experimente als solche sind im Rahmen physikalischer Laborübungen in die Bildungsplaneinheit „Klimaphysik“ im jeweiligen Lehrplan integrierbar.

Rahmenbedingungen

Um mit den Experimenten einen **maximalen Lernerfolg** zu erzielen, ist Aufseiten der Lernenden ein **grundlegendes Wissen** über folgende thermodynamische Größen und Prinzipien als notwendig anzusehen: Das Wesen der Temperatur und des Druckes, Eigenschaften von Gasen und Festkörpern und ein Verständnis von Wärmeleitung. Wird das Konzept in Form von Schülerexperimenten angewandt, ist weiterhin ein **grundlegendes Verständnis** von Elektrizität (Strom, Spannung, Leistung, Energie, Stromkreis) und Wissen über Elektronik (Bauteile und deren Verhalten wie Widerstände, Spannungsquellen und Kondensatoren) sinnvoll.

Zielsetzung und Lernziele

Der maßgebende Bildungsplan für den Laborunterricht der beruflichen Oberstufe sieht allgemein folgende **Lernziele** im Rahmen der maßgebenden Bildungsplaneinheit 3.1 (Klimaphysik) vor:

„Die Schülerinnen und Schüler beschreiben das Verhalten von Flüssigkeiten, Gasen und Festkörpern bei Temperaturänderungen und erklären damit die Funktionsweise von Thermometern. Mithilfe des **allgemeinen Gasgesetzes** beschreiben die Schülerinnen und Schüler die Auswirkungen einer Temperaturänderung auf den Druck und das Volumen eines Gases“ (Ministerium für Kultur, Jugend und Sport).

Die zu konzipierenden Experimente sollen einen großen Beitrag hierzu leisten und über diese Mindestanforderungen hinaus eine Anknüpfung an weitere Themen in Physik, Technik und Natur ermöglichen, wie Kreis- und Kraftwerksprozesse, Wärmepumpen, Wetterbildung und weitere. Die für die einzelnen Experimente im Speziellen zutreffenden Lernziele sollen in den entsprechenden [Abschnitten](#) erläutert werden. Da eine **genaue Definition der Lernziele** von einigen Parametern abhängt, welche in der jeweiligen Unterrichtsvorbereitung festgelegt werden, ist eine Angabe **an dieser Stelle** weder wissenschaftlich korrekt noch sinnvoll. Die Lernziele hängen unter anderem vom

Lerngegenstand (Phänomen oder Messtechnik), der Methodik (Vorführ- oder Schülerexperiment), der Herangehensweise (induktiv oder deduktiv), der Wahl der Funktionen des Experiments und vielen weiteren Freiheitsgraden ab.

Das vorgestellte Konzept soll die **zielgerichtete Adressierung verschiedener Funktionen für das Lernen** berücksichtigen und somit den Aufbau und die Förderung der daran anknüpfenden Kompetenzen begünstigen. Zum Wohle einer möglichst trivialen Implementierung im Unterricht (Reproduzierbarkeit) sollen die benötigten Geräte und Materialien frei erhältlich und günstig erhältlich sein. Der Zusammenbau des Vorführmodells soll sich einfach und ist ohne professionelle Ausstattung an Werkzeugen und Maschinen gestalten. Zudem soll ein Einsatz als Vorführ- und Schülerexperiment gleichermaßen möglich sein.

4.3 Didaktische und methodische Rahmung

Bereits im Vorfeld, in der **Unterrichtsvorbereitung**, ist der Rahmen für das jeweilige Experiment abzustecken und die Weichen für den größtmöglichen Gewinn für das Lernen zu stellen. Neben den didaktischen und methodischen Überlegungen bezüglich des Lernziels der jeweiligen Unterrichtseinheit, welche im letzten Unterkapitel erläutert wurden, ist das Vorwissen und die Kompetenzen der Lernenden bei der Ausgestaltung der Unterrichtseinheit zu berücksichtigen und bei Bedarf eine Binnendifferenzierung einzubauen. Die Experimente sollen mithilfe des im Rahmen dieser Arbeit zu konzipierenden Versuchsaufbaus einen nachhaltigen Erwerb physikalischer Fachkompetenzen in „**situativen, alltagsbezogenen [und] sinnstiftenden Kontexten**“ (Ministerium für Kultur, Jugend und Sport) sicherstellen. Durch ein ergebnisoffenes Experimentieren kann die Motivation der Lernenden zusätzlich gefördert werden:

Wenn Schülerinnen und Schüler so – ausgehend von interessanten Phänomenen und Kontexten – mit ihrem „eigenen Messgerät“ ergebnisoffenen Fragestellungen nachgehen können, wird damit ihr selbstbestimmter Lernprozess maßgeblich unterstützt. (Hans- Ulrich Lampe et al., 2015, S. 11)

Dies kann beispielsweise durch ein **problemorientiertes Experimentieren** erfolgen. Der Bildungsplan greift diesen Ansatz auf und führt ihn weiter aus:

Im Rahmen der problemorientierten Methode beobachten und beschreiben sie [die Lernenden] Phänomene, formulieren Fragestellungen und stellen Hypothesen auf. Diese werden mithilfe entsprechender Untersuchungsmethoden durch direkte und indirekte Messung von Größen experimentell überprüft. Die Schülerinnen und Schüler wenden dabei allgemeine fachspezifische Auswerteverfahren an: Betrachtung von Messabweichungen und -fehlern, Beschreibung und Interpretation von Messdiagrammen, grafisches Integrieren und Differenzieren, Ermittlung von exponentiellen bzw. periodischen Zusammenhängen, Regression, Nachweis der Gültigkeit und Grenzen eines mathematischen Modells. (Ministerium für Kultur, Jugend und Sport)

Der im Rahmen dieser Arbeit konzipierte Versuchsaufbau ermöglicht die Verfolgung dieser **Lernziele** bis in jedes Detail:

- Darstellung von physikalischen Phänomenen der Thermodynamik
- Abweichungen von Idealverläufen ermöglichen Diskussion von Fehlerursachen und Modellannahmen
- Durch mehrere mit dem Versuchsaufbau messbare Größen, welche durch das ideale Gasgesetz verknüpft sind, kann direkt oder indirekt gemessen werden
- Die Offenheit des Programms erlaubt neben einer Echtzeit-Visualisierung den Export der Messwerte und erweitert hierdurch die Möglichkeiten der Datenauswertung. Über frei verfügbare Datenvisualisierungsprogramme ist es der Lehrkraft wie den Lernenden möglich, die Daten mit Fehlern/Messabweichungen und Kurvenanpassungen zu visualisieren und die Ergebnisse mit dem mathematischen Modell abzugleichen

Wie das jeweilige Experiment jedoch im Unterricht adaptiert wird und ob es an dieser Stelle Sinn macht, muss von der Lehrkraft entschieden werden. Diese Arbeit soll lediglich einen Beitrag dazu leisten, das Verständnis der Lernenden von thermodynamischen Zusammenhängen durch Konzipierung eines Versuchsaufbaus mit digitaler Messtechnik zu unterstützen. Das Setting hierfür ist gemäß der pädagogischen Handwerkskunst entsprechend auszurichten.

4.4 Konzipierung von Experimenten für die Veranschaulichung von thermodynamischen Zustandsänderungen idealer Gase

Die im Thermodynamik-Unterricht vorherrschende Art, quantitative Größen beim Experimentieren zu erfassen, ist analoger und händischer Natur (T³ Deutschland & MNU e.V., 2018, S. 89). Meist werden für solche Versuche Aufbauten mit gefährlichen Stoffen wie Quecksilber verwendet. Da jedoch für schnelle (wie beispielsweise ein adiabatischer Prozess) oder sehr langsam ablaufende Prozesse (wie beispielsweise eine isobare Abkühlung) die analoge Methodik an ihre Grenzen kommt und in diesen Fällen eine Echtzeit-Auswertung nicht möglich ist, soll hierfür eine digitale Lösung entwickelt werden. Um auch Lernenden die Möglichkeit zu geben, die Experimente durchzuführen, soll der Versuchsaufbau zudem ungefährlich sein. Im Rahmen dieser Arbeit ist ein Konzept inklusive Versuchsaufbau entstanden, dessen Konzipierung, Konstruktion, Fertigung und Anwendung in diesem Kapitel dargelegt werden soll. Einleitend wird die Planung der Forschung thematisiert, worauf die Konzipierung der Prototypen und abschließend die Implementierung der verwendeten Sensorik aufgeführt wird.

4.4.1 Planung der Experimente

Zu Beginn soll ein Einblick in die **grundlegenden Fragestellungen** gegeben werden, die einer Richtungsfindung der Konzipierung dieser Experimente vorausgingen

- Wie kann ein Unterrichtskonzept aussehen, welches durch digitale Messtechnik wesentlich zum Verständnis der Thematik beiträgt?
- Bietet das Konzept einen didaktischen und/oder methodischen Mehrwert für das Lernen und welche Kompetenzen sollen hierdurch gefördert werden?
- Was soll mit dem Versuchsaufbau gezeigt werden und wie ist dies mit dem aktuell gültigen Bildungsplan vereinbar?
- Wie kann ein Versuchsaufbau realisiert werden, der schulischen Voraussetzungen genügt?

Zur Beantwortung der **ersten zwei Fragestellungen** ist es sinnvoll, Anforderungen an die didaktische und methodische Konzeption zu formulieren:

- Der didaktische und methodische Mehrwert soll gegeben sein:
 - Visuelle Veranschaulichung erleichtert Verständnis
 - Förderung digitaler Kompetenzen
 - Nutzung als Vorführ- und Schülerexperiment
 - Verbindung von Physik, Alltag und Technik gegeben
-

- Überfachlicher Kompetenzaufbau möglich
- Die adressierten Funktionen der Experimente müssen deutlich ersichtlich sein (welche Kompetenzen mit welchem Experiment gefördert werden sollen)
- Das Konzept ist in die gängige Lehrpraxis integrierbar und mit allgemein anerkannten didaktischen und methodischen Leitlinien vereinbar

Anhand dieser Anforderungen ist eine zielführende Konzeption entstanden, die in folgenden Kapiteln in Form von Experimenten umgesetzt wird.

Die Beantwortung der **dritten Fragestellung** hat sich im Laufe der Konzeption geändert: Neben dem Veranschaulichen der Abhängigkeiten von Druck, Volumen und Temperatur und dem Motivieren des idealen Gasgesetzes sollte anschließend ein Carnot-Prozess nachgebildet werden. Durch unzureichende Versuchsbedingungen und Sensorik konnte der Carnot-Prozess nicht abgebildet werden, jedoch hat sich das Repertoire an dahinführenden Experimenten vergrößert und umfasst alle relevanten Zustandsänderungen des idealen Gasgesetzes, welche in Kapitel 4.1 aufgeführt sind. Weitere Einsatzgebiete sind durch eine Weiterentwicklung des Versuchsaufbaus möglich und werden im [Resümee](#) als Zukunftsausblick thematisiert.

Zur Beantwortung der **vierten Fragestellung** werden Anforderungen an den Versuchsaufbau definiert:

- Ungefährlich für Lernende und Lehrkraft, sowohl vonseiten der Materialien und Hilfsstoffe als auch vonseiten der Betriebsspannung
- Einfacher, nachvollziehbarer Versuchsaufbau ohne überflüssige, verkomplizierende Bauteile
- Robust, zuverlässig und langlebig in der Anwendung
- Einfach nachbaubar mit Werkzeugen und Maschinen aus dem Privatanwender-Bereich
- Günstige und breit verfügbare Materialien

Die Berücksichtigung dieser Punkte soll einen erfolgreichen Einsatz im schulischen Unterricht ermöglichen. Im Laufe dieser Arbeit wurde ein Prototyp entwickelt, welcher in drei Optimierungsschritten durch Beseitigen der Mängel angepasst wurde. Die entsprechenden Entwicklungen und Erprobungen sind im Anhang wiedergegeben.

Ähnliche Versuchsaufbauten wie der konstruierte Prototyp werden bereits von Leybold und Pasco vertrieben:

- Leybold Didactic stellt in seinem Demonstrationsversuch D 2.5.1.1.a zum Thema Energieumwandlung dar, wie die Temperaturerhöhung infolge einer Kompression von Luft in einem Kolbenprober/Spritze aufgezeichnet und veranschaulicht werden kann. Hierfür ist ein digitales CASSY-System erforderlich. Allerdings kann der Druck mit diesem Versuchsaufbau nicht gleichzeitig bestimmt werden
- Pasco vermarktet ein Gerät, mit welchem hauptsächlich das Boyle-Mariotte'sche Gesetz (Isotherme Zustandsänderung) gezeigt werden kann. Hierbei können der Druck und die Temperatur durch Sensoren und das Volumen durch Ablesen bestimmt werden. Das Gerät scheint für diese Art von Experiment geeignet, ein Carnot-Prozess ist durch ein fehlendes Wärmereservoir nicht möglich. Zudem wird zur Weiterverarbeitung der Messwerte das Pasco-eigene System benötigt.

Da keines der Versuchsaufbauten den angestrebten Anwendungsfall (Veranschaulichung aller relevanten Zustandsänderungen eines idealen Gases) vollständig nachbilden kann, soll ein Versuchsaufbau entwickelt werden, welcher den definierten Anforderungen genügt. In den folgenden Kapiteln wird die Konstruktion des Versuchsaufbaus inklusive aller Entscheidungsprozesse bezüglich seiner Komponenten oberflächlich dargelegt, beginnend mit der Wahl des Drucksensors. Eine differenzierte Betrachtung erfolgt im Anhang.

4.4.2 Druckmessung

4.4.2.1 Vergleich von Drucksensoren und Wahl eines Modells

Durch den vorgegebenen Einsatzort des Drucksensors kann die Auswahl an infrage kommenden Sensoren anhand **definierter Anforderungen** eingegrenzt werden:

- Messbereich: Ein großer Messbereich ist sinnvoll, um die Wahrscheinlichkeit einer merklichen Temperaturerhöhung zu erhöhen und um eine Multifunktionalität über die konzipierten Experimente hinaus zu gewährleisten
 - Messfrequenz und Latenz: Eine geringe Messfrequenz verkürzt die Latenz und erhöht die Reaktionsfähigkeit auf abrupte und sich schnell ändernde Zustände, wie sie bei einer schnellen, adiabatischen Zustandsänderung auftreten
 - Auslösung und Stabilität: Eine hohe Auflösung der Messwerte ermöglicht präzisere Messungen und eine Reduzierung der Fehler
 - Physikalisches Prinzip, Aufbau und Ausgabewert: Zur Beurteilung der Validität und für die weitere Messsignalweiterverarbeitung von Bedeutung
-

(wie der Drucksensor mit dem Raspberry Pi verbunden wird und ob dafür weitere Bauteile nötig sind)

- Verfügbarkeit und Kosten

Da viele im Mikrocontroller-Bereich etablierte Drucksensoren nicht auf höhere Drücke über 1 bar ausgelegt sind, für eine deutliche Temperaturerhöhung jedoch ein höherer Druckanstieg nötig ist, bietet sich ein Drucksensor für Industierzwecke an. Auch die im Mikrocontroller-Bereich allseits bekannte Serie BMP/BME, welche standardmäßig über einen kombinierten Druck- und Temperatursensor verfügt, ist für diese Einsatzzwecke nicht geeignet. Neben der Tatsache, dass dieser nur für Drücke im Bereich des Atmosphärendrucks ausgelegt ist, ist durch die Bauart des Sensors eine hohe Latenz bei der Temperaturmessung zu erwarten.

Ein Sensor, welcher alle Anforderungen erfüllt und der für diesen Einsatz ausgewählt wurde, ist ein NPT¹⁴-Druckaufnehmer mit einem G1/4“-Außengewinde und einem Sensoranschluss über eine dreiadrige Litze (Spannungsversorgung, Messspannung, Masse), wie er in folgender Abbildung dargestellt ist.



Abbildung 9: NPT-Drucksensor, bis 150 PSI

Die Daten des Drucksensors sind folgende (all4de2023gogo001, 2023):

- Versorgungsspannung: Bis zu 5 V DC
- Bereich der Messspannung (bei 5V Betriebsspannung): 0,5 - 4,5 V
- Maximaler Druck: 150 PSI (10,34 bar)
- Genauigkeit: $\pm 0,5$ % vom Endwert
- Arbeitstemperatur: -40 – 120 °C

Der Drucksensor kann von seiner Anbindung her, wie bei vergleichbaren Bauarten üblich, als Spannungsteiler dargestellt werden, welcher eine vom Druck abhängige Spannung am Signalausgang ausgibt.

Als nächstes ist eine Kalibrierung des Drucksensors notwendig, da er lediglich ein druckabhängiges, analoges Spannungssignal ausgibt, welches nicht unbedingt proportional und linear zum Druck verlaufen muss. Eine detaillierte Beschreibung der Kalibration

¹⁴ NPT (engl.): National Pipe Thread – Amerikanische Kategorisierung von Drucksensoren

erfolgt im Anhang. Im folgenden Unterkapitel soll lediglich das Ergebnis präsentiert werden.

4.4.2.2 Kalibrierung des Drucksensors

Die Kalibrierung des Drucksensors ist entweder ausschließlich **über PhyPiDAQ** oder mithilfe **externer Gerätschaften** möglich. Da die zweitgenannte Ausführung anfänglich gewählt wurde und an dieser Stelle mehr Einblick in das Verhalten des Drucksensors gibt, soll das Ergebnis hieraus erläutert werden. Eine nähere Erläuterung des Kalibriervorgangs ist dem [Anhang](#) beigelegt. Die Kalibrierung ist von der Lehrkraft durchführbar, birgt jedoch durch die einfache Vorgehensweise und den hierin enthaltenen Lerngewinn auch das Potential, beispielsweise im Rahmen eines Schülerexperiments von den Lernenden durchgeführt zu werden.

Im Falle des vorhandenen Drucksensors zeigte dieser, wie die folgende Abbildung des negativen Relativdruckbereichs veranschaulicht, einen nahezu ideal-linearen Verlauf. Um dies zu quantifizieren, ist mit einer quadratischen Funktion angenähert worden. Der kleine quadratische Term q attestiert somit eine sehr gute Linearität.

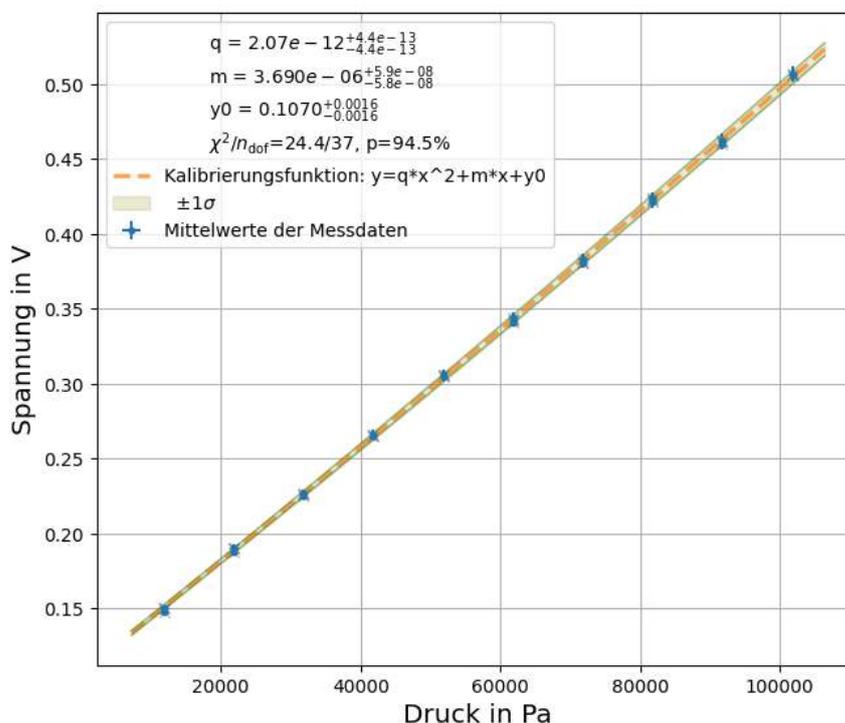


Abbildung 10: Schaubild der Drucksensor-Kalibrationsfunktion

Für eine **Relativdruckkalibrierung** wird die Steigung der Regressionsfunktion von $m = \frac{U_2 - U_1}{p_2 - p_1} = (3,69 * 10^{-6} \pm 5,8 * 10^{-8}) \frac{V}{Pa}$ für künftige Messungen verwendet. Hierfür muss die nach dem Druck umgestellte Steigung in Form von $\Delta p = \left(\frac{c_0 - U_0}{m}\right)$ in den entsprechenden Befehl „ChanFormula“ in der PhyPiDAQ-Config eingespeichert werden. Hierbei stellt c_0 das Eingangssignal in V und U_0 die Spannung in V bei Atmosphärendruck dar. Hierdurch werden die gemessenen Spannungen in zukünftigen Messungen automatisch mit der Formel umgerechnet. Die Kalibration ist auch sehr gut mit Lernenden machbar, da sie viele den Aufbau übergreifender Kompetenzen fördert.

4.4.3 Temperaturmessung

Die Temperaturmessung soll durch ein **Thermoelement** mit dem zur Auslesung der Messdaten benötigten Thermoelement-Verstärkerboard MAX31855 erfolgen, da sich dieses besonders bezüglich der geringen Latenz von anderen Temperatursensoren abhebt. Eine detaillierte Beschreibung des Auswahlprozesses inklusive aller Versuche und Auswertungen ist dem [Anhang](#) beigelegt. Nachfolgend soll ein **Überblick** über den verwendeten Temperatursensor gegeben werden, ohne das Thema erschöpfend zu behandeln.

Das Thermoelement nutzt den Seebeck- beziehungsweise thermoelektrischen Effekt zweier unterschiedlicher Leiter aus, welche an einem Ende verlötet sind: Wird der verbundene Leiter erwärmt, kann eine elektrische Spannung als Funktion der Temperatur an der Vergleichsstelle gemessen werden. Die folgende schematische Darstellung soll dieses Prinzip veranschaulichen. Hierbei ist rechts im Bild die Messstelle, welche am Ort der größten Temperaturänderung positioniert ist, abgebildet und links die Elektronik vereinfacht dargestellt.

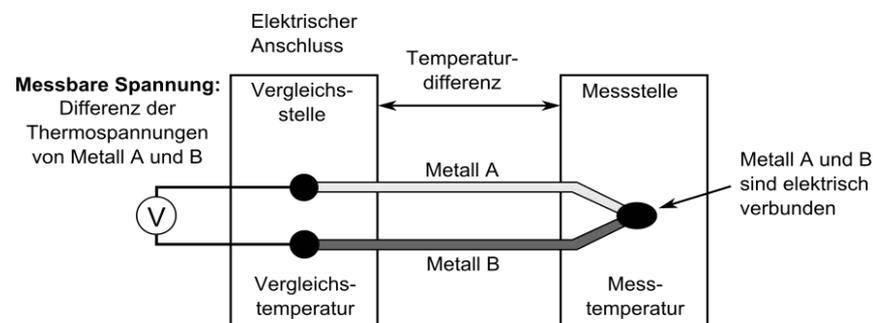


Abbildung 11: Schematische Darstellung eines Thermoelementes (Wikipedia, 2023)

Dieser Effekt, thermische Energie in elektrische umzuwandeln, lässt sich auch umgekehrt als Kühl- oder Heizelement nutzen in Form eines Peltier-Elements. Da die Messspannung

mit einigen $10 \mu\text{V pro } ^\circ\text{C}$ (Wika Alexander Wiegand SE & Co. KG, 2021) sehr klein und somit sehr störanfällig ist, ist das Thermoelement auf die Leistungen eines Verstärkerboards angewiesen. Im Rahmen dieser Arbeit hat sich das Verstärkerboard MAX31855 bewährt, welches zum einen breit verfügbar ist und zum anderen bereits in PhyPiDAQ implementiert ist. Hierbei wurde das etwas höherpreisige Modell von Adafruit verwendet, da es zuverlässigere Werte als die Konkurrenz lieferte.

Das verwendete Thermoelement besteht, wie in folgender Abbildung ersichtlich, aus einer silikonummantelten Litze mit einer Messspitze und zwei Drähten zum Anschluss an das Verstärker-Board. Diese Bauart kann durch den bloßen Metallkontakt nicht in flüssigen Medien eingesetzt werden, zeichnet sich jedoch durch eine geringe Wärmekapazität und damit durch eine **schnelle Reaktionsfähigkeit** aus.

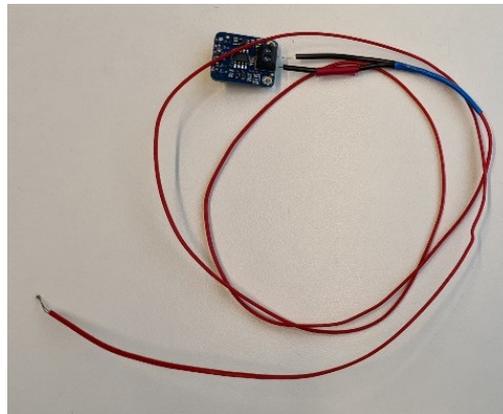


Abbildung 12: Beispielhaftes Thermoelement mit Verstärkerboard MAX31855

Die durch das Thermoelement ausgelöste analoge Spannung wird durch einen integrierten AD-Wandler im Verstärker-Board in ein digitales Signal umgewandelt, verstärkt, geglättet und mit der Vergleichstemperatur eines ebenfalls integrierten Temperaturfühlers verglichen (Kaltstellen-Kompensation), bevor sie als Temperatur über die SPI-Schnittstelle ausgegeben wird.

Im Laufe dieser Arbeit wurde ein **Prototyp** entworfen, welcher das Produkt der Optimierung von zwei Vorgängermodellen ist. Das folgende Kapitel soll einen groben Einblick in die Konzeption der Prototypen ermöglichen.

4.4.4 Design des Prototyps 3

4.4.4.1 Konzeption und Entwicklung vorhergegangener Prototypen

Der aktuell eingesetzte Prototyp 3 basiert auf der Optimierung von zwei Vorgängermodellen. Die konzeptionellen Gedanken, die zu ihnen geführt haben und ihre Entwicklung sollen im Folgenden kurz wiedergegeben werden. Eine ausführliche Beschreibung der Prototypen erfolgt im [Anhang](#).

Für die Entscheidungsfindung eines geeigneten Versuchsaufbaus wurde nach bereits bestehenden Ansätzen in Internet-Quellen gesucht. Aus der Recherche ging hervor, dass bisher noch kein Versuchsaufbau alle drei relevanten Zustandsänderungen (isotherm, isochor und isobar) inklusive der Sonderfälle einer isentropen beziehungsweise adiabaten Zustandsänderung mit oder ohne digitale Unterstützung zeigen konnte. Klassische Experimente, welche einzelne Vorgänge zeigen, geben jedoch nach wie vor einen Hinweis auf einen möglichen Versuchsaufbau, mit welchem eventuell mehrere Prozesse veranschaulicht werden könnten:

- Ein **isothermer Prozess** kann durch die Verwendung von beispielsweise einer Spritze gezeigt werden, indem ein Luftvolumen durch hinreichend langsam erhöhten Druck bei konstanter Temperatur komprimiert wird
- Ein **isochorer Prozess** kann durch die Verwendung von beispielsweise einer mit Luft gefüllten Aluminiumkugel mit integriertem Manometer gezeigt werden, bei welcher durch eine Temperaturerhöhung ein Druckanstieg sichtbar ist
- Ein **isobarer Prozess** kann durch die Verwendung von beispielsweise einem gasgefüllten Zylinder mit nahezu reibungsfreiem und masselosem Kolben gezeigt werden, bei welchem durch Erhitzen des Gases eine Volumenänderung sichtbar wird
- Ein **adiabatischer Prozess** ist durch ein ideal isoliertes System oder eine hinreichend (ideal: unendlich) schnelle Zustandsänderung möglich, beispielsweise die Kompression eines Gases ohne Wärmeaustausch mit der Umgebung

Diese Prozesse beziehungsweise Zustandsänderungen stellen somit folgende Bedingungen an den Versuchsaufbau:

Tabelle 2: Anforderungen verschiedener Prozesse an den Versuchsaufbau

Prozesse	Anforderungen		
	Volumen	Druck	Temperatur
Isotherm	Variabel	Variabel	Wände möglichst wärmedurchlässig
Isochor	Volumenbegrenzung fest oder arretierbar	Variabel	Wände möglichst wärmedurchlässig
Isobar	Variabel	Dichtigkeit	Wände möglichst wärmedurchlässig
Isentrop	Variabel	Variabel	Wände möglichst isoliert

Diese Übersicht gibt einen Einblick in die Komplexität, ein Modell zu entwerfen, anhand dessen alle Prozesse gleichzeitig gezeigt werden können. Für ein externes Erwärmen oder Abkühlen des Gases sollten entweder die Wände des Prozessraums gut wärmeleitend oder im Prozessraum selbst eine Wärmequelle vorhanden sein. Im Falle des isentropen oder zumindest adiabaten Prozesses sollten hingegen die gleichen Wände am besten ideal isoliert sein.

Da diese Anforderungen derzeit unmöglich gleichzeitig mit einem Versuchsaufbau im Rahmen dieser Arbeit zu erfüllen sind, sich aber an die Kombination mehrerer möglicher Prozesse mit einem Versuchsaufbau angenähert werden soll, wurde zunächst ein einfacher Prototyp (**Prototyp 1**) konstruiert, welcher in nebenstehender Abbildung dargestellt ist. Mit diesem konnte qualitativ und in Grenzen quantitativ ein isothermer Prozess realisiert werden.

Wie in der Abbildung zu sehen ist, wurde hierzu eine große Kunststoffspritze mit den Sensoren über Schlauchstücke und Schlauchschellen verbunden. Eine detaillierte Beschreibung erfolgt im jeweiligen Abschnitt im [Anhang](#). Trotz einiger Verbesserungsschritte zeigte der Prototyp Schwächen in Form von Undichtigkeiten, einer schwer reproduzierbaren Fertigung und einem nur begrenzten Einsatzbereich.

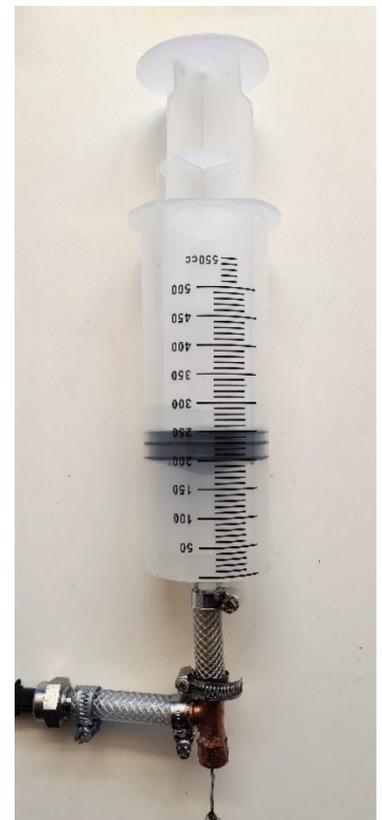


Abbildung 13: Prototyp 1

Die Optimierung des Prototyps 1 führte zum **Prototyp 2**. Um den Kraftaufwand für die gleiche und eine höhere Druckerhöhung zu senken, wurde der Kolbendurchmesser zudem verkleinert und zum Zwecke der Stabilität die Spritze in einen Sockel eingefasst. Die Sensoren wurden über Bohrungen mit dem Prozessraum verbunden. Um gleichzeitig eine Wärmeübertragungsmöglichkeit für isotherme, isobare oder eventuelle Kreisprozesse zu schaffen, wurde die Bodenplatte aus Aluminium gefertigt. Der Prototyp 2 ist in nebenstehender Abbildung dargestellt. Eine detaillierte Beschreibung erfolgt im jeweiligen Abschnitt im [Anhang](#). Aus den Versuchen mit diesem Prototyp ergaben sich weitere Verbesserungspotentiale, welche unter anderem (ein weiteres Mal) die Dichtigkeit betraf. Hieraus wurden Anforderungen für einen weiteren, im Rahmen dieser Arbeit letzten Prototyp definiert, dessen Konzeption und Entwicklung im folgenden Unterkapitel thematisiert werden soll.



Abbildung 14: Prototyp 2

4.4.4.2 Konzeption und Entwicklung des Prototypen 3

Der aus den Optimierungen der Vorgängermodelle entstandene Prototyp 3 kann mit deutlich weniger Aufwand als seine Vorgänger gefertigt werden und zeigt den geringsten Luftverlust. Obwohl die Bodenplatte des Prototyps 2 zwecks Stabilität beibehalten wurde, ist ein Wärmeaustausch hierdurch aufgrund des geringen Durchmessers der Übertragungsfläche nicht mehr sinnvoll und aufgrund einer Barriere auch nicht mehr möglich. Da das Ventil in der ersten Version dieses Prototyps für ein Luftentweichen gesorgt hat, wurde in der letzten Version hierauf verzichtet, obwohl dessen Einbau prinzipiell sinnvoll ist. Eine Quantifizierung des Druckverlusts infolge der Undichtigkeit und seine Visualisierung in Form eines exponentiellen Abfalls kann bei Interesse im [Anhang](#) nachvollzogen werden. Die Konstruktion und Fertigung inklusive Auflistung verwendeter Materialien ist wie bei den Vorgängermodellen im [Anhang](#) aufgeführt. Die Auswahl und gegebenenfalls Kalibrierung eines adäquaten Druck- und Temperatursensors für diesen Prototyp soll im folgenden Kapitel beschrieben werden.



Abbildung 15: Prototyp 3

5 Experimente mit dem Prototyp 3

Durch den Einsatz des Prototyps 3 wird die Veranschaulichung einiger grundlegender physikalischer Gesetzmäßigkeiten und verschiedener thermodynamischer Prozesse ermöglicht, welche auf analogem Wege nur schwer oder nicht realisierbar sind. Zum Zwecke der Übersichtlichkeit sollen sie im Folgenden in Stichpunkten kurz genannt und im weiteren Verlauf im Detail veranschaulicht werden.

- [Isothermer Prozess](#) (Boyle-Mariotte): Erhöhung des Drucks bei langsamer Kompression
- [Isobarer Prozess und Wärmeleitung](#): Exponentieller Abfall der Temperatur bei konstantem Druck
- [Isochorer Prozess](#): Veränderung der Temperatur und des Drucks bei konstantem Volumen
- [Adiabatische beziehungsweise isentrope Zustandsänderung](#): Aufnahme und Analyse der Messungen, Fehleranalyse und Modellanpassung
- [Quasi-Adiabatische Expansion und isobare Erwärmung](#): Abfall der Temperatur bei Expansion von Luft (Umwandlung von innerer Energie in Volumenarbeit), Beobachten eines isobaren Erwärmungsprozesses

Obwohl mit diesem Prototyp mit eingebautem Drosselventil auch der exponentielle Druckabfall sehr gut veranschaulicht werden kann, wurde dieser nicht in diesen Hauptteil mit aufgenommen, da er nur bedingt Schnittpunkte zur Thermodynamik besitzt. Die Ausführung kann stattdessen dem [Anhang](#) entnommen werden. Die übrigen Experimente sollen im Folgenden dargestellt werden. Hierbei richten sich die Ausführungen, wie die gesamte Arbeit auch, an Personen mit physikalischem Hintergrundwissen und erhebt nicht den Anspruch, auf eine Schülergruppe vollständig didaktisch zugeschnitten zu sein. Für eine Umsetzung im Unterricht ist das jeweilige Experiment der Zielgruppe entsprechend anzupassen und die Erklärungen gegebenenfalls didaktisch zu reduzieren.

Die folgenden Experimente sind als abgesonderte „Pakete“ zu verstehen, welche (ohne einen vorherigen Einblick in die theoretischen Einführungen von Kapitel 1-4) die für das Experiment relevanten didaktischen und thermodynamischen Informationen als Einleitung enthalten. Dies soll die Verständlichkeit und Umsetzbarkeit erleichtern.

5.1 Isothermer Prozess

Dieses Experiment soll mit dem isobaren und isochoren Prozess einen Einstieg in das ideale Gasgesetz bieten, indem einzelne Größen, wie hier die Temperatur, konstant gehalten und die anderen Zustandsgrößen betrachtet werden. Da die Temperatur bei richtiger Anwendung konstant bleibt, kann die Aufmerksamkeit allein auf den Zusammenhang von Volumen und Druck gelenkt werden. Da mit leichten Gewichten hantiert wird, ist auch eine Schülerbeteiligung oder sogar Gruppenarbeit mit mehreren solcher Versuchsaufbauten möglich. Ausgehend von bekannten Vorgängen/Phänomenen in Natur, Technik und Alltag formulieren die Lernenden Hypothesen über den Verlauf der Messgrößen, ehe sie diese experimentell überprüfen. Zum Ende der Unterrichtseinheit sollte der Zusammenhang nach Boyle-Mariotte bekannt sein.

5.1.1 Didaktische Kernpunkte

Hinweise:

- Kein Vorwissen zum idealen Gasgesetz nötig
- Der Begriff isotherm sollte nicht zu früh genannt werden, um die Lernenden kognitiv nicht zu überlasten
- Die Visualisierung sollte so einfach und schülernah wie möglich gehalten werden

Mögliche Ziele dieses Experiments:

- Erkennen eines Zusammenhangs zwischen der stückweisen Volumenreduktion und der Erhöhung des Drucks bei konstanter Temperatur
- Visualisierung der Messwerte, Analyse und Interpretation des Verlaufs
- Herstellen eines theoretischen Zusammenhangs aus den Messwerten bis hin zum Zusammenhang nach Boyle-Mariotte ($p \cdot V = \text{const.}$)
- Diskussion von Abweichungen vom theoretischen Wert

Hierbei können je nach Unterrichtssetting und Schwerpunktsetzung verschiedene Kompetenzen gefördert werden wie beispielsweise handwerkliche Kompetenz, analytische Fähigkeiten, Experimentier-, EDV-, Interpretierungs- und Kommunikationskompetenz.

5.1.2 Thermodynamischer Hintergrund

Die isotherme Zustandsänderung nach Boyle-Mariotte, wie sie in Formel (4.4) wiedergegeben ist, beschreibt eine Verhältnismäßigkeit des idealen Gasgesetzes. Diese besagt, dass bei gleichbleibender Temperatur das Produkt aus Druck und Volumen konstant ist:

$$p * V = const.$$

Ausgehend vom ersten Hauptsatz der Thermodynamik für geschlossene Systeme nach Formel (4.1) kann dieser Prozess wie folgt hergeleitet werden:

$$dU = \delta Q + \delta W \rightarrow C_V dT = \delta Q + p dV$$

Da beim isothermen Prozess idealerweise keine Temperaturdifferenz vorhanden ist, kann der Ausdruck vereinfacht werden:

$$0 = \delta Q + p dV \rightarrow \delta Q = -p dV$$

Hieraus können zwei Szenarien abgeleitet werden:

- Die in das System eingebrachte Arbeit $p dV$ verlässt es in Form von Wärme δQ wieder, ohne die innere Energie zu erhöhen
- Die zugeführte Wärmemenge δQ führt zu einer Volumenänderung (Erhöhung der Arbeit $dW = p dV$)

Im Folgenden soll dem ersten Szenario nachgegangen werden.

5.1.3 Durchführung

Für die Durchführung werden außer dem Prototyp 3 folgende **Hilfsmittel** benötigt:

- Raspberry Pi inklusive Sensoren/Elektrik und Programm PhyPiDAQ (inklusive vorgefertigter Konfigurationsdatei)
- Gewichte beliebiger Masse (empfohlen: 1-8 kg, in 1 kg-Schritten)
- Ein Aufbau, mit welchem einige Gewichte sicher und stabil auf dem Kolbenpleuel platziert werden können, beispielsweise mithilfe eines Stativfußes (z.B. von Phywe), einem Gefäß und Stäben wie in Abbildung 16 dargestellt

Vorgang:

1. Formulieren von Hypothesen des Verlaufs des Drucks bei Kompression
 2. Starten der Messung über PhyPiDAQ
 3. Einstellen des ersten Volumens und Beobachten des Drucks. Hierauf ist darauf zu achten, dass die Temperatur konstant bleibt
 4. Einstellen der nächsten Volumina unter gleicher Prämisse
 5. Notieren des Atmosphärendrucks, welcher zum Zeitpunkt der Messung vorliegt (für die Modellanpassung)
 6. Auswerten der Daten und Visualisieren als p/V-Schaubild
 7. Diskutieren der Messergebnisse und -abweichungen
 8. Mathematisieren des Zusammenhangs
-

Die Messwerte können entweder extern (beispielsweise in einem Tabellenkalkulations- oder einem Datenvisualisierungsprogramm) oder intern von PhyPiDAQ erfasst werden. Bei Erfassung mit PhyPiDAQ können die Messwerte im Anschluss in Form einer CSV-Datei exportiert werden. Bei der folgenden Durchführung soll die erste Option gewählt werden, da nicht viele Messpunkte aufzunehmen sind. Um die Reliabilität der Messwerte zu erhöhen, sollen im Folgenden zwei Messreihen nach obiger Anleitung aufgenommen und die Ergebnisse visualisiert werden.

Das folgende Schaubild, welches mit Hilfe eines Datenvisualisierungsprogramms erzeugt wurde, zeigt den Verlauf der aufgenommenen Wertepaare im p/V-Diagramm (Differenzdruck p über dem Restvolumen V).



Abbildung 16: Versuchsaufbau für einen isothermen Prozess

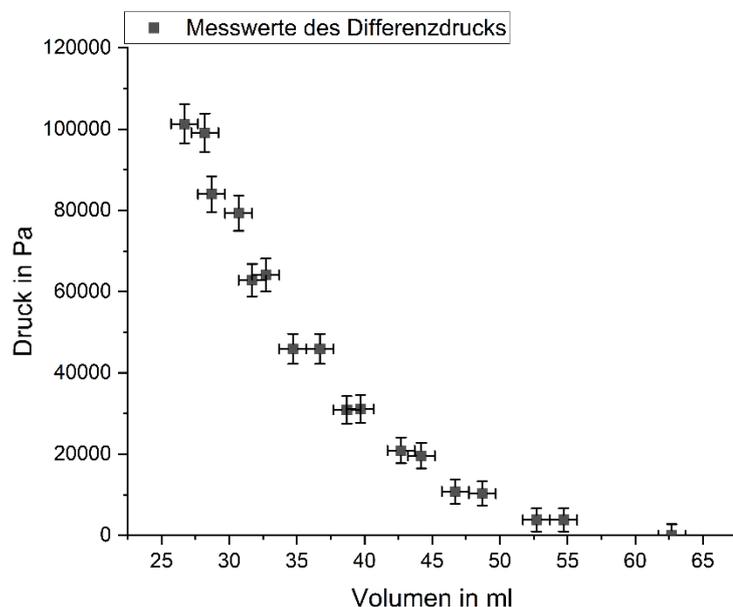


Abbildung 17: Visualisierung der Messdaten eines isothermen Prozesses mit Fehlern in einem p/V-Diagramm

Mithilfe des Zusammenhangs aus Formel (4.4) ($p * V = const.$) können die Messwerte mit dem isothermen Modell verglichen werden, indem der Zusammenhang, nach dem Druck umgestellt, als Kurvenanpassung genutzt wird $p = \frac{const.}{V}$. Hierbei ist zu beachten,

dass nicht der Differenzdruck, sondern der Absolutdruck für die Berechnung des Modells maßgebend ist. Der zum Zeitpunkt des Versuchs vorliegende Atmosphärendruck ist somit zu den Messwerten hinzuzurechnen. Bei Berücksichtigung der korrelierten und unkorrelierten Messabweichungen/Fehler ergibt sich das folgende Schaubild.

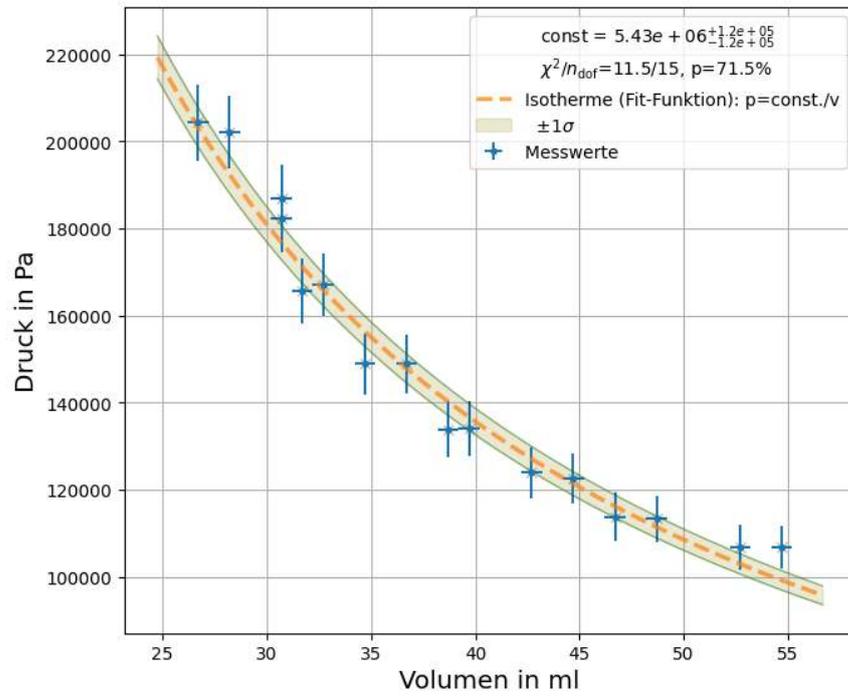


Abbildung 18: Kurvenanpassung an die Messdaten

Aus der Kurvenanpassung der relevanten Messpaare geht der Wert der Konstanten zu $\text{const.} = (5,43 \pm 0,12) * 10^6 \text{ Nm}$ hervor. Die Abweichungen im unteren Druckbereich können durch Haftreibung des Kolbens an der Zylinderwand bedingt sein. Die Abweichungen im oberen Druckbereich können durch den Luftverlust von insgesamt 2 ml bedingt sein. Dennoch zeigen die Messwerte zumindest hinreichend genau den qualitativen Zusammenhang bei isothermer Kompression.

5.1.4 Konklusion

Dieses Experiment veranschaulicht hinreichend genau einen isothermen Prozess und den Zusammenhang mit dem Modell nach Boyle-Mariotte trotz einzelner Abweichungen und stellt eine weitere Stufe zur Einführung in das ideale Gasgesetz dar. Die Fehler bieten eine Diskussionsgrundlage und Möglichkeit zur weiteren Auseinandersetzung. Je nach methodischer Gestaltung des Experiments und Schwerpunktsetzung konnten die Lernenden Erfahrungen im Experimentieren und in der Datenerfassung, -visualisierung und -analyse sammeln.

5.2 Isobarer Prozess und Wärmeleitung

Dieses Experiment soll mit dem isothermen und isochoren Prozess einen Einstieg in das ideale Gasgesetz bieten, indem einzelne Größen, wie hier der Druck, konstant gehalten und die anderen Zustandsgrößen betrachtet werden. Bei diesem Experiment kann zum einen die Verhältnismäßigkeit nach Gay-Lussac nachgestellt und zum anderen der exponentielle Abfall der Temperatur bei konstantem Druck beobachtet und quantitativ beschrieben werden (Newtonsches Abkühlungsgesetz). Da das Volumen aufgrund der Undichtigkeit nicht hinreichend genau bestimmt werden konnte, ist in der Durchführung lediglich der Temperaturabfall betrachtet worden. Falls – wie im Folgenden beschrieben – mit einem schweren Gewicht hantiert wird, ist dieser Versuch als Vorführexperiment vorgesehen.

5.2.1 Didaktische Kernpunkte

Hinweise:

- Kein Vorwissen zum idealen Gasgesetz nötig
- Der Begriff isobar sollte nicht zu früh genannt werden, um die Lernenden kognitiv nicht zu überlasten
- Die Visualisierung sollte so einfach und schülernah wie möglich gehalten werden
- Im Vorfeld ist festzulegen, welche Kompetenzen mit diesem Experiment gefördert werden sollen

Mögliche Ziele dieses Experiments:

- Formulieren von Hypothesen, Aufstellen von Vermutungen zum Verlauf
- Erkennen eines exponentiellen Abfalls der Temperatur bei konstantem Druck
- Auswertung und Visualisierung der Daten
- Überprüfen der Ergebnisse und Vergleich mit dem angenommenen Modell
- Diskussion der Fehlerherkunft
- Mathematisierung des Verlaufs
- Übertragung auf Beispiele in Technik, Natur und/oder Alltag

Bereits im Vorfeld oder auch während des Experiments können Hypothesen über den Verlauf gesammelt werden, worauf weiter aufgebaut werden kann. Hierbei bietet es sich an, Bezug zu Vorgängen/Phänomenen aus Natur, Technik und Alltag herzustellen, um die Prägnanz des Prozesses zu verdeutlichen. Zum Ende der Unterrichtseinheit sollte der Zusammenhang nach Gay-Lussac bekannt sein.

5.2.2 Thermodynamischer Hintergrund

Die isobare Zustandsänderung nach Gay-Lussac, wie sie in Formel (4.6) wiedergegeben ist, beschreibt eine Verhältnismäßigkeit des idealen Gasgesetzes. Diese besagt, dass bei gleichbleibender Temperatur das Produkt aus Druck und Volumen konstant ist:

$$\frac{V}{T} = \text{const.}$$

Ausgehend vom ersten Hauptsatz der Thermodynamik für geschlossene Systeme nach Formel (4.1) kann dieser Prozess wie folgt hergeleitet werden:

$$dU = \delta Q + \delta W$$

$$C_v dT = \delta Q + p dV$$

$$p \Delta V = C_v \Delta T - \Delta Q$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta T} = C_v - C_p$$

Da die Differenz $C_v - C_p$ im betrachteten Bereich konstant ist, muss auch der Quotient $\frac{\Delta V}{\Delta T}$ konstant sein.

Aus dem Verhältnis $\frac{\Delta V}{\Delta T}$ ergeben sich zwei mögliche Szenarien:

- Eine Expansion bei gleichzeitiger Temperaturerhöhung
- Eine Kompression bei gleichzeitiger Temperaturabsenkung

Im Folgenden soll die zweite Variante verfolgt werden, da sie mit dem Versuchsaufbau leichter realisierbar ist.

5.2.3 Durchführung

Für die Durchführung werden außer dem Prototyp 3 folgende **Hilfsmittel** benötigt:

- Raspberry Pi inklusive Sensoren/Elektrik und Programm PhyPiDAQ (inklusive vorgefertigter Konfigurationsdatei)
- Schweres Gewicht mit einer Masse von ca. 20 kg
- Ein Aufbau, mit welchem das Gewicht sicher und stabil auf dem Kolbenpleuel platziert werden kann, beispielsweise mithilfe eines Stativfußes (z.B. von Phywe), einem Gefäß und Stäben wie in Abbildung 19 dargestellt.



Abbildung 19: Versuchsaufbau für einen isobaren Prozess

Vorgang:

1. Formulieren von Hypothesen des Verlaufs der Temperatur bei konstantem Druck
2. Starten der Messung über PhyPiDAQ
3. Schnelles Belasten des Kolbens mit dem Gewicht, Notieren des Volumens nach Kompression
4. Betrachten des Verlaufs der Temperatur und des Drucks
5. Wenn Temperatur bei Raumtemperatur angekommen ist: Notieren des Volumens, Entlasten des Kolbens und Speichern/Exportieren der Messwerte
6. Notieren des Atmosphärendrucks, welcher zum Zeitpunkt der Messung vorliegt (für die Berechnungen)
7. Auswerten der Daten und Visualisieren als T/t-Schaubild
8. Diskutieren der Messergebnisse und -abweichungen
9. Mathematisieren des Zusammenhangs

Um die Wärmeverluste durch Wärmeleitung während der Kompressionsphase möglichst gering zu halten, ist auf eine zügige Kompression zu achten. Falls das Volumen exakt gemessen werden kann, ist das Verhältnis $\frac{\Delta V}{\Delta T} = const.$ zu bestimmen. Zusätzlich bietet es sich an, den exponentiellen Verlauf der Temperatur über der Zeit zu veranschaulichen:

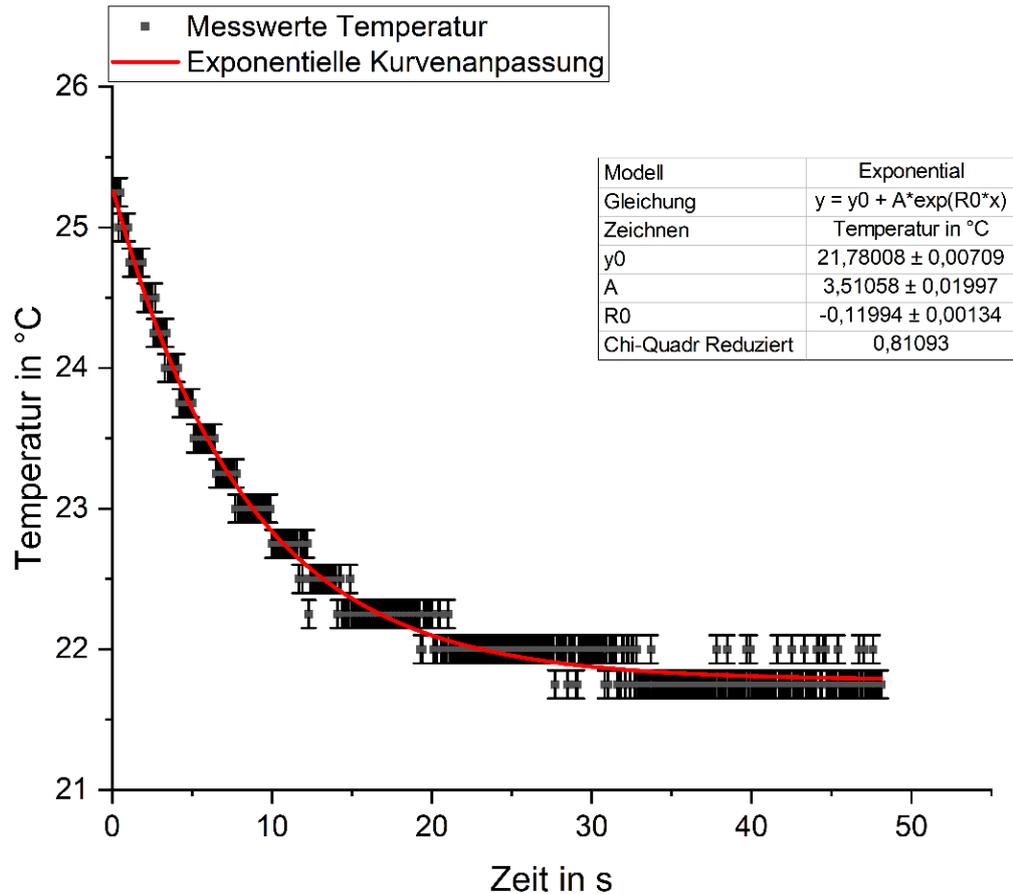


Abbildung 20: Messwerte und Kurvenanpassung des isobaren Prozesses

Zur didaktischen Annäherung an die Messwerte können mehrere Wege, je nach Schwerpunktsetzung der Unterrichtseinheit, gewählt werden. Ein möglicher Weg ist die Veranschaulichung über ein Datenanalyse-Programm und die anschließende Diskussion, mit welcher mathematischen Funktion der Verlauf am besten beschrieben werden könnte. Im weiteren Verlauf können verschiedene mathematische Funktionen an die Messwerte probeweise angepasst und die Genauigkeit der Passung von Funktion zu Messwerten (*Chi-Quadrat reduziert* beziehungsweise $Chi^2/Freiheitsgrad$ n nahe 1) beurteilt werden. Dies ist allerdings erst dann sinnvoll, wenn die Lernenden ein entsprechendes mathematisches Verständnis über Fehleranalyse vorweisen können. Wird sich den Messwerten der Temperatur mit einer exponentiellen Funktion der Form $y = y_0 + A \cdot e^{R_0 \cdot x}$ angenähert, so lässt sich eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten finden (*Chi-Quadrat reduziert* beziehungsweise $Chi^2/Freiheitsgrad$ n nahe 1), wie in der obigen Abbildung ersichtlich.

Die Messwerte lassen sich in Verbindung mit dem Newtonschen Abkühlungsgesetz bringen, welches besagt, dass die Abkühlungsgeschwindigkeit eines Körpers

näherungsweise proportional zur Differenz der Temperaturen von Körper und Umgebung ist. (Tipler et al., 2019, S. 643):

$$\frac{dT}{dt} = k * (T(t) - T_U)$$

Die Materialkonstante $k = \frac{-C}{\alpha A}$ stellt mit der Wärmekapazität C , der Wärmeübergangszahl α und der Fläche A , durch die die Wärme dringt, eine Objektkonstante dar. Die Differenzialgleichung lässt sich zu folgendem Ausdruck hin lösen:

$$T(t) = (T(t = 0) - T_U) * e^{kt} + T_U$$

Hierbei stellt $T(t)$ die aktuelle Temperatur, $T(t = 0)$ die Anfangstemperatur und T_U die Umgebungstemperatur dar. Mit den Groen aus der Kurvenanpassung lassen sich die folgenden Werte finden:

$$(T(t = 0) - T_U) = 3,51 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_U = 21,78 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$k = -0,12 \frac{1}{^\circ\text{C}}$$

Durch das Anpassen einer exponentiellen Funktion an die Messwerte konnte somit die Umgebungstemperatur und die Temperaturdifferenz bestimmt werden. Durch Extrapolieren der Messwerte über die maximale Temperatur hinaus kann die Latenz des Thermoelementes herausgerechnet und somit die theoretische Temperatur zum Zeitpunkt der Druckerhöhung bestimmt werden.

Im weiteren Verlauf könnte diskutiert werden, von welchen Eigenschaften die Wärmeleitung abhängt. Somit könnte eine Anbindung an die adiabatische Zustandsänderung, welche in Kapitel 5.4 thematisiert wird, geschaffen werden.

5.2.4 Konklusion

Dieses Experiment ermöglicht den Lernenden, im Vorfeld Hypothesen zu bilden und während der Messung einen Abkühlungsprozess in Echtzeit zu beobachten. Wird das Volumen und die Temperatur in Echtzeit gemessen, beispielsweise durch Ablesen oder einen weiteren Sensor, kann das Verhältnis nach Gay-Lussac nachgebildet werden. ber das Newtonsche Abkühlungsgesetz kann jedoch auch eine Quantifizierung der Temperaturverlaufs erfolgen. Hierbei stehen der Lehrkraft verschiedene Möglichkeiten der Umsetzung offen, ebenso wie die Tiefe der Mathematisierung und damit Binnendifferenzierung. Ein Transfer auf Phänomene in der Natur, welche ebenso meist isobar verlaufen, bietet sich hierbei besonders an.

5.3 Isochorer Prozess

Der isochore Prozess ist der letzte noch verbleibende Prozess auf dem Weg zum idealen Gasgesetz, in welchem eine einzelne Zustandsgröße, hier das Volumen, konstant gehalten wird. Neben der Realisierung mit dem Prototyp 3 wurde in einem Nebenexperiment hierfür ein weit verbreitetes Lehrmittel nachempfunden, womit der Prozess ebenfalls gezeigt werden könnte. Konstruktion, Verwendung und Diskussion dieses Versuchsaufbaus sind im [Anhang](#) nachzulesen. An dieser Stelle soll jedoch die Realisierung mit dem aktuellen Prototyp 3 vorgestellt werden.

5.3.1 Didaktische Kernpunkte

Hinweise:

- Kein Vorwissen zum idealen Gasgesetz nötig
- Die Durchführung des Experimentes sollte möglichst von den Lernenden selbst oder unter ihrer Beteiligung erfolgen
- Der Begriff isochor sollte nicht zu früh genannt werden, um die Lernenden kognitiv nicht zu überlasten
- Die Visualisierung sollte so einfach und schülernah wie möglich gehalten werden

Mögliche Ziele dieses Experiments:

- Formulieren von Hypothesen, Aufstellen von Vermutungen zum Verlauf
- Bei Schülerbeteiligung: Förderung von Experimentierkompetenz
- Überprüfen der Ergebnisse und Vergleich mit dem angenommenen Modell
- Mathematisierung des Verlaufs
- Übertragung auf Beispiele in Technik, Natur und Alltag

Die Lernziele sind hierbei von der jeweiligen Schwerpunktsetzung abhängig, ebenso welche Kompetenzen konkret gefördert werden.

5.3.2 Thermodynamischer Hintergrund

Die isochore Zustandsänderung nach Amontons, wie sie in Formel (4.5) wiedergegeben ist, beschreibt eine Verhältnismäßigkeit des idealen Gasgesetzes. Bei Messung und Auftragen des Drucks und der Temperatur des Prozesses sollte gemäß der Definition eine lineare Funktion zutage treten mit einer konstanten Steigung:

$$\frac{p}{T} = \text{const.}$$

Ausgehend vom Vereinfachten ersten Hauptsatz der Thermodynamik nach Formel (4.2) ergibt sich durch Eliminieren der Verschiebeenergie ΔW :

$$\Delta U = \Delta Q$$

Hieraus können zwei Szenarien abgeleitet werden:

- Erhöhung der inneren Energie ΔU durch Zufuhr von Wärme ΔQ
- Absenkung der inneren Energie ΔU durch Abfuhr von Wärme ΔQ

Da die innere Energie wie die Wärme von der Temperatur abhängt, folgt aus ihrer Erhöhung beziehungsweise Abnahme auch die Zu- beziehungsweise Abnahme der Temperatur, falls das Volumen konstant ist.

Im Folgenden soll dem zweiten Szenario nachgegangen werden.

5.3.3 Durchführung

Unter Verwendung einer Vorrichtung, welche ein gleichbleibendes Volumen garantiert, wie beispielsweise eine handelsübliche Kartuschenpresse, kann hypothetisch über die folgende Vorgehensweise ein isochorer Prozess realisiert werden:

1. Formulieren von Hypothesen des Verlaufs der Temperatur bei konstantem Druck
2. Starten der Messung über PhyPiDAQ, Notieren des Anfangsvolumens
3. Schnelle Kompression des Gases durch Verfahren des Kartuschenpressen-Stempels, bis eine deutliche Temperaturänderung sichtbar wird, Notieren des Volumens direkt nach Kompression
4. Betrachten des Verlaufs der Temperatur und des Druckes
5. Wenn Temperatur bei Raumtemperatur angekommen ist, Notieren des Volumens, Entlasten des Kolbens und Speichern/Exportieren der Messwerte
6. Aus Gründen der Reliabilität und Reproduzierbarkeit der Messwerte sind mehrere Messungen empfehlenswert
7. Notieren des Atmosphärendrucks, welcher zum Zeitpunkt der Messung vorliegt (für die Berechnungen)
8. Auswerten der Daten und Visualisieren als T/p-Schaubild
9. Diskutieren der Messergebnisse und -abweichungen
10. Mathematisieren des Zusammenhangs

Da handelsübliche Kartuschenpressen einen geringeren Verfahrweg haben als die Gesamtlänge des Prototyps, muss bei dem Zusammenfügen bereits der Stempel geringfügig eingedrückt werden, wie in folgender linken Abbildung ersichtlich.

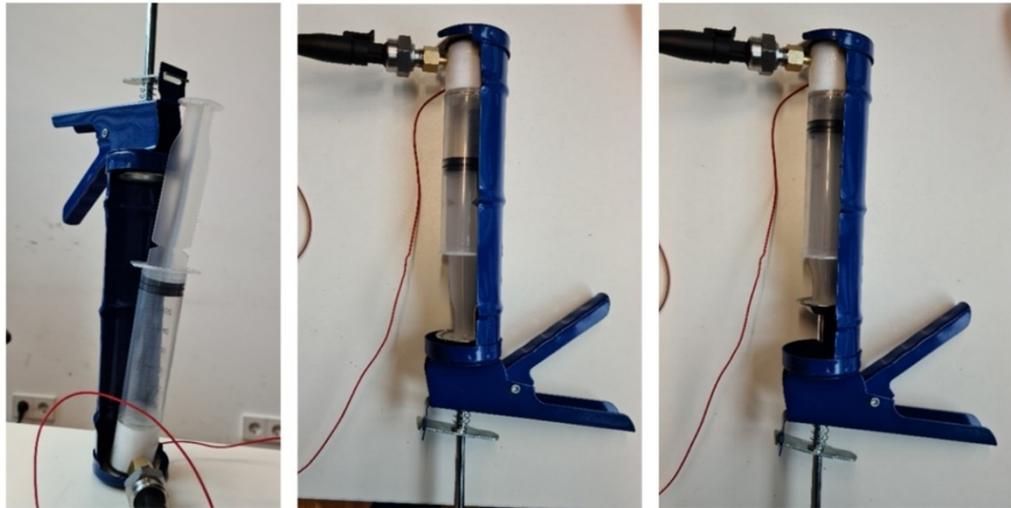


Abbildung 21: Aufbau für einen isochoren Prozess

Ist der Prototyp eingelegt (mittleres Bild) und die Messung gestartet, kann mit dem Komprimieren begonnen werden. Da dies in Schüben durch das Betätigen des Hebels geschieht, ist auf dem Echtzeit-Schaubild eine sprunghafte Erhöhung des Druckes und der Temperatur wahrzunehmen. Ist die Kompression mit der Hand schnell auf maximal erreichbaren Druck erfolgt (rechtes, obiges Bild), kann ein Abfall der Temperatur und des Druckes beobachtet werden, wie in folgender Abbildung ersichtlich.

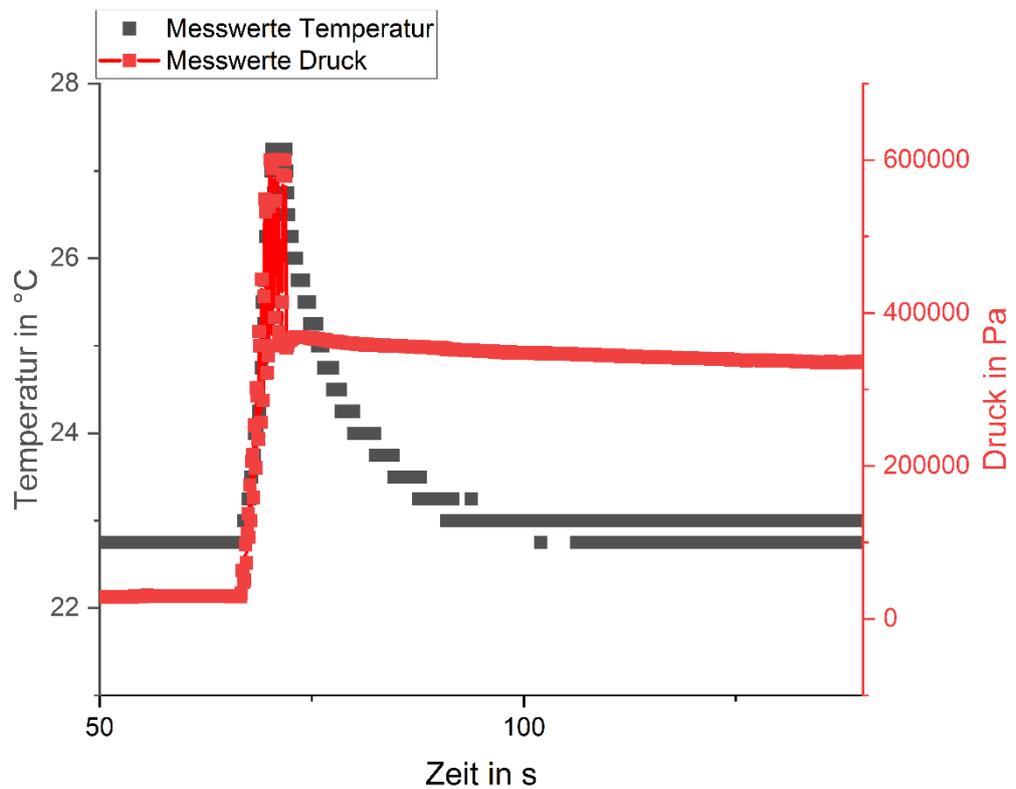


Abbildung 22: Schaubild einer gesamten Messung über der Zeit, ohne Fehlerangaben

Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Messpunkte des Drucksensors mit einer Linie verbunden und Fehlerbalken unterdrückt. Die Druckspitzen waren durch die Mechanik der vorhandenen Kartuschenpresse bedingt, da diese nach Kompression einrasten musste. Hierdurch, und durch den stattgefundenen Luftverlust von 3 ml, ist der auszuwertende Bereich einzugrenzen und die Fehler anzupassen. Wird der Druck über die Temperatur im relevanten Bereich dargestellt und eine lineare Kurvenanpassung vorgenommen, ergibt sich folgendes Schaubild.

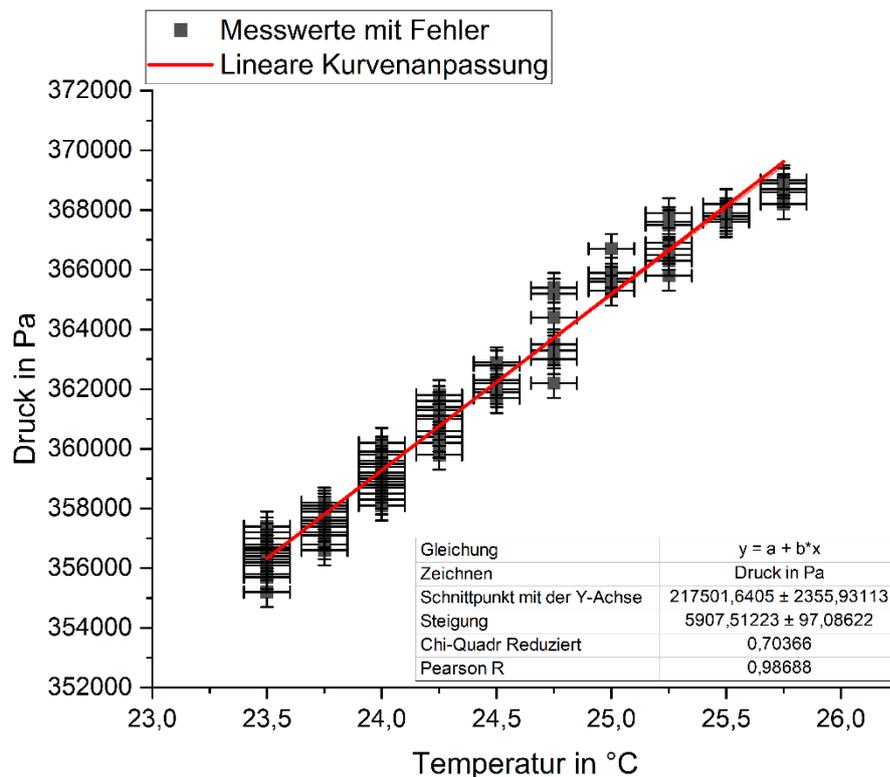


Abbildung 23: Anpassung einer linearen Funktion an den relevanten Messbereich

Bei einer isochoren Zustandsänderung (4.5) sollte eine lineare Funktion zutage treten mit der folgenden Steigung:

$$\frac{p}{T} = \text{const.}$$

Wird über das ideale Gasgesetz die Konstante berechnet, ergibt sich – im Gegensatz zur gemessenen Steigung – ein deutlich kleinerer Wert:

$$\text{const.} = \frac{m \cdot R}{V} = \frac{7,66 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot 287,06 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}}{10,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 2055,03 \frac{\text{Pa}}{\text{K}}$$

Die deutlich größere Steigung der linearen Anpassung, welche aus einem überproportionalen Druckabfall folgt, ist auf den Luftverlust der Spritze zurückzuführen.

Bei Anpassung der Fehler auf $\Delta p = 500 \text{ Pa}$ und $\Delta T = 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ ergibt sich dennoch ein hinreichend genauer linearer Zusammenhang mit einem $\text{Chi}^2/\text{Freiheitsgrad } n$ von 0,7.

Um eine solche Verfälschung der Messwerte durch Luftverlust zu vermeiden, wäre neben einer weiteren Modifikation des Prototyps das Einstellen eines geringeren Druckes zielführend.

5.3.4 Konklusion

Mit diesem Experiment kann die letzte der drei Abhängigkeiten, welche zum idealen Gasgesetz führen, dargestellt werden. Durch die Druckspitzen und den Luftverlust ist zwar der auszuwertende Bereich einzugrenzen und die Fehler anzupassen, jedoch kann eine nahezu konstante Verhältnismäßigkeit reproduziert werden. Mit anderen Kartuschenpressen können die beobachteten Druckspitzen wahrscheinlich vermieden werden. Das Durchführen des Experimentes von oder mit Beteiligung der Lernenden fördert das aktive Rezipieren unter anderem durch das eigene „Fühlen“ des Druckes, welcher für eine Temperaturerhöhung notwendig ist. Durch die Möglichkeit, den aufgebauten Druck durch Betätigen eines Löse-Hebels schlagartig abzubauen, ist mit diesem Versuchsaufbau ebenso eine Quasi-adiabatische Expansion und die darauffolgende Abkühlung sehr gut darstellbar. Da isochore Zustandsänderungen besonders im Alltag und in der Technik wiederzufinden sind, bietet sich ein Transfer hierauf an.

5.4 Adiabatische beziehungsweise isentrope Zustandsänderung

Mit diesem Experiment lässt sich eine quasi-isentrope beziehungsweise quasi-adiabatische Zustandsänderung anhand schwerer Gewichte, hoher Drücke und sichtbaren Temperaturerhöhungen veranschaulichen. Die Lernenden erhalten die Möglichkeit des Einblicks in das Wesen der Naturwissenschaft: Durch das Experimentieren und Betrachten des Verlaufs der Temperatur und des Drucks stellen sie Vermutungen zu der wechselseitigen Beziehung auf. Durch den Vergleich mit dem theoretisch erwarteten Verlauf stellen sie Vermutungen zu der Herkunft der Abweichungen auf, welche im Folgenden mathematisch fortgeführt werden können. Das Ausmaß der Diskussion der systematischen und statistischen Fehler ist hierbei selbstverständlich der Lehrkraft überlassen, ebenso die Gestaltungsfreiheit des gesamten Lernsettings (darbietend, genetisch, problemorientiert etc.).

5.4.1 Didaktische Kernpunkte

Hinweise:

- Das Vorwissen der Lernenden zum idealen Gasgesetz sollte durch die vorangegangenen Experimente vorhanden sein
- Der Begriff „isentrop“ oder „adiabat“ sollte höchstens zum Schluss erwähnt werden, um die Lernenden kognitiv nicht zu überfordern

Mögliche Ziele dieses Experiments:

- Formulieren von Vermutungen zum erwarteten Verlauf der Temperatur
 - Annehmen eines Modells und Berechnen der erwarteten Temperatur nach der Kompression
 - Erkennen eines Zusammenhangs zwischen Volumenreduktion, Druckerhöhung und Temperaturerhöhung
 - Analyse der Ergebnisse und Vergleich mit dem angenommenen Modell
 - Diskussion der Fehlerherkunft
 - Für Fortgeschrittene: Überarbeiten des Modells und Erklären des Verlaufs anhand des neuen Modells
 - Erkennen eines Zusammenhangs zu Vorkommnissen in Technik, Natur oder Alltag
-

5.4.2 Thermodynamischer Hintergrund

Die isentrope Zustandsänderung stellt ein idealisiertes Modell dar, nach welchem alle Vorgänge reversibel und adiabatisch ablaufen. Solch eine Zustandsänderung zeichnet aus, dass sie zu jeder Zeit Gleichgewichtszustände durchläuft (unendlich langsam stattfindet) und ideal isoliert von der Umgebung ist. Dass Prozesse dieser Art, obwohl sie in der Natur nicht vorkommen, näherungsweise nachgebildet werden können, ist eine gute Isolation von der Umgebung und/oder eine sehr schnelle Prozessdurchführung vonnöten (Reduktion der Wärmeabgabe an die Umgebung). Die in den Formeln (4.7) - (4.11) und (4.13) erwähnten Zusammenhänge beschreiben diese Zustandsänderung mathematisch und sollen an dieser Stelle nicht nochmals wiedergegeben werden. Eine Anwendung der Zusammenhänge auf das Experiment erfolgt im jeweiligen Unterkapitel.

5.4.3 Durchführung

Für die Durchführung werden außer dem Prototyp 3 folgende **Hilfsmittel** benötigt:

- Raspberry Pi inklusive Sensoren/Elektrik und Programm PhyPiDAQ (inklusive vorgefertigter Konfigurationsdatei)
- Schweres Gewicht mit einer Masse von ca. 20 kg
- Ein Aufbau, mit welchem das Gewicht sicher und stabil auf dem Kolbenpleuel platziert werden kann. Beispielsweise mithilfe eines Stativfußes (z.B. von Phywe), einem Gefäß und Stäben wie in Abbildung 19 dargestellt.

Vorgang:

1. Starten der Messung über PhyPiDAQ
 2. Belasten des Kolbens mit dem Gewicht und Beobachten des Druckes und der Temperatur, möglichst schnell und ohne Druckspitze (Achtung: Verletzungsgefahr!)
 3. Entlasten des Kolbens, sobald die Temperatur sein Maximum erreicht hat. Wenn mit dem Entlasten gewartet wird, bis die Temperatur auf Umgebungstemperatur abgeklungen ist, kann diese Messung ebenfalls für eine anschließende Thematisierung des isobaren Prozesses genutzt werden gemäß [Kapitel 5.3](#)
 4. Zur Erhöhung der Reliabilität ist es empfehlenswert, die Schritte drei bis vier Mal zu wiederholen, um eine Fehlerbetrachtung durchführen zu können
 5. Auswerten der Daten und Visualisieren als T/t- und T/p-Schaubild
-

5.4.4 Aufnahme und Analyse der Messungen

Für die Präsentation dieses Versuchs wurde die Belastung mit dem Gewicht sieben Mal wiederholt, um eine aussagekräftige Fehleranalyse durchführen zu können. Während der einzelnen Messungen lässt sich bereits in Echtzeit ein deutlicher Temperaturanstieg mit der Druckerhöhung erkennen, wie anhand einer Messung in folgender Abbildung veranschaulicht.

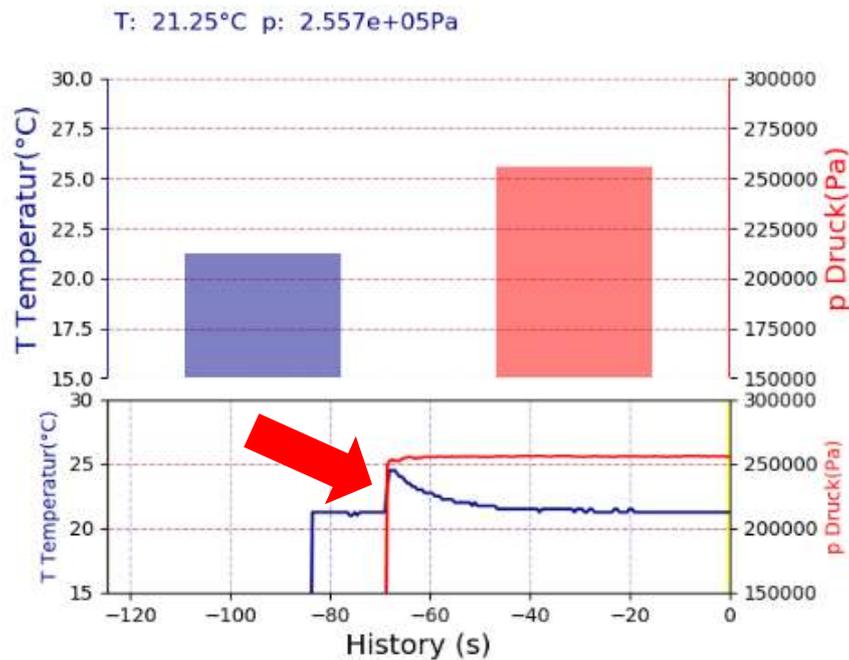


Abbildung 24: Ausschnitt aus der Messung einer isentropen/adiabaten Zustandsänderung

Werden die Messwerte nach den Messungen in ein Datenvisualisierungsprogramm importiert und vergrößert in einem T/t-Diagramm aufgetragen, lässt sich der leicht verzögerte Temperaturanstieg durch die Druckerhöhung erkennen:

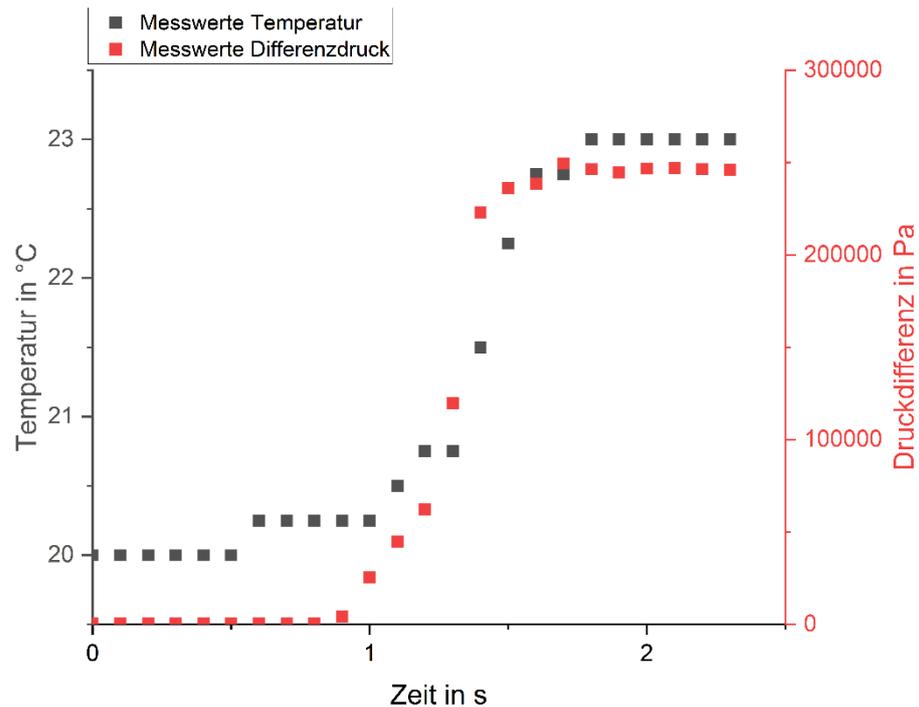


Abbildung 25: Visualisierte Messwerte der isentropen/adiabaten Zustandsänderung
(Messung von 200,0-202,3 s)

Bei allen Einzelversuchen zeigte sich ein ähnlicher wie der folgende Verlauf. Hierbei ist anzumerken, dass die einzelnen Wertepaare der Messreihen nicht zu Mittelwerten zusammengefasst werden konnten, da sie alle unterschiedliche Wertepaarungen aufwiesen. Wird nun bei Betrachtung der Temperatur von einem isentropen Modell ausgegangen, kann dieses durch den Zusammenhang aus der Formel (4.8) mit $\kappa = 1,4$ (trockene Luft als Medium) beschrieben werden:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1-\kappa}{\kappa}}$$

Vom Anfangsdruck und der Anfangstemperatur aus beginnend (bei Annahme hinreichender Genauigkeit der anfänglichen Messwerte) ergibt sich der folgende theoretische Verlauf:

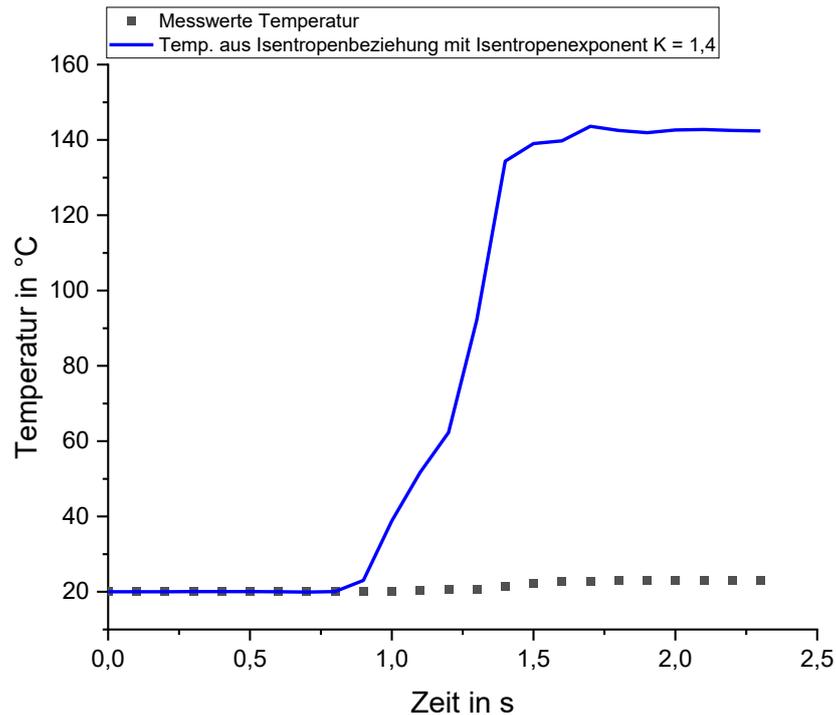


Abbildung 26: Vergleich der Messwerte einer Einzelmessung mit dem theoretischen Verlauf einer Ideal-isentropen Zustandsänderung mit Isentropen-Exponent $\kappa=1,4$

Hieraus ist zu erkennen, dass die Temperatur theoretisch deutlich höher ansteigen sollte, als es in den Messungen der Fall ist. Hierbei wurde auf die Angabe von Fehlern zwecks der Übersichtlichkeit verzichtet.

Zur Verdeutlichung kann die theoretische Endtemperatur ebenfalls berechnet werden: Mit einem üblichen Ausgangsdruck von $p_1 = 1,02 \cdot 10^5 Pa$, einer Ausgangstemperatur von $T_1 = 293,15 K$ und einem maximalen Absolutdruck von $p_2 = 3,62 \cdot 10^5 Pa$ ergibt sich beispielsweise eine theoretische Temperatur von

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1-\kappa}{\kappa}} = 293,15 K * \left(\frac{1,02}{3,62} \right)^{\frac{1-1,4}{1,4}} = 420,98 K = 147,83 \text{ } ^\circ C.$$

Dies entspricht einer Temperaturdifferenz von $127,83 \text{ } ^\circ C$.

Die maximale, **gemessene** Temperaturdifferenz beträgt jedoch lediglich $3 \text{ } ^\circ C$.

Im Folgenden sollen die Ursachen der Messabweichungen diskutiert und das ideale Modell, welches bisher angenommen wurde, durch ein realeres Modell ersetzt werden.

5.4.5 Fehleranalyse und Modellanpassung

Analyse der Rahmenbedingungen

Die bisherigen, idealisierenden Modellannahmen sind folgende:

- Ideales Gas
- Konstante Wärmekapazitäten
- Vernachlässigung der kinetischen und potentiellen Energien
- Isentrope Zustandsänderungen (adiabatisch und reversibel)
- Vernachlässigung des Einflusses eines eventuellen Massenstroms (Luftentweichen)

Im Allgemeinen kann das verwendete Arbeitsgas (Luft) hinreichend genau als ideales Gas aufgefasst (Tipler et al., 2019, S. 561) und durch die geringe Dichte und das abgeschlossene System weiterhin die kinetische und potentielle Energie der Gasteilchen vernachlässigt werden. Die Wärmekapazitäten können ebenso aufgrund der geringen Druck- und Temperaturänderungen weiterhin als konstant aufgefasst werden. Der eventuelle Massenstrom sollte in dem auftretenden Ausmaß hauptsächlich einen Einfluss auf das Volumen haben, was jedoch bereits als „Fehler“/Messungengenauigkeit berücksichtigt ist. Die Annahme, welche hierbei fallen gelassen werden muss, ist die isentrope. Jeder reale Prozess erzeugt Entropie, vor allem bei einer Abkühlung ist die isentrope Annahme unverhältnismäßig (Demtröder, 2018, S. 302).

Da eine im Gegensatz zum (idealisiert) berechneten Wert eine deutlich geringere Temperatur gemessen wurde, erscheint es sinnvoll, als nächstes den Prozessraum näher zu betrachten. Das Gasvolumen ist im Gegensatz zu beispielsweise dem analogen Experiment „Mariotte’sche Flasche“ deutlich geringer, somit besteht eine größere Berührungsfläche zur Außenwand proportional zum Volumen, welche Wärme abführen kann. Da weiterhin die Wärmeleitung von den Eigenschaften der Wände/Bauteile abhängt, sollen diese ebenfalls betrachtet werden. Die mit dem Arbeitsgas unmittelbar in Kontakt stehenden Bauteile sind folgende:

- Teflon (Sockel)
- PP¹⁵ (Spritze)
- Messing (Schlauchtülle Drucksensor)
- Zinn (Thermoelement-Messspitze)

¹⁵ PP: Polypropylen - Kunststoff

Während Teflon mit dem größten Volumen eine vergleichbar hohe Wärmekapazität wie Luft hat, weist das Messing der Drucksensor-Schlauchtülle und das Zinn des Thermoelements mit einem kleinen Volumen eine geringe Wärmekapazität auf. Dementsprechend leiten das Teflon und das PP im Gegensatz zum Zinn und Messing schlecht die entstehende Wärme und sollen deshalb vorerst nicht betrachtet werden. Eine Ausdifferenzierung erfolgt im [Anhang](#). Trotz, dass die Zustandsänderung rapide erfolgt ist, scheint es Verluste durch Wärmeleitung zu geben. Diese sollen in einer neuen Modellannahme berücksichtigt werden.

Annahme eines neuen Modells

Der vorhandene Prozess soll statt als isentrope nun als polytrope Zustandsänderung (siehe Kapitel 4.1.5) betrachtet werden. Hierzu sollen die Messwerte in ein Datenanalyse-Programm eingegeben werden und eine Modellanpassung über den polytropen Zusammenhang (Formel (4.15) stattfinden:

Wird $T^n * p^{1-n} = const.$ nach T umgestellt, ergibt sich die Funktion $T = \sqrt[n]{\frac{const}{p^{1-n}}}$,

mit welcher eine Modellanpassung über die Bestimmung des Parameters n und der Konstante $const$ möglich ist. Mit den jeweiligen aus einer Fehlerrechnung stammenden statistischen und systematischen Fehlern ergibt sich das folgende Schaubild.

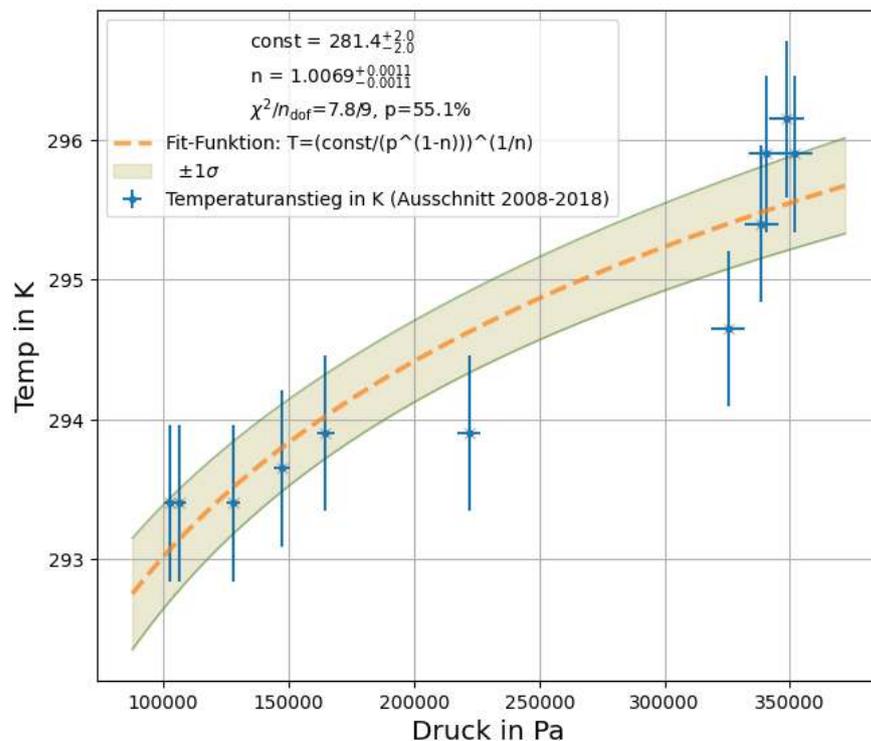


Abbildung 27: Messwerte mit Kurvenanpassung des polytropen Modells mit angepassten Fehlern

Das Verhalten der Messwerte, welche bei allen der sieben Messungen mit geringer Abweichung dasselbe ist, sollte theoretisch dem polytropen Modell entsprechen. Über den Verlauf lässt sich ein Rückschluss auf das Verhalten der Materialien des Prototypen im Allgemeinen und auf das Verhalten des Thermoelements im Speziellen ziehen: Auf eine abrupte Temperaturerhöhung reagiert das Thermoelement zunächst mit einer geringen Verzögerung/Latenz. Neben der Erwärmung des Luftvolumens und der Wände/Bauteile verzögert die Erwärmung der Messspitze des Thermoelements ebenso die Messung des Temperaturanstiegs. Während im weiteren Verlauf das Thermoelement der Temperaturerhöhung folgt, kühlt sich die Luft wieder durch Wärmeübertragung ab. Diese Umstände können zu dem vorgefundenen Verhalten geführt haben.

Die vom Datenanalyse-Programm ausgegebenen Werte können ebenso analytisch berechnet und nachvollzogen werden. An dieser Stelle soll auf den entsprechenden [Anhang](#) verwiesen werden.

5.4.6 Konklusion

Dieses Experiment ermöglicht den Lernenden einen Einblick in das Wesen der Naturwissenschaften: Aus anfänglichen Hypothesen folgt ein Modell, dessen Wahrheitsgehalt durch Experimente falsifiziert werden muss. Falls das Modell den gemessenen Verlauf nicht hinreichend genau beschreibt, muss es durch eine anschließende Überprüfung und Eingrenzung der Annahmen angepasst werden, bis es die Messwerte hinreichend genau beschreibt. Hierbei bieten Fehler vielmehr das Potential, die Lernenden kognitiv zu aktivieren und in das Wesen der physikalischen Datenanalyse einzuführen, als dass sie als ein Indikator für eine eventuelle Schwäche des Experiments aufgefasst werden sollten. Da die hier gemessenen Wertepaare dem Modell lediglich beim Anfangs- und beim Enddruck entsprechen und für die Genauigkeit der Zwischenwerte multiple Einflussfaktoren verantwortlich sein können, ist für die schulische Anwendung im Sinne einer didaktischen Reduktion empfehlenswert, lediglich diese beiden Punkte vor dem Hintergrund des Modells zu betrachten. Da der isentrope beziehungsweise adiabate Prozess nicht im Lehrplan vermerkt und vom Schwierigkeitsgrad für die technische Oberschule zu komplex ist, ist dieser höchstens als Exkurs in stark vereinfachter Form unterrichtbar.

5.5 Quasi-Adiabatische Expansion und isobare Erwärmung

Dieses Experiment kann beispielsweise im Anschluss an den isobaren Prozess oder gesondert erfolgen. Der wesentliche Effekt dieses Experiments besteht in der Veranschaulichung, dass ebenso wie die Kompression eines Gases die Temperatur erhöht, die Dekompression sie abfallen lässt. Mit einem geeigneten Aufbau kann dieses Experiment auch mit höheren Massen wie der Masse eines/einer Lernenden durchgeführt werden, da die Höhe der Masse die Höhe der Temperaturabsenkung bedingt. Eine quantitative Auswertung ist hierbei nicht angedacht, jedoch können Einflussgrößen auf den Verlauf der Temperatur diskutiert werden, basierend auf dem Vorwissen zur isobaren und adiabatischen Zustandsänderung. Da sich bei diesem Prozess alle drei bisher erwähnten Zustandsgrößen (Druck, Volumen und Temperatur) ändern, ist auch eine Quantifizierung und Anwendung des idealen Gasgesetzes möglich.

5.5.1 Didaktische Kernpunkte

Mögliche Ziele dieses Experiments:

- Formulieren von Hypothesen, Aufstellen von Vermutungen zum Verlauf, ausgehend vom ersten Hauptsatz der Thermodynamik für geschlossene Systeme
- Erkennen eines Zusammenhangs zwischen Expansion, Druck- und Temperaturabfall
- Auswertung und Visualisierung der Daten
- Überprüfen der Ergebnisse und Vergleich mit dem angenommenen Modell
- Übertragung auf Beispiele in Technik, Natur oder Alltag

Die jeweilige Auswahl und Tiefe der jeweiligen Lernziele sind abhängig von der Schwerpunktsetzung der jeweiligen Unterrichtseinheit. Es bietet sich an, durch die Thematisierung der Abkühlung das Prinzip der Kältemaschine (Kühlschrank) und das Themengebiet der Phasenübergänge zu motivieren. Durch eine rasche Expansion kann die kurzzeitige Bildung von Nebel in dem Prozessraum beobachtet werden, welcher sich aus dem in der Luft enthaltenem Wasser bildet. Dieser Vorgang kann verstärkt werden, indem Atemluft in den Prozessraum gepustet wird.

5.5.2 Thermodynamischer Hintergrund

Die Quasi-adiabatische Zustandsänderung lässt sich aus dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik für geschlossene Systeme (4.2) herleiten:

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W \rightarrow \Delta U = \Delta W$$

Hieraus können zwei Szenarien abgeleitet werden:

- Erhöhung der inneren Energie ΔU durch Verrichten von Arbeit ΔW am System
- Absenkung der inneren Energie ΔU durch Verrichten von Arbeit ΔW vom System

Das zweite Verfahren soll im Folgenden durchgeführt werden, da die erste Variante bereits im letzten Kapitel thematisiert wurde.

Die isobare Erwärmung stellt das Gegenteil der in 5.2 dargestellten isobaren Abkühlung dar und verdeutlicht, dass die Zusammenhänge wie bei der quasi-adiabatischen Zustandsänderung auch bei einer Umkehrung des Prozesses gültig sind:

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W \rightarrow \Delta U = \Delta Q$$

5.5.3 Durchführung

Für die Durchführung werden außer dem Prototyp 3 folgende **Hilfsmittel** benötigt:

- Raspberry Pi inklusive Sensoren/Elektrik und Programm PhyPiDAQ (inklusive vorgefertigter Konfigurationsdatei)
- Schweres Gewicht mit einer Masse von ca. 20 kg oder schwerer
- Ein Aufbau, mit welchem das Gewicht sicher und stabil auf dem Kolbenpleuel platziert werden kann, beispielsweise mithilfe eines Stativfußes (z.B. von Phywe), einem Gefäß und Stäben wie in Abbildung 19 dargestellt.

Vorgang:

1. Belasten des Kolbens mit dem Gewicht
2. Starten der Messung über PhyPiDAQ, Notieren des Volumens
3. Schnelles Entlasten des Kolbens, Notieren des Volumens nach Expansion
4. Betrachten des Verlaufs der Temperatur und des Drucks
5. Wenn Temperatur bei Raumtemperatur angekommen ist: Beenden der Messung und Speichern/Exportieren der Messwerte
6. Notieren des Atmosphärendrucks, welcher zum Zeitpunkt der Messung vorliegt (für die Berechnungen)
7. Auswerten der Daten und Visualisieren als T/t-Schaubild

Wenn davon ausgegangen wird, dass in der kurzen Dekompressionszeit kein signifikanter Wärmeübertrag an die Außenwände und Bauteile erfolgt, dann muss die gesamte in der Kompression der Luft gespeicherte innere Energie ΔU in Arbeit ΔW übergehen. Da das Gas am System Arbeit verrichtet, ist das Vorzeichen von ΔW negativ, weshalb auch die innere Energie negativ sein muss. Die innere Energie stellt beim idealen Gas den

Zusammenhang der Temperatur mit der Wärmekapazität $\Delta U = C\Delta T$ dar. Da die Wärmekapazität keinen negativen Wert annehmen kann, muss folglich die Temperatur fallen.

Um die Wärmeverluste durch Wärmeleitung während der Expansionsphase möglichst gering zu halten, ist auf eine zügige Dekompression zu achten. Wurde das Gewicht entfernt, ist zu erkennen, dass die Temperatur mit geringer Latenz rasch abfällt und sich gegebenenfalls kurzzeitig Nebel im Prozessraum bildet. Werden die Messwerte im Folgenden in ein Daten-Analyse-Programm eingegeben und über die Zeit dargestellt, sollte sich ein ähnliches wie das folgende Bild ergeben:

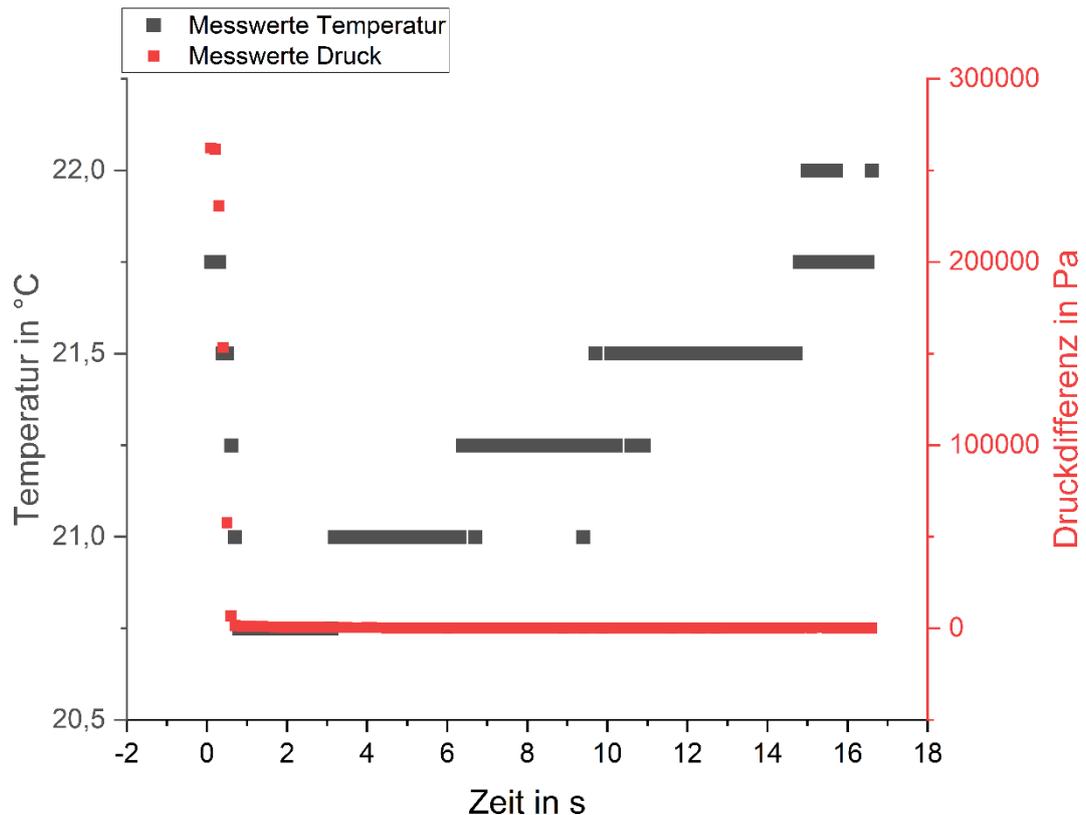


Abbildung 28: Messwerte des quasi-adiabatischen und isobaren Prozesses ohne Fehleranpassung

Ausgehend von einem Differenzdruck von $p_0 = 2,62 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ auf $p_1 = 1000 \text{ Pa}$ hat sich das Gas expandiert, sodass es sich von knapp $T_0 = 22 \text{ °C}$ auf $T_1 = 20,75 \text{ °C}$ abgekühlt hat. Der Effekt würde noch höher sein, wenn zum einen eine höhere Druckdifferenz überwunden und zum anderen schneller dekomprimiert würde, wenn möglich auch in den Unterdruck. Technisch setzt die Temperaturmessung der Effektstärke ebenfalls Grenzen (Latenz aufgrund der Wärmekapazität der Thermoelement-Messspitze).

Im Anschluss kann die Erwärmung des Gases mit den Lernenden thematisiert werden, was als ein Transfer des idealerweise bereits gelernten [isobaren Prozesses](#) auf eine Erwärmung darstellt. Wird über ein Datenanalyse-Programm auf die Messwerte eine exponentielle Funktion angepasst, ergibt sich mit einem Fehler auf die Temperatur von $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ das folgende Schaubild.

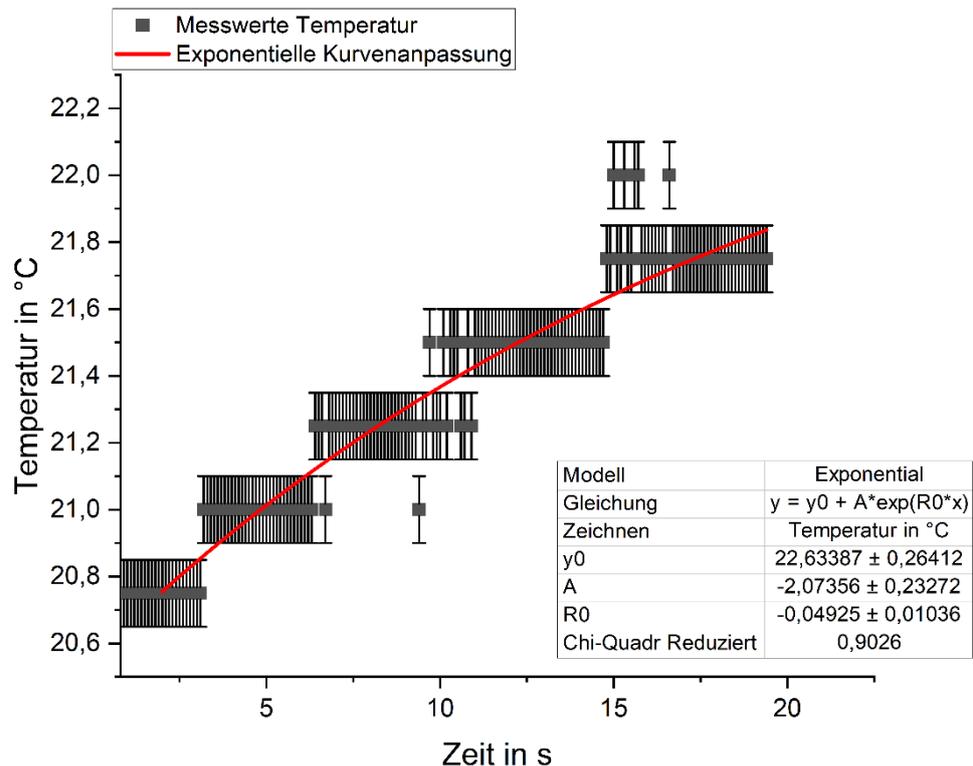


Abbildung 29: Messwerte und exponentielle Kurvenanpassung des isobaren Prozesses mit Fehleranpassung

Die einzelnen Messpunkte, welche nicht auf der Kurve liegen, sind auf Fehlmessungen des Thermoelementes zurückzuführen. Der Fehler ist beim Thermoelement mit $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ angegeben, weshalb Fehlmessungen vorkommen können, obwohl die Temperaturmessung des Thermoelementes in der Regel präziser ist. Der Fehler von $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ wurde entsprechend gewählt, um eine bestmögliche Passung zur Funktion ($\text{Chi}^2/\text{Freiheitsgrad } n$) zu erreichen. Die Kurvenanpassung des relevanten Bereichs zeigt hinreichend genau den Verlauf des isobaren Temperatursausgleichs.

5.5.4 Konklusion

Mit diesem Experiment, welches aus der quasi-adiabatischen Expansion (alle drei Zustandsgrößen p , V und T ändern sich) und der isobaren Erwärmung zusammengesetzt

ist, lassen sich verschiedene Aspekte der Thermodynamik zeigen. Es wird empfohlen, das Experiment nach dem isobaren und dem adiabatischen Prozess in den Unterrichtsverlauf einzureihen, da einzelne Wissens Elemente aus den beiden Experimenten nochmals aufgegriffen werden und weiter vertieft werden können. Da in der Natur viele Prozesse isobarer Natur sind, lässt sich ein Transfer auf den vom Bildungsplan vorgegebenen Schwerpunkt Klimaphysik gestalten. Durch die Anwendung des vereinfachten ersten Hauptsatzes der Thermodynamik wird zudem eine gedankliche Verbindung zum Energieerhaltungssatz der Mechanik hergestellt.

6 Erstellung von Anleitungen, Screencasts und Handouts für Lehrkräfte

6.1 Ziel und Vorgabe der Gestaltung

Um eine Adaption dieses Konzeptes im Unterricht zu erleichtern, sollen ausgehend von den Erkenntnissen und Erfahrungen dieser Arbeit und weiterer Quellen Leitfäden, Anleitungen und Erklärvideos für Lehrkräfte erstellt werden. Bei ihrer Erstellung ist auf folgende Punkte zu achten:

- Verständlichkeit für Personen, welchen das Thema weitgehend fremd ist
- Schlüssigkeit und Logik
- Reduzieren überflüssiger Hinweise und Verweis auf weiterführende Quellen
- Praxisnähe und Anwendungsbezogenheit

Zielgruppe sind Lehrkräfte, welche kaum bis keine Vorkenntnisse mit dem Themengebiet des „Physical Computing“ besitzen.

6.2 Konstruktionsanleitung

Sinn und Ziel der Anleitung in Anhang 05 – Konstruktion und Fertigung des Prototyps 3 soll sein, dass die Konstruktion des Prototyps nachempfunden und gegebenenfalls hierauf aufbauend verbessert werden kann.

Die Anleitung soll aus folgenden Elementen aufgebaut sein:

- Grundlegende Hinweise zur Konstruktion
- Werkzeuge
- Materialien und mögliche Beschaffungsorte
- Zeichnungen und Abbildungen
- Fertigungsanleitung

6.3 Vorbereitung und Durchführung von Experimenten

Sinn und Ziel dieses Leitfadens in Anhang 11 – Leitfaden für die Vorbereitung und Durchführung von Experimenten mit PhyPiDAQ soll sein, dass Lehrkräften ein einfacher Einstieg in die Arbeit mit diesem System geboten wird, um damit zeitsparend, effizient und zielsicher in der Unterrichtsvorbereitung und -durchführung arbeiten zu können.

Der Leitfaden soll dabei aus folgenden Elementen bestehen:

- Hinweise zum Einrichten des Systems
 - Arbeit mit dem Betriebssystem Raspbian
 - Ordnerstruktur und Projektorganisation
-

- Verkabeln der elektronischen Bauteile
- Implementierung von elektronischen Bauteilen im System
- Einbindung elektronischer Bauteile in PhyPiDAQ
- Kalibration von Sensoren
- Steuern des Messvorgangs
- Tipps zur Durchführung von Experimenten

6.4 Erstellung von Erklärvideos für Lehrkräfte

Die Erstellung von Erklärvideos soll einen weiteren Kanal der Vermittlung von Anwendungswissen und -kompetenzen darstellen. Hierbei sollen einzelne „Workflows“ der Arbeit mit PhyPiDAQ und dem Raspberry Pi, sowie Tipps zur experimentellen Einbindung gezeigt werden, um den Einstieg hierin zu vereinfachen. Durch die Möglichkeit, die Videos an beliebiger Stelle stoppen zu können, soll eine zeitgleiche Umsetzung gemäß dem Prinzip „Learning by doing“ erfolgen. Die Videos werden auf einer öffentlich zugänglichen Plattform angeboten und bei Bedarf erweitert.

7 Evaluation des Konzeptes

Ursprünglich war geplant, das vorgestellte Konzept im Rahmen eines Workshops für Lehrkräfte vorzustellen und die geäußerten Eindrücke und Meinungen in diese Evaluation einfließen zu lassen. Da ein solcher Workshop nicht mehr rechtzeitig zustande kam, wurde das Konzept stattdessen Ausbilderinnen und Ausbildern von Lehrkräften am KIT und Lehramtskandidaten vorgestellt und die geäußerten Eindrücke und Meinungen in diese Evaluation aufgenommen. Eine weitere, fortlaufende Evaluation soll über die Rückmeldung von Lehrkräften erfolgen, welchen der Zugriff dieses Konzepts über github.com und seine Verwendung offen steht.

Aus der Diskussion der Vorstellung dieses Konzeptes am KIT gingen folgende Punkte hervor:

- Die experimentelle Anwendung der Thermodynamik gestalte sich komplexer als dies von theoretischer Seite her scheint und bedarf viel Feingefühl und Empirie der ausführenden Person
- Für die Anwendung des Konzeptes sollte die Schwerpunktsetzung deutlich hervorgehen: Ob die Messtechnik Lerngegenstand oder lediglich Werkzeug sei
- Positiv bewertet wurde der auf das Wesentliche beschränkte Aufbau, welcher keiner oder nur wenig kognitiver Anstrengung zur Nachvollziehung bedürfe
- Die instantane Veränderung und Visualisierung der Messgrößen (Temperatur und Druck) bei Komprimierung des Gases erzeugen einen „Aha-Effekt“
- Als eindrücklich bezeichnet wurde der „Kühlschrank-Effekt“, das Bilden von Nebel bei Abkühlung der Luft durch Druckabsenkung
- Es wurde bemerkt, dass die einzige Größe, welche noch nicht digitalisiert ist, das Volumen ist und dass die problematischste Messgröße die Temperatur sei
- Die Eignung dieses Prototyps für die Weiterentwicklung im Rahmen von Schülerprojekten wurde hervorgehoben

Im Allgemeinen fand dieses Konzept breite Zustimmung und kann durch einen zielgerichteten Einsatz im Unterricht entscheidend zum Verständnis der Thematik beitragen. Ein Transfer auf äquivalent ablaufende Prozesse in Technik und Natur bilden die Brücke zu dem im Bildungsplan definierten Schwerpunkt Klimaphysik.

8 Resümee und Schlusswort

Resümee

Das entwickelte Konzept stellt eine Möglichkeit dar, Lernenden der beruflichen Oberstufe im Rahmen der physikalischen Laborübungen das ideale Gasgesetz und seine Prägnanz in der Umwelt und Technik zu veranschaulichen. Der „Physical Computing“-Ansatz verspricht Synergieeffekte durch die Paarung von Physik, Elektrotechnik und Informatik und ermöglicht somit den Aufbau fächerübergreifender Kompetenzen. Das offene, vielseitig einsetzbare System erlaubt den Einsatz bei Experimenten ebenso, wie die gezielte Betrachtung des Messsystems selbst.

Durch das Befolgen der Konstruktionsanleitung und des Leitfadens im Anhang können anhand günstiger und (derzeit) verfügbarer Artikel eigene Versuchsaufbauten nachgebaut und im Unterricht eingesetzt werden. Erklärvideos in Form von Screencasts sollen zusätzlich die Einarbeitung vereinfachen.

Die Konstruktion betreffend hat es sich als am schwierigsten herausgestellt, einen ideal-luftdichten Versuchsaufbau herzustellen. Deshalb ist hiermit das Messen bei einem höheren Druck (schätzungsweise über 1,5 bar Relativdruck) über längere Zeit (schätzungsweise über 1 Stunde Zeitdifferenz) (noch) nicht reliabel möglich.

Die Durchführung betreffend hat sich als am schwierigsten herausgestellt, die Temperatur bei einer adiabatischen Zustandsänderung schnell genug messen zu können, bevor sie wieder abgeflacht ist. Möglicherweise wird dies in Zukunft durch ein anderes experimentelles Setting oder einen anderen Sensor präziser realisierbar.

Für die Zukunft wäre es wünschenswert, dass eine wachsende Anzahl an Lehrkräften die Potentiale in diesem Konzept entdeckt und eine Community bildet, welche untereinander selbstentwickelte Projekte teilen, das Programm PhyPiDAQ fortentwickeln und ihre Schülerinnen und Schüler damit begeistern. Eine progressive, sich beschleunigende Digitalisierung erfordert von den Schülerinnen und Schülern (im privaten und beruflichen Kontext) ein zunehmendes physikalisches und informationstechnisches Hintergrundwissen und Kompetenzen, deren Grundlage in der Schule gelegt werden soll. Die – relativ zu den Preisen vergleichbarer Artikel diverser Lehrmittelhersteller – günstige Beschaffung und die breite Anwendungsmöglichkeit des Raspberry Pi's in Bildung und Technik erlauben darüber hinaus den Lernenden eine eigene Anschaffung und das eigene Experimentieren

Zuhause. Durch die Möglichkeiten, welche sich aus diesem Konzept ergeben, ist allgemein ein tieferes und vernetztes Verständnis naturwissenschaftlicher Themen möglich. Speziell in Verbindung mit dem vorgestellten Versuchsaufbau ist ein besseres Verständnis des idealen Gasgesetzes und seiner einzelnen Größen durch folgende Punkte möglich:

- Digitale Messtechnik erleichtert die Datenaufnahme, vor allem bei mehreren Messwerten
- Die Kompetenz des händischen Zeichnens und mathematische Vorkenntnisse sind nicht zwingend für den Erfolg des Experiments vorausgesetzt und können durch digitales Visualisieren und Auswerten gegebenenfalls ersetzt werden
- Ein auf wesentliche Bauteile reduzierter Versuchsaufbau erleichtert das Nachvollziehen der Phänomene und verhindert eine unnötige kognitive Belastung
- Sensoren mit geringer Latenz bilden die gemessene Wirklichkeit nahezu in Echtzeit ab, wodurch auch schnelle Prozesse (quasi-adiabat beziehungsweise polytrop) quantitativ untersucht werden können
- Messabweichungen bieten das Potential, das Wesen der Naturwissenschaften, Modellbildung und Fehleranalyse zu thematisieren

Weitere Potentiale können über eine Weiterentwicklung dieses Konzepts freigelegt werden. Hierbei kann zwischen dem Konzept selbst und dem Versuchsaufbau unterschieden werden:

Das Konzept betreffend wäre es wünschenswert, dass es durch seine Umsetzung und das daraus folgende Feedback durch Lehrkräfte und Lernende an Form gewinnt, beständig weiterentwickelt und der Fortschritt weiteren interessierten Lehrkräften öffentlich zugänglich gemacht wird. Als Plattform ist hierfür das bereits genannte Portal github.com möglich, über welches auch PhyPiDAQ beständig fortentwickelt wird.

Den Prototyp betreffend wäre eine Weiterentwicklung in folgende Richtung denkbar:

- Einstellung des Volumens durch beispielsweise einen Schrittmotor
- Digitale Messung des Volumens durch einen Schrittmotor oder ToF-Sensor¹⁶
- Schaffen einer Möglichkeit zur Wärmeübertragung, um Kreisprozesse näherungsweise realisieren zu können
- Verstärken des Aufbaus, damit auch größere Massen (von beispielsweise Personen) im Rahmen eines interaktiven Experimentierens zum Einsatz kommen können

¹⁶ ToF (engl.): Time-of-Flight – Sensor, mit welchem die Abstandsmessung über einen Laser möglich ist.

Die im Anhang aufgeführten Informationen und Ideen zur Weiterentwicklung des Versuchsaufbaus können hierfür eine Basis darstellen.

Schlusswort

Abschließend soll an dieser Stelle noch angemahnt werden, dass Sinn und Ziel jeder Verbesserung des Konzeptes immer sein sollten, den möglichen Lerngewinn vor dem Hintergrund des didaktischen Mehrwerts zu steigern. In der schulischen Umsetzung sollte trotz den – vor allem überfachlichen – Möglichkeiten, die sich durch den vorgestellten Ansatz ergeben, die eigentliche Disziplin – die Physik – nicht vernachlässigt werden (vgl. (Major et al., 2021)). Ebenso ist der Einsatz allgemein von Experimenten, aber auch speziell mit digitaler Messtechnik nicht inflationär und unüberlegt, sondern stets mit klarer Zielvorgabe zu planen und durchzuführen (vgl. (Rincke, 2016)). Unter diesen Aspekten kann ein gewinnbringender Einsatz im Unterricht erfolgen.

Ich hoffe, ich konnte eine Basis hierfür mit diesem Konzept schaffen.

An dieser Stelle möchte ich mich bei folgenden Personen besonders bedanken:

- Herr Prof. Quast: Vielen Dank, dass ich bei Ihnen meine Masterarbeit schreiben durfte. Danke für die fortdauernde materielle, fachliche und ideelle Unterstützung.
 - Frau Dr. Bergmann: Vielen Dank für die freundliche Aufnahme in eurem Team, die Unterstützung während der Zeit am Institut und die immer sehr schnell erfolgenden E-Mail-Antworten.
 - Last but not least möchte ich mich bei meiner Frau bedanken, die sich so großartig um unseren Sohn gekümmert hat, damit ich mich meiner Masterarbeit widmen konnte, sowie unserem Gott, der dies alles ermöglicht hat.
-

Anhang 01 – Überprüfung und Auswahl passender Temperatursensoren

Vergleich von ausgewählten Temperatursensoren

Da für die Temperaturmessung prinzipiell viele Sensoren infrage kommen würden, soll eine Auswahl an Temperatursensoren anhand ihrer Eigenschaften und hinsichtlich ihrer Eignung, die Temperatur eines Gases zu messen, miteinander verglichen werden, um den adäquatesten Sensor für diesen Versuch zu finden. Eine Gegenüberstellung von breit eingesetzten Temperatursensoren soll durch folgende Tabelle veranschaulicht und nachfolgend ausdifferenziert werden. Statt eine Übersicht über sämtliche Temperatursensoren darzustellen, soll weiterführend auf diverse Internetseiten, wie mikrocontroller.net verwiesen werden.

Tabelle 3: Vergleich ausgewählter Temperatursensoren

Sensoren	Messbereich	Genauigkeit	Wasserresistenz	Weitere Infos
PT100	-30-105 °C	$\leq \pm(0,3 + 0,005 * T) °C$	Vorhanden	Benötigt Verstärkerboard MAX31865
DS18B20	-55-125 °C	$\pm 0,5 °C$	Vorhanden	Digitales Ausgangssignal Benötigt Verstärkerboard
Thermoelement	-200-700 °C	$\leq \pm 2 °C$	Nicht vorhanden	Verstärkerboard MAX31855

Ergänzend sei anzumerken, dass die Werte und Angaben zu den Sensoren lediglich auf die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Bauarten zutreffen und nicht allgemeingültig zu verstehen sind. Neben dem Messbereich und der Wasserresistenz, der von Bauart zu Bauart unterschiedlich sein kann, unterscheidet sich in vielen Fällen deutlich die Genauigkeit je nach Messbereich. Da die Sensoren prinzipiell alle für eine Temperaturmessung infrage kommen würden, sollen ihre Spezifika im Folgenden näher beleuchtet werden:

- **Zum PT100:**

- Der PT100 ist ein analoger Temperatursensor, dessen Effekt auf die temperaturabhängige Veränderung des elektrischen Widerstands von Platin zurückgeht.
- Bei 0 °C ist der Widerstand beim PT100 auf 100 Ω normiert. Der PT100 ist etwas schlechter auflösend als der ebenfalls weit verbreitete, aber geringfügig teurere PT1000, welcher bei 0 °C auf 1000 Ω normiert ist. Für diese Anwendung ist der PT100 jedoch ausreichend
- Aufgrund der kleinen Messspannung und der auftretenden Störgrößen muss das Ausgangssignal des PT100 über ein Verstärkerboard wie beispielsweise den MAX31865 verstärkt und Störgrößen kompensiert werden
- Anbindung und Datenübertragung erfolgt über die SPI-Schnittstelle¹⁷ des Raspberry Pi (Anschluss siehe Adafruit.com)
- Sehr vorteilhaft im Vergleich zu anderen Sensoren ist seine fast lineare Kennlinie im näheren Temperaturbereich und seine Wasserresistenz
- Nachteilhaft ist hierbei, dass ein Verstärker-Board unbedingt benötigt wird, welches je nach Händler vor Gebrauch gelötet werden muss

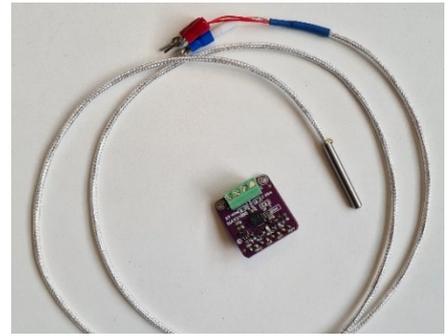


Abbildung 30: Beispielhafter PT100-Sensor inklusive Verstärkerboard MAX31865

- **Zum DS18B20:**

- Der DS18B20 ist ein digitaler Temperatursensor, welcher die analoge Eingangsgröße in Form einer Spannung durch einen internen AD-Wandler in ein digitales Signal überträgt. Die bereits kalibrierten Werte werden im Folgenden über eine sogenannte „One-Wire“-Verbindung an den Raspberry Pi weitergeleitet. Er hat eine eigene Sensor-Adresse, sodass mehrere seiner Art zeitgleich verbaut werden können, ohne dass das System diese vertauscht.



Abbildung 31: Beispielhafter DS18B20-Sensor

¹⁷ SPI (engl.): Serial Peripheral Interface – Art der Datenübertragung

Für eine Verminderung der Störsignale ist der Einbau eines Pull-up-Widerstands¹⁸ sinnvoll.

- Auflösung je nach Art zwischen 9-12 Bit, Messbereich -55 bis 125 °C, wobei lediglich zwischen -10 °C und 85 °C eine Genauigkeit von bis zu 0,5 °C vorliegt (Patrick Schnabel, 2023)
- Vorteile: Sensor bereits kalibriert, hohe Genauigkeit, 1-Wire-Ausgang (mehrere derselben Bauart verwendbar)
- Nachteile: Pullup-Widerstand muss gegebenenfalls nachträglich verbaut werden, Datenpin muss im Raspberry Pi – System definiert werden (Verändern der Config.txt), was jedoch mit Anleitungen wie beispielsweise von tutorials-raspberrypi.de für Jedermann möglich ist

- **Zum Thermoelement (mit MAX31855):**

- Das Thermoelement nutzt den Seebeck- beziehungsweise thermoelektrischen Effekt zweier unterschiedlicher Leiter aus, welche an einem Ende verlötet sind: Wird der verbundene Leiter erwärmt, kann eine elektrische Spannung als Funktion der Temperatur an der Vergleichsstelle gemessen werden

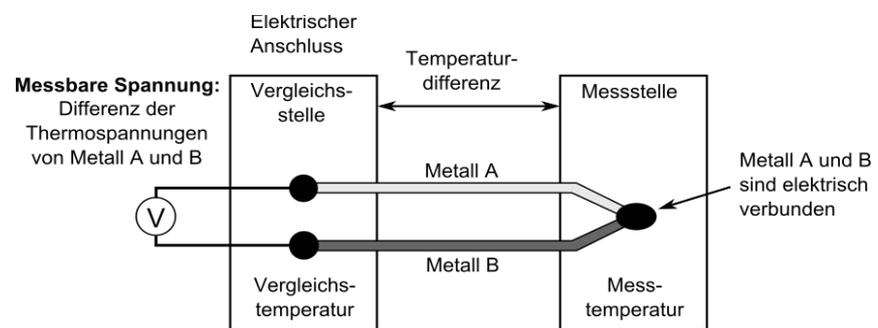


Abbildung 32: Schematische Darstellung eines Thermoelementes (Wikipedia, 2023)

- Da die Messspannung mit einigen 10 μV pro °C (Wika Alexander Wiegand SE & Co. KG, 2021) sehr klein und somit sehr störanfällig ist, ist das Thermoelement auf die Leistungen eines Verstärkerboards angewiesen. Im Rahmen dieser Arbeit hat sich das Verstärkerboard MAX31855 bewährt, welches zum einen breit verfügbar ist und zum anderen bereits in PhyPiDAQ implementiert ist. Im Rahmen dieser Arbeit wurden vier verschiedene MAX31855 unterschiedlicher Hersteller und Preisklassen

¹⁸ Ein Pull-up-Widerstand (engl. pull up = "Hochziehen") zieht den Signal-Pegel konstant auf „HIGH“, wodurch Signalstörungen deutlich vermindert werden

getestet, wobei sich das etwas höherpreisige Modell von Adafruit bewährt hat. Dies heißt jedoch nicht, dass auch günstigere Alternativen akkurate Ergebnisse liefern könnten.

- Das verwendete Thermoelement besteht, wie folgende Abbildung ersichtlich, aus einer silikonummantelten Litze mit einer Messspitze und zwei Drähten zum Anschluss an das Verstärker-Board. Diese Bauart kann durch den bloßen Metallkontakt nicht in flüssigen Medien eingesetzt werden, zeichnet sich jedoch durch eine geringe Wärmekapazität und damit einer schnellen Temperaturdetektion aus. Die Thermoelemente (engl. „Thermocouple“) werden neben ihrer Bauart anhand ihrer Materialien unterschieden. Die im Rahmen dieser Arbeit zum Einsatz kommende Thermoelement-Paarung ist die hinreichend genaue und breit eingesetzte Typ K – Paarung, welche aus einer Nickel-Chrom-Legierung einerseits und einem Nickeldraht andererseits besteht. Eine höhere Genauigkeit versprechen lediglich höherpreisige Thermoelemente der Typen T, R und S für besondere technische Anwendungen, welche für diese Anwendung jedoch nicht eingesetzt werden sollen.

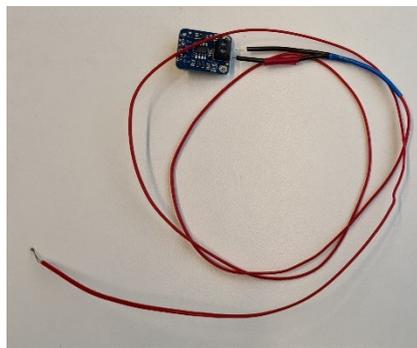


Abbildung 33: Beispielhaftes Thermoelement mit Verstärkerboard MAX31855

- Die durch das Thermoelement ausgelöste analoge Spannung wird durch einen integrierten AD-Wandler im Verstärker-Board in ein digitales Signal umgewandelt, verstärkt, geglättet und mit der Vergleichstemperatur eines ebenfalls integrierten Temperaturfühlers verglichen (Kaltstellen-Kompensation), bevor sie als Temperatur über die SPI-Schnittstelle ausgegeben wird
- Vorteile: Messung schneller Temperaturänderungen möglich, Ausführung in verschiedenen Bauformen, hoher möglicher Messbereich, manche Verstärker-Boards sind bereits kalibriert, breiter technischer Einsatz, auch von Lehrmittelfirmen oft verbaut

- Nachteile: Verstärker-Board notwendig, nicht wasserfest (eingesetztes Modell)

Inwiefern sich die Temperatursensoren im praktischen Einsatz unterscheiden, soll im folgenden Kapitel erprobt werden.

Test und Kalibrierung der Temperatursensoren

Um die Temperatursensoren auf ihre Funktion und Eignung hin zu prüfen und gegebenenfalls zu kalibrieren, bietet es sich an, hierfür ein Wasserbad zu nutzen. Weiterhin ist ein kalibriertes Referenz-Thermometer notwendig, welches in diesem Fall ein Thermoelement der Lehrmittelfirma MAEY darstellt. Die Vorgehensweise sei im Folgenden kurz erläutert:

1. Anschließen der Temperatursensoren beispielsweise gemäß Anleitung im [Anhang](#)
 2. Vorbereiten der Temperaturmessungen in PhyPiDAQ:
 - a. Öffnen der Demo-Konfigurationsdatei („Demo-Config“)
 - b. Aktivieren der entsprechenden Devices (z.B. DS18B20, MAX31865, MAX31855) und Einstellen weiterer Parameter wie den beispielsweise den bei der Messung anzuzeigenden Wertebereich der Temperatur
 - c. Laden der Geräte durch Betätigen des Buttons „Load Device Config(s) und Verändern einzelner Befehle, falls nötig
 - d. Abspeichern der neuen Config unter neuem Namen
 3. Starten der Messungen, Anschließen und Anschalten des Referenzthermometers, Überprüfen und notieren der Messwerte bei Raumtemperatur
 4. Ummanteln des Thermoelementes mit Klarsichtfolie, um es vor Wasser zu schützen
 5. Erhitzen von Wasser in einem Topf auf einer Heizplatte bis zur Siedetemperatur
 6. Entfernen der Wärmequelle
 7. Eintauchen der Temperatursensoren in das Wasserbad, an einem Punkt konzentriert, Abwarten, bis alle Temperatursensoren einen statischen Wert erreicht haben, Notieren der Temperaturen
 8. Zugabe von kaltem Wasser, bis die Temperatur um einige °C (z.B. 5°C) abgeklungen ist, Umrühren des Wasserbades, Abwarten eines statischen Temperaturwertes und Notieren der Temperaturen
 9. Wiederholen des letzten Schrittes, bis annähernd Raumtemperatur erreicht ist
-

PT100

Durch anfängliche Probleme mit dem PT100 und dem MAX31865 können folgende Hinweise nachdrücklich gegeben werden:

- Durch eine Widerstandsprüfung ist die Art des PT-Sensors festzustellen, da die angegebene Produktart (PT100, PT200, PT1000 etc.) von der tatsächlichen abweichen kann
- Ob der jeweilige MAX31865 für den PT-Sensor geeignet ist, lässt sich durch die Bezeichnung auf dem Vorwiderstand, welcher auf die Platine gelötet ist, ablesen
- Die entsprechenden Lötstellen sind vor Benutzung zu verbinden oder gegebenenfalls aufzutrennen
- Auf den korrekten Anschluss der Kabel an das Board und das Board an den Raspberry Pi ist zu achten

Eine ausführliche Anleitung ist auf Adafruit.com nachzulesen.

Für diese Arbeit konnte eine Kalibration mit dem PT100 nach obiger Methode durchgeführt werden, dessen Ergebnisse in folgender Tabelle ersichtlich sind.

Tabelle 4: Ergebnisse der PT100 - Kalibration

Referenztemperatur in °C	PT100 in °C	Rel. Fehler in %
100,00	95,06	4,9
82,5	80,45	2,5
72,5	71,38	1,5
64,1	63,8	0,5
55,5	55,5	0,0
45,1	45,45	0,8
35,3	35,39	0,3
29,5	29,56	0,2
23,7	23,00	3,0

Weitere Versuche zeigten einen analogen Verlauf. Zur groben Angabe der Fehler wurde ein relativer Fehler angegeben. Auf eine ausführliche Fehlerrechnung wurde an dieser Stelle verzichtet. Der Sensor zeigte ab Werk ein weitgehend akzeptables Verhalten mit einem relativen Fehler von meist unter 2 %. Lediglich bei hohen Temperaturen und bei vollständiger Abkühlung auf Raumtemperatur ließen sich größere Abweichungen feststellen. Die ansteigenden Abweichungen bei höheren Temperaturen können durch Messfehler (instationäre Temperatur) und durch das zunehmende nichtlineare Verhalten der Kennlinie des PT100 zustande gekommen sein. Die Abweichung bei Raumtemperatur kann durch den Verdunstungseffekt des restlichen Wassers am Sensor zustande gekommen

sein. Für den in diesem Rahmen relevanten Temperaturbereich ist die Genauigkeit jedoch hinreichend zufriedenstellend.

Thermoelement und DS18B20

Die Funktion des Thermoelements in Verbindung mit dem ersten Verstärkerboard (MAX31855 (1), welches einem günstigen, dem Original nachempfundenen Modell entspricht), wurde zusammen mit zwei DS18B20-Sensoren getestet. Die Ergebnisse sind folgendem Schaubild zu entnehmen.

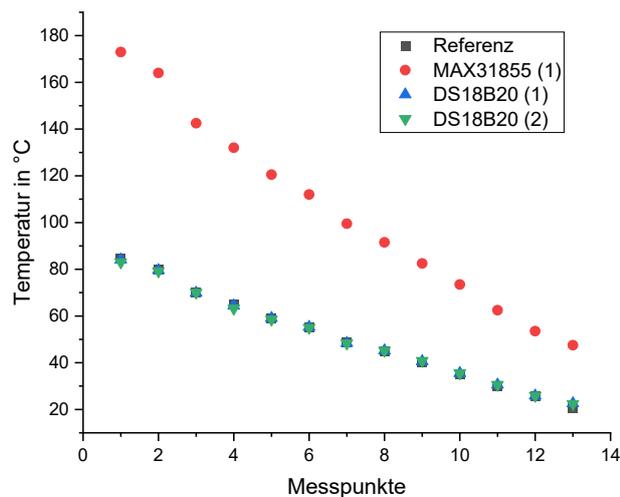


Abbildung 34: Veranschaulichung der DS18B20- und MAX31855 (1) - Kalibration

Aus der Tabelle und dem Schaubild ist deutlich zu erkennen, dass die Messpunkte der beiden DS18B20-Sensoren sehr nah an den Referenzwerten liegen, das Thermoelement jedoch einen deutlich höheren Offset und eine andere Steigung aufweist.

Aus den Daten geht hervor, dass beim ersten DS18B20 eine leicht geringere Abweichung vom Referenzwert auftrat als beim zweiten. Eine Betrachtung der relativen Fehler zeigt, dass in den meisten Fällen die Fehler im unkritischen Bereich liegen. Die gering größere Abweichung beim letzten Messwert kann durch die hohe Latenz der DS18B20-Sensoren im Gegensatz zum Thermoelement des Referenz-Thermometers zustande gekommen sein (Temperatursensoren gegebenenfalls noch zu warm im Vergleich zur Umgebungstemperatur).

Die Aufnahme der Messwerte des Thermoelements gestaltete sich schwierig, da die Werte stark schwankten ($\pm 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$). Eventuell kann diesem Effekt durch einen Bypass-Kondensator zwischen den Drähten des Thermoelementes vermieden werden. Der originale MAX31855 von Maxim Integrated oder Adafruit hat diesen und weitere

sinnvolle Bauteile bereits ab Werk verbaut. Trotzdem zeigte der getestete MAX31855 (1) einen nahezu linearen Verlauf mit einem anderen Offset und einer anderen Steigung. Insofern dieses Verhalten reproduzierbar ist, könnte es durch eine Kalibration für den Einsatz im Experiment angepasst werden. Jedoch wurde die Arbeit mit diesem Thermoelement-Verstärker beendet, da im weiteren Verlauf weitere Thermoelement-Verstärker wie der MAX31855 (2) und der MAX31855 von Adafruit korrektere Werte zeigten, wie im folgenden Kapitel nahegelegt wird.

Vergleich der Thermoelement-Verstärker

Da der bisherig vorhandene MAX31855 (1) mangelhaft erschien, wurde ein originaler MAX31855 von Adafruit (im Folgenden i.V. mit rot ummanteltem Thermoelement) und ein weiterer günstiger MAX31855 (2) testweise beschaffen. Die Messpunkte sollen im Folgenden anhand der Messwerte des Referenzthermometers verglichen werden.

Durch auftretende Interferenzen bei gleichzeitiger Anbindung von zwei oder mehr MAX31855 an die SPI-Schnittstelle war es nicht möglich, die Thermoelemente zusammen zu kalibrieren, weshalb sie infolgedessen einzeln kalibriert wurden.

Folgende Tabelle legt die Messpunkte des Vergleichs zwischen den Werten des Referenz-Thermometers (Leybold) und denen des MAX31855 (Adafruit) dar.

Tabelle 5: Ergebnisse der MAX31855 (Adafruit) - Kalibration

Referenztemp. in °C	MAX Adafruit in °C	Rel. Fehler in %
99,3	97,75	1,56
85,1	85	0,12
73	73	0,00
61,4	61,5	0,16
51,5	51,75	0,49
44,5	44,5	0,00
39,5	39,5	0,00
31,2	31	0,64
28	28,5	1,79
19	19,5	2,63

Der teurere Thermoelement-Verstärker MAX31855 von Adafruit zeigt bereits ein kalibriertes Verhalten. Der Fehler liegt bei maximal 2,6 % und ist somit für den hier vorliegenden Anwendungsfall akzeptabel.

Ein Vergleich des nachbestellten, günstigen Thermoelement-Verstärkers MAX31855 (2) mit den Temperaturen des Referenz-Thermometers von Leybold ergab die folgenden Werte:

Tabelle 6: Ergebnisse der MAX31855 (2) - Kalibration

Referenztemperatur in °C	MAX (2) in °C	Rel. Fehler in %
79,9	79,75	0,19
67	66,5	0,75
58,3	58,25	0,09
48,3	48,5	0,41
38,7	39	0,78
20	20,5	2,50

Auch bei diesem günstigeren Modell scheint eine Kalibration bereits von Werk aus erfolgt zu sein, der Fehler liegt lediglich bei maximal 2,5 % und ist somit ebenfalls akzeptabel für den hier vorliegenden Anwendungsfall. Da jedoch das Verstärkerboard von Adafruit bereits vorliegt, soll dieses vorrangig für zukünftige Messungen eingesetzt werden.

Zum Schluss dieses Unterkapitels sei angemerkt, dass eine Kalibration auch komplett über PhyPiDAQ geschehen kann, indem ein kalibrierter Sensor die wahren Werte liefert, während die Rohdaten aus den zu kalibrierenden Sensoren ausgelesen werden. Die Messwerte können in eine Datei exportiert werden, woraus die Daten für die Kalibration (ChanCalib) gewonnen werden. Hierbei ist lediglich darauf zu achten, dass aufgrund etwaiger unterschiedlicher Latenzen der Sensoren jeweils nur bei Temperatur-Gleichgewichtszuständen gemessen werden sollte.

Überprüfung der Latenzen der Temperatursensoren

Da die Messung von Zustandsgrößen an Gasen durch ihre geringe Dichte an Teilchen besondere Anforderungen an die entsprechenden Sensoren stellt, sind diese in Bezug auf die in diesem Einsatzbereich entscheidenden Merkmale hin zu vergleichen, um ein adäquates Modell auswählen zu können. Um in Gasen schnelle Temperaturänderung detektieren zu können, wird ein Temperatursensor mit besonders schneller Anspruchszeit beziehungsweise möglichst geringer Latenz benötigt. Das demnach entscheidende Merkmal, eine geringe Latenz, wird in diesem Fall als maßgebendes Kriterium für die Sensorauswahl definiert, auch wenn andere Sensoren gegebenenfalls bessere Eigenschaften in anderen Bereichen zeigen. Da der Drucksensor bei der Kalibration eine maximale Latenz von 100 ms zeigte, sollen nun die Temperatursensoren PT100, DS18B20 und das Thermoelement auf dieses Merkmal hin verglichen werden.

Hypothetisch kann angenommen werden, dass die Latenz zum einen vom Material des Temperaturfühlers (Masse und Wärmekapazität) und zum anderen von der

Übertragungsgeschwindigkeit von Signaleingang bis zur Ausgabe abhängen muss, wobei der erstere Grund der entscheidendere sei. Da im Experiment schnelle Temperaturänderungen von Gasen gemessen werden sollen, ist eine möglichst geringe Latenz wünschenswert, wenn nicht sogar obligatorisch für das Gelingen des Experiments an sich.

Hierzu kann folgendermaßen vorgegangen werden:

1. Sensoren in eine PhyPiDAQ-Config integrieren und Datenausgabe als .csv-Datei aktivieren
2. Messung testweise starten, um Funktion und Werte zu prüfen
3. Heißes Wasser einer definierten Temperatur bereitstellen und mit Referenz-Thermometer die Temperatur kontrollieren
4. Sensoren vorbereiten: Thermoelement mit wasserdichtem, ab dünnem Material ummanteln (z.B. Klarsichtfolie, da Sensor nicht wasserdicht), Sensoren bündeln (gleichzeitige Temperaturerhöhung)
5. Messung starten
6. Sensoren gleichzeitig in das heiße Wasser tauchen und die Temperaturen über der Zeit beobachten
7. Vorgang beenden, sobald die Temperatur-Ausgaben aller Sensoren im gleichen Bereich liegen und einen konstanten Wert annehmen

Für ein Vergleich der Latenzen wurden anhand dieser Vorgehensweise ausgehend von Umgebungstemperatur (Luft) von 22,7 °C die Sensoren zuerst in das siedende Wasser mit einer Temperatur von 100 °C getaucht, um sie anschließend wieder bei Umgebungstemperatur abkühlen zu lassen. Die Auswertungen der Ergebnisse seien im Folgenden dargestellt.

Erwärmung (auf Wassertemperatur)

Die Ergebnisse der Vergleichsmessung der Erwärmung auf Wassertemperatur sind in folgender Tabelle dargestellt.

Tabelle 7: Latenzen der Temperatursensoren bei Erwärmung

Sensoren	Latenz in s
DS18B20	8,3
PT100 mit MAX31865	3,7
Thermoelement mit MAX31855 (2)	3,5

Die Messpunkte als Funktion der Zeit sollen zum Zwecke der Visualisierung in folgendem Schaubild dargestellt werden.

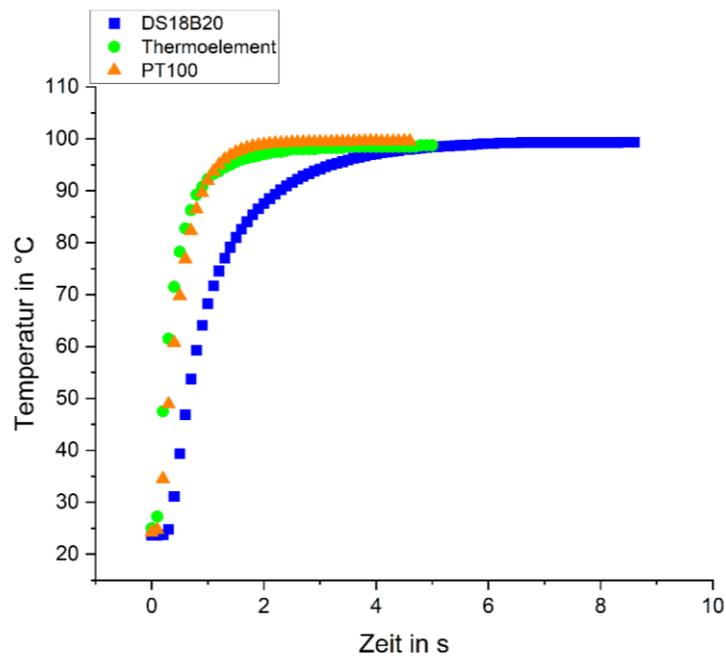


Abbildung 35: Grafische Veranschaulichung der Latenzen der Temperatursensoren bei Erwärmung

Der exponentielle Verlauf ist bereits ohne Quantisierung zu erkennen und soll an dieser Stelle nicht näher thematisiert werden, da der Sinn dieses Schaubilds in dem Erkennen des qualitativen Verlaufs der Latenzen liegt. Zu sehen ist, dass das Thermoelement eine geringere Latenz als die anderen Sensoren aufweist, wobei der PT100-Sensor eine sehr ähnliche Reaktionsfähigkeit aufweist. Hierbei sei anzumerken, dass die Reaktionsfähigkeit des Thermoelementes durch die Ummantelung (Gummihandschuh) einer Verzögerung unterlag und vermutlich bei direktem Wasserkontakt noch schneller reagiert hätte.

Abkühlung (auf Umgebungstemperatur):

Die Ergebnisse der Vergleichsmessung der anschließenden Abkühlung auf Umgebungstemperatur sind in folgender Tabelle dargestellt.

Tabelle 8: Latenzen der Temperatursensoren bei Abkühlung

Sensoren	Latenz in s
DS18B20	> 60
PT100 mit MAX31865	55,4
Thermoelement mit MAX31855 (2)	30,2

Die Messpunkte als Funktion der Zeit sollen wie bei der Erwärmung zum Zwecke der Visualisierung in folgendem Schaubild dargestellt werden. Wie bei der Erwärmung wurde auch bei diesem Schaubild bewusst auf die Darstellung von Fehlerangaben und Kurvenanpassungen verzichtet, da es hierbei lediglich um die qualitativen Verläufe geht.

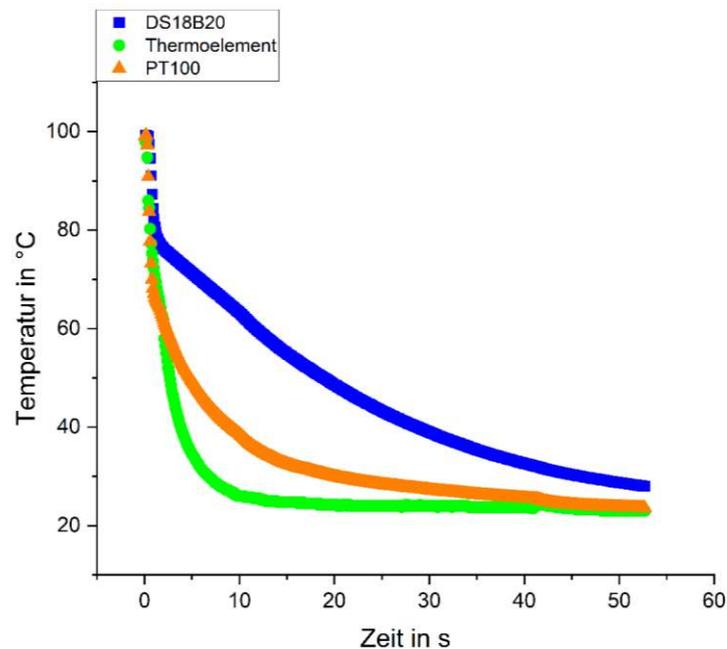


Abbildung 36: Grafische Veranschaulichung der Latenzen der Temperatursensoren bei Abkühlung

Qualitativ lässt sich feststellen, dass auch bei der Abkühlung das Thermoelement am schnellsten, der PT100-Sensor am zweitschnellsten und der DS18B20 am langsamsten die Temperaturänderung detektierte, was durch die Massen und Wärmekapazitäten der Sensoren bedingt sein müsste. Diese Vermutung wird nochmal dadurch verstärkt, dass im direkten Vergleich der Messspitzen der Sensoren PT100 und DS18B20 die Messspitze des DS18B20 deutlich größer und schwerer als die des PT100 ist.

Aus den Ergebnissen lässt sich schließen, dass das Thermoelement trotz seiner Nachteile aufgrund seiner geringen Latenz und seiner geringen Masse an der Messspitze am besten für eine Temperaturmessung in Gasen geeignet ist und in nicht nur in Produkten von diversen Lehrmittelherstellern, sondern auch in allen hier entworfenen Prototypen Einsatz findet.

Anhang 02 – Kalibrierung des Drucksensors

Um eine Aussage über den Verlauf des Druckes über den gesamten relevanten Wertebereich treffen zu können, muss dieser bei der Kalibration bereits entsprechend berücksichtigt werden. Im Hinblick auf die Einbindung in PhyPiDAQ ist es sinnvoll, möglichst viele Kalibrationswerte im relevanten Bereich (0 – 10 bar) aufzunehmen, um die Aussagefähigkeit der Kalibrationswerte über das Verhalten des Drucksensors zu verstärken. Da bei der Erprobung ebenfalls negative Druckwerte auftreten können, ist es sinnvoll, auch im negativen Druckbereich Kalibrationswerte aufzunehmen oder diese abzuschätzen. Zur Kalibration selbst wird folgendes benötigt:

- Fahrrad-Luftpumpe mit hinreichend genauem Manometer (Referenz-Messgerät)
- Schlauchtülle mit einem Innengewinde von G1/4“ und einem Tüllendurchmesser vom Innendurchmesser des Fahrrad-Luftpumpen-Schlauchs inklusive eines Dichtungsrings
- Gegebenenfalls Hand-Vakuum-Pumpe mit Schlauch des angegebenen Innendurchmessers (Referenz-Messgerät)

Die folgende Abbildung zeigt den im Zuge dieser Arbeit verwendeten Luftpumpenaufbau.



Abbildung 37: Fahrrad-Luftpumpe mit Manometer und Drucksensor

Die Kalibration kann mithilfe dieses Systems (Raspberry Pi in Verbindung mit PhyPiDAQ) erfolgen, oder unabhängig von diesem, wobei die Kalibration über PhyPiDAQ generell zu bevorzugen ist, da im weiteren Verlauf auch hiermit gearbeitet wird.

Wird die Kalibration über den Raspberry Pi mit dem Programm PhyPiDAQ durchgeführt, werden folgende Hilfsmittel benötigt:

- Analog-Digital-Wandler (AD-Wandler), beispielsweise der in PhyPiDAQ bereits implementierte ADS1115
- Widerstand von 10 k Ω
- 5 Jumper-Kabel

Wird die Kalibration hingegen unabhängig von diesem System durchgeführt, werden außer den bereits erwähnten Hilfsmitteln für die Kalibration selbst folgende benötigt:

- Netzteil mit regelbarer Spannung
- 3 Bananenstecker-Kabel mit Krokodilklemmen
- Multimeter zur Spannungssignalausgabe

Jede Kalibration verläuft im Allgemeinen ähnlich. Die Messwerte eines unkalibrierten Sensors werden mithilfe eines hinreichend genau kalibrierten Sensors/Messgeräts verglichen, um die Messwerte an den Referenzwerten auszurichten. Der Ablauf der Kalibration über das verwendete System aus Raspberry Pi und PhyPiDAQ gestaltet sich wie folgt:

1. Sicherstellen der richtigen Verkabelung des Drucksensors und des AD-Wandlers (Verkabelung siehe [Anhang](#))
 2. Konfigurieren in PhyPiDAQ:
 - a. Einbinden des zu kalibrierenden Sensors in die Muster-Haupt-Config. Falls ein kalibrierter Referenz-Sensor vorliegt, welcher ebenfalls an den Raspberry angeschlossen werden kann, so kann dieser ebenfalls eingebunden werden
 - b. Anpassen der Haupt-Config auf die Kalibration (Channel, ChanLabels, ...), wie in der folgenden Abbildung beispielhaft dargestellt
-

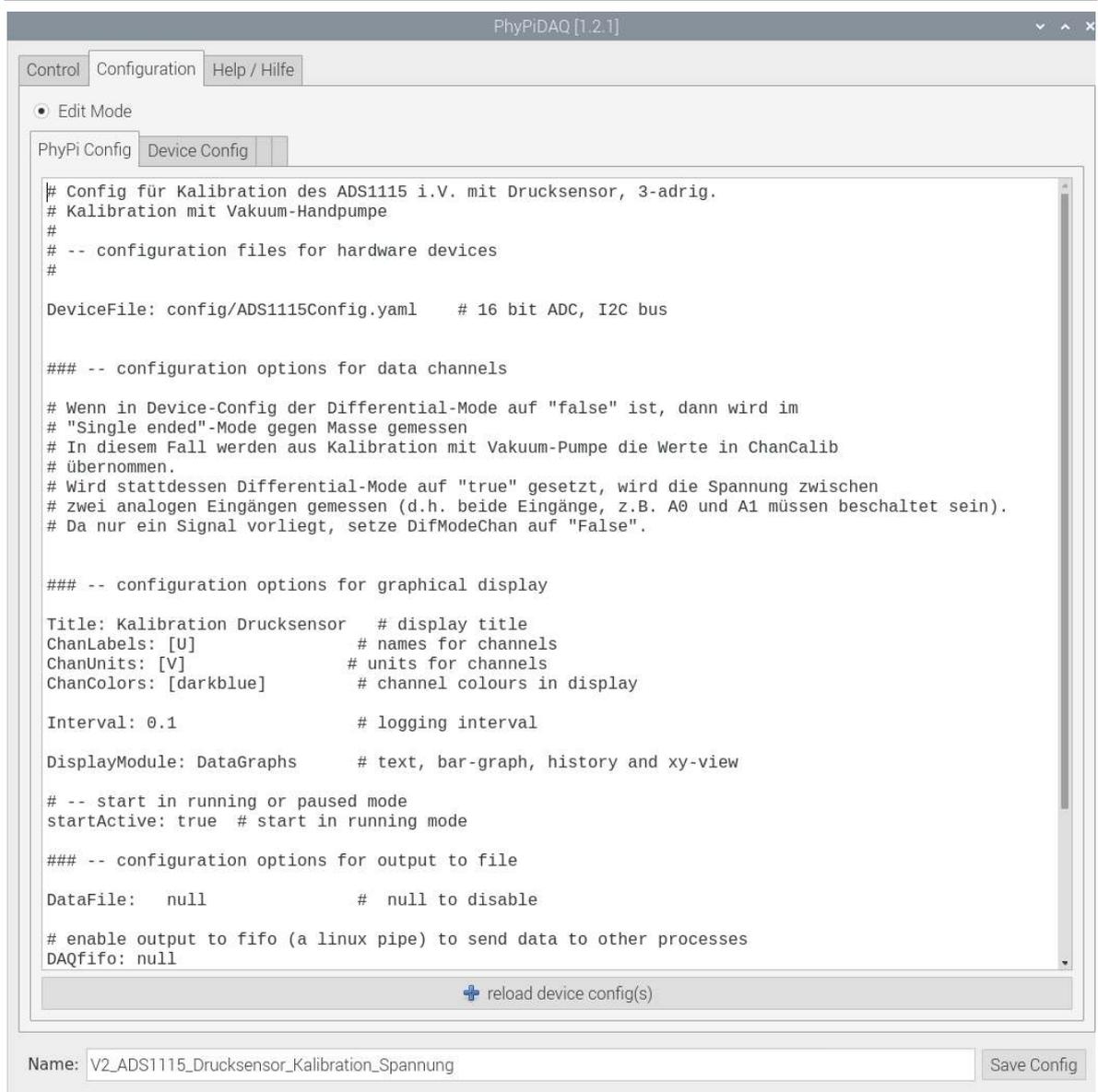


Abbildung 38: Haupt-Konfigurationsdatei der Drucksensor-Kalibration

- c. Vorbereiten der Oberfläche, in welche die Referenz- und Messwerte eingespeichert werden können: Zur Erfassung der Wertepaare bietet sich ein Tabellenkalkulationsprogramm an. Falls ein kalibrierter Druck-Sensor in PhyPiDAQ eingebunden ist, kann dies über PhyPiDAQ geschehen: Wichtig ist hierbei, dass die entsprechenden Befehle angepasst werden: „NHistoryPoints“ auf eine hohe Zahl der Datenpunkte und „DataFile“ aktivieren, um die Daten- und Referenzpunkte in eine .csv-Datei exportieren zu lassen
- d. Anpassen der Device-Config des AD-Wandlers, indem der entsprechende Kanal („Channel“) ausgewählt wird und DifModeChan auf „False“ gesetzt wird wie in der folgenden Abbildung beispielhaft dargestellt.

- e. Abspeichern der gesamten Config
- f. Anschließen der Hilfsmittel an den Drucksensor, Druckausgleich

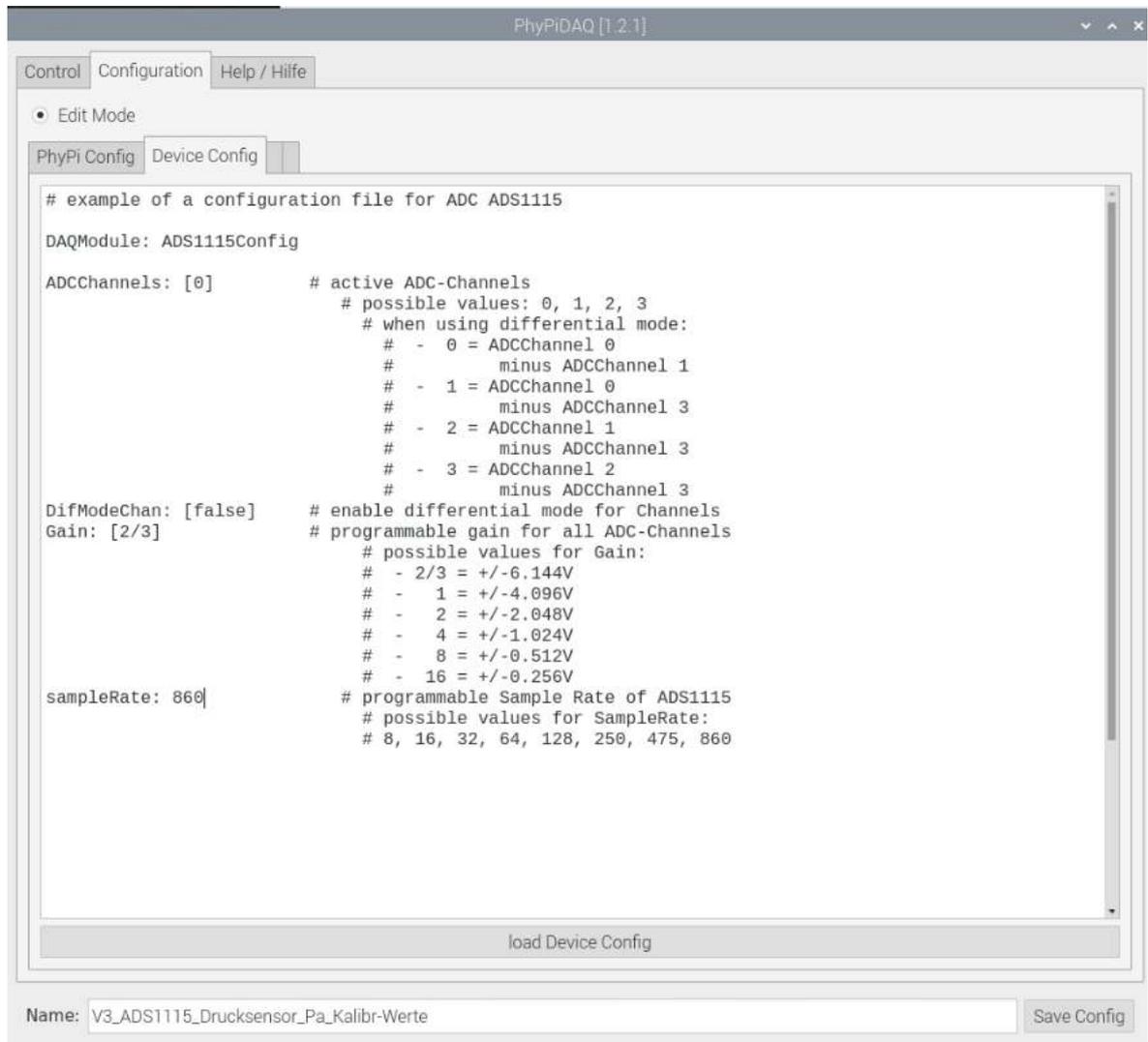


Abbildung 39: Geräte-Konfigurationsdatei der Drucksensor-Kalibration

3. Starten der Messung durch Betätigen des „Run“-Buttons auf der PhyPiDAQ-Startseite. Bei Verwendung eines externen Referenz-Manometers schließen sich folgende Schritte an:
 - a. Notieren der Spannung, welche von PhyPiDAQ ausgegeben wird, bei aktuell vorliegendem Druck, welcher recherchiert werden muss (Atmosphärendruck) in die Arbeitsmappe des Tabellenkalkulationsprogramms
 - b. Stückweises Erhöhen des Drucks je nach Messbereich des Referenz-Manometers, sodass insgesamt mindestens 8 Spannungswerte gemessen werden können. Notieren des vorliegenden Druckes und der Spannung

- c. Wiederholen des vorherigen Schrittes, bis der zukünftige Messbereich (maximal 8-9 bar) durch Messungen abgedeckt ist
 - d. Anschluss der Vakuum-Luftpumpe und Fortführen der Messungen bis ein Unterdruck von bis zu $-800\,000$ Pa erzeugt wurde. Für den hauptsächlichen Gebrauch im positiven Druckbereich ist auch ein maximaler Unterdruck von $-100\,000$ bar ausreichend. Alternativ können bei hinreichend bestimmter Kalibrationsfunktion (im Besten Fall eine Gerade) die Wertepaare im negativen Bereich bestimmt werden
 - e. Beenden der Messung
4. Eingabe der Messdaten in eine neue Haupt-Config unter dem Befehl „ChanCalib“ in Form von [[Referenzwert1, Referenzwert2, ...], [Sensorwert1, Sensorwert2, ...]] wie beispielsweise in folgender Abbildung ersichtlich

```

PhyPi Config
# -- Configuration Options for PhyPiDAQ
# -----
# Config für ADS1115 1.v. mit Drucksensor, 3-adrig.
# Kalibrationswerte aus Kalibration mit Vakuum-Handpumpe
#
# -- configuration files for hardware devices
#
DeviceFile: config/ADS1115Config.yaml # 16 bit ADC, 12C bus
#
# -- configuration options for data channels
#
ChanLimits:
- [1000., 1000000.] # chan 0
#
# Wenn in Device-Config der Differential-Mode auf "false" ist, dann wird im
# "Single ended"-Mode gegen Masse gemessen
# In diesem Fall werden aus Kalibration mit Vakuum-Pumpe die Werte in ChanCalib
# übernommen.
# Wird stattdessen Differential-Mode auf "true" gesetzt, wird die Spannung zwischen
# zwei analogen Eingängen gemessen (d.h. beide Eingänge, z.B. A0 und A1 müssen beschaltet sein).
# Da nur ein Signal vorliegt, setze DifModeChan auf "False".
# Werte (Achtung: Werte müssen durch neue ersetzt werden, da sich Setting geändert hat!):
ChanCalib:
- [ [-100., 0., 100000., 200000., 300000., 400000., 500000., 600000., 690000., 710000., 810000., 1010000.],
  [0.315, 0.344, 0.646, 0.643, 1.163, 1.411, 1.716, 1.945, 2.196, 2.21, 2.431, 2.565] ] # chan0: interpolation: [true][<raw>]
#
# apply Formulae to (calibrated) channel values
# ChanFormula:
# - c0*100000/(3.60)
# - c0 + c1 # chan0
# - c1 # chan1
# - null # chan2 : no formula
#
# -- configuration options for graphical display
#
Title: Echtzeit Druckmessung # display title
ChanLabels: [p] # names for channels
ChanUnits: [Pa] # units for channels
ChanNames: [c0] # names for channels
ChanColors: [darkblue] # channel colours in display
#
Interval: 0.1 # logging interval
#HistoryPoints: 120 # number of points used in history buffer
#DisplayModule: DataLogger # history of channel signals
DisplayModule: DataGraphs # text, bar-graph, history and xy-view
#DisplayModule: null # no graphical display
# no graphical display
# enable/disable XY-display
# if more than two channels active:
#Chan2Axes: [0, 1, 0] # assign channels to axes
#xyPlots: # define which axes to show
# - [0, 1] # in xy-plot
# - [0, 2]
# - [1, 2]
#
# -- start in running or paused mode
startActive: true # start in running mode
#
# -- configuration options for output to file
#
#DataFile: testfile.csv # file name for output file,
DataFile: null # null to disable
#CSVseparator: ',' # field separator, set to ';' for German Excel
#
# enable buffering of latest data (depth NHistoryPoints from above)
#bufferData: PhyPiData # file name to track and store latest data
#bufferData: null # or null to switch off
#
# enable output to fifo (a linux pipe) to send data to other processes
DAQfifo: null
#DAQfifo: PhyPiDAQ.fifo
#
# reload device config(s)

```

Name: V5_ADS1115_Drucksensor_?a_Kalibr_Werte_diff_FINAL Save Config

Abbildung 40: Haupt-Konfigurationsdatei nach der Drucksensor-Kalibration

5. Abspeichern der neuen Config unter einem entsprechenden Namen, wie beispielsweise „Drucksensor-Kalibration“

Wird ein kalibrierter, in PhyPiDAQ integrierter Drucksensor als Referenz verwendet, so erfolgt das Auslesen der Wertepaare anhand der erzeugten CSV-Datei, welche direkt in die neue Config eingegeben werden können. Da der AD-Wandler gegen Masse geschaltet ist, findet bei jeder Messung mit dem neu kalibrierten Drucksensor eine Relativdruckmessung statt. Wird mit den Messwerten gerechnet, so ist darauf zu achten, dass der Atmosphärendruck gegebenenfalls hinzugerechnet werden muss.

Wird nicht mithilfe von PhyPiDAQ kalibriert, geschieht dies ähnlich. Im Vorfeld dieser Arbeit wurde dieser Weg gewählt und soll im Folgenden ergänzend dargestellt werden. Hierbei können folgende Schritte empfohlen werden:

1. Sicherstellen der richtigen Verkabelung des Drucksensors mit dem Multimeter und der Spannungsversorgung, Verbinden des Drucksensors über die Schlauchtülle mit dem Referenz-Gerät, wie in folgender Abbildung am Beispiel der Vakuumpumpe dargestellt. Hierzu muss das grüne Kabel mit dem Eingang des Multimeters (mittig im Bild) und das schwarze Kabel mit der Masse des Multimeters und der Spannungsquelle verbunden werden. Um eine eventuelle Spannungs-Übersorgung des Drucksensors zu vermeiden, ist es empfehlenswert, das rote Kabel des Sensors erst nach Einschalten des Netzgerätes (Spannungsquelle, oben im Bild) und Einstellen der Versorgungsspannung (5 V) mit diesem zu verbinden.

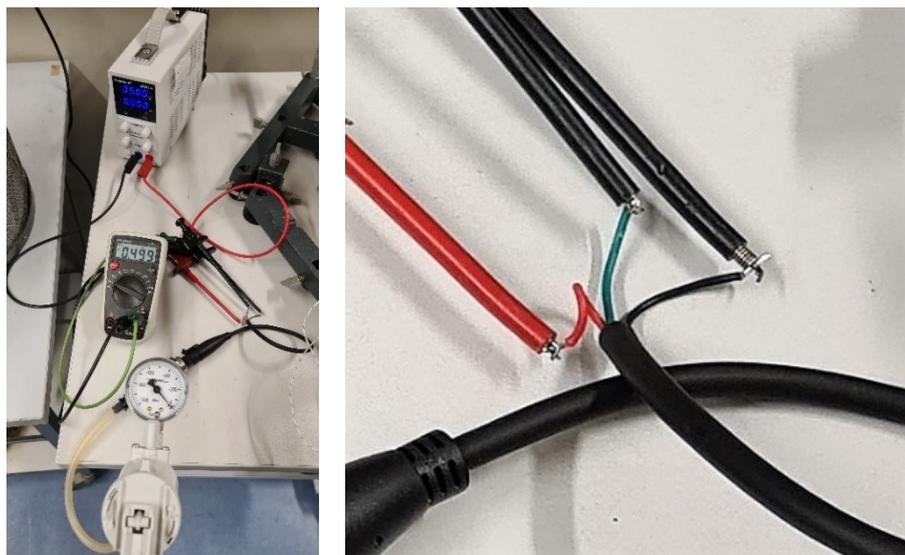


Abbildung 41: Links: Experimenteller Aufbau der Drucksensor-Kalibration;
Rechts: Verkabelung in Nahansicht

2. Einschalten des Multimeter und des Netzgerätes, Verbinden des roten Kabels mit dem Netzgerät. Ablesen und Eingeben des vom Multimeter detektierten Spannungswerts als Wertepaar mit dem aktuell vorliegenden Atmosphärendruck in eine PC-Anwendung, wie beispielsweise ein Tabellenkalkulationsprogramm. Der Atmosphärendruck kann über Recherche von Wetterdiensten hinreichend genau ermittelt werden. In obiger Abbildung ist eine Mess-Spannung von knapp 500 mV bei dem Atmosphärendruck, welcher zum Zeitpunkt der Messung vorlag, ersichtlich.
 3. Durch Erhöhen und Absenken des Druckes sind im Bereich von mindestens -0,1 bis 8 bar hinreichend viele Wertepaare aufzuzeichnen, um die Aussagefähigkeit der Kalibration zu erhöhen. Im Falle der oben ersichtlichen Kalibration des Drucksensors wurden im negativen wie im positiven Druckbereich (ausgehend vom Atmosphärendruck) insgesamt 19 Wertepaare aufgenommen. Im Folgenden wird der Negativdruckbereich genauer untersucht, da mit der Vakuumpumpe exaktere Drücke einstellbar waren als mit der Fahrradluftpumpe. Um eine Aussage über die statistischen Fehler/Abweichungen treffen zu können, ist es sinnvoll, in mehreren Messreihen die Spannungen bei gleichen Drücken aufzunehmen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden vier Messreihen im negativen Relativdruckbereich aufgestellt und die Mittelwerte und Standardabweichungen berechnet. Hieraus ergab sich eine sehr geringe maximale Streuung (Standardabweichung) von $\sigma_{max} = 700 \mu V$. Alternativ kann die Berechnung des statistischen Fehlers auch durch das Visualisierungsprogramm erfolgen (in Folgenden Schritten dargelegt).
 4. Unter Berücksichtigung der systematischen Fehler/Messunsicherheiten, welche aus dem Datenblatt des Multimeters und des Drucksensors hervorgehen, werden mithilfe eines Visualisierungsprogramms die Messwerte visualisiert und die Spannung über dem Druck dargestellt. Im Zuge dieser Arbeit wurden hierfür die Programme Origin und ein Python-basiertes Visualisierungsskript namens PhyPraKit genutzt. Kostenlose und Open-Source-Programme, mit denen dies auch möglich ist, sind beispielsweise LabPlot2 und SciDAVis
 5. Entsprechend des Verlaufs der Wertepaare ist im Folgenden die Anpassung einer Funktion an die Wertepaare nötig, um das Verhalten des Drucksensors quantifizieren zu können. Im Falle des vorhandenen Drucksensors zeigte der Drucksensor, wie die folgende Abbildung des negativen Relativdruckbereichs zeigt, nahezu einen idealen linearen Verlauf. Um seine Linearität zu überprüfen, ist
-

mit einer quadratischen Funktion angenähert worden. Der kleine quadratische Term q attestiert in diesem Fall eine sehr gute Linearität

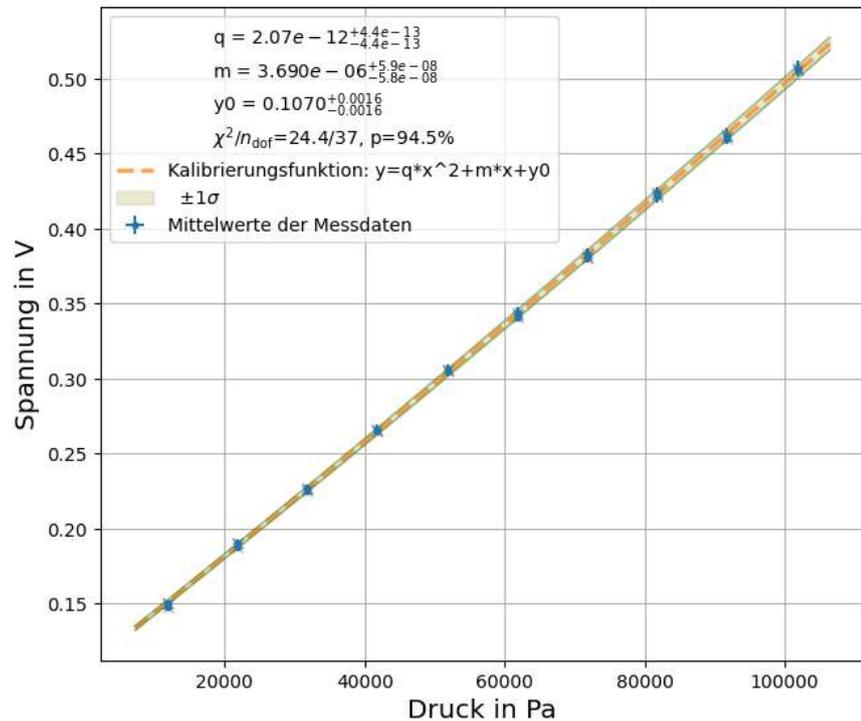


Abbildung 42: Schaubild der Drucksensor-Kalibrationsfunktion

6. Die ermittelte Funktion muss im Folgenden näher betrachtet werden: Die vom Programm ausgegebene Funktion $U = 3,69 * 10^{-6} * p + 0,107 \text{ V}$ stellt in diesem Fall keine Ursprungsgerade dar, sondern weist einen geringen Offset auf, welcher aber auch von Sensor zu Sensor unterschiedlich sein kann und eine Absolutwert-Kalibrierung als nicht zweckmäßig erscheinen lässt. Darum soll die Druckmessung in diesem Rahmen als Relativdruckkalibrierung erfolgen, wodurch die Güte lediglich von der Steigung der Geraden und ihren Fehlern abhängt. Die Steigung m der Geraden beträgt somit $m = \frac{U_2 - U_1}{p_2 - p_1} = (3,69 * 10^{-6} \pm 5,8 * 10^{-8}) \frac{\text{V}}{\text{Pa}}$ und kann für künftige Messungen verwendet werden
7. Für künftige Messungen muss die ermittelte Funktion in das entsprechende Messprogramm eingespeichert werden. Da nur die Differenzdrücke entscheidend sind, muss die Spannung, die bei Atmosphärendruck vorliegt, berücksichtigt werden:
 - a. Messen und notieren der Spannung bei Atmosphärendruck

- b. Eingeben der nach dem Druck umgestellten Funktion $\Delta p = \left(\frac{\Delta U}{m}\right)$ in das Feld „ChanFormula“ der neu erstellten Haupt-Config, mit welcher künftig gemessen werden soll
- c. Eingeben des Atmosphärendrucks in die Formel. Dies kann folgende Form annehmen: $\Delta p = \left(\frac{c_0 - U_0}{m}\right)$ mit c_0 als Messkanal und U_0 als Atmosphärendruck in V

Hierdurch werden die gemessenen Spannungen in zukünftigen Messungen automatisch mit der Formel umgerechnet.

Anhang 03 – Konzipierung von und Versuche mit Prototyp 1

Um das in [Kapitel 4](#) definierte Konzept, Lernenden auf anschauliche Weise grundlegende thermodynamische Gesetzmäßigkeiten (durch digitale Unterstützung) näherzubringen, in Form eines Versuchsaufbaus umzusetzen, wurden insgesamt drei Prototypen entwickelt. Hierbei sei anzumerken, dass die jeweils folgenden Prototypen eine Optimierung der vorhergegangenen darstellen. In diesem Teil soll der erste Prototyp von der Idee bis zum experimentellen Einsatz und seiner Auswertung dargelegt werden.

Konzipierung und Fertigung

Eine oft eingesetzte Vorrichtung, den Druck eines Gases zu erhöhen, erfolgt über Kunststoff- oder Glasspritzen, welche für den Relativdruckbereich hinreichend dicht sind. Das durchsichtige Material des Spritzenkörpers hat dabei den Vorteil, dass er für die Lernenden eine sichtbare Bestätigung dessen darstellt, was angenommen wird. In einem undurchsichtigen Körper bliebe verborgen, was sich darin befindet. Da durch den Einlass beziehungsweise die Tülle der Spritze die Anbindung an den Druck- und Temperatursensor realisierbar sein müsste, bietet es sich an, eine in verschiedenen Größen erhältliche Kunststoffspritze zu nehmen. Zum Zwecke der Anschaulichkeit und Handhabbarkeit wurde ein großes Modell (Kostenpunkt ca. 10 €) mit einem Fassungsvermögen von $V=550$ ml ausgewählt.

Um den Fokus vollständig auf die Prototyp-Konstruktion zu richten und Fehlerquellen gering zu halten, fiel die Entscheidung für einen von PhyPiDAQ unabhängigen Betrieb der Sensoren:

- Die Auslesung der Temperatur erfolgte über ein geeignetes Multimeter (Voltcraft 350 E), mit welchem ein Thermoelement (Typ K, Kostenpunkt ca. 15 €) verbunden wurde. Hierzu nutzte das Multimeter den intern verbauten Temperatursensor, um die für das Auslesen der Messtemperatur nötige Vergleichstemperatur zu bestimmen.
- Der Drucksensor (ca. 15 €) hält wurde wie bei der Kalibration beschrieben, extern an einem DC-Generator ($U = 5$ V) betrieben. Die Differenzspannung wurde mit einem Multimeter (Voltcraft VC170) gemessen.

Die Konstruktion und Fertigung des Prototyps 1 sollte möglichst einfach gehalten werden. Zu diesem Zweck wurde die Schlauchtülle bei ausgefahrenem Kolben über ein Schlauchstück und Schlauchschellen mit einem T-Fitting aus Kupfer verbunden, welcher wiederum an den Druck- und Temperatursensor verbunden wurde.



Abbildung 43: Anbindung des Drucksensors an Prototyp 1

Da der Drucksensor ein Außengewinde aufweist, kann dieser über einen gedehnten Schlauch mit Ramsayfett und Schlauchschelle an den T-Fitting montiert werden. Da durch die Glasfaser-Ummantelung der Thermoelement-Litze signifikant viel Luft entwich, wurde sie im letzten Optimierungsschritt dieses Prototyps entmantelt und in Heißkleber eingegossen, bevor sie an den T-Fitting montiert wurde.



Abbildung 44: Abdichten der Thermoelement-Litze mit Heißkleber

Die luftdichte Verbindung von Sensoren und der Spritze gestaltete sich schwieriger als zunächst angenommen und konnte nur hinreichend gut realisiert werden.



Abbildung 45: Fertiggestellter Prototyp 1

Dennoch ist das Durchführen von Versuchen mit diesem Prototyp möglich, wenn der entweichende Luftstrom in den Messungen und Berechnungen berücksichtigt wird.

Versuche und Berechnungen

Durch anfängliche Versuche mit dem Prototyp 1 konnte trotz des Luftentweichens eine gleichzeitige Erhöhung der Temperatur mit dem Druck verzeichnet werden.

Hierauf aufbauend wurden folgende Versuche mit dem vertikal ausgerichteten Prototyp durchgeführt:

- 4 Messreihen mit gestaffelter Belastung von 1-5 kg
- 3 Messungen mit einer einmaligen Belastung von 20 kg Gewicht
- 2 Messungen mit maximaler Muskelkraft

Auswertung der 4 Messreihen mit gestaffelter Belastung (isotherm)

Im ersten Versuch quantitativer Art wurde der Kolben des Prototyps mit Gewichten von 1 bis 5 kg in 1 kg -Schritten belastet und dabei das Volumen von der Spritze, der Druck über die Spannung des Drucksensors und die Temperatur über das Multimeter abgelesen und notiert. Da die Druckerhöhung in solch kleinen Schritten stattfand, änderte sich die Temperatur nicht. Diese isotherme Zustandsänderung lässt sich am sinnvollsten in einem pV-Diagramm veranschaulichen, in welchem der Absolutdruck über dem Volumen aufgetragen wird. Hierbei wurden die gemessenen Werte der Spannung über die Kalibrationsfunktion in einen Druck umgerechnet und mit den theoretisch nach der Formel $p = \frac{F}{A} + p_0$ errechneten Werten verglichen. Die Messergebnisse der vier Messreihen sind den folgenden Schaubildern zu entnehmen.

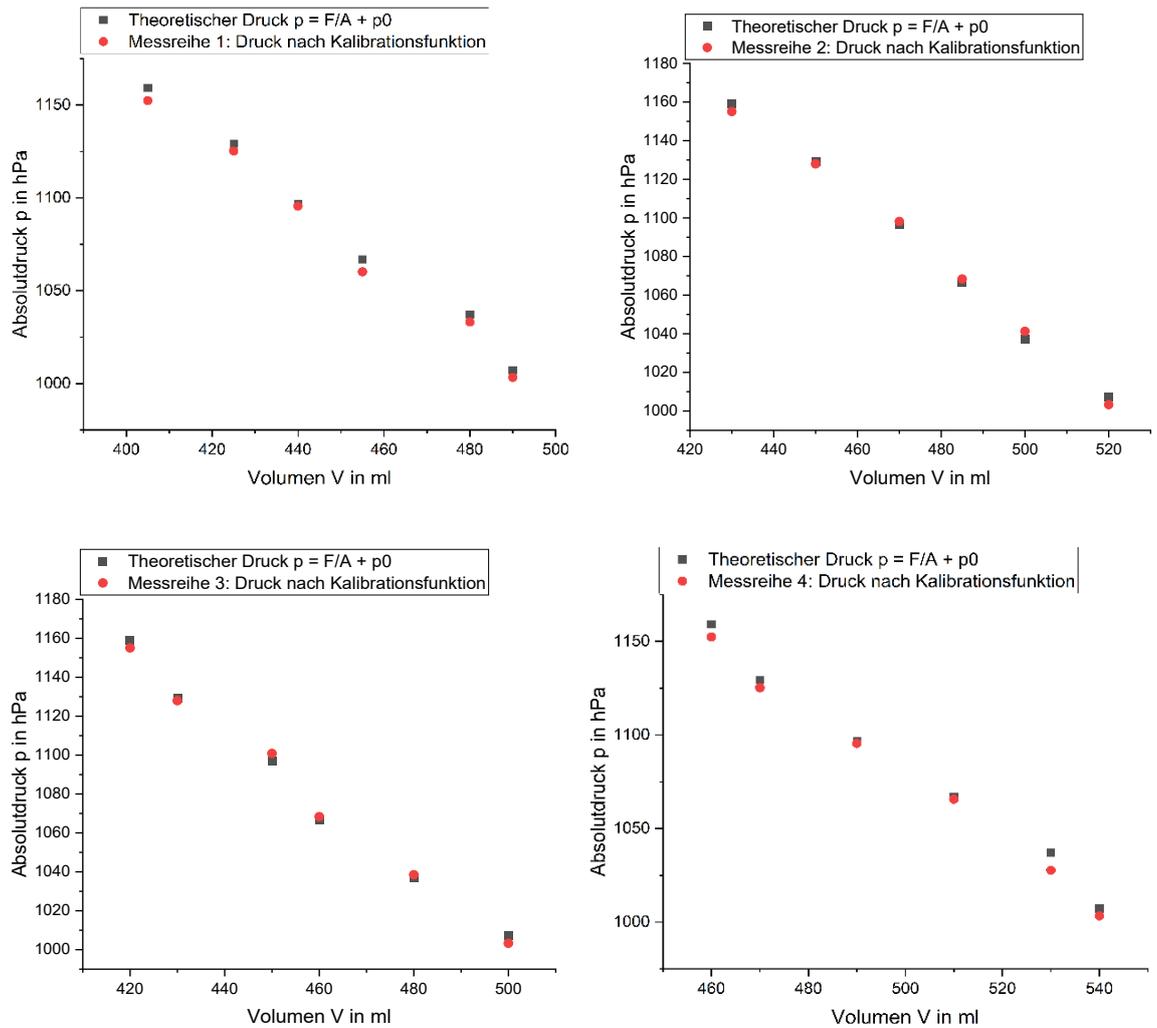


Abbildung 46: Vergleich des theoretischen erwarteten Drucks mit dem gemessenen Druck bei Belastung mit Gewicht der Massen von 1-5 kg

Hierbei fällt auf, dass die theoretischen Druckwerte mit den gemessenen Druckwerten weitgehend übereinstimmen und die Undichtigkeit in diesem Fall einen vernachlässigbaren Charakter hat. Auf eine weitere Ausdifferenzierung der Ergebnisse soll an dieser Stelle verzichtet werden.

Auswertung der Messungen mit einmaliger Belastung

Um bei einem höheren Druck das Verhalten des Systems vor dem Hintergrund der Undichtigkeit nachzuprüfen, wurde der Prototyp mit einem 20 kg -Gewicht belastet und der Druck, das Volumen und die Temperatur festgehalten. Die Ergebnisse sollen die folgenden Abbildungen veranschaulichen.

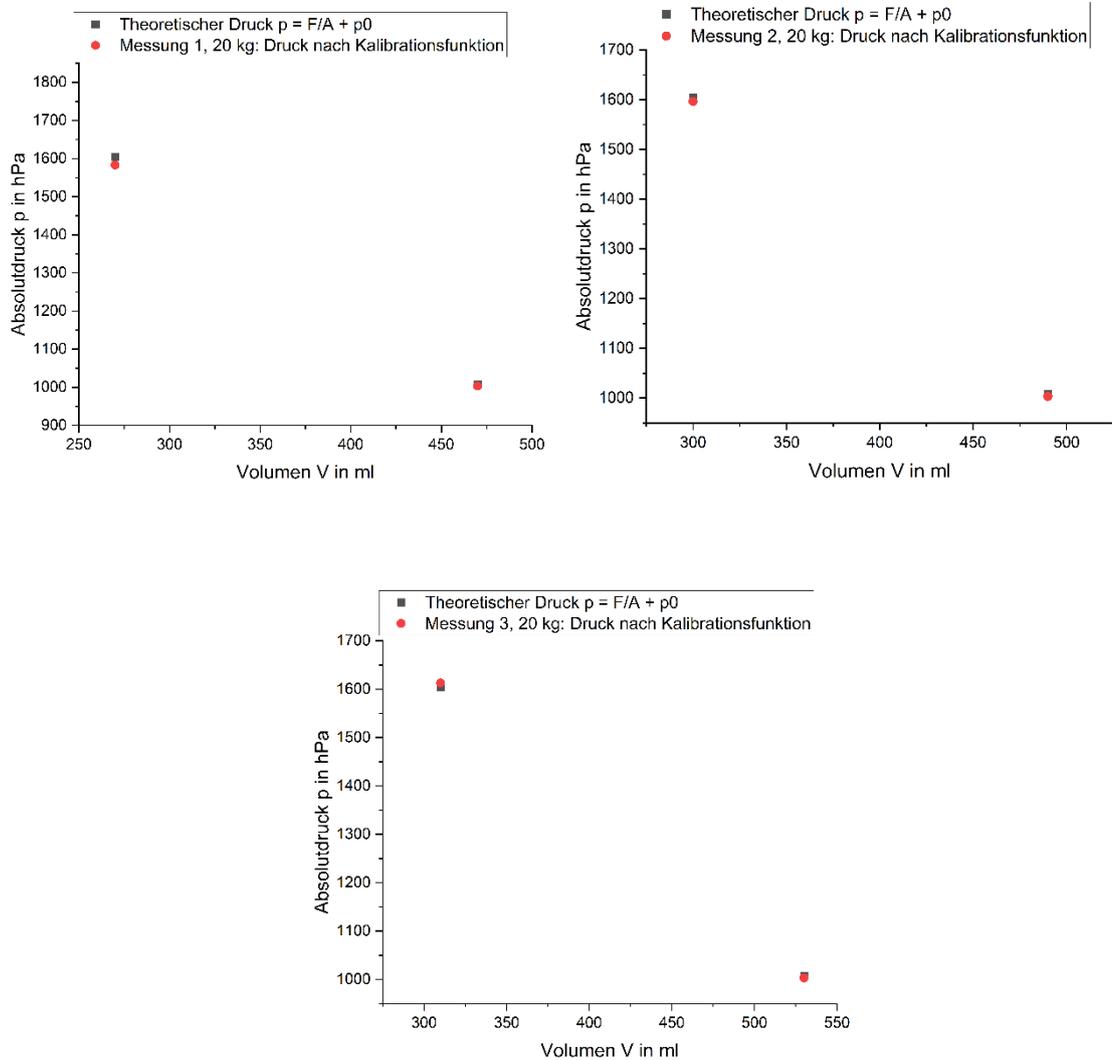


Abbildung 47: Vergleich des theoretischen erwarteten Drucks mit dem gemessenen Druck bei Belastung mit einem Gewicht der Masse von 20 kg

Alle drei Messungen zeigten die weitgehende Übereinstimmung von theoretischem und realem Druck. Die Unterschiede sind marginal, obwohl bei jeder Messung Luft ausgetreten ist. Auch in diesem Fall kann mit diesem Prototyp eine isotherme Zustandsänderung, sofern sie kurz genug andauert, um einen übermäßigen Luftverlust zu vermeiden, durchgeführt und gezeigt werden.

Auswertung der Messungen mit maximaler Muskelkraft

In den folgenden zwei Messungen wurde mit maximaler Muskelkraft beziehungsweise vorhandener Gewichtskraft das Gas komprimiert. Hierbei hat sich im Gegensatz zu den vorherigen Messungen die Temperatur im ersten Fall um 7 °C und im zweiten Fall um 8 °C erhöht. Dennoch soll dieser Vorgang in einem pV-Diagramm veranschaulicht werden, um den Druckunterschied zu verdeutlichen.

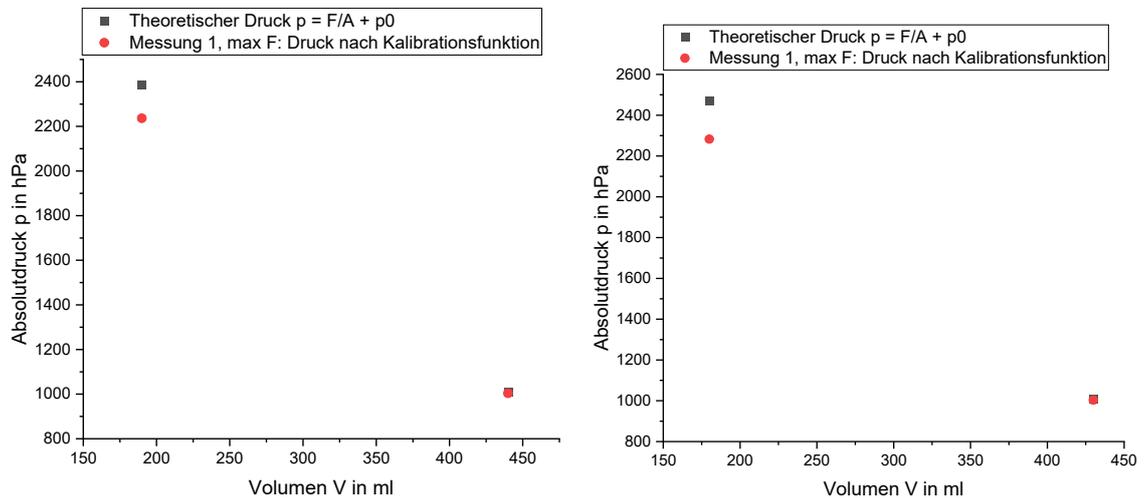


Abbildung 48: Vergleich des theoretischen erwarteten Drucks mit dem gemessenen Druck bei maximaler Muskelkraft

Aus den Messungen ist zu erkennen, dass der theoretische Druck in beiden Fällen höher ist als der gemessene Druck. Im Zuge der Kompression müsste die Luft durch die Erwärmung sich ausdehnen und einen Überdruck erzeugen. Stattdessen ist der gemessene Druck deutlich niedriger als der theoretisch berechnete. Da nach den Messungen das Restvolumen geringer als zuvor war, ist davon auszugehen, dass die Undichtigkeit zu einem Druckabfall führte, wodurch die Messung verfälscht wurde.

Diskussion der Ergebnisse des Prototyps 1

Durch den Luftverlust wurde nach jeder Belastung des Aufbaus das noch verbliebene Anfangsvolumen notiert, welches bei kurzer Belastung jedoch nahezu unverändert blieb. Bei den Versuchen bis rund 5 kg Belastung konnte durch einen Vorher-Nachher-Vergleich der Volumina ein Luftaustritt von 2-4 % des Anfangsvolumens registriert werden, was bei 500 ml Inhalt rund 10-20 ml entspricht.

Zur genaueren Bestimmung des Einflusses des Luftentweichens wurde weiterführend untersucht, wieviel Luft pro Sekunde tatsächlich entweicht. Hierzu wurde der Versuchsaufbau 2 min lang mit einem 20 kg - Gewicht belastet bei gleichzeitiger Messung

des Druckes, des Volumens und der Temperatur jeweils vor, während und nach der Belastung. Es ergab sich, dass während der Be- und Entlastung eine große Luftmenge in Höhe von 3-4 cm³/s entwich, während bei der statischen Belastung selbst eine vergleichsweise geringe Luftmenge von 0,4-0,5 cm³/s entwichen sein muss. Das Entweichen von Luft bei Be- und Entlastung ist somit sieben- bis achtfach höher als bei statischer Belastung. Dieses Verhalten könnte durch das Spiel des Kolbens zum Zylinder zustande gekommen sein, da die Anschlüsse der Sensoren nun hinreichend luftdicht sein müssten. Eine solche Kunststoffspritze wurde offensichtlich nicht für höhere Drücke konzipiert.

Mit diesem Prototyp kann konkludierend folgendes gezeigt werden:

- Kompressibilität von Gasen/Luft
- Zusammenhang zwischen Volumen und Druck (isotherme Zustandsänderung)
- Erhöhung der Temperatur bei schneller Druckerhöhung

Die Versuche mit diesem Prototyp und die eingetretenen Probleme geben Auskunft über seine Schwächen:

- Luftentweichen weiterhin problematisch
- Ein zu hoher Kraftaufwand ist für eine wahrnehmbare Temperaturdifferenz nötig
- Die Montage der Sensoren gestaltet sich schwierig und die Haltbarkeit der Verbindungen ist begrenzt
- Die Einsatzvielfalt des Prototyps ist begrenzt

Die Optimierung des Prototyps 1 soll durch die Neukonstruktion in Form des Prototyps 2 erfolgen, welche in folgendem Anhang dargelegt wird.

Anhang 04 – Konstruktion von und Versuche mit Prototyp 2

Konzeption, Konstruktion und Fertigung

Ausgehend von den Schwächen des ersten Prototyps (1) ergeben sich folgende Optimierungsmöglichkeiten für einen weiteren Prototyp (2):

- Luftdichte Konstruktion
- Kleinerer Kolbendurchmesser, um einen höheren Druck bei geringerem Kraftaufwand realisieren zu können
- Einfachere, stabilere Anbindung der Sensoren an den Prototyp
- Möglichkeit des Wärmeaustauschs, um den Anwendungsbereich zu vergrößern und eventuell Kreisprozesse darstellen zu können

Als Inspiration des Prototyps 2 diente der Versuchsaufbau zur Untersuchung des idealen Gasgesetzes von Pasco, welches beispielsweise über Conatex.com erwerbbar ist. Hierbei handelt es sich um einen Sockel, in welchen eine Spritze eingefasst ist und Anschlüsse für die Auslesung des Drucks und der Temperatur bereitstellt.

Um dieses Modell in der Richtung weiterzuentwickeln, dass eine Wärmezufuhr möglich wird und mit günstigen Sensoren die Messwerte Pasco-System-unabhängig ausgelesen werden können, wurde es als Inspiration für den Prototyp 2 genutzt.

Demnach soll der Sockel (wie rechts in 3D dargestellt) aus einem Würfel oder Zylinder bestehen, in welchen durch eine Bohrung die Spritze eingelassen wird und die Sensoren über seitliche Bohrungen dem Prozessraum zugeführt werden. Theoretisch könnte der Sockel 3D-

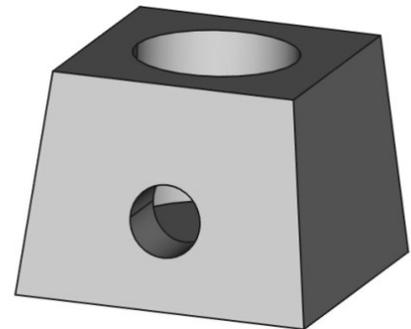


Abbildung 49: 3D-Ansicht des ersten Entwurfs des Sockels

gedruckt werden, wenn er keinen höheren Temperaturen standhalten müsste. Dies kann in diesem Fall jedoch nicht geschehen, da eine Wärmübertragung angedacht ist. An die Einzelteile sind somit Anforderungen zu stellen, die sie in Hinsicht auf den späteren Einsatzbereich erfüllen müssen.

- Anforderungen Sensorik:
 - o Ummantelung des Thermoelements an Sockel ist luftdicht und weitgehend temperaturbeständig (→ Silikonummantelung)

- Anbindung des Drucksensors ist weitgehend haltbar und beständig gegen mechanische Einflüsse (→ Schlauchtülle)
- Anforderungen Sockel
 - Material sollte aus einem hitzebeständigen Material sein, jedoch günstig, verfügbar, schlecht wärmeleitend (zum Schutz der Spritze) und gut bearbeitbar sein (→ z.B. PTFE/Teflon)
 - Abdichtung der Anschlussstellen und Fugen sollte durch hitzebeständige Dichtungsmasse erfolgen (→ Dichtungsmasse für KFZ-Anwendungen)
- Anforderung Bodenplatte:
 - Gut bearbeitbar, jedoch hinreichend dick/stabil
 - Gut wärmeleitend (→ Aluminium)

Für die Auswahl des Materials der Bodenplatte wurden vorhandene Kupfer und Aluminiumbleche auf ihr Wärmeleitvermögen hin untersucht. Das etwas dünnere Aluminiumblech leitete deutlich schneller die Wärme, weshalb es für diesen Prototyp verwendet wurde. Zum Zwecke der besseren Wärmeleitung wurde die wärmeleitende Oberfläche durch das Anbringen von kleinen Kühlkörpern vergrößert.

Für das Material des Sockels, welcher im Kontakt mit dem ggf. heißen Aluminiumblech nicht schmelzen darf und gleichzeitig die Wärme nur sehr langsam an die Spritze weitergeben sollte, eignet sich der technische Kunststoff PTFE beziehungsweise Teflon. Dieser ist bis ca. 260 °C formstabil, schlecht wärmeleitend und gut bearbeitbar, zeigt aber leider auch ein äußerst schlechtes adhäsives Verhalten (was sich in diesem Fall als nachteilig herausstellt). Als Form fiel die Entscheidung auf einen Zylinder, da dieser bezüglich der Außenabmaße bereits im Endmaß zu erwerben war. Für die Ab/Zufuhr von Luft/Gas war zusätzlich ein Hahn-Ventil vorgesehen.

Durch erste Tests hat sich herausgestellt, dass durch die Fuge zwischen Sockel und Spitze Luft entweicht. Da durch wiederholtes Verkleben mit Dichtmasse die Fuge nicht dicht wurde und dies mit dem bekannten antiadhäsiven Verhalten von Teflon zusammenhängen musste, soll die Oberfläche mit einem ätzenden Mittel (Primer) vorbehandelt werden und die Fuge



Abbildung 50: Erneutes Abdichten der Fuge zwischen Sockel und Spritze

mit Cyanacrylat (sog. „Sekundenkleber“) geschlossen werden. Eine weitere, aber gefährlichere Möglichkeit ist das Ätzen der Oberfläche mittels Natrium-Naphtalin-Lauge (siehe klebeprofi.net), was jedoch vorerst nicht infrage kommen soll.

Das Verkleben gestaltete sich schwierig, erfolgte jedoch nach längerer Aushärtezeit.

Daher ist im Folgenden die korrigierte Konstruktionsanleitung mit Stückliste wiedergegeben.

Anhand der folgenden CAD-Zeichnung die Konstruktion des Prototyps gezeigt werden.

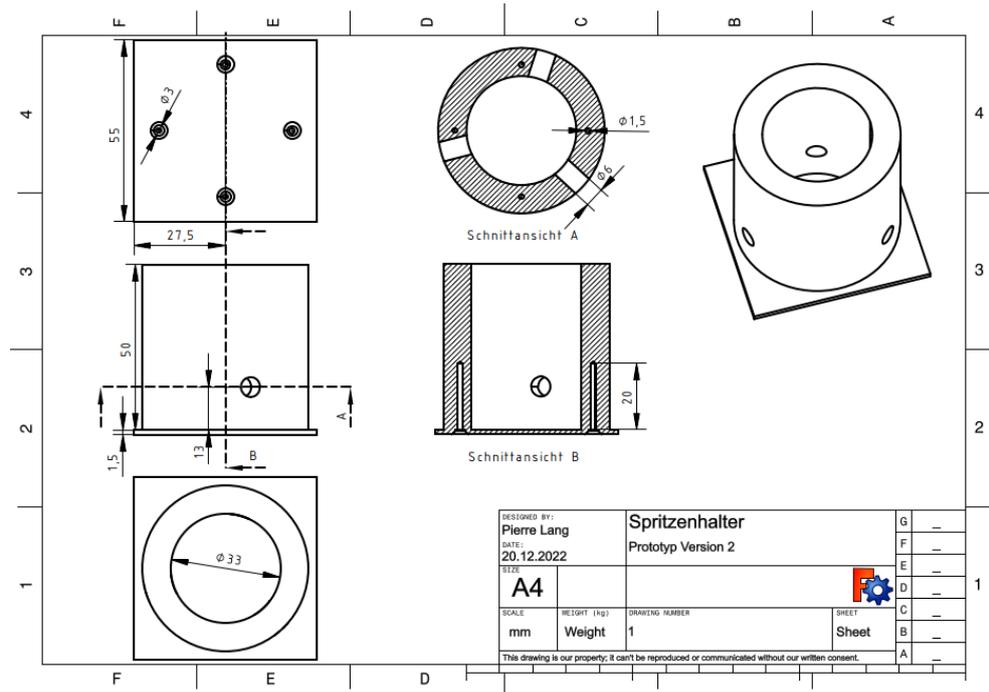


Abbildung 51: CAD-Zeichnung des Prototyps 2, erstellt mit Open-Source-Programm FreeCAD

Die erforderlichen Bauteile sind der folgenden Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 9: Materialien für die Fertigung des Prototyps 2

Bezeichnung	Präzisierung	Preis ¹⁹ und Herkunft ²⁰
Teflon-Rundstab	PTFE, Höhe ≥ 35 mm, Durchmesser ≥ 32 mm (Sockel)	2,63 €, ebay
Blech	Aus beispielsweise Aluminium, Stärke ≥ 1 mm, Abmaße $\geq 40 \times 40$ mm	7,09 €, ebay
Kunststoffspritze	PP, Inhalt: $V = 60$ ml	3,60 €, ebay
Drucksensor	mit Außengewinde G $\frac{1}{4}$, 150 PSI	13,92 €, ebay
Thermoelement	Typ K	9,99 €, conrad
Verstärkerboard	MAX31855	14,83 €, exp-tech
Ventil	Mit Gewinde, z.B. M5	3,99 €, ebay
Sekundenkleber	$m < 20$ g, mittelviskos	3,80 €, ebay
Primer	Für Vorbereiten des Verklebens	3,95 €, ebay
Kühlkörper	Kleine Microcontroller-Kühlkörper	2,99 €, ebay
Dichtmasse	hitzebeständig, Promark 2, 80 gr.	4,80 €, ebay
Verbindungsschrauben	3-4 Stk., klein, ca. 3x15	0,10 €, Baumarkt

Zusammenbau-Anleitung:

1. Erwerben/Bereitstellen aller notwendigen Teile (siehe obige Liste) und bereitlegen folgender Werkzeuge/Hilfsmittel:
 - Schraubendreher, Kreuz und Schlitz
 - Bohrmaschine
 - Kernlochbohrer mit einem Durchmesser, welcher dem Durchmesser der Spritze entspricht (hier: 32 mm)
 - 2 mm und 6 mm – Bohrer, Kegelsenker
 - Schleifpapier
 - Einmalhandschuhe und Schutzbrille (Hantierung mit Sekundenkleber und Primer)
2. Teflonwelle auf 50 mm kürzen

¹⁹ Zum Zeitpunkt der Konzipierung (2023), ohne Versandkosten.

²⁰ Da einzelne Bauteile bei der Konzeption bereits vorhanden waren, musste nicht alles bestellt werden.

3. Bohren des Ventil- und Drucksensorzugangs mit 6mm-Bohrer und des Thermoelement-Zugangs mit 2 mm-Bohrer, jeweils 120° versetzt zueinander
4. Innenrunddrehen oder Kernlochbohren der Teflonwelle auf Spritzenaußendurchmesser + 1mm, Behandeln der Kontaktfläche zur Spritze mit Primer
5. Zuschneiden der Bodenplatte, Anfertigen der Bohrungen und Senkungen für die Befestigungsschrauben zum Sockel, Mittiges Anbringen des Kühlkörpers
6. Sockelverbindung zur Bodenplatte vorbohren mit 1,5 mm-Bohrer
7. Abtrennen der Spritzenendkappe
8. Verbinden des Sockels mit der Spritze und Verfüllen des Zwischenraums mit mittelviskosem Sekundenkleber (Benötigt rund einen halben Tag, bis die Verbindung komplett ausgehärtet ist)
9. Montieren der Drucksensor-Anbindung (Tülle) und des Absperrventils mit Dichtmasse
10. Durchführen der Litze des Thermoelements durch die entsprechende Bohrung, Verfüllen der Bohrung mit Dichtungsmasse
11. Aufbringen der Dichtungsmasse auf die Auflagefläche der Bodenplatte und Verschrauben mit dem Sockel
12. Mindestens einen Tag lang aushärten lassen

Nach der Fertigstellung dieses Prototyps zeigten sich im Testlauf dennoch deutliche

Mängel:

- Bohrungen für Spritzenzylinder, Ventil, Druck- und Temperatursensor zu groß
- Dichtmasse verbindet sich nicht ausreichend mit dem Teflon, auch nach Behandlung des Teflons
- Mit Dichtmasse montierte Teile haben zu viel Bewegungsfreiheit (Spiel), was auf Dauer zu Undichtigkeit führen kann (vor allem Ventil, Druck- und Temperatursensor)
- Zu viel Volumen im unteren Teil des Sockels, das nicht komprimiert werden kann (Insgesamt niedrigerer Druck erreichbar)

Die ersten drei Punkte wurden in obiger Anleitung bereits berichtigt, jedoch führten zum Zeitpunkt der Entwicklung dieses Prototyps diese Mängel zum Entwurf eines nochmals optimierten Prototyps – dem (im Rahmen dieser Arbeit letzten) Prototyp 3.

Anhang 05 – Konstruktion und Fertigung des Prototyps 3

Der dritte Prototyp stellt gegenüber dem zweiten insofern eine Verbesserung dar, da folgende Punkte optimiert wurden:

- Deutliche Erhöhung der Dichtigkeit
- Erhöhung der Stabilität und Robustheit in der Anwendung (vor allem in Hinsicht auf einen Einsatz als Schülerexperiment)
- Verringerung des nicht komprimierbaren Volumens erlaubt eine höhere Drucksteigerung
- Simplifizierung der Fertigung
- Reduzierung des Materialaufwands durch kleineren Sockeldurchmesser

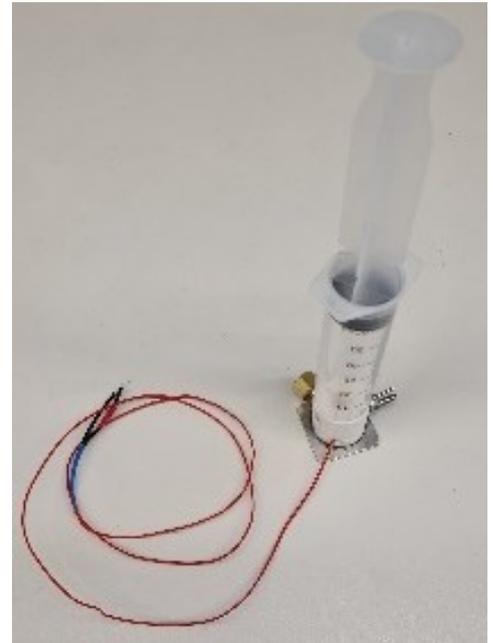


Abbildung 52: Fertiggestellter

Geändert haben sich im Vergleich zum letzten Prototyp lediglich der Außendurchmesser des

Sockels und die Bohrungen für die Spritzenzülle

und die Sensoren: Während die Bohrung für den Drucksensor gleichgeblieben ist, wurde der Durchmesser der Bohrung für die Spritzenzülle und das Thermoelement kleiner gestaltet. Die Anbindung des Ventils, welches anfangs noch verbaut wurde, wurde durch das Schneiden eines M5-Innengewindes in den Sockel und das darauffolgende Einkleben zum Zwecke der Stabilität und Dichtigkeit realisiert. Jedoch stellte sich bei Anwendungstests heraus, dass das eingesetzte Ventil (für den Aquarienbereich) und ein weiteres Ventil (für den Einsatz in der Pneumatik) Undichtigkeiten aufwies und letztendlich entfernt wurde. In der folgenden Fertigungsanleitung ist der Einbau dieses Ventils jedoch belassen worden, da es prinzipiell einen wichtigen Teil dieses Prototyps darstellt und andere Ventile womöglich eine höhere Dichtigkeit aufweisen könnten. Da eine Zu/Abführung von Wärme über die Bodenplatte durch den kleinen Durchmesser des Prozessraums nicht mehr effektiv ist, wäre es sinnvoll, bei der zukünftigen Fertigung des Prototyps die Bohrung nicht mehr als Durchgangs- sondern als Sacklochbohrung zu gestalten, wie es in der folgenden Fertigungsanleitung beschrieben wird. Hierdurch wird auch die Verwendung der Montagepaste obsolet. Auf den folgenden Bildern ist dennoch der Einsatz dieser Montagepaste zu sehen, da durch die Kernlochbohrung des vorherigen Prototyps eine Durchgangsbohrung entstand, welche abgedichtet werden musste (Rand-

Info: Der verwendete Sockel stellt das Abfallprodukt des Sockels vom Prototyp 2 dar). Zum Nachbau des Prototyps 3 wird die folgende Handlungsempfehlung gegeben, wobei anzumerken ist, dass dies keinen vorgegebenen Ablauf darstellt und gerne auch andere/weitere Schritte gegangen, Materialien verwendet oder Fertigungsweisen gefolgt werden können.

Benötigte Materialien:

Tabelle 10: Materialien für Prototyp 3

Bezeichnung	Präzisierung	Preis ²¹ und Herkunft ²²
Teflon-Rundstab	Höhe ≥ 35 mm, Durchmesser ≥ 32 mm (Sockel) Aus beispielsweise Aluminium, Stärke	2,63 €, ebay
Blech	≥ 1 mm, Abmaße $\geq 40 \times 40$ mm	7,09 €, ebay
Kunststoffspritze	PP, Inhalt: $V = 60$ ml	3,60 €, ebay
Drucksensor	mit Außengewinde G $\frac{1}{4}$, 150 PSI	13,92 €, ebay
Thermoelement	Typ K	9,99 €, conrad
Verstärkerboard	MAX31855	14,83 €, exp-tech
Ventil	Mit Gewinde, z.B. M5	3,99 €, ebay
Sekundenkleber	$m < 20$ g, mittelviskos	3,80 €, ebay
Primer	Für Vorbereiten des Verklebens	3,95 €, ebay
Verbindungsschrauben	3-4 Stk., klein, ca. 3x15	0,10 €, Baumarkt

Das Ventil sollte höhere Drücken (< 5 bar) standhalten können. Zuerst verbautes Ventil wies Undichtigkeit auf. Ein Drossel- oder Einweg-Ventil für Pneumatik-Anwendungen wäre am sichersten)

Werkzeug:

- Metallsäge, Halbrundfeile, Schleifpapier, Messer
- Bohrmaschine/Akkuschrauber, Stahlbohrer (Durchmesser: 2 mm, 4,7 mm, 6 mm, 10 mm), Gewindebohrer M5 und Kegelsenker (Anfertigen der Bohrungen)
- Einmalhandschuhe und Schutzbrille (Hantierung mit Sekundenkleber)

²¹ Zum Zeitpunkt der Konzipierung (2023), ohne Versandkosten.

²² Da einzelne Bauteile bei der Konzeption bereits vorhanden waren, musste nicht alles bestellt werden.

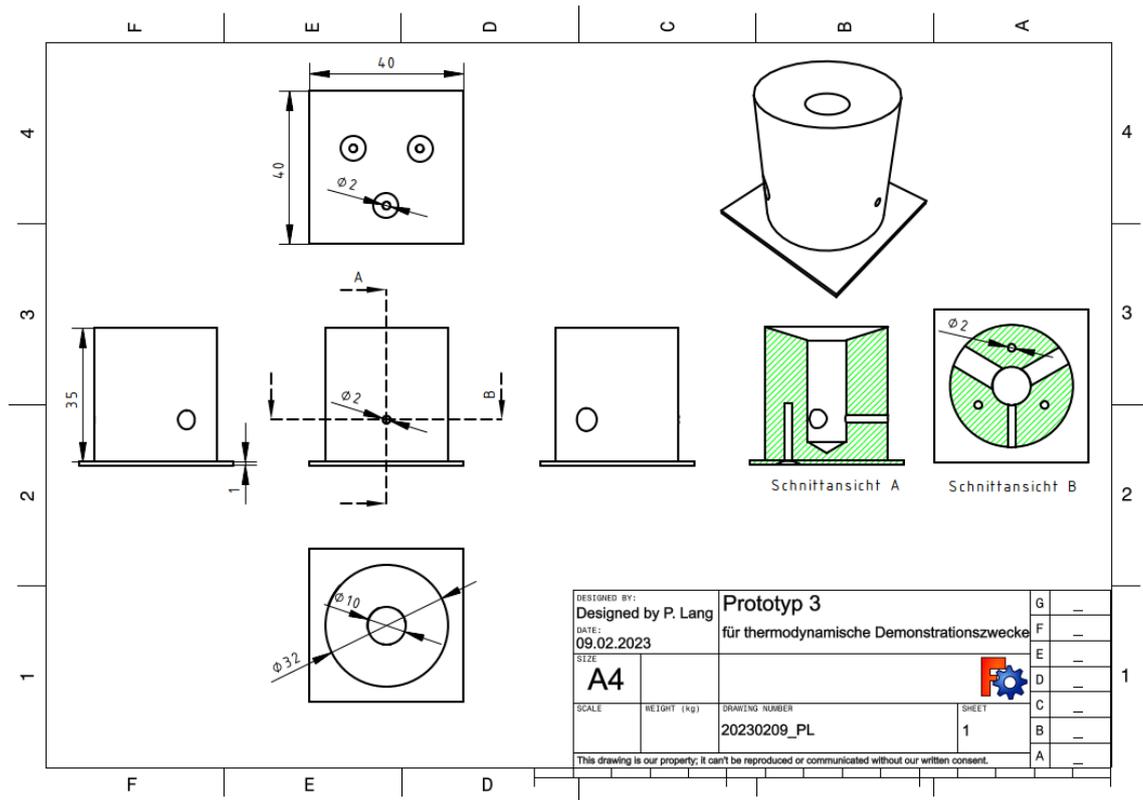
Konstruktionszeichnung

Abbildung 53: Konstruktionszeichnung, Erstellt durch Open-Source-Software FreeCAD

Fertigungsanleitung:

1. Teflon-Sockel auf Maß trennen ($h = 35$ mm, Durchmesser = 32 mm (Spritzendurchmesser)) und eine Durchgangsbohrung (oder mit einem 10 mm-Bohrer durchführen)
2. Bohrung für Spritze durchführen, 10 mm über Sockelboden an 3 Stellen für die Bohrungen der Sensoren und das Ventil anzeichnen (jeweils 120° versetzt)
3. Für Drucksensor-Durchgang Bohrung mit einem 6mm-Bohrer durchführen
4. Für Thermoelement-Durchgang Bohrung mit einem 1,5 mm-Bohrer durchführen
5. Für das Ventil mit dem entsprechenden Bohrer (in diesem Fall einem 4,7 mm-Bohrer) vorbohren und mit dem entsprechenden Gewindeschneider (in diesem Fall der Größe M5) behutsam ein Gewinde schneiden (Teflon ist sehr weich)

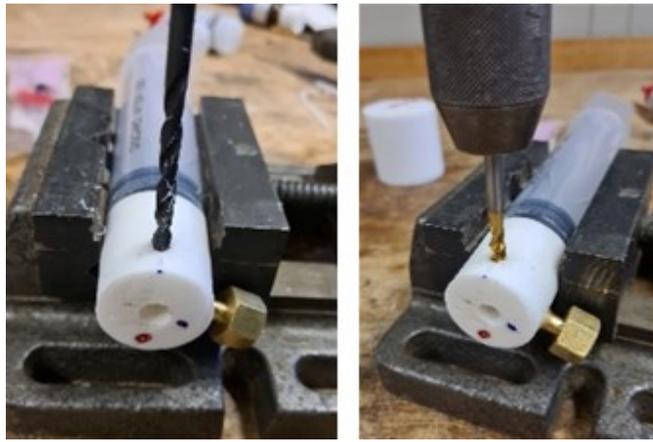


Abbildung 54: Vorbohren und Gewindeschneiden für das Ventilgewinde

6. Die Oberseite des Sockels mit einem scharfen Werkzeug anschrägen, sodass der Spritzenkopf an allen Kontaktflächen anliegt. Falls der Auslass der Spritze zu lang, diesen entsprechend kürzen
7. Die anderen Bohrungen säubern und mit dem Primer vorbehandeln
8. Nach frühestens 15 min. das Gewinde des Ventils und das geschnittene Innengewinde des Sockels mit Sekundenkleber vernetzen und das Ventil bis zum Anschlag in den Sockel eindrehen



Abbildung 55: Vorbereiten der Kontaktflächen und Einkleben des Ventils

9. Die Schlauchtülle (Schlauch 6mm an G1/4-Innengewinde) und das (kalibrierte) Thermoelement mit mittelviskosem Sekundenkleber an den jeweiligen Stellen mit dem Sockel verkleben, hierbei darauf achten, dass die Messspitze des Thermoelementes in der Mitte des Prozessraums positioniert ist



Abbildung 56: Ausrichten und Verkleben des Thermosensors und der Schlauchtülle

10. Material der Bodenplatte (Alu/Kupfer für Möglichkeit der Wärmeleitung/Übertragung am besten) auswählen (mind. 1 mm dick), Bodenplatte auf 40x40 mm zuschneiden und entgraten
11. Bodenplatte für die Montage am Sockel an 3 Punkten mit einem 2mm-Bohrer durchbohren und mit einem Senker die Bohrungen ansenken, damit die Schraubenköpfe später nicht stören



Abbildung 57: Vorbereiten des Bleches (hier mit vier statt drei Bohrungen)

12. Nach einer Aushärtezeit von ca. einem Tag den Sockel an den 3 Punkten mit einem 2mm-Bohrer 15 mm tief vorbohren (Achtung: Nicht die seitlichen Sockelbohrungen anbohren!) und die Bodenplatte mit dem Sockel mit den 3 Verbindungsschrauben (klein, ca. 3x15) verschrauben.
 13. Den Sockel säubern und die zu verklebenden Flächen des Sockels (Kontaktfläche zum Spritzenzylinder) mit Primer vorbehandeln
 14. Nach frühestens 15 min. die Spritze mithilfe von Sekundenkleber mit dem Sockel verkleben
-

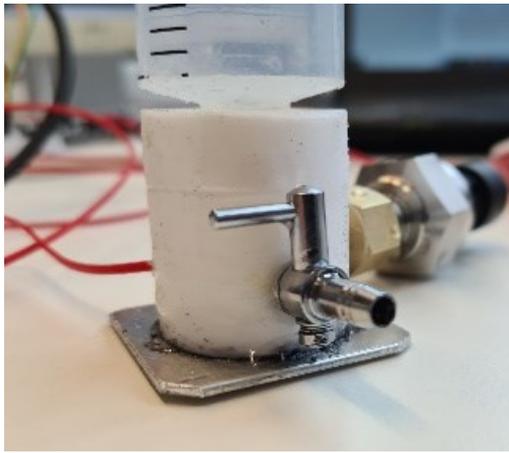


Abbildung 58: Verklebte Spritze

15. Nach einer Aushärtezeit von ca. einem Tag kann der Prototyp getestet werden

16. Zusatzinfo: Falls die Verbindung von Sockel zu Spritze noch zu instabil ist, kann mit Epoxidharz oder Heißkleber der verbleibende Zwischenraum verfüllt werden, dies macht den Prototyp zudem robuster und langlebiger

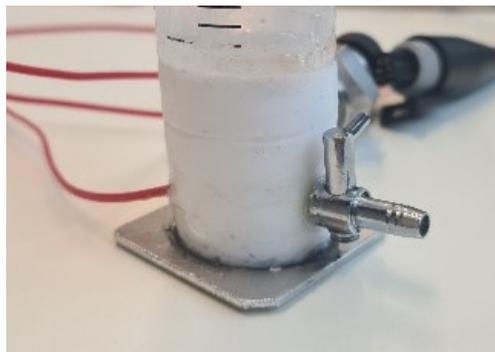


Abbildung 59: Verfüllter Zwischenraum für mehr Stabilität

Wie bereits erwähnt, birgt die Abwandlung von den vorgeschlagenen Materialien und der Fertigung neue Anwendungsmöglichkeiten. Beispielsweise ist die Einbindung eines Sensors/Aktors, welcher das Volumen digitalisiert, möglich (im [Anhang](#) beschrieben). Weiterhin könnten durch ein Verstärken des Prototyps Experimente mit Körpergewicht durchgeführt werden. Eine weitere interessante Erweiterung wäre die mit Prototyp 2 versuchte Realisierung eines Kreisprozesses, wofür an einer Stelle ein schneller Wärmeaustausch (Wärmereservoir) geschaffen werden müsste.

Das hier vorgestellte Modell hat sich jedoch als robust und verlässlich erwiesen und ermöglicht trotz einem leichten Luftentweichen, vor allem bei höherer, statischer Druckdifferenz, reproduzierbare Messwerte.

Anhang 06 – Quantifizierung des Druckverlusts des Prototyps 3

Der am Aquarien-Ventil aufgetretene, (eigentlich) unerwünschte Luftverlust führte bei konstant gehaltenem Volumen, wie theoretisch zu erwarten ist, zu einem exponentiellen Druckverlust, welcher wiederum zu Unterrichtszwecken genutzt werden kann. Der Hergang der Quantifizierung und die Diskussion der Visualisierung dieses Druckverlusts soll im Folgenden wiedergegeben werden.

Quantifizierung

Um das mit dem Aquarien-Ventil auftretende Luftentweichen zu quantifizieren, wurden in 3 Durchläufen bei 2 verschiedenen Volumina nach unterschiedlichen Zeitdauern die Druck- und Volumendifferenz Δp & ΔV gemessen. Das Anfangsvolumen betrug 60 ml bei einem Anfangsdruck von 0 Pa (Differenzmessung). Hieraus ergaben sich folgende Ergebnisse:

Tabelle 11: Messwerte des Luftentweichens

Zeitdifferenz ΔT	Endvolumen: $V_2 = \frac{4}{6} * V_1$ (Enddruck = $2,12 * 10^4 Pa$)		Endvolumen: $V_2 = \frac{2}{6} * V_1$ (Enddruck = $1,65 * 10^5 Pa$)	
	10 s	$\Delta p = 2 * 10^4 Pa$	$\Delta V = 4 ml$	$\Delta p = 2 * 10^4 Pa$
20 s	$\Delta p = 3,7 * 10^4 Pa$	$\Delta V = 7 ml$	$\Delta p = 3,7 * 10^4 Pa$	$\Delta V = 7 ml$
30 s	$\Delta p = 5 * 10^4 Pa$	$\Delta V = 11 ml$	$\Delta p = 5 * 10^4 Pa$	$\Delta V = 11 ml$
60 s	$\Delta p = 12 * 10^4 Pa$	$\Delta V = 24 ml$	$\Delta p = 12 * 10^4 Pa$	$\Delta V = 24 ml$

Die Werte sind nur grobe Angaben, da sich zum einen die Messwerte des Drucksensor ständig ändern (vor allem bei der größeren Kompression) und zum anderen die Ablesung des Volumens auf dem Spritzenzylinder nicht fehlerfrei ist. Zudem wurde die Temperaturänderung unberücksichtigt gelassen.

Die Messung, welche eigentlich den Druckverlust über die Zeit feststellen sollte, veranschaulichte ebenso den exponentiellen Abfall des Druckes bei Luftentweichen durch einen Durchlass konstanten Querschnitts (am Luftventil). Hierzu wurde das Volumen auf $\frac{2}{6}$ seines Anfangszustandes komprimiert und so lange gehalten, bis der Druck nahezu komplett abgefallen war. Ein Ausschnitt der laufenden Messung soll folgende Abbildung veranschaulichen.

Echtzeit Druckmessung

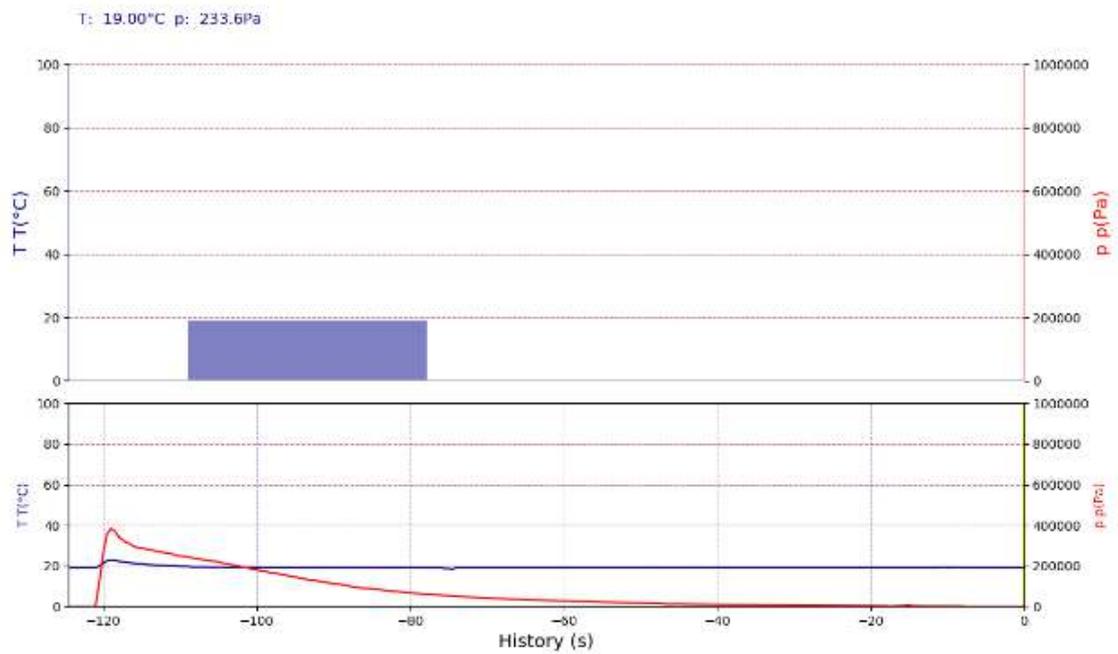


Abbildung 60: Ausschnitt von laufender Messung (Luftentweichen)

Der Ausschnitt der Messung veranschaulicht den sprunghaften Anstieg des Drucks und der Temperatur. Die Visualisierung der Messwerte und Anpassung einer exponentiellen Kurve hieran soll das folgende Schaubild zeigen.

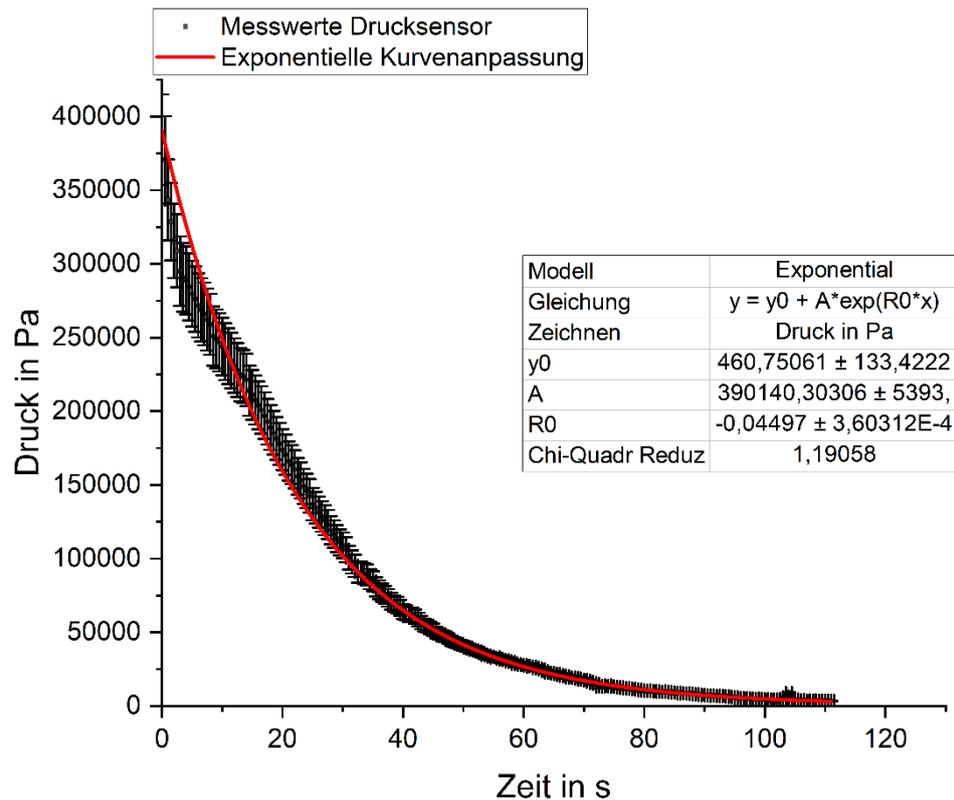


Abbildung 61: Darstellung der Messergebnisse über die Zeit mit exponentieller Kurvenanpassung

Das Schaubild verdeutlicht den Druckabfall, welcher bei einem konstanten Volumen mit annähernd konstanter Temperatur durch einen austretenden Luft-Massenstrom durch einen konstanten Querschnitt zustande kommt. Die größeren Abweichungen im oberen Druckbereich können durch den Temperaturabfall und Luftverwirbelungen zustande gekommen sein. Zur weiteren Quantisierung kann die Funktion zu weiteren Modellberechnungen genutzt werden, was an dieser Stelle jedoch nicht weiter thematisiert werden soll.

Abschließende Hinweise

Die Messwerte verdeutlichen, dass durch den rapiden Druckabfall ein Ausbau oder Austausch des Ventils unumgänglich ist.

Im weiteren Verlauf erfolgte am Prototyp 3 ein Ausbau des Ventils, nachdem ein weiteres Ventil (Drosselventil für Pneumatik-Anwendungen) ebenfalls Undichtigkeiten aufwies. Die Undichtigkeit des Drosselventils war auf Materialmängel zurückzuführen. Jedoch ist es im Allgemeinen vor allem für den Einsatz im Unterricht interessant, mit einem Drosselventil die Luftzu- und abfuhr regeln zu können, weshalb ein Einbau grundsätzlich empfohlen wird.

Anhang 07 – Differenzierte Betrachtung der Wärmeleitung des Prototyps 3

Aus dem Vergleich der theoretisch ermittelten und der gemessenen Werte ergab sich, dass eine große Differenz zwischen den idealen und realen Werten besteht. Das angenommene Modell und die getroffenen Annahmen waren zu weit gefasst. Ein isentroper Fall kann nicht näherungsweise angenommen werden und soll stattdessen durch einen polytrophen Fall präzisiert werden. Hierzu soll die Annahme fallen gelassen werden, dass das System adiabatisch ist. Zwar ist ein allzu großer Wärmetransport über die Wände in der kurzen Zeitspanne (< 1 s) unwahrscheinlich, soll aber dennoch berechnet werden.

Abschätzung Wärmeverlust Q aus 1. HS

Da es sich bei dem Prototyp um ein geschlossenes System handelt und der Einfluss der kinetischen und potentiellen Energie der Teilchen vernachlässigbar ist, vereinfacht sich der allgemeine 1. Hauptsatz der Thermodynamik

$$\sum \dot{Q} + \sum \dot{W} + \sum \dot{m} \left(h + \frac{c^2}{2} + gz \right) = \frac{d}{dt} \sum \left(m(\bar{u} + \bar{e}_{kin} + \bar{e}_{pot}) \right)$$

zu $\delta Q + \delta W = dU$.

Für die Arbeit W vom Zustand 0 ($V = 62,5$ ml) zum Zustand 1 ($V = 16,7$ ml) ergibt sich folgendes:

$$\delta W = p * \delta V = \int_0^1 p dV = \int_0^1 \frac{m * R * T}{V} dV = (m_{Luft} * R * T_{mittel}) * \int_0^1 \frac{1}{V} dV$$

$$W = \left(7,66 * 10^{-5} kg * 287,058 \frac{J}{kg * K} * (273,15 + 21,5) K \right) * \ln \left(\frac{16,7}{62,7} \right) = 8,571 J$$

Die innere Energie lässt sich beim idealen Gas unter den gegebenen Zuständen mit $dU = C_{p,Luft} dT = (C_{p,Luft} * m_{Luft}) dT$ vereinfacht beschreiben (C_p , da Druck im komprimierten Zustand konstant gehalten wird durch Gewicht) und ergibt bei einer totalen (gemessenen) Temperaturdifferenz von 3,5 K folgendes:

$$dU = c_{p,Luft} * m_{Luft} * dT = c_{p,Luft} * m_{Luft} \int_1^0 dT \rightarrow \Delta U = c_{p,Luft} * m_{Luft} * \Delta T = 1005 \frac{J}{kgK} * 7,66 * 10^{-5} kg * 3,5 K =$$

0,269 J

Die obige Formel des vereinfachten 1. Hauptsatzes zur Wärmemenge Q umgestellt ergibt nun mit allen berechneten Werten:

$$Q = \Delta U - W = 0,269 J - 8,571 J = -8,302 J \cong -8,3 J$$

Das negative Vorzeichen zeigt an, dass das System diese Energie in Form von Wärme verliert.

Abschätzung Wärmeleitung durch Kunststoffoberflächen

Im Folgenden soll die Wärmeleitung der Kunststoffoberflächen grob abgeschätzt werden. Da die beiden Flächen des Teflons und des PP's parallel angeordnet mit derselben Temperaturdifferenz in Kontakt sind, lässt sich ihr gesamter Wärmestrom P_{Ges} aus ihren einzelnen Wärmeströmen $P_{PE} + P_{Teflon}$ abschätzen (siehe Tipler S. 648):

Wärmestrom der PE-Spritze bei 20 kg Belastung:

$$P_{PE} = \frac{\Delta T}{R_{PE}}$$

ergibt mit dem Wärme-Widerstand

$$R_{PE} = \frac{\Delta x_{PE}}{\lambda_{PE} * A_{PE}} = \frac{\Delta x_{PE}}{\lambda_{PE} * (\pi * d * h_{Spritze})}$$

$$R_{PE} = \frac{8 * 10^{-4} m}{0,4 \frac{W}{m * K} * (\pi * 30 * 10^{-3} * 23 * 10^{-3}) m^2} = 0,923 \frac{K}{W}$$

den Wärmestrom

$$P_{PE} = \frac{\Delta T}{R_{PE}} = \frac{3,5 K}{0,923 \frac{K}{W}} = 3,792 W,$$

wobei als $h_{Spritze}$ die Resthöhe von 23 mm (von Boden Spritze bis Kolben) und ΔT wieder großzügig mit 3,5 K angesetzt wurde.

Wärmestrom des Teflon-Sockels bei 20 kg Belastung:

Der Wärmestrom

$$P_{Sockel} = \frac{\Delta T}{R_{Teflon}}$$

ergibt mit dem Wärme-Widerstand

$$R_{Teflon} = \frac{\Delta x_{Sockel}}{\lambda_{Teflon} * A_{Teflon}} = \frac{\Delta x_{Sockel}}{\lambda_{PE} * (\pi * d * h_{Sockel})}$$

$$R_{Teflon} = \frac{12 * 10^{-3} m}{0,24 \frac{W}{m * K} * (\pi * 8 * 10^{-3} * 35 * 10^{-3}) m^2} = 56,841 \frac{K}{W}$$

den Wärmestrom

$$P_{Sockel} = \frac{\Delta T}{R_{Teflon}} = \frac{3,5 K}{56,841 \frac{K}{W}} = 0,062 W,$$

wobei als h_{Sockel} die Sockelhöhe von 35 mm gewählt wurde (von Boden bis Spritzenboden). Eine genauere Betrachtung wäre hierbei möglich, da die Sprizentülle eine Strecke in den Sockel hineinragt, jedoch soll dieser Einfluss an dieser Stelle vernachlässigt werden.

Auswertung der Wärmeströme

Der gesamte Wärmestrom lässt sich somit zu $P_{\text{Ges}} = P_{\text{PE}} + P_{\text{Teflon}} = (3,792 + 0,062) \text{ W} = 3,854 \text{ W}$ abschätzen.

Die Wärmemenge über die mittlere Zeit der Temperaturerhöhung bei Kompression von durchschnittlich $\Delta t = 0,8 \text{ s}$ beträgt somit:

$$\Delta Q = P_{\text{Ges}} * \Delta t = 3,083 \text{ J} \cong 3,1 \text{ J}$$

Im Vergleich zu dem vorherig bestimmten Wärmeverlust im Falle eines nicht-adiabatischen Prozesses von 8,3 J erscheint die über die Wände entweichende Wärme von ca. 3,1 J wie erwartet gering. Jedoch ist hierbei zu beachten, dass mit mehreren Näherungen gerechnet wurde:

- Homogene Verteilung der Wärme im Prozessraum ohne interne Temperaturdifferenzen
- Vernachlässigung der Wärmeleitung der Sensoranschlüsse
- Annahme eines idealen Gases, konstantem C_p (obwohl Druck und Volumen sich ändern)
- Reversibilität für den gesamten Prozess, Reibungsfreiheit
- Gemittelte Werte für Temperatur und Zeit

Wärme Q zur Erwärmung der Thermoelements Spitze

Die erforderliche Wärmemenge, die benötigt wird, um die gelötete Messspitze des Thermoelements um 3,5 K zu erwärmen, beträgt angenähert bei einem Radius von 0,5 mm und Literaturwerten für Zinn (aus schweizer-fn.de):

$$\begin{aligned} Q &= \Delta U = c_{v,\text{Lötzinn}} * m_{\text{Lötzinn}} * \Delta T \\ &= 221 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} * \left(7290 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \frac{4}{3} * \pi * (5 * 10^{-4} \text{ m})^3 \right) * 3,5 \text{ K} = 2,95 * 10^{-3} \text{ J} \end{aligned}$$

Durch den kleinen Beitrag fällt dieser kaum/nicht ins Gewicht.

Konklusion der Erkenntnisse

Hieraus lässt sich schließen, dass ein wesentlicher Teil der Energie, die durch Volumenänderung in das System eingebracht wurde, nur zu einem Bruchteil in innere

Energie umgesetzt wird und teilweise durch Wärmeverluste an Oberflächen wieder abgeführt wird. Weiterhin ist die geringe Wärmekapazität der Luft und die Latenz des Thermoelements entscheidende Faktoren, warum die Temperaturdifferenz so gering ausfällt.

Weitere Diskussion der Fehler der Messungen

Die hohe Abweichung der gemessenen Temperatur von der theoretisch nach gewähltem Modell (Isentrop) berechneten lässt sich ebenfalls auf das **geringe Luftvolumen** im Prozessraum zurückführen. Durch das geringe Luftvolumen und die dementsprechend größere räumliche Nähe zu kälteren Objekten/Wänden wird ein höherer Temperaturanstieg durch Wärmeübertragung gebremst. Um dem idealen Modell Rechnung zu tragen, müsste die Druckerhöhung und Messung unendlich schnell bei einem unendlich großen Luftvolumen ohne Reibungsverluste, Entropieerzeugung und Wärmeabfuhr erfolgen. Da dies nicht möglich ist, wird im Folgenden mit dem realitätsnahem, polytropen Modell versucht, das Verhalten zu beschreiben.

Darauf hinführend sollen im Folgenden die Wärmekapazitäten der in Kontakt mit dem Gas stehenden Materialien betrachtet werden, um den Wert des Polytropenexponenten abschätzen zu können.

Wird der Prozessraum als inhomogener Körper (bestehend aus Luft, Oberflächen aus Kunststoff und Metall) beschrieben, kann durch die Regel von Neumann-Kopp die gesamte Wärmekapazität als Summe der einzelnen Wärmekapazitäten aufgefasst werden: $C_{Ges} = c_{p,Luft} * m_{Luft} + c_{Messing} * m_{Messing} + c_{Zinn} * m_{Zinn}$. Zusätzlich müssen für die folgende Berechnung/Abschätzung die Massen der jeweiligen Elemente einbezogen werden:

$$c_{Ges} = m_{Luft} + m_{Messing} + m_{Zinn} = (7,66 * 10^{-5} + 1 * 10^{-3} + 3,82 * 10^{-6})kg = kg$$

Der Massenanteil der Messingtülle basiert lediglich auf einer Schätzung, da nur ein kleiner Teil der Tülle im Prozessraum ist.

Zusammen ergibt sich eine kombinierte Wärmekapazität von

$$C_{Ges} = \sum_{i=1}^3 c_i * m_i = 1005 \frac{J}{kgK} * 7,66 * 10^{-5}kg + 376 \frac{J}{kgK} * 1 * 10^{-3}kg + 221 \frac{J}{kgK} * 3,82 * 10^{-6}kg = 0,454 \frac{J}{K}$$

mit Literaturwerten für Zinn und Messing aus schweizer-fn.de.

Die reine Wärmekapazität der Luftmasse im Prozessraum beträgt hingegen lediglich

$$C_{Luft} = 0,076 \frac{J}{K}.$$

Das Verhältnis beider Wärmekapazitäten ist $\frac{c_{Luft}}{c_{Ges}} = 0,167$. Somit beträgt die angenommene Wärmekapazität der Luft im Verhältnis zur Gesamtkapazität 16,7 % und ist damit 6 mal kleiner.

Die innere Energie des Gesamtkomplexes berechnet sich somit zu: $dU = c_{ges} * dT \rightarrow \Delta U = c_{Ges} * \Delta T = 0,454 \frac{J}{K} * 3,5 K = 1,589 J$. Diese Berechnungen stellen eine grobe Abschätzung dar, da von konstanten Wärmekapazitäten, homogener Wärmeleitung und der gemessenen Temperatur ausgegangen wurde. Da zumindest kurzzeitig die Temperaturdifferenz höher gewesen sein müsste, sollte die innere Energie, zumindest kurz nach Kompression, theoretisch ebenso höher sein.

Anhang 08 – Berechnung der Variablen der polytropen Zustandsänderung

An dieser Stelle soll eine mögliche analytische Berechnung des Polytropenexponenten n und der Konstanten $const$ erfolgen.

Polytropenexponent

Unter Zuhilfenahme der Formel $T_1 = T_0 * \left(\frac{p_0}{p_1}\right)^{\frac{1-n}{n}}$, welche aus der Beziehung $T^n * p^{1-n} = const.$ folgt, kann durch Umstellen der Formel der Polytropenexponent berechnet werden:

$$\begin{aligned} \frac{T_1}{T_0} &= \left(\frac{p_0}{p_1}\right)^{\frac{1-n}{n}} \rightarrow \ln\left(\frac{T_1}{T_0}\right) = \frac{1-n}{n} * \ln\left(\frac{p_0}{p_1}\right) \rightarrow n * \ln\left(\frac{T_1}{T_0}\right) = (1-n) * \ln\left(\frac{p_0}{p_1}\right) \\ &\rightarrow n * \ln\left(\frac{T_1}{T_0}\right) + n * \ln\left(\frac{p_0}{p_1}\right) = \ln\left(\frac{p_0}{p_1}\right) \rightarrow n * \left(\ln\left(\frac{T_1}{T_0}\right) + \ln\left(\frac{p_0}{p_1}\right)\right) \\ &= \ln\left(\frac{p_0}{p_1}\right) \rightarrow n = \frac{\ln\left(\frac{p_0}{p_1}\right)}{\left(\ln\left(\frac{T_1}{T_0} * \frac{p_0}{p_1}\right)\right)} \end{aligned}$$

Hieraus folgt für die gemessenen Drücke und Temperaturen bezüglich einer exemplarischen Messreihe für den Polytropenexponent:

$$n = \frac{\ln\left(\frac{217 + 102300}{211800 + 102300}\right)}{\left(\ln\left(\frac{(23 + 273,15) * (217 + 102300)}{(20,5 + 273,15) * (211800 + 102300)}\right)\right)} = 1,0076$$

Obwohl an dieser Stelle mit einzelnen Messwertepaaren gerechnet wurden, werde selbst Fehlern unterliegen, hat sich ein mit der Ausgabe des Datenanalyse-Programms identischer Wert ergeben.

Weiterhin könnte die Konstante $const$ durch Einsetzen des Polytropenexponenten und eines Messwertepaares in obige Formel bestimmt werden, allerdings liefert die Anpassungsfunktion hierfür einen deutlich genaueren Wert, da die einzelnen Messwerte, wie im entsprechenden Schaubild (Abbildung 27) ersichtlich, deutlich streuen.

Anhang 09 - Überlegungen zu Antrieb des Kolbens des Prototyps 3 und der Volumenmessung

Die Bewegung des Kolbens kann in mehreren Varianten ausgeführt werden. Die infrage kommenden Varianten sollen im Folgenden dargestellt und diskutiert werden.

Mögliche Varianten der Volumenänderung sind folgende:

- Mechanisch von Hand mit/ohne Kurbel und Vorrichtung. Zur Digitalisierung des Volumens wird ein Abstandssensor benötigt. Möglich z.B. am einfachsten durch Hebel, welcher Spritze an einem bestimmten Punkt hält oder eine Kurbel, welche einrastet
- Elektrisch über Servo- oder Schrittmotor. Dann würde auch kein Abstandssensor benötigt, da durch Schritte des Schrittmotors das Volumen bestimmt werden kann

Vergleich möglicher Ausführungsarten

Vor/Nachteile Schrittmotor (siehe kollmorgen.com):

- Geringere Drehzahlen möglich als bei Servomotor
- Abfallendes Drehmoment bei steigenden Drehzahlen
- Geringe Punkt- zu Punkt-Präzision
- Hohes Drehmoment bei geringen Drehzahlen
- i.d.R. offener Regelkreis (einfache Beschaltung)
- Hält seine Position durch Drehmomentaufrechterhaltung

Vor/Nachteile Servomotor (siehe kollmorgen.com):

- Hohe Drehzahlen möglich bei nahezu konstantem Drehmoment
- Drehmoment i.d.R. geringer als bei Schrittmotoren
- Hohe Punkt-zu-Punkt-Präzision
- i.d.R. geschlossener Regelkreis (regelt bei Abweichung ständig nach, hält so seine Position)

Vor/Nachteile mechanisch:

- Volumenmessung durch weiteres Gerät stellt zusätzlichen Aufwand und Komplexität dar
 - Jedoch andererseits geringere Komplexität der Vorrichtung durch fehlenden Motor und Steuerung
 - Gleichmäßige Kraftaufbringung und -aufrechterhaltung gestaltet sich schwieriger (muss durch Konstruktion erbracht werden)
-

Generelle Vorbereitung systemseitig:

- Bestimmen des Anfangsvolumens. Bei Schrittmotor: Festlegung von Größe Volumen/Schritt. Abstandssensor: Eingabe der Offset-Distanz
- Welcher Prozess soll gefahren werden? Isotherm/chor/bar oder adiabatisch? Entsprechend muss Verhalten des Programms festgelegt werden

Prozesse**Möglicher Ablauf $V/T, p=\text{const.}$:**

- Extern: Erhöhe T
- System: Wenn p steigt, dann fahre Kolben raus, bis p wieder bei Ursprungswert. Miss Druck, Volumen und Temp. und gib sie grafisch aus

Möglicher Ablauf $p/1/V, T = \text{const.}$:

- System: Fahr Kolben rein, komprimiere das Volumen. Miss T, p und V und gib sie grafisch aus
- Extern: Wenn T steigt, dann kühle Bodenplatte ab

Möglicher Ablauf $p/T, V=\text{const.}$:

- Extern: Erhöhe T
- System: Halte Schritt 0. Miss T, p und V und gib sie grafisch aus

Mögliche Varianten händisch/mechanisch:

- Von Hand drücken
- Silikonpresse integrieren
- Einzelteile einer Nudelpresse integrieren

Mögliche Varianten mit Schrittmotor:

- **Standard-Schrittmotor** (z.B. [28BYJ-48](#), Wellenstück mit abgeflachten Enden) mit Vorrichtung verbinden
 - o Ideen:
 - Über Koppler mit Gewindestange verbinden und dieses Gewinde mit Kolbenmutter verbinden
 - Zahnrad auf Schrittmotorwelle ist mit Zahnstange oder Gewindestange, welche auf Kolben drückt, verbunden
 - o Techn. Daten:
 - Max. (Halte-)Drehmoment: 0,034 N/m

- Spannung: 5 V
 - Widerstand: $50 \Omega \rightarrow$ Nennstrom/Phase: 0,1 A
 - Die max. Drehzahl beträgt 10-15 U/min
- **Schrittmotor** (z.B. [17HD3401-100N](#), mit integrierter Gewindestange und Mutter) mit Vorrichtung verbinden. Hierbei spart man sich die Verbindung von Welle und Gewindestange.
- Technische Daten:
 - Max. (Halte-)Drehmoment: 0,28 N/m
 - Max. Strom/Phase: 1 A
 - Widerstand: $2,2 \Omega \rightarrow$ Spannung: $R \cdot I = 2,2 \text{ V}$
 - Gewindestange Durchm: 8 mm, Gewindesteigung: 2 mm
 - Max. Drehzahl: 2500 U/min (Dieser und folgende Werte von NEMA-Motoren sind [hier](#) entnommen und bieten lediglich eine Orientierungshilfe)
 - Min. lineare Kraft: 879 N
- **Schrittmotor** (z.B. [35HD132Y-100](#), mit integrierter, durchgehender Gewindestange) mit Vorrichtung verbinden. Hierbei spart man sich die bauliche Veränderung des Kolbens, da dieser lediglich gedrückt wird.
- Ali-Express (Versand aus China)
 - Technische Daten:
 - Max. (Halte-)Drehmoment: 0,165 N/m
 - Max. Strom/Phase: 1,2 A
 - Widerstand: $3,2 \Omega \rightarrow$ Spannung: $R \cdot I = 3,8 \text{ V}$
 - Gewindestange Durchm: 6,5 mm, Gewindesteigung: 2 mm
 - Max. Drehzahl: 2000 U/min
 - Min. lineare Kraft: 518 N
- **Schrittmotor** (z.B. [16HSL3404](#), mit integrierter, durchgehender Gewindestange) mit Vorrichtung verbinden. Hierbei spart man sich die bauliche Veränderung des Kolbens, da dieser lediglich gedrückt wird.
- Ebay (Versand aus DE)
 - Technische Daten:
 - Min. (Halte-)Drehmoment: 0,21 N/m
 - Nennstrom/Phase: 0,4 A
 - Widerstand: $30 \Omega \rightarrow$ Spannung: $R \cdot I = 12 \text{ V}$
-

- Gewindestange Durchm: 5 mm, Gewindesteigung: 0,5 mm
- Max. Drehzahl: 3000 U/min
- Min. lineare Kraft: 2638 N
- **Schrittmotor** (z.B. [17HSL4417-250](#), mit integrierter, durchgehender **Gewindestange**) mit Vorrichtung verbinden. Hierbei spart man sich die bauliche Veränderung des Kolbens, da dieser lediglich gedrückt wird.
 - Ebay (Versand aus DE)
 - Technische Daten:
 - Min. (Halte-)Drehmoment: 0,4 N/m
 - Nennstrom/Phase: 1,7 A
 - Widerstand: 1,5 Ω /Phase \rightarrow Spannung: $R \cdot I = 2,55$ V
 - Gewindestange Durchm: 8 mm, Gewindesteigung: 8 mm
 - Max. Drehzahl: 2000 U/min
 - Min. lineare Kraft: 314 N

Konklusion

\rightarrow Problem mit allen anderen Ausführungen als mit dem Standard-Schrittmotor: Maximales Drehmoment und Geschwindigkeit begrenzt durch Strom und Spannung. Maximaler Stromoutput pro Pin sollte auf dem Raspberry Pi nicht mehr als 16 mA betragen, was für ein größeres Drehmoment und eine höhere Verfahrgeschwindigkeit zu wenig ist. Hierzu muss mit einer externen Spannungsversorgung nachgesteuert werden.

Anhang 10 – Nebenexperiment: Spraydose mit BMP280

Im gängigen Standard-Inventar von Physik-Laboren sind oftmals Metallkugel mit einem fest installierten Manometer, mit dem die Druckerhöhung bei einer Temperaturerhöhung gemessen/veranschaulicht werden kann, vorhanden. Dieser Vorgang wird als isochore Zustandsänderung bei konstanter (Luft)-Masse bezeichnet, bei welchem sich nach dem idealen Gasgesetz mit dem Druck ebenso die Temperatur ändert. Um diesen Lehrapparat durch elektronische Messtechnik zu erweitern, wurde er mit verfügbaren, günstigen Mitteln nachgebaut.

Benötigte Materialien:

- 1x Leere Spraydose aus Metall, z.B. Aluminium
- Epoxidharz, nach Bedarf
- 1x BMP280 und 4x Jumper-Kabel in passender Farbe
- Schaumstoff und Isolierband/Klebstreifen

Vorgehen:

1. Vorsichtig den inneren Deckel der Spraydose abtrennen, sodass der Falz erhalten bleibt zum Zwecke der besseren Haftung des Harzes
2. Testen des BMP280 und der Jumperkabel (Kalibriert? Einstellung in PhyPiDAQ/Python-Programm nötig?)

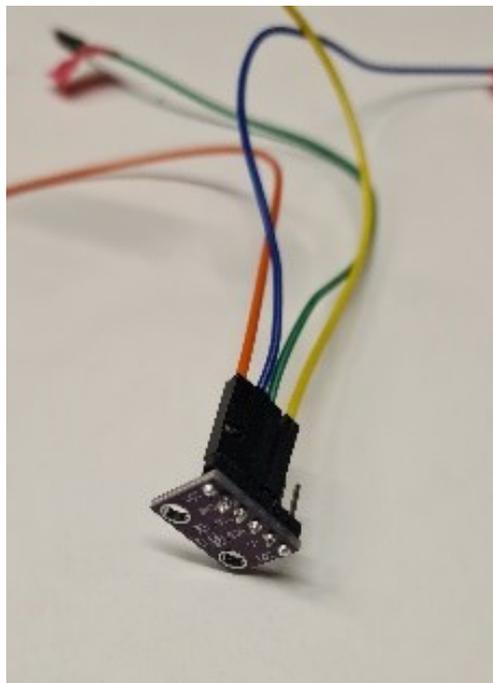


Abbildung 62: Sensor BMP280 mit verbundenen und beschrifteten Jumper-Kabeln

3. Sparsames Einbetten des Sensors in ein stoßdämpfendes Materialstück und Fixieren mit Isolierband/Klebstreifen zum Zwecke des Schutzes gegen Schläge (falls Lehrgerät zu unsanft behandelt wird) Wichtig: Temperatursensoren müssen frei bleiben!

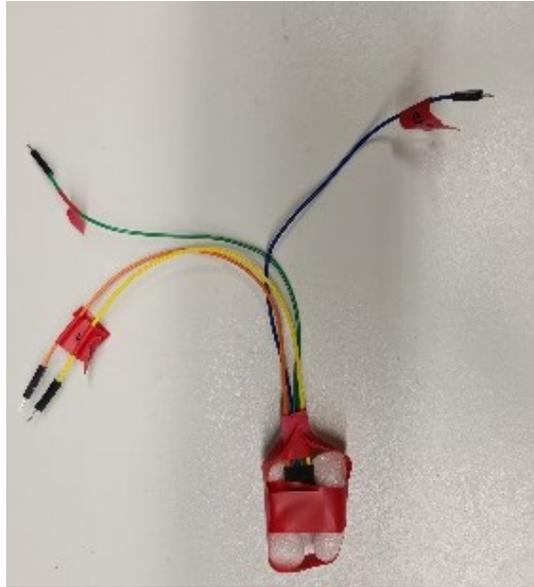


Abbildung 63: BMP280 mit Schlagschutz

4. Beschriften der Kabel (GND, VCC, SCL, SDA) und Einlegen des Sensors in die Spraydose
5. Anmischen der entsprechenden Menge Epoxidharz in einem Behälter, welcher zur Not auch kaputt gehen kann, wie z.B. einem Plastikbecher (2 Teile Harz, 1 Teil Härter)



Abbildung 64: Vorpräparierte Spraydose mit Hilfsmitteln für den Umgang mit Epoxidharz

6. Seitliches eintauchen (Kopfüber) der Spraydose in den Behälter mit dem Harz, damit auch ein wenig Harz in die Spraydose gelangt (zumindest über den Falz)
7. Ausrichten und fixieren der Spraydose und der Jumperkabel in dem Behälter, sodass das Harz aushärten kann



Abbildung 65: In Epoxidharz fixierter Spraydosenaufbau

8. Nach ca. einem Tag kann auf Festigkeit überprüft werden und falls das Harz fest ist, der Behälter entfernt werden (optional, sieht jedoch schöner aus). Hierzu muss ggf. mit einem Cutter-Messer die Hülle entfernt werden



Abbildung 66: Entmantelter, fertiger Versuchsaufbau

Nachdem das Produkt bei der Erstinbetriebnahme in PhyPiDAQ integriert und die Messung gestartet wurde, war zu beobachten, dass bei einer Temperaturerhöhung der Dose (Warme Hand oder Feuerzeug) der Druck nach ca. 4 s reagierte, während die Temperatur mit einer Verzögerung von ca. 10 s zu steigen begann. Ebenso war dieser Effekt beim Abkühlen zu beobachten: Während der Druck nach ca. 4-5 Sekunden des Wärmeentzugs langsam abnahm, stieg die Temperatur weiter, bis sie nach ca. 100 Sekunden ebenfalls zu fallen begann:

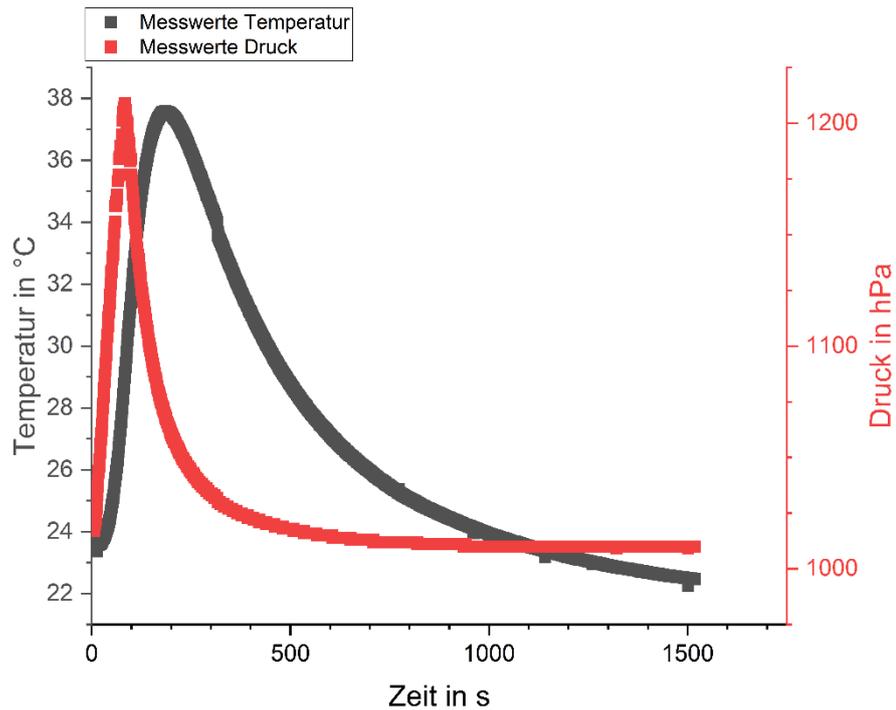


Abbildung 67: Verlauf des Druckes und der Temperatur bei Erwärmung der Spraydose

Es liegt die Vermutung nahe, dass die Latenz des Temperaturfühlers auf seine Bauart (einfacher Thermistor) und die größere Masse, welche zur Detektion einer Temperaturveränderung erwärmt werden muss, zurückzuführen ist.

Um die Latenz zu verringern, kann der Lehrapparat beispielsweise wie folgt modifiziert werden:

- Die Messung der Temperatur von einem Thermoelement durchführen lassen
- Entweder den BMP280 durch einen Drucksensor ersetzen, welcher schneller den Druck misst, oder BMP280 hierfür weiterhin verwenden → Vorteil: Temperaturen können miteinander verglichen und somit der Latenzunterschied visualisiert werden

Didaktische Möglichkeiten mit dem aktuellen Modell:

- Veranschaulichung des isochoren Prozesses, auch als Schülerexperiment (ungefährlich)
 - Demonstration der Abkühlkurve (Newtonsches Gesetz)
 - Diskussion der Herkunft der großen Latenz des Temperatursensors
 - Diskussion des Teilchenmodells und der Eigenschaften der Zustandsgrößen: Druck makroskopisch betrachtet als Moleküle, die gegen warme/kalte Wand prallen und dementsprechend Energie durch Stöße gewinnen/abgeben. Temperatur als mittlere kinetische Energie der Teilchen
-

Anhang 11 – Leitfaden für die Vorbereitung und Durchführung von Experimenten mit PhyPiDAQ

Einführende Hinweise

Dieser Leitfaden soll einen einfachen Einstieg in die Arbeit mit diesem System ermöglichen, um einen reibungslosen, effizienten und zielsicheren Einsatz zu gewährleisten. Ergänzend hierzu kann zusätzliche Literatur, wie das offizielle Einführungsbuch der Raspberry Pi Foundation (kostenlos als E-Book unter magpi.raspberrypi.com beziehbar), hinzugezogen werden. Als Kommunikationsstil wird hierfür die in der Support-Community übliche direkte Gesprächsform verwendet.

Gliederung:

- Einführende Hinweise
- Empfehlung zur Beschaffung der erforderlichen Artikel
- Hinweise zum Einrichten des Systems
- Arbeit mit dem Betriebssystem
- Ordnerstruktur und Projektorganisation
- Verkabeln der elektronischen Bauteile
- Ansteuerung/Auslesung der Devices
- Ansteuerung/Auslesung der Devices in PhyPiDAQ
- Kalibration von Sensoren
- Steuern des Messvorgangs
- Auslesen und Weiterverarbeiten der Messdaten
- Weiterführende Tipps zur Vorbereitung von Experimenten

Begriffslegende

Tabelle 12: Legende der im Folgenden genutzten Begriffe

Config	Konfigurationsdatei, bestehend aus Haupt-Config und Device-Config
Haupt-Config	
Device-Config	.yml-Datei, in welcher in Textform Befehle aufgeführt sind, welche die Auslesung der angeschlossenen Geräte (z.B. Sensoren) ermöglichen
Devices	
GPIO-Pin	(engl.): General Purpose Input/Output – Pin, Anschluss-Pins für Devices

Breadboard	Steckplatine, auf welcher schnell und ohne Löt Aufwand eine elektrische Verbindung zwischen Bauteilen hergestellt werden kann
Breakoutboard	Leiterplatte (Träger für elektronische Bauteile), welcher als Erweiterung für Mikrocontroller und Einplatinen-Computer dient und die Ansteuerung/Auslesung von Sensorik/Aktorik ermöglicht
Bibliothek	Vorprogrammierter Code, welcher bestimmte Aktionen durchführt, sobald er über Befehle im Überprogramm aufgerufen wird
IDE	(engl.): Integrated Development Environment – Programmierumgebung

Die folgenden Ausführungen werden in der Mehrzahl, vor allem in Verbindung mit „Devices“ getätigt. Falls nur der Plural zutreffen sollte, übertragen Sie dies einfach hierauf.

Empfehlung zur Beschaffung der erforderlichen Artikel

Für den Einsatz im Unterricht wird für ein System die Anschaffung folgender Artikel empfohlen:

Tabelle 13: Benötigte Artikel für das grundlegende experimentelle Setup

Quantität	Bezeichnung	Spezifizierung	Richtpreis pro Stk.
		Modell 3 oder 4, ab 2 GB RAM	65,50 €
1	Raspberry Pi	<u>oder</u> Pi 400 (inkl. Zubehör)	126,00 €
1	SD-Karte	Ab 32 GB	10,00 €
1	Netzteil	z.B. GOO 56746	14,00 €
>1	Breadboard	Mit mindestens 400 Kontakten	1,50 €
>1	Jumperkabel	In verschiedenen Farben	1,60 €
1	GPIO-Extension-Board		8,70 €
1-2	Devices von jeder Art	Für Redundanz	1-20 €

Grundsätzlich kann auch ein anderer Einplatinen-Computer gewählt werden, allerdings sollten Sie darauf achten, dass dieser gleichwertige Spezifikationen aufweist. Mit Devices sind vor allem Sensoren, aber auch Breakoutboards gemeint.

Hinweise zum Einrichten des Systems

Für die **grundsätzliche Einrichtung** des Systems (Vorbereiten der SD-Karte mit dem Betriebssystem, Einrichten des Betriebssystems, Herunterladen von PhyPiDAQ) bietet sich der Leitfaden auf [github.com](https://github.com/PhyPiDAQ/EducatorsGuide) an, welcher ab Kapitel 3.1 diesen Vorgang hinreichend genau beschreibt.

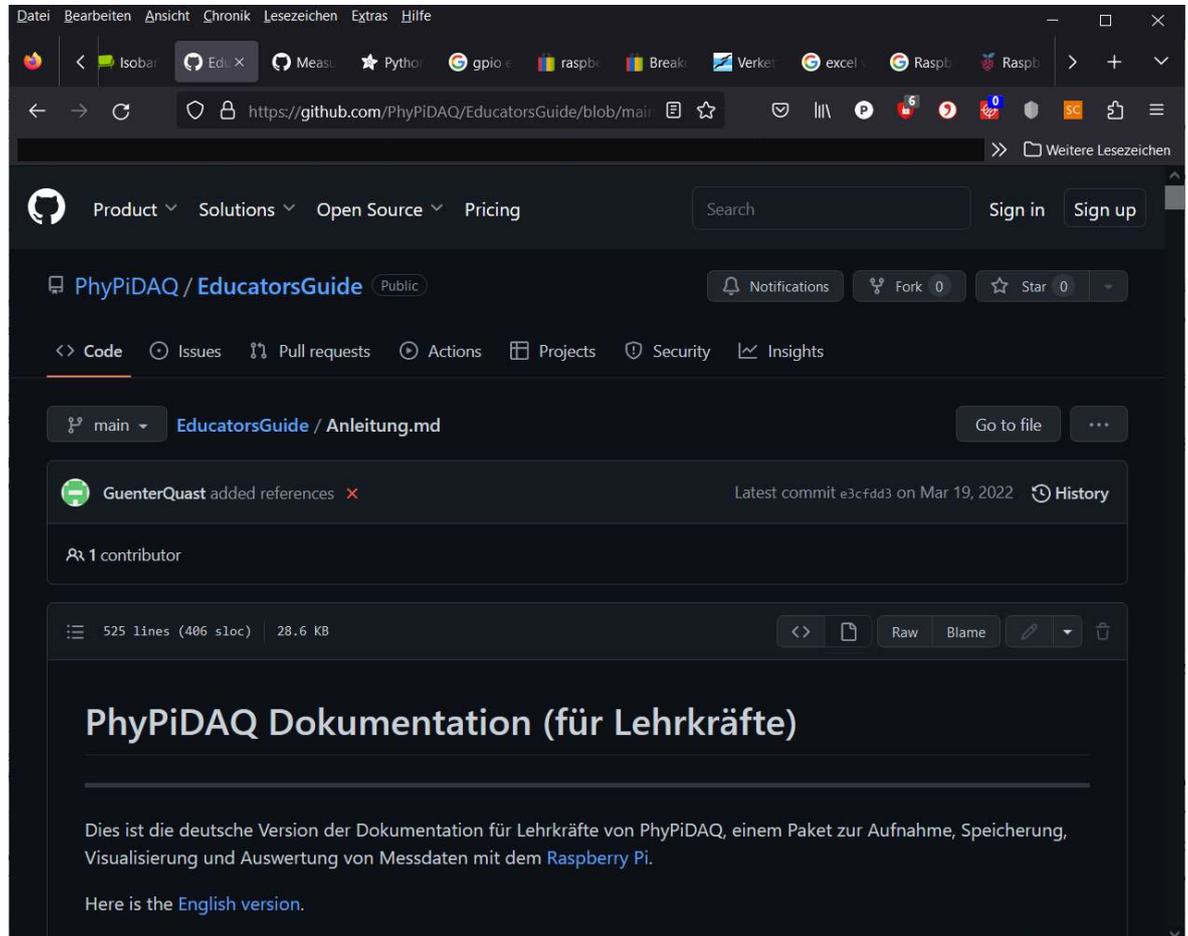


Abbildung 68: Öffentlich zugängliche Github-Seite von PhyPiDAQ

Ergänzend hierzu kann zusätzliche Literatur, wie das offizielle Einführungsbuch der Raspberry Pi Foundation (kostenlos als E-Book unter magpi.raspberrypi.com beziehbar), hinzugezogen werden. Achten Sie darauf, dass Sie die 32-bit-Variante des Betriebssystems wählen, da PhyPiDAQ noch nicht auf 64-bit-Systemen lauffähig ist (Stand: 2023).

Arbeit mit dem Betriebssystem

Da das Raspberry Pi – Betriebssystem eine Linux-basierte Distribution (Abwandlung) darstellt, ist es hierbei ebenso sinnvoll und nötig, über das **Terminal** (Eingabeaufforderung) Befehle einzugeben. Hierdurch sind weitreichende Aktionen möglich, welche **mit der Maus nur bedingt oder nicht durchführbar** sind. Es bietet sich an, einige, grundlegende Befehle als Text-Dokument abgespeichert zu haben. Eine

Übersicht über die gängigsten Befehle ist ebenfalls in dem obigen Leitfaden (verfügbar auf github.com) gegeben.

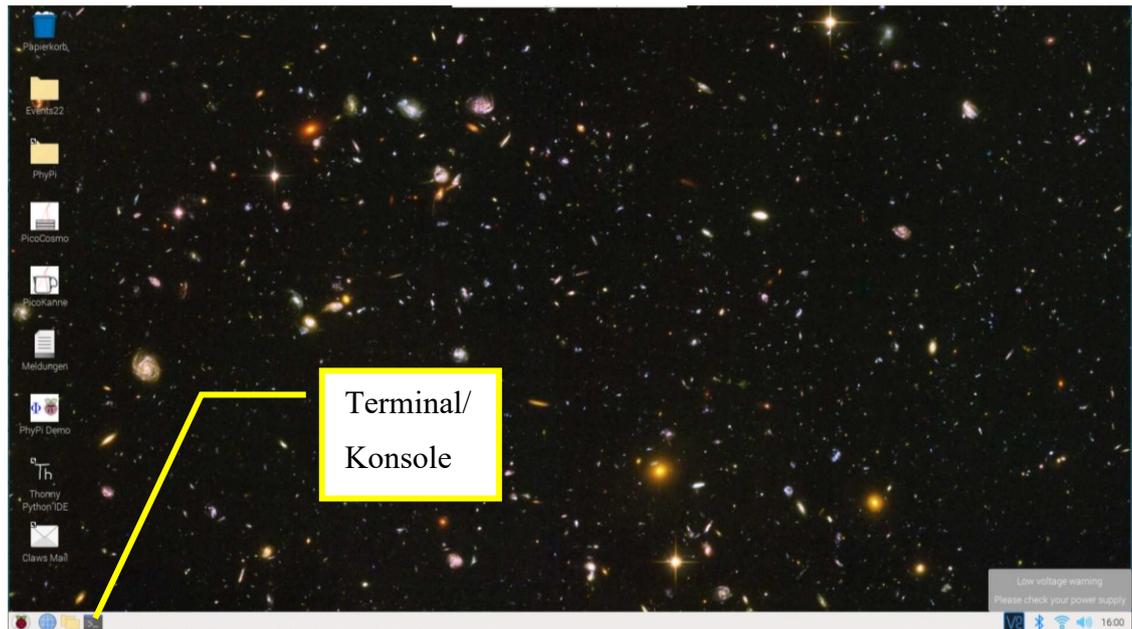


Abbildung 69: Startseite/Desktop des Raspberry Pi - Betriebssystems

Ordnerstruktur und Projektorganisation

Wer nutzt das Gerät?

Wird das Gerät hauptsächlich von Ihnen genutzt, ist das Anlegen von Benutzerkonten und Definieren von Zugangsrechten obsolet. Werden mehrere Geräte für Schülerversuche eingerichtet, bietet es sich an, Benutzerkonten (wie unter Windows) einzurichten und Nutzerrechte zu vergeben (zur Abkapselung des Systems und Vermeidung von ungewollter Manipulation). Eine Anleitung hierzu ist unter elektronik-kompodium.de beispielsweise abrufbar.

Wie kann eine sinnvolle Ordnerstruktur aussehen?

Nachdem Sie den Raspberry gemäß dem obigen Leitfaden (github.com) eingerichtet haben, sollte unter dem Nutzer (z.B. „pi“) neben dem Verzeichnis „git“, in welchem die Original-Version „PhyPiDAQ“ liegt, das Verzeichnis „PhyPi“ angelegt sein, welcher für die Arbeit genutzt werden sollte (zum Schutz vor ungewollter Manipulation des Programms).

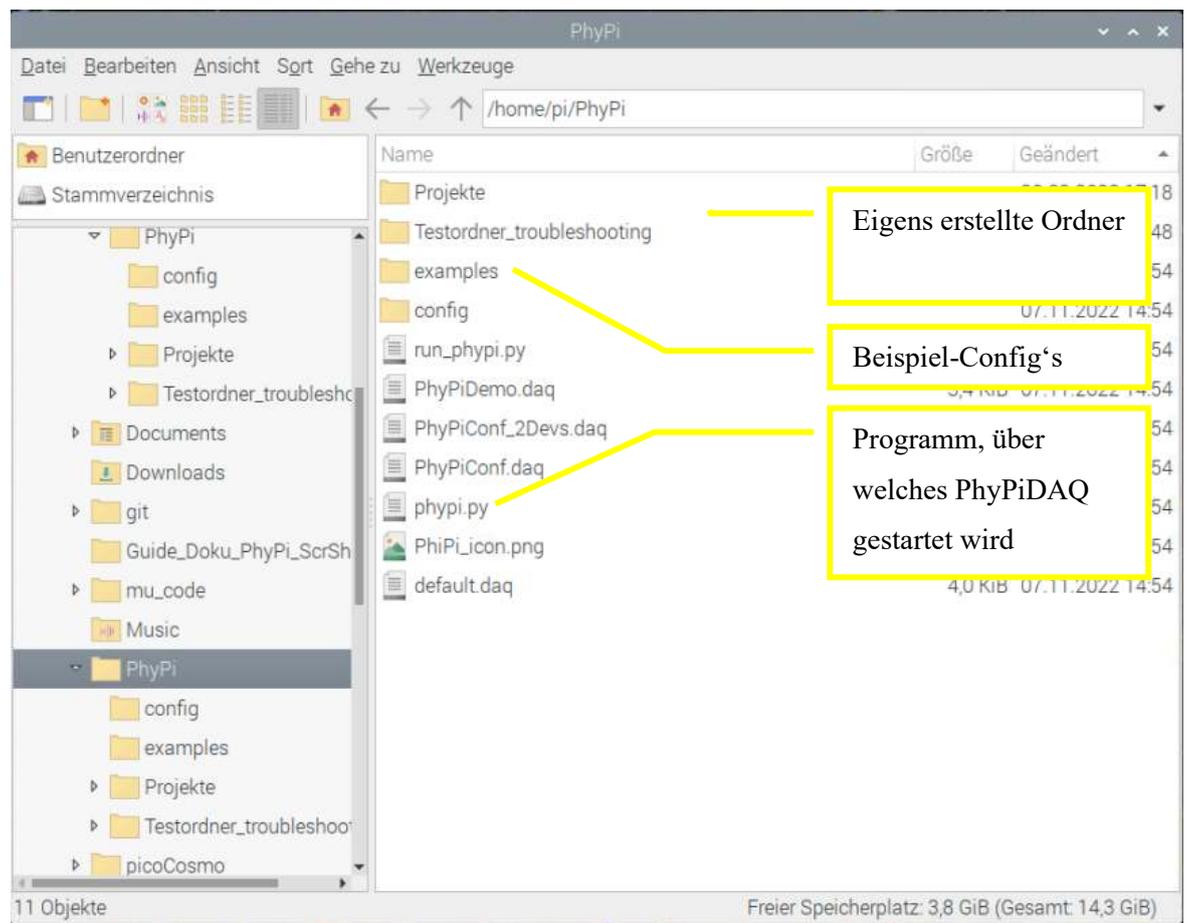


Abbildung 70: Ansicht des Verzeichnisses "PhyPi"

Innerhalb dieses Ordners empfiehlt es sich, zu Beginn eine Struktur an Ordnern zu erstellen, beginnend mit einem Sammelordner (z.B. „Projekte“), worin alle Projekte in jeweilige Unterordner abgelegt werden können.

Projekte koordiniert abspeichern

Falls Sie eigene lauffähige **Python-Programme** erstellt haben, speichern Sie diese am besten zentral zugreifbar unter dem Verzeichnis „pi“, in welchem „PhyPi“ vorzufinden ist, in hierfür erstellte Unterordner.

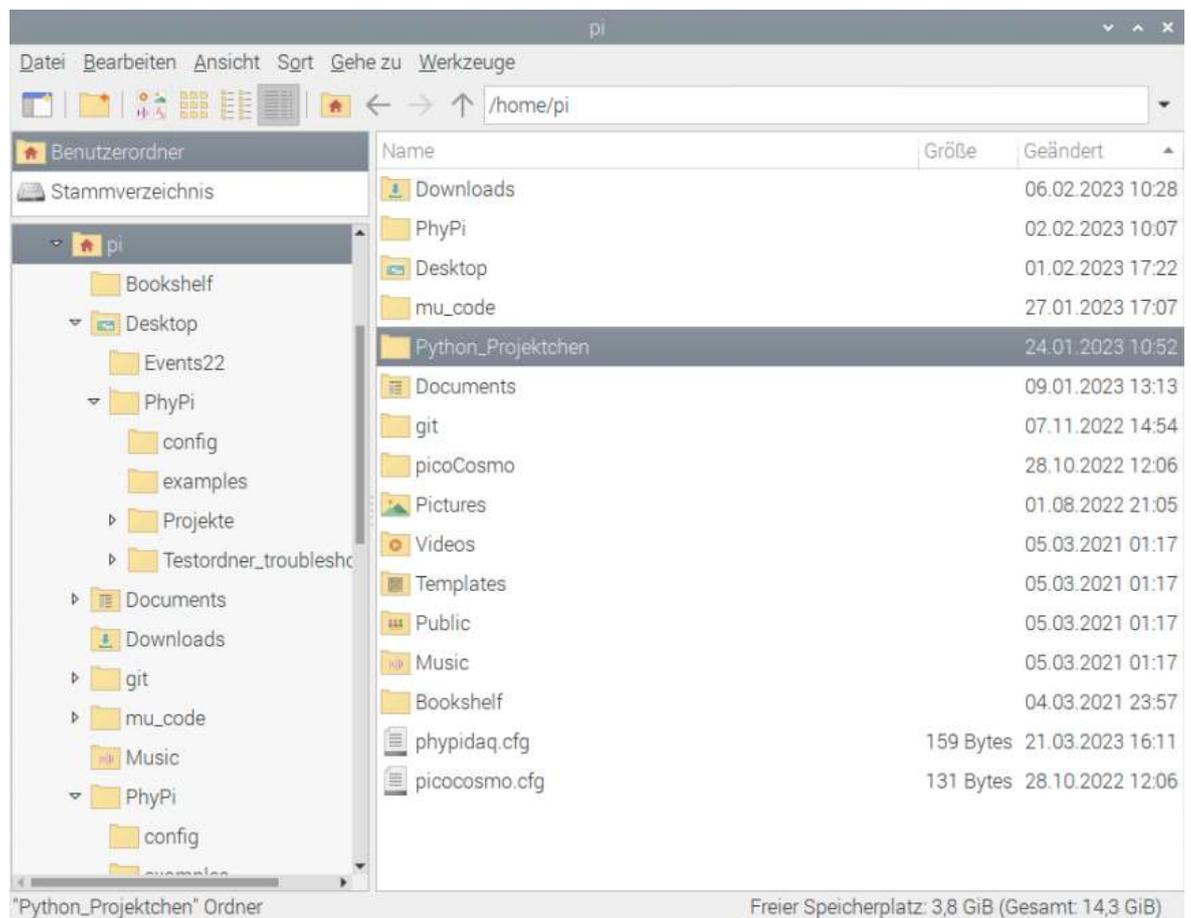


Abbildung 71: Ansicht des Verzeichnisses "pi" mit dem Ordner "Python_Projektchen"

Wenn Sie in **PhyPiDAQ** Config's erstellen oder ändern, speichern Sie diese (über „Save Config“) in einem erstellten Unterordner von „Projekte“, beispielsweise in „Temp und Druck“. Hierdurch wird die gesamte Config (Haupt-Config und die jeweilige(n) Device-Config(s)) an diesem Ort abgespeichert für eine spätere Verwendung.

- ➔ **Achtung:** Vor dem Speichern sollten alle deklarierten Device-Config's geladen sein, da sonst aufgrund der fehlenden Verknüpfung das Programm abstürzt.

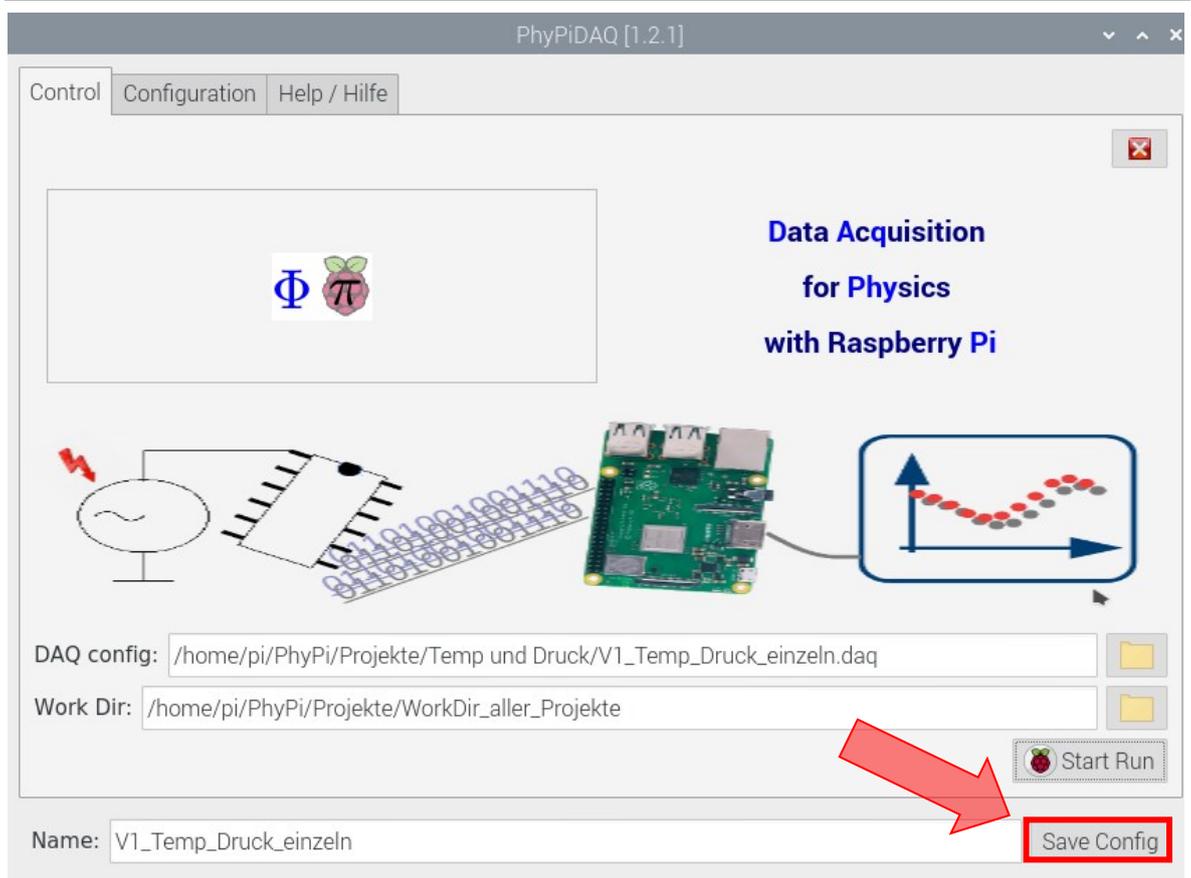


Abbildung 72: Ansicht der PhyPiDAQ-Startseite

Bewahren der Übersichtlichkeit und Struktur

Wenn viel im Vorfeld experimentiert/getestet wird, ist es ratsam, einen Ordner (z.B. „WorkDir aller Projekte“) anzulegen, in welchem alle Arbeitsordner abgespeichert werden. Dies hat den Vorteil, dass alle Device-Config’s, die PhyPiDAQ bei jeder „Start Run“-Ausführung erstellt, an einem Ort gespeichert werden und nicht die anderen Ordner verstopfen.

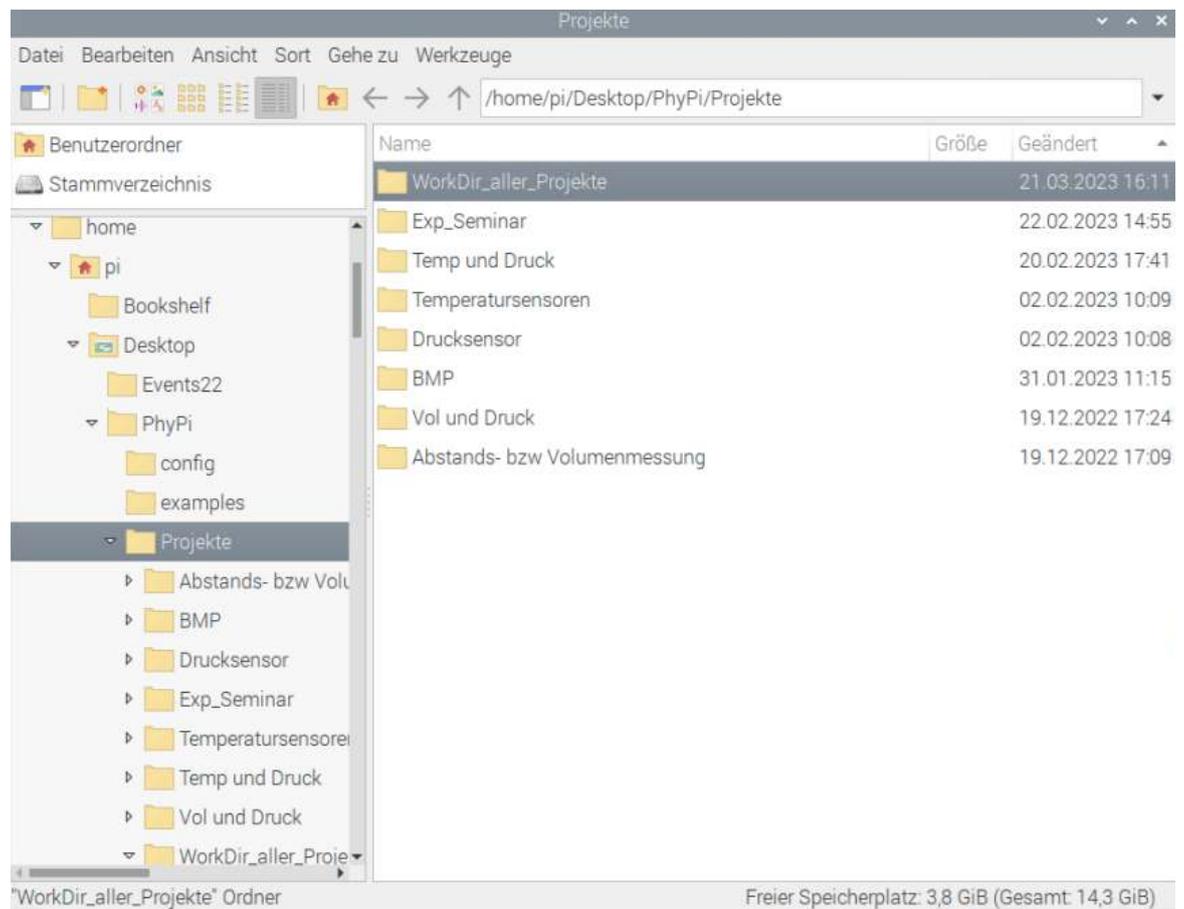


Abbildung 73: Ansicht des Ordners "WorkDir_aller_Projekte" im Verzeichnis "Projekte"

Verkabeln der elektronischen Bauteile

Bevor Sie die Devices im System deklarieren, ist es empfehlenswert, die jeweiligen Geräte mit dem Breadboard des Raspberry Pi zu verbinden. Somit können unnötige Fehler vermieden werden.

Hierbei ist auf die richtige Verkabelung der jeweiligen Devices zu achten, da sonst eine die Devices oder der gesamte Raspberry Pi irreversibel beschädigt werden kann. Für viele erhältliche Devices sind im Internet mehrfach Anleitungen abrufbar, wie diese verkabelt werden können. Die im [Anhang 12](#) dargestellten Verkabelungen wurden ebenfalls durch diverse Internetquellen motiviert.

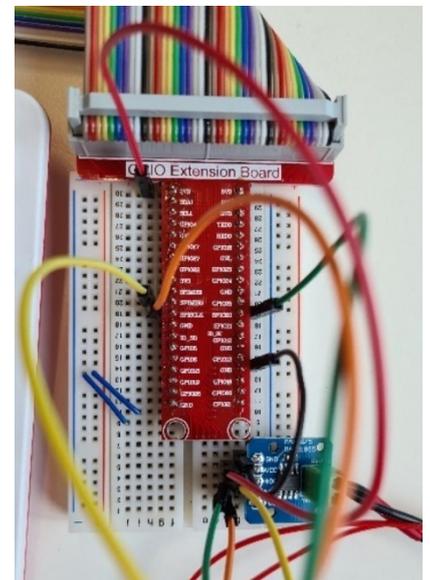


Abbildung 74: Beispielhafte Verkabelung (Thermoelement mit MAX31855)

Am häufigsten tauschen Sensoren und Breakoutboards Daten mit dem Raspberry Pi über die Schnittstellen I²C und SPI aus. Etwas exotischer ist der One-Wire-Bus. Alle müssen im System aktiviert werden, wie in folgender Abbildung dargestellt.

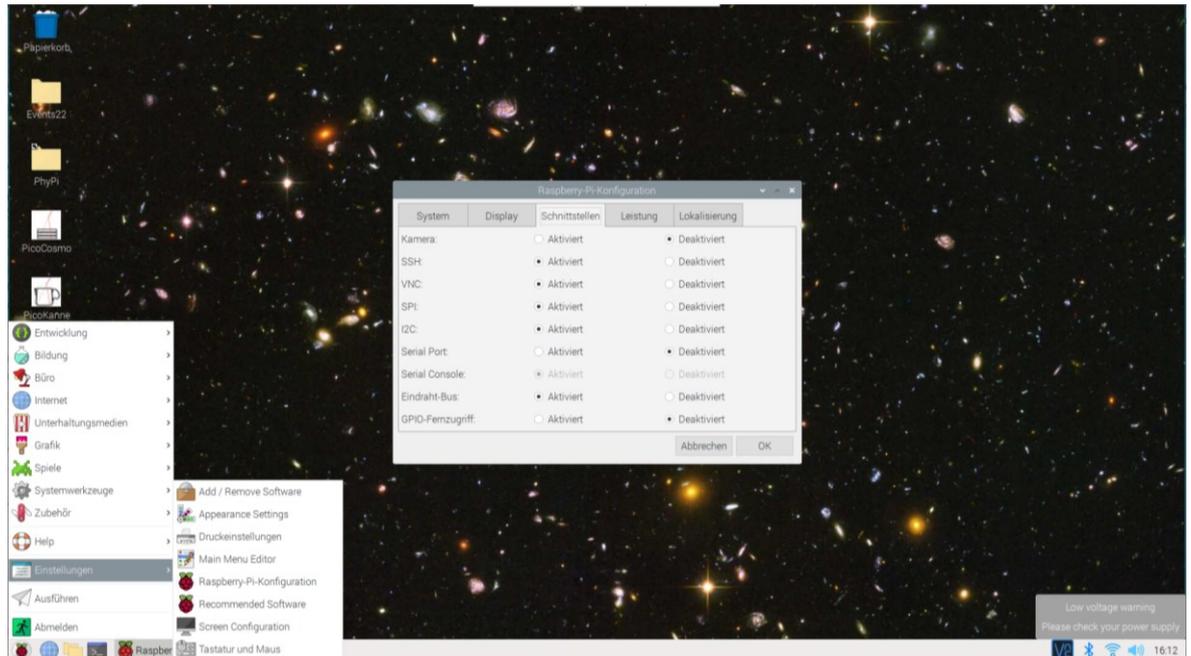
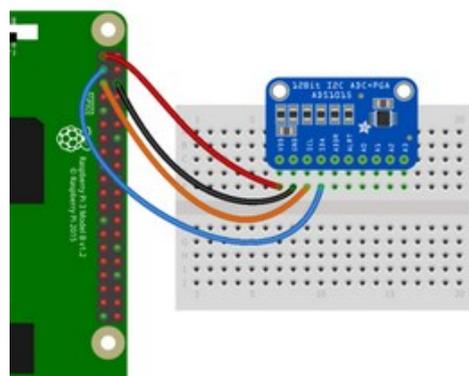


Abbildung 75: Aktivieren der relevanten Schnittstellen über "Einstellungen → Raspberry Pi-Konfiguration"

Im Folgenden soll Ihnen in Kürze ein Einblick hierin gegeben werden.

I²C

Viele Sensoren, Aktoren und Breakoutboards kommunizieren über den „Inter-Integrated Circuit-Bus“ (I²C, ausgesprochen „I-Quadrat-C“). Falls nicht bereits geschehen, muss diese im System aktiviert werden. Eine ausführliche Anleitung hierzu und weitere Informationen sind beispielsweise unter einplatinencomputer.com oder sparkfun.com abrufbar. Beispielhaft ist die Verkabelung des Breakoutboards ADS1115 (Analog-Digital-Wandler) im Folgenden dargestellt.



- Pi 3V (red wire in STEMMA QT version) to ADS1115 VDD - Remember the **maximum input voltage** to any ADC channel cannot exceed this VDD 3V value!
- Pi GND (black wire in STEMMA QT version) to ADS1115 GND
- Pi SCL (yellow wire in STEMMA QT version) to ADS1115 SCL
- Pi SDA (blue wire in STEMMA QT version) to ADS1115 SDA

Abbildung 76: Verkabelung des ADS1115 über I²C. Quelle: [Adafruit](http://adafruit.com)

SPI

Eine weitere, verbreitet eingesetzte Schnittstelle ist das „Serial-Peripheral-Interface“ (SPI), welche ebenfalls, falls noch nicht geschehen, aktiviert werden muss. Eine ausführliche Anleitung hierzu und weitere Informationen sind beispielsweise unter Codingworld.io oder ebenfalls sparkfun.com abrufbar. Beispielhaft ist die Verkabelung des Breakoutboards MAX31855 im Folgenden dargestellt.

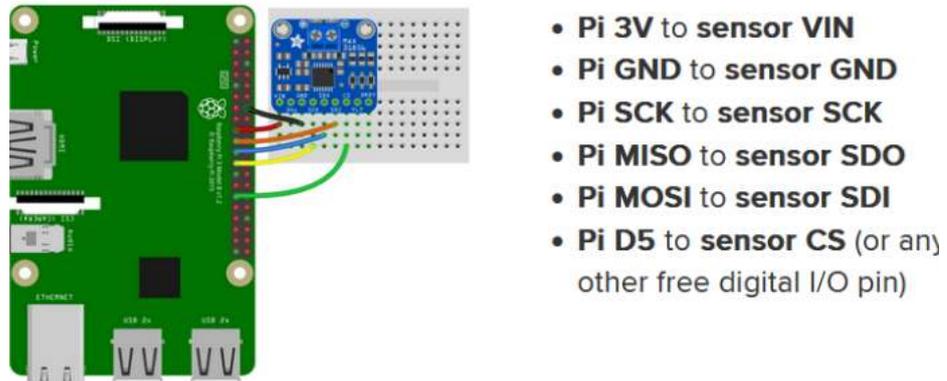


Abbildung 77: Verkabelung des MAX31855 über SPI. Quelle: Adafruit

One-Wire-Bus

Der One-Wire-Bus ist ein digitaler, serieller Bus, bei welchem lediglich eine Daten-, Versorgungs- und eine Masseleitung verbunden werden muss. Die Schnittstelle muss ebenfalls im System konfiguriert werden, ebenso der GPIO-Pin, welcher hierfür genutzt werden soll. Die Anleitung hierzu und weitere Informationen sind beispielsweise unter netzmafia.ee abrufbar. Beispielhaft ist die Verkabelung zweier Temperatursensoren (DS18B20) über den One-Wire-Bus im Folgenden dargestellt. Da jeder Sensor eine eigene Adresse hat, können diese zusammen am im System deklarierten Pin angeschlossen werden (hier: GPIO 26).

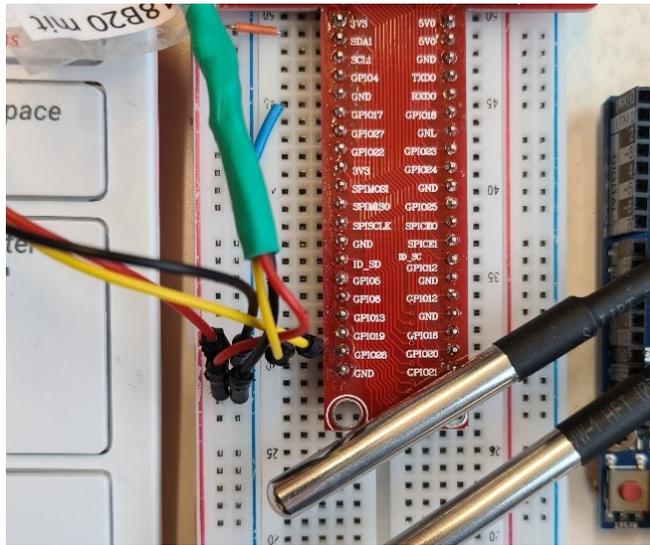


Abbildung 78: Verkabelung zweier DS18B20, welche über einen One-Wire-Bus ausgelesen werden

Ansteuerung/Auslesung der Devices über ein selbstgeschriebenes Programm

Möglichkeiten der Ansteuerung/Auslesung der Devices

Als nächstes werden die Devices softwareseitig eingebunden, damit sie angesteuert/ausgelesen werden können. Hierfür stehen zwei Wege offen:

- Ansteuerung/Auslesung über ein selbstgeschriebenes Programm
- Ansteuerung/Auslesung über PhyPiDAQ (im nächsten Unterkapitel ausdifferenziert)

Die erste Variante ist vorteilhaft gegenüber der zweiten in der Hinsicht, dass Sie nicht an die in PhyPiDAQ vorkonfigurierte Device-Auswahl und -Version gebunden sind und meist ein einfaches Übernehmen von Code aus dem Internet ohne Probleme zum Ziele führt. Die zweite ist jedoch der ersten gegenüber in der Hinsicht im Vorteil, dass keine Programmierkenntnisse erforderlich sind und weiterführende Werkzeuge bereits integriert sind (Anpassen der Messwerte und Visualisierung, Anwenden von Funktionen, Ausgabe als CSV-Datei und weitere)

Ansteuerung/Auslesung über ein selbstgeschriebenes Programm

Für viele Devices sind im Internet bereits Anleitungen zur Verkabelung und ganze lauffähige Programmcode-Blöcke abrufbar. Die geläufigste Programmiersprache, welche im Internet bezüglich dem Raspberry Pi genutzt wird, ist Python. Zwar ist es auch möglich über andere Programmiersprachen wie Scratch zu programmieren, jedoch soll das hier nicht weiterverfolgt werden. Ein oft genutztes Tool zum Programmieren ist die „Thonny

IDE“, welche einen einfachen, aber ausreichenden Funktionsumfang vorweist. Beachtet werden muss beim Programmieren und Übernehmen von Code aus dem Internet folgendes:

- Die jeweilig genutzten Schnittstellen (SPI, I²C, ...) müssen aktiviert sein
- Wenn Bibliotheken (erkennbar an „import“) genutzt werden, müssen diese vorher gegebenenfalls über die Konsole heruntergeladen werden (meist in den Anleitungen beschrieben)

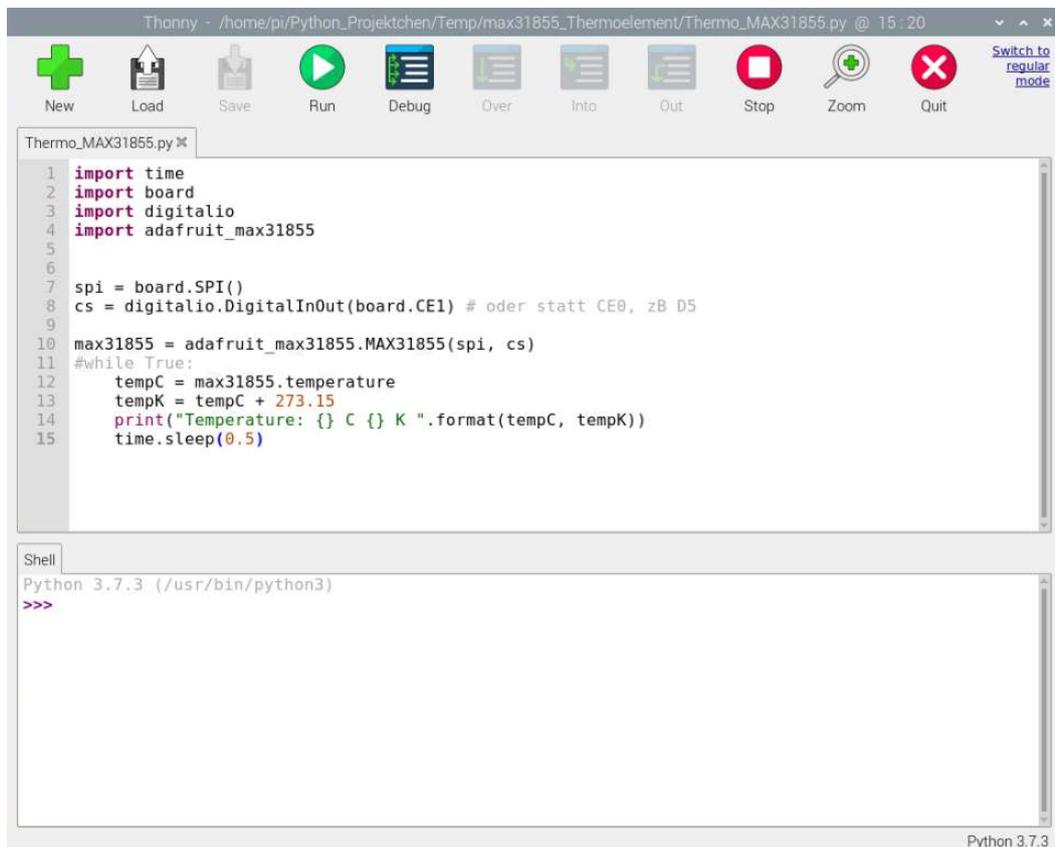


Abbildung 79: IDE des Programms "Thonny" mit einem lauffähigen Code zur Auslesung eines Thermoelements über ein MAX31855-Verstärkerboard

Ansteuerung/Auslesung der Devices in PhyPiDAQ

Starten von PhyPiDAQ

Starten Sie PhyPiDAQ über die Verknüpfung auf dem Desktop oder über den Pfad „pi/PhyPi/phy.py“ (in der Konsole!), erscheint die Konsole und der Start-Oberfläche, über welche Sie das Programm steuern können:

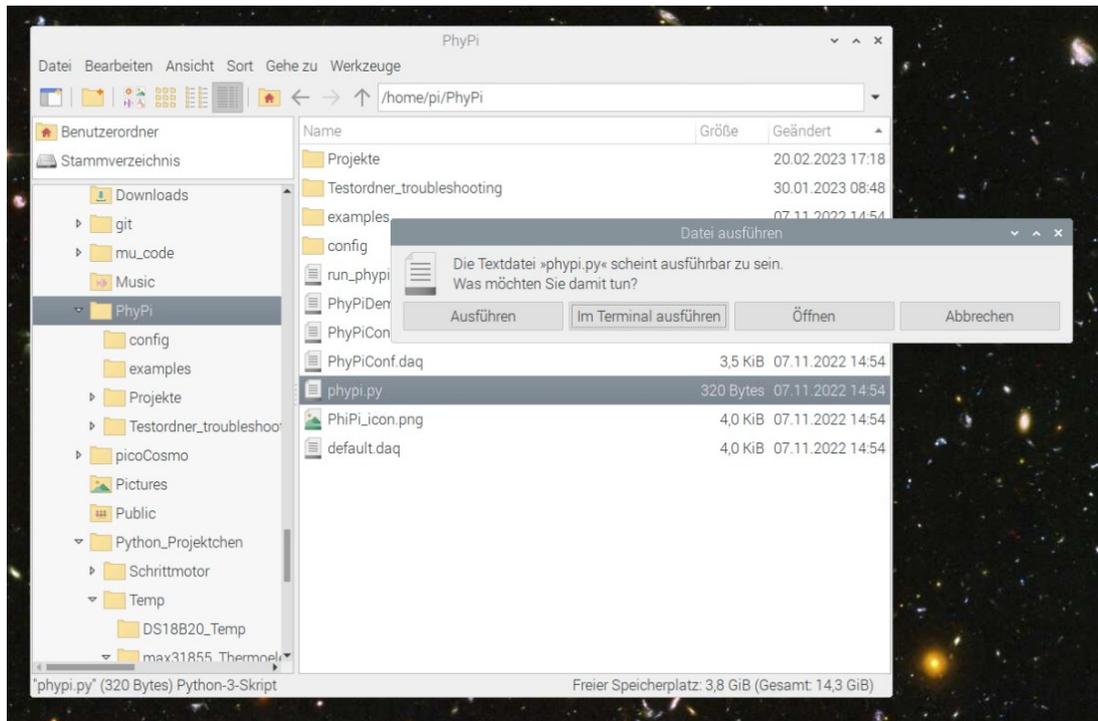


Abbildung 80: Öffnen von PhyPiDAQ über die Desktop-Verknüpfung oder das Ausführen des Programms "phypi.py"

Wählen Sie zuerst eine Config (z.B. die Default-Config) über „DAQ-Config“ aus, welche geöffnet werden soll

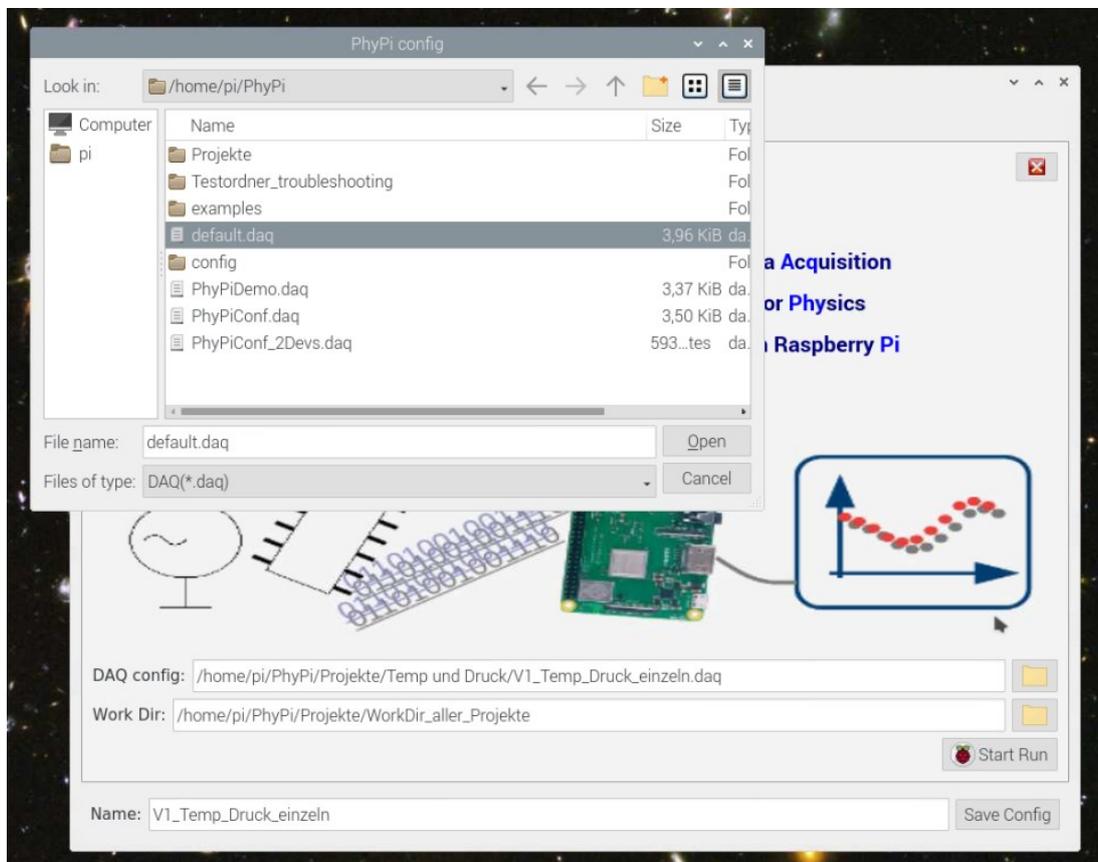


Abbildung 81: Auswahl der "Default"-Config über das Ordner-Symbol der Leiste "DAQ Config"

Dann geben Sie über „Work Dir“ einen Pfad an, wohin die Config's und ggf. Messwerte der einzelnen Messungen gespeichert werden sollen (z.B. „WorkDir aller Projekte“)

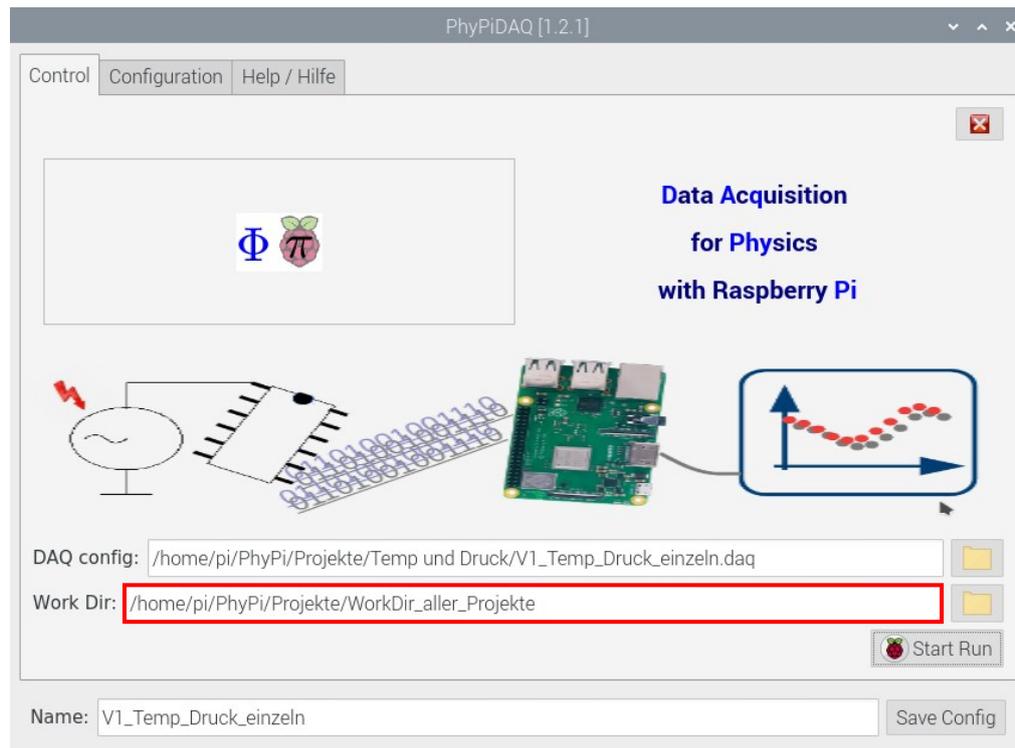


Abbildung 82: Auswahl des Pfades in „Work Dir“, worin die erstellten Projekte inklusive aller Messwerte und Grafiken gespeichert werden sollen

Wechseln Sie im Folgenden von „Control“ auf den Tab „Configuration“, um die Haupt-Config zu bearbeiten. Alle optionalen Befehle sind standardmäßig auskommentiert (erkennbar an dem vorangestellten Raute-Zeichen (#)), damit sie vom Programm nicht ausgeführt werden.

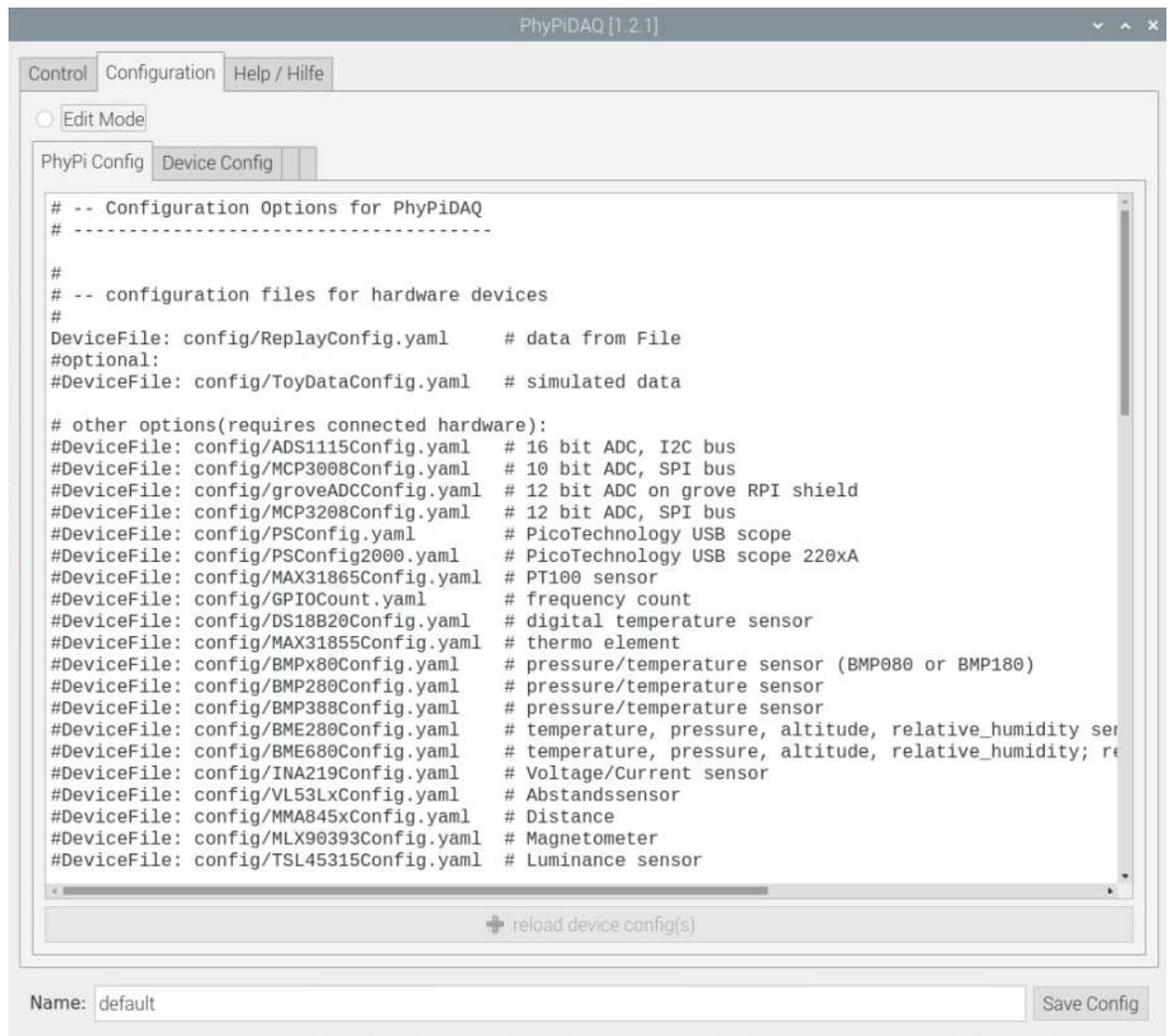


Abbildung 83: Ausschnitt aus der Default-Haupt-Config

Konfigurieren der Haupt-Config

Ne nachdem, wie Ihre Messung aussehen soll und welche Devices Sie verwenden wollen, müssen Sie die Default-Config Ihren Vorstellungen entsprechend anpassen. Aktivieren Sie hierfür zuerst das Feld „Edit Mode“ am oberen Rand des Fensters. Im Nachhinein sind die Angaben weiterhin manipulierbar, falls sich andere Parameter als sinnvoller erweisen sollten. Alle nicht benötigte, standardmäßig auskommentierte Befehle können zur Wahrung der Übersichtlichkeit gelöscht werden. Die jeweiligen Befehle in den Konfigurationsdateien sind dem versierten Nutzer ausreichend kommentiert, sollen hier jedoch trotzdem zum Verständnis oberflächlich erläutert werden.

- DeviceFile – Auswahl der zu verwendenden Geräte/Sensoren (Devices) durch Entfernen der Raute oder Zusammenfassung in ein Array (Eckige Klammern) bei mehreren Geräten
- ChanLimits – Definition des Wertebereichs der Diagramme bei der Messung
- ChanCalib – Möglichkeit der Eingabe von Werten, welche aus der Kalibrierung eines Gerätes stammen und sein Verhalten in dem relevanten Messbereich beschreiben. Das Programm generiert hieraus eine Funktion und interpretiert die Mess-Eingangsgößen entsprechend diesem Verlauf
- ChanFormula – Möglichkeit, auf die Mess-Eingangsgößen eine Formel anzuwenden, damit das Programm selbstständig die berichtigte Messgröße berechnet und grafisch darstellt
- ChanLabels, -Units, -Colors – Definierung der Darstellung und Bezeichnung der Messgrößen, je nach Kanal
- Interval – Angabe des Mess-Intervalls in Sekunden. Die Größe dieses Wertes ist individuell einzustellen je nach Anwendungsfall
- NHistoryPoints – Anzahl der Datenpunkte, die zwischengespeichert werden. Bei dem Betätigen des Buttons „Save Data“ während der Messung werden die jeweils letzten N Datenpunkte abgespeichert
- DisplayModule – Auswahl der Darstellungsform der Messgrößen, ob als Graph oder als reine Datenausgabe
- Chan2Axes und XY-Mode – Einstellmöglichkeit der Visualisierung, falls mehrere Mess-Kanäle aktiv sind

Das folgende Bild soll eine beispielhafte Haupt-Config für eine Temperaturmessung mit PhyPiDAQ darstellen.

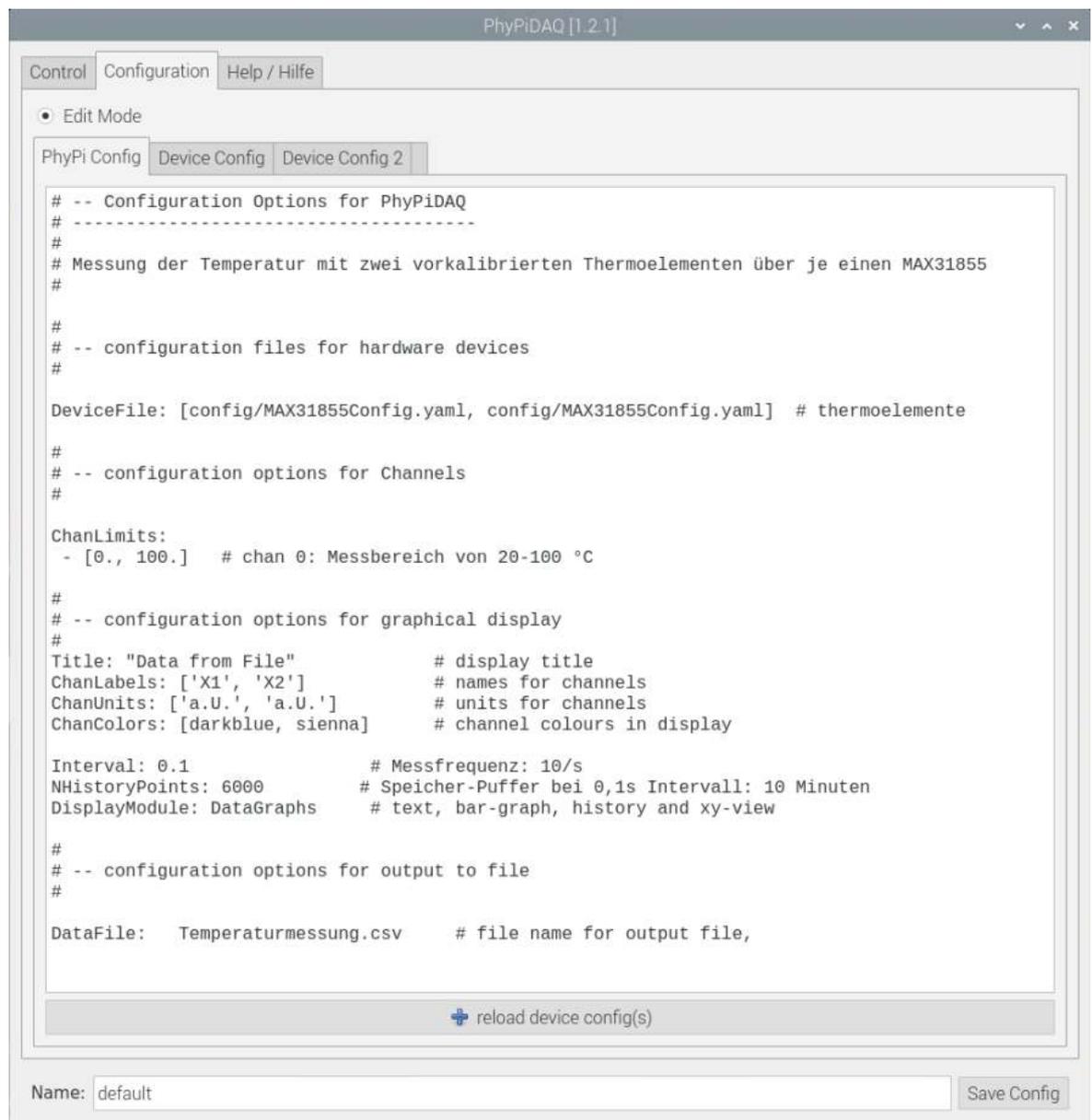


Abbildung 84: Für die Temperaturmessung mit einem Thermoelement angepasste Haupt-Config

Generell erweist es sich als sinnvoll, dass Sie in das obige Kommentarfeld die Bezeichnung der forcierten Verwendung und gegebenenfalls Einzelheiten hineinschreiben, Ihre aktivierten Befehle mit Zusatzinformationen kommentieren, damit Sie bei einer im Nachgang die von Ihnen verfolgte Absicht nachvollziehen können.

Konfigurieren der Device-Config's

Aktivieren Sie die Devices über PhyPiDAQ, welche Sie ansteuern/auslesen möchten, falls sie hierin vorkonfiguriert sind, indem Sie das Raute-Zeichen (#) vor dem jeweiligen Device entfernen und den Button „Load Device-Config“ betätigen. Über den hinzugefügten Tab am oberen Rand des Fensters wechseln Sie auf die jeweilige Device-Config (im späteren Verlauf thematisiert)

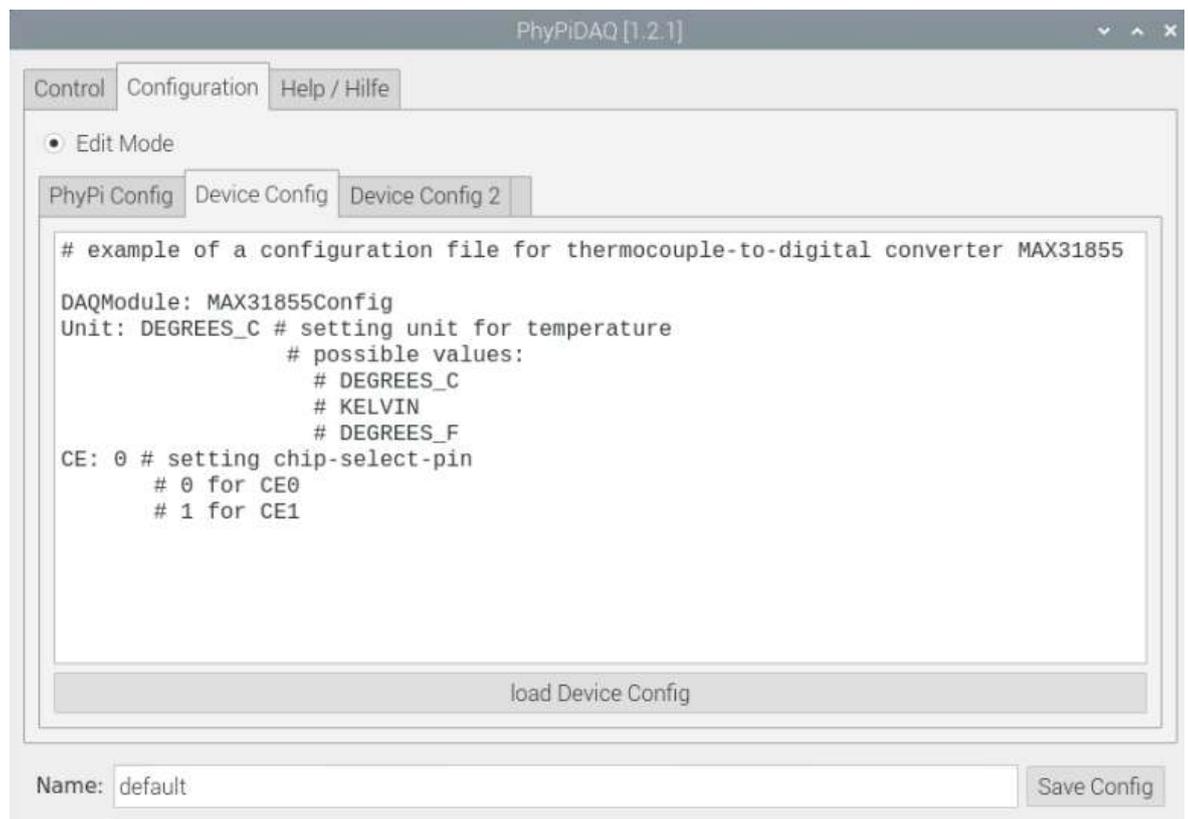


Abbildung 85: Device-Config des MAX31855, über welchen ein Thermoelement ausgelesen werden kann

Indem Sie einzelne Befehle manipulieren, können Sie die Ansteuerung/Auslesung des Devices anpassen, falls dies nötig sein sollte.

Kalibration von Sensoren

Allgemeines

Die Kalibration der Sensoren können Sie am einfachsten über PhyPiDAQ und beispielsweise ein Tabellenkalkulationsprogramm wie Microsoft Excel oder OpenOffice Calc vollziehen. Hierzu bietet es sich an, dass Sie sich nach der in [Anhang 02](#) gezeigten Kalibrationsabfolge richten. Die folgenden Empfehlungen werden an einigen Stellen auf das Beispiel der Drucksensor-Kalibration angewandt.

Vorgang

In der Regel werden bei der Kalibration nur einige wenige Wertepaare aufgenommen (< 10 Messwerte), welche für eine Regression ausreichen. Diese können Sie während der Messung direkt in eine Haupt-Config eintippen.

Hierzu kopieren Sie die Default-Haupt-Config in das jeweilige, angelegte Verzeichnis (z.B. unter dem Pfad „pi/PhyPi/Projekte/Kalibrierte_Sensoren“), ändern den Namen zu z.B. „Druckmessung“ und öffnen Sie diese mit einem Rechtsklick in einem Texteditor.

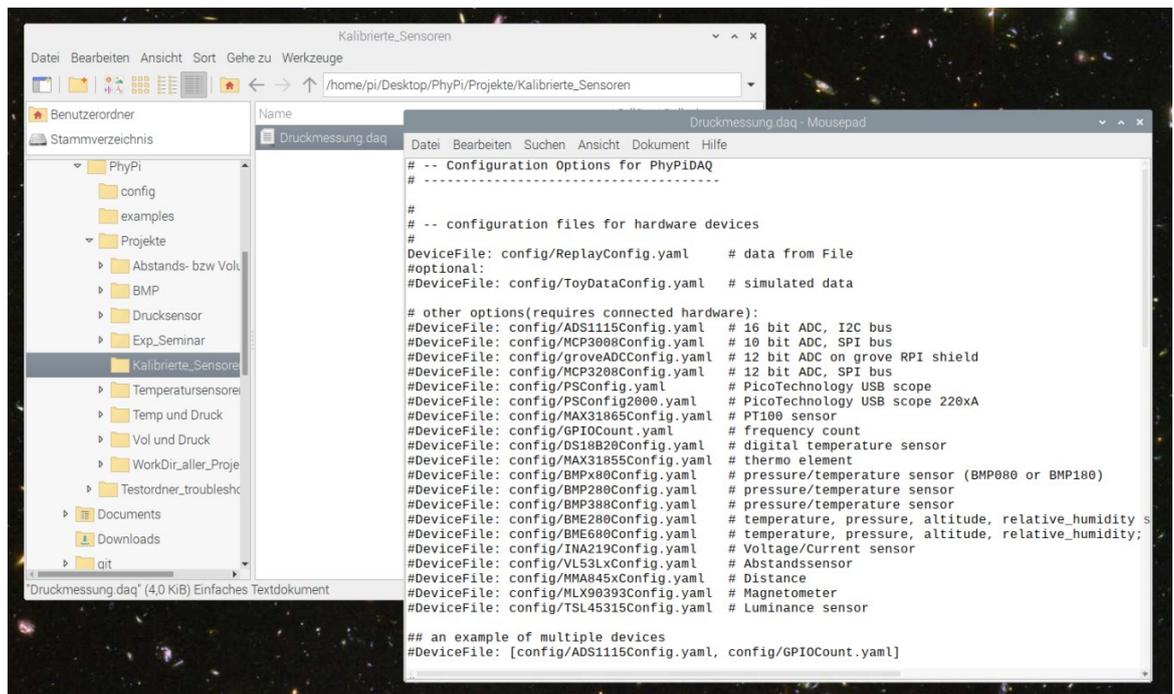


Abbildung 86: In einem Texteditor geöffnete Haupt-Config

Geben Sie in **ChanCalib** die jeweiligen Wertepaare in folgender Form ein:

[[Referenzwert1, Referenzwert2, ...], [Sensorwert1, Sensorwert2, ...]]

Achten Sie darauf, dass die Dezimaltrennzeichen statt Kommata wie im englischen/amerikanischen Raum in Form von Punkten erfolgen. Bei diesem Beispiel sei anzumerken, dass die Referenzwerte als x-Werte (horizontale Achse) und die Sensorwerte als y-Werte (vertikale Achse) aufgefasst werden. Falls ganze Zahlen auftreten, sollten diese ebenfalls mit einem Punkt versehen werden (programmseitige Gründe). Passen Sie die Befehle und Kommentare in dem Zuge gleich mit an.

```

Druckmessung - Mousepad
Datei Bearbeiten Suchen Ansicht Dokument Hilfe
# -- Configuration Options for PhyPiDAQ
# -----
# Config für ADS1115 i.V. mit Drucksensor, 3-adrig.
# Kalibrationswerte aus Kalibration mit Vakuum-Handpumpe
#
# -- configuration files for hardware devices
#
DeviceFile: config/ADS1115Config.yaml # 16 bit ADC, I2C bus
#
# -- configuration options for data channels
#
ChanLimits:
- [1000., 1000000.] # chan 0
# Wenn in Device-Config der Differential-Mode auf "false" ist, dann wird im
# "Single ended"-Mode gegen Masse gemessen
# In diesem Fall werden aus Kalibration mit Vakuum-Pumpe die Werte in ChanCalib
# übernommen.
# Wird stattdessen Differential-Mode auf "true" gesetzt, wird die Spannung zwischen
# zwei analogen Eingängen gemessen (d.h. beide Eingänge, z.B. A0 und A1 müssen beschaltet sein).
# Da nur ein Signal vorliegt, setze DifModeChan auf "False".
# Werte (Achtung: Werte müssen durch neue ersetzt werden, da sich Setting geändert hat!):
# Werte mit Spannungsversorgung des Drucksensors von 3.3 V, nicht 5 V aufgenommen!
ChanCalib:
- [ [-100., 0., 100000., 200000., 300000., 400000., 520000., 600000., 690000., 710000., 810000., 1010000.],
  [0.315, 0.344, 0.646, 0.843, 1.163, 1.411, 1.716, 1.945, 2.196, 2.21, 2.431, 2.565] ] # chan0

```

Abbildung 87: Anpassung der Haupt-Config durch Eingeben der Kalibrationswerte, Löschen/Aktivieren von Befehlen und Anpassen der Kommentare

Die soeben erstellte und abgespeicherte Haupt-Config öffnen Sie mit PhyPiDAQ, laden den entsprechenden Sensor und starten probeweise die Messung.

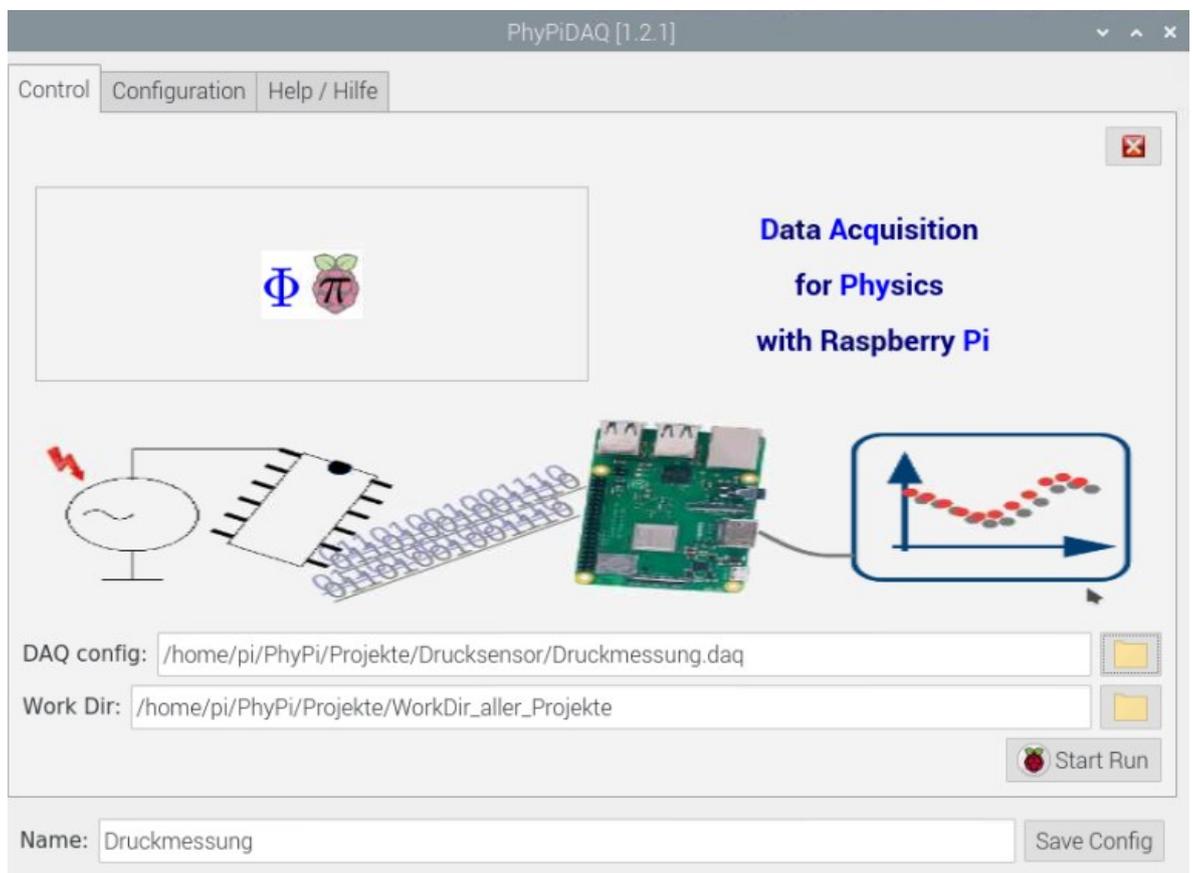


Abbildung 88: In PhyPiDAQ geladene, soeben angepasste Haupt-Config

Balkendiagramme und im unteren Bereich als Funktion der Zeit aufgetragen wird. Hierdurch wird Ihnen die Veranschaulichung im Experiment auf zwei Arten ermöglicht.

Auslesen und Weiterverarbeiten der Messdaten

Haben Sie in der Config die Ausgabe als CSV-Datei aktiviert, können Sie die gewonnenen Messdaten beispielsweise in einem Datenanalyse- oder einem Tabellenkalkulationsprogramm auswerten. Das Erstere sei hierbei zu bevorzugen, da mit diesem Ihnen weiterführende Funktionen möglich sind (Angabe von Fehlern, Kurvenanpassung/Fit mit Fehlern und Gewichtung uvm.). Hierfür bieten sich vor allem Open-Source-Lösungen wie [SciDAVis](#) oder [LabPlot](#) an, da diese in der Regel kostenlos und lizenzfrei sind und meistens ein umfangreiches Funktionsspektrum vorweisen. Für die einfache Auswertung von Messwerten durch Schülerinnen und Schüler ist jedoch auch ein Tabellenkalkulationsprogramm verwendbar.

Weiterführende Tipps zur Vorbereitung von Experimenten

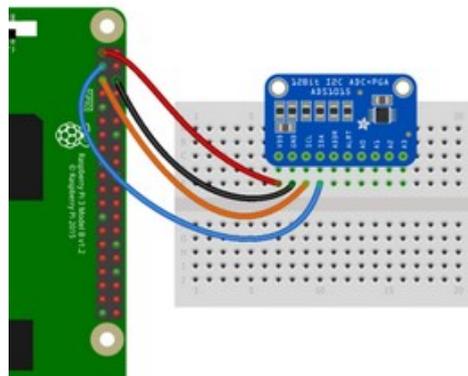
Vorbereitung:

- Bereiten Sie das Experiment hinreichend gut vor und notieren Sie sich gegebenenfalls verwendete Hardware und Programme
 - Falls mehrere Experimente an einem Tag vorgeführt werden sollen, ist es sinnvoll, auf verschiedenen Breadboards die jeweiligen Verkabelungen herzustellen, sodass im Unterricht selbst dies nicht mehr passieren muss
 - Speichern Sie die Configs der einzelnen Experimente an Orten, die Sie leicht wieder auffinden. Erstellen Sie gegebenenfalls eine Verknüpfung auf dem Desktop
-

Anhang 12 - Weitere Informationen zur eingesetzten Sensorik und elektrischen Bauteilen

Nachfolgend sollen weiterführende Informationen zu den verwendeten Sensoren und elektronischen Bauteilen, sowie eine Hilfestellung zur Anbindung an den Raspberry Pi zur Verfügung gestellt werden.

- **ADS1115** (für analoge Eingangsgrößen) siehe [Adafruit](#):



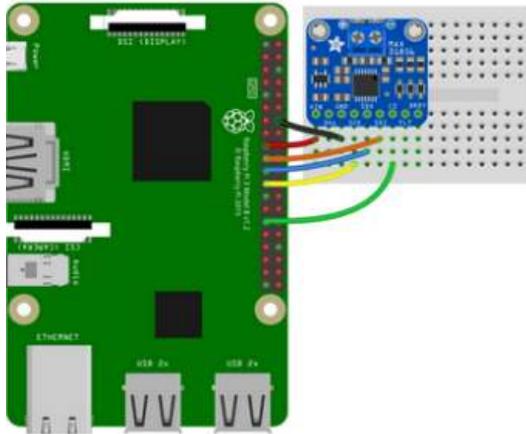
- **Pi 3V (red wire in STEMMA QT version)** to **ADS1x15 VDD** - Remember the **maximum input voltage** to any ADC channel cannot exceed this VDD 3V value!
- **Pi GND (black wire in STEMMA QT version)** to **ADS1x15 GND**
- **Pi SCL (yellow wire in STEMMA QT version)** to **ADS1x15 SCL**
- **Pi SDA (blue wire in STEMMA QT version)** to **ADS1x15 SDA**

Abbildung 90: Anbindung des ADS1115 an den Raspberry Pi (Quelle: [Adafruit](#))

Info zu PhyPiDAQ-Device-Config: Differential Mode: Wenn aktiviert, dann wird die Spannung zwischen zwei analogen Eingängen (z.B. A0 und A1) gemessen. In diesem Fall müssen A0 und A1 auch verkabelt sein. Über den Single-Ended-Mode wird die Spannung zwischen dem analogen Eingang und der Masse (Ground) gemessen. In der Regel ist dieser deaktiviert.

Bei starken Schwankungen des Eingangssignals empfiehlt es sich, einen Widerstand (z.B. 10 kOhm) zwischen den analogen Eingang und der Masse/Ground zu schalten. Zusätzlich kann mit einem Kondensator in Reihe mit dem Widerstand das Signal geglättet werden (Auslegung gemäß $\tau = R \cdot C \rightarrow C = \tau / R$, bei 0,1 sek und $R=10 \text{ kOhm} \rightarrow C = 10 \text{ }\mu\text{F}$)

- **MAX31855** (für Thermoelement Typ K) siehe [Adafruit](#) (statt an D5, Sensor an CE0 anschließen):

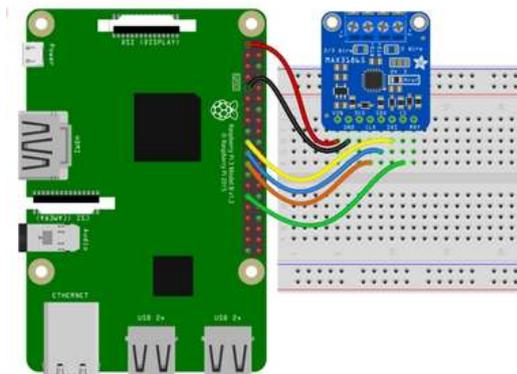


- **Pi 3V** to **sensor VIN**
- **Pi GND** to **sensor GND**
- **Pi SCK** to **sensor SCK**
- **Pi MISO** to **sensor SDO**
- **Pi MOSI** to **sensor SDI**
- **Pi D5** to **sensor CS** (or any other free digital I/O pin)

Abbildung 91: Anbindung des MAX31855 an den Raspberry Pi (Quelle: [Adafruit](#))

Bei mehreren MAX31855 ist die Verkabelung identisch, jedoch bekommt jeder MAX seinen eigenen Eingang beim Chip-Select (MAX1/Ch0 → SPICE0, MAX2/Ch1 → SPICE1)

- **MAX31865** (für PT100/PT1000, je nach Referenzwiderstand) siehe [Adafruit](#):



- **Pi 3V3** to **sensor VIN**
- **Pi GND** to **sensor GND**
- **Pi MOSI** to **sensor SDI**
- **Pi MISO** to **sensor SDO**
- **Pi SCLK** to **sensor CLK**
- **Pi GPIO5** to **sensor CS** (or use any other free GPIO pin)

Abbildung 92: Anbindung des MAX31865 an den Raspberry Pi (Quelle: [Adafruit](#))

- **DS18B20** (digitaler Temperatursensor) siehe [tutorials-raspi](#):

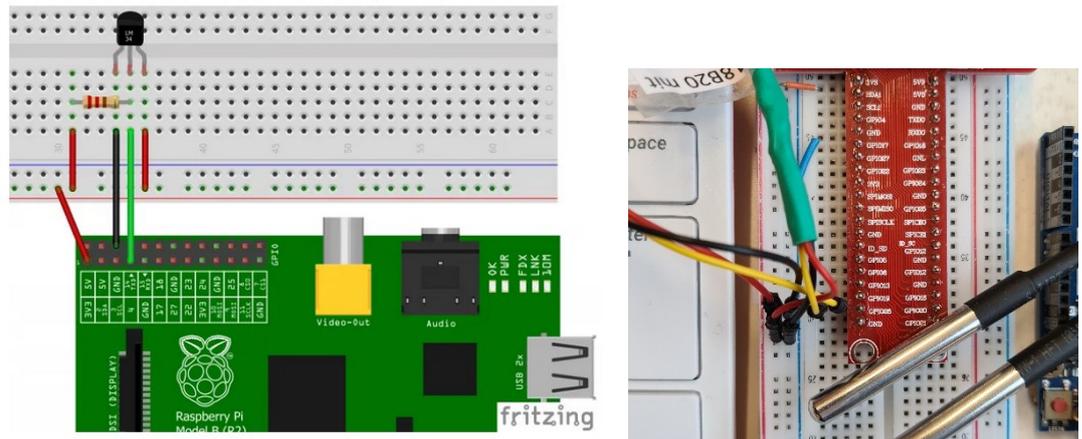


Abbildung 93: Links: Anbindung des DS18B20 an den Raspberry Pi (Quelle: [tutorials-raspi](#)),
rechts: Verkabelung zweier DS18B20 an einem GPIO-Pin

Verkabelung: VCC zu 3,3 V-Pin, Ground zu Ground-Pin, Datenpin zu einem GPIO-Pin (z.B. GPIO 26). Der Widerstand ist bereits am Sensor verbaut. Datenpin muss jedoch in RasPi-Config.txt definiert werden! Siehe beispielhafte [Anleitung](#).

- **Drucksensor an ADS1115** (Eigendarstellung)

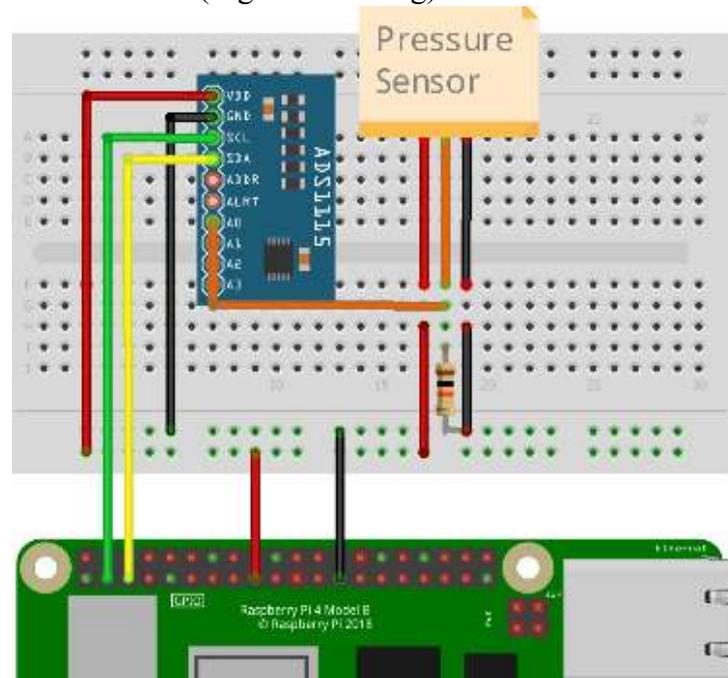


Abbildung 94: Anbindung des Drucksensors über den ADS1115 an den Raspberry Pi
(Eigendarstellung)

Der Anschluss erfolgt wie in der Abbildung ersichtlich:

Tabelle 14: Anschluss des Drucksensors und des ADS1115 an den Raspberry Pi

Raspberry Pi	→	ADS1115	→	Drucksensor
3,3 V		VDD		Rot: Stromversorgung
GND		GND		Schwarz: Ground
SCL		SCL		
SDA		SDA		
GND über R=10 kOhm		A0		Grün: A0

Bei andersfarbigen Litzen des Drucksensors sind dem Datenblatt entsprechend die jeweiligen Anschlüsse zu bestimmen. Der 10 kOhm-Widerstand wird benötigt, um die Störgrößen zu mildern. Bei starkem Rauschen kann ein 10 μ F-Kondensator zusätzlich in Reihe verbaut werden. Der vorhandene Drucksensor könnte theoretisch auch an 5V betrieben werden.

Literaturverzeichnis

all4de2023gogo001. (2023, 9. März). *0.5-4.5V Drucksensor Druckaufnehmer 1/8 "NPT - eBay*.

<https://www.ebay.de/itm/234913829441?hash=item36b1f49241:g:~doAAOSwshxj~HV4&amdata=enc%3AAQAHA8BOuQ0jhcAtQV7HNkDZpc99OFGv1tfCQX6XGHxSGeakmPvuPKWR5rg4GLj74G%2FSs4QS30r5dIK%2BesyPbSl2qChdEGZ8JHOyCuCLxNWOxyeSfceHzFcuXwHRSJpTLx%2FfDwHB7zuwaWZYHNczsixSZnOfsOTB4VYMnm%2BeYaNpbkhOUSNxdR2CbcS%2BbRCMG4HCSX9LWFPky4bsxgZz7rsAc%2Buh18rrj1uIyU5%2FtWqvN9DRVqakLHaRpOCfArD4QWYldamKbCz0p8%2Foc7Elbz5n2aFJORbIa7nN0h0KjcD3SoWDY1jQXIIUBwWoLgi2sQmSGw%3D%3D%7Ctkp%3ABk9SR5bDk-fYYQ>

Archimedes von Syrakus. *Zitate von Archimedes*. <https://1000-zitate.de/9333/Miss-alles-was-sich-messen-laesst.html>

CERN. (2023, 10. Februar). *The CERN Data Centre*.

<https://home.cern/science/computing/data-centre>

Demtröder, W. (2018). *Experimentalphysik I*. Springer Berlin Heidelberg.

<https://doi.org/10.1007/978-3-662-54847-9>

Friedrich Dürrenmatt. (2017). *"Der Inhalt der Physik geht die Physiker an, die Auswirkung alle Menschen"*. Goetheschule Kaiserslautern. <https://goetheschulekl.de/der-inhalt-der-physik-geht-die-physiker-an-die-auswirkung-alle-menschen/>

Funduino GmbH. (2023, 27. Februar). *Funduino Lernset - Einsteiger Kit für Arduino*.

<https://funduinoshop.com/funduino-lernsets/funduino-lernset-einsteiger-kit-fuer-arduino>

Hampe & Katja. (2015). *Digitale Schule - vernetztes Lernen: Ergebnisse einer BITKOM-Studie*. Berlin. Bitkom. <https://www.bitkom.org/Bitkom/Publikationen/Digitale-Schule-und-vernetztes-Lernen.html>

Hans- Ulrich Lampe, Frank Liebner, Hildegard Urban-Woldron & Mirco Tewes. (2015).

Innovativer naturwissenschaftlicher Unterricht mit digitalen Werkzeugen:

Experimente mit Messwerterfassung in den Fächern Biologie, Chemie, Physik

[MNU Themenreihe Bildungsstandards]. [https://www.mnu.de/images/blog/MNU-Themenheft_digitale_Werkzeuge/MNU-](https://www.mnu.de/images/blog/MNU-Themenheft_digitale_Werkzeuge/MNU-Themenheft_Innovativer_naturwissenschaftlicher_Unterricht_mit_digitalen_Werkzeugen.pdf)

[Themenheft_Innovativer_naturwissenschaftlicher_Unterricht_mit_digitalen_Werkzeugen.pdf](https://www.mnu.de/images/blog/MNU-Themenheft_Innovativer_naturwissenschaftlicher_Unterricht_mit_digitalen_Werkzeugen.pdf)

- Hodson, D. (1993). Re-thinking Old Ways: Towards A More Critical Approach To Practical Work In School Science. *Studies in Science Education*, 22(1), 85–142. <https://doi.org/10.1080/03057269308560022>
- Kircher, E., Girwidz, R. & Fischer, H. E. (Hrsg.). (2020). *Physikdidaktik Grundlagen* (4. Aufl.). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-59490-2>
- Kotseva, I., Gaydarova, M., Angelov, K. & Hoxha, F. (2019). *Physics experiments and demonstrations based on Arduino*. <https://doi.org/10.1063/1.5091417>
- Major, Š., Hubálovská, M. & Waclawek, M. (2021). *Using the Raspberry Pi Microcomputers in STEM Education in Technically Oriented High Schools* (1-2). <https://sciendo.com/it/article/10.2478/cdem-2021-0006>
<https://doi.org/10.2478/cdem-2021-0006>
- Ministerium für Kultur, Jugend und Sport. *Bildungsplan 2021 - Berufliches Gymnasium: Physikalische Laborübungen*.
- Moritz Aupperle. (2018). *Konzeption und Gestaltung eines digitalen Messwerterfassungssystems für den Physikunterricht in der Schule: Masterarbeit*.
- Moya, A. A. (2019). *Studying Avogadro's Law with Arduino* (Nr. 9). <https://doi.org/10.1119/1.5135793>
- Patrick Schnabel. (2023, 13. März). *DS18B20 - Digitaler Temperatursensor*. https://www.elektronik-kompodium.de/sites/praxis/bauteil_ds18b20.htm
- Pinheiro Junior, J. B. & Soares, A. A. (2021). *Studying the specific heat of sand with an Arduino board* (Nr. 4). Department of Physics, Chemistry and Mathematics. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/abf5f2>
- Rincke, K. (2016). *Experimente in ihren Funktionen für das Lernen*. Regensburg. Universität Regensburg. <https://epub.uni-regensburg.de/36410/1/rincke-grundlagentext-experimentieren.pdf>
- Roczniewski und Schwede GbR. (2020). *Wofür wird Python verwendet? 10 Aufgaben und Anwendungsbereiche*. <https://lerneprogrammieren.de/python-anwendungsbereiche/>
- T³ Deutschland & MNU e.V. (2018). *Experimentieren im naturwissenschaftlichen Unterricht im Zeitalter der Digitalisierung: Stellungnahme zum Erwerb fachlicher und fachdidaktischer Kompetenzen in der Lehramtsausbildung, Tagungsbericht zum Expertentreffen „Sensorgestütztes Experimentieren im naturwissenschaftlichen Unterricht“*. http://t3-trainingcenter-berlin.de/wp-content/uploads/2018/05/Tagungsbericht-MNU_T3_Sensortagung.pdf
-

- Thornton, R. K. & Sokoloff, D. R. (1990). *Learning motion concepts using real-time microcomputer-based laboratory tools*.
<https://aapt.scitation.org/doi/pdf/10.1119/1.16350>
- Tipler, P. A., Mosca, G., Kersten, P. & Wagner, J. (Hrsg.). (2019). *Physik*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-58281-7>
- University of New York. (2023, 27. Februar). *ITP Physical Computing*.
<https://itp.nyu.edu/physcomp/>
- Wika Alexander Wiegand SE & Co. KG. (2021). *Was beim Einsatz von Thermoelementen zu beachten ist*. <https://wirautomatisierer.industrie.de/sensorik/was-beim-einsatz-von-thermoelementen-zu-beachten-ist/>
- Wikipedia. (2023, 12. März). *Thermoelement*.
<https://de.wikipedia.org/wiki/Thermoelement>
-

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zyklus des experimentellen Forschens (Demtröder, 2018, S. 10).....	8
Abbildung 2: Auswahl möglicher Funktionen eines Experiments im Physikunterricht (Kircher et al., 2020, S. 267).....	10
Abbildung 3: Verteilung des Einsatzes verschiedener Messwerterfassungssysteme (T ³ Deutschland & MNU e.V., 2018, S. 85).....	14
Abbildung 4: Einschätzung von Lehrkräften in Bezug zum zukünftigen Stellenwert bestimmter Aspekte der digitalen Messwerterfassung (T ³ Deutschland & MNU e.V., 2018, S. 89).....	15
Abbildung 5: Startseite / Benutzeroberfläche PhyPiDAQ.....	25
Abbildung 6: Beispielhafter Ausschnitt aus einer Haupt-Konfigurationsdatei.....	26
Abbildung 7: Beispielhafte Geräte-Konfigurationsdatei	27
Abbildung 8: Beispielhafter Messvorgang beim Laden und Entladen eines Kondensators in PhyPiDAQ	28
Abbildung 9: NPT-Drucksensor, bis 150 PSI.....	45
Abbildung 10: Schaubild der Drucksensor-Kalibrationsfunktion.....	46
Abbildung 11: Schematische Darstellung eines Thermoelementes (Wikipedia, 2023).....	47
Abbildung 12: Beispielhaftes Thermoelement mit Verstärkerboard MAX31855.....	48
Abbildung 13: Prototyp 1	50
Abbildung 14: Prototyp 2.....	51
Abbildung 15: Prototyp 3.....	51
Abbildung 16: Versuchsaufbau für einen isothermen Prozess	55
Abbildung 17: Visualisierung der Messdaten eines isothermen Prozesses mit Fehlern in einem p/V-Diagramm	55
Abbildung 18: Kurvenanpassung an die Messdaten	56
Abbildung 19: Versuchsaufbau für einen isobaren Prozess.....	59
Abbildung 20: Messwerte und Kurvenanpassung des isobaren Prozesses	60
Abbildung 21: Aufbau für einen isochoren Prozess	64
Abbildung 22: Schaubild einer gesamten Messung über der Zeit, ohne Fehlerangaben	64
Abbildung 23: Anpassung einer linearen Funktion an den relevanten Messbereich	65
Abbildung 24: Ausschnitt aus der Messung einer isentropen/adiabaten Zustandsänderung	69
Abbildung 25: Visualisierte Messwerte der isentropen/adiabaten Zustandsänderung (Messung von 200,0-202,3 s)	70

Abbildung 26: Vergleich der Messwerte einer Einzelmessung mit dem theoretischen Verlauf einer Ideal-isentropen Zustandsänderung mit Isentropen-Exponent $\kappa=1,4$	71
Abbildung 27: Messwerte mit Kurvenanpassung des polytropen Modells mit angepassten Fehlern	73
Abbildung 28: Messwerte des quasi-adiabatischen und isobaren Prozesses ohne Fehleranpassung.....	77
Abbildung 29: Messwerte und exponentielle Kurvenanpassung des isobaren Prozesses mit Fehleranpassung.....	78
Abbildung 30: Beispielhafter PT100-Sensor inklusive Verstärkerboard MAX31865	B
Abbildung 31: Beispielhafter DS18B20-Sensor	B
Abbildung 32: Schematische Darstellung eines Thermoelementes (Wikipedia, 2023).....	C
Abbildung 33: Beispielhaftes Thermoelement mit Verstärkerboard MAX31855	D
Abbildung 34: Veranschaulichung der DS18B20- und MAX31855 (1) - Kalibration.....	G
Abbildung 35: Grafische Veranschaulichung der Latenzen der Temperatursensoren bei Erwärmung.....	K
Abbildung 36: Grafische Veranschaulichung der Latenzen der Temperatursensoren bei Abkühlung	L
Abbildung 37: Fahrrad-Luftpumpe mit Manometer und Drucksensor	M
Abbildung 38: Haupt-Konfigurationsdatei der Drucksensor-Kalibration	O
Abbildung 39: Geräte-Konfigurationsdatei der Drucksensor-Kalibration.....	P
Abbildung 40: Haupt-Konfigurationsdatei nach der Drucksensor-Kalibration.....	Q
Abbildung 41: Links: Experimenteller Aufbau der Drucksensor-Kalibration; Rechts: Verkabelung in Nahansicht.....	R
Abbildung 42: Schaubild der Drucksensor-Kalibrationsfunktion.....	T
Abbildung 43: Anbindung des Drucksensors an Prototyp 1	W
Abbildung 44: Abdichten der Thermoelement-Litze mit Heißkleber.....	W
Abbildung 45: Fertiggestellter Prototyp 1	X
Abbildung 46: Vergleich des theoretischen erwarteten Drucks mit dem gemessenen Druck bei Belastung mit Gewicht der Massen von 1-5 kg	Y
Abbildung 47: Vergleich des theoretischen erwarteten Drucks mit dem gemessenen Druck bei Belastung mit einem Gewicht der Masse von 20 kg.....	Z
Abbildung 48: Vergleich des theoretischen erwarteten Drucks mit dem gemessenen Druck bei maximaler Muskelkraft.....	AA
Abbildung 49: 3D-Ansicht des ersten Entwurfs des Sockels.....	CC
Abbildung 50: Erneutes Abdichten der Fuge zwischen Sockel und Spritze.....	DD

Abbildung 51: CAD-Zeichnung des Prototyps 2, erstellt mit Open-Source-Programm FreeCAD.....	EE
Abbildung 52: Fertiggestellter Prototyp 3	HH
Abbildung 53: Konstruktionszeichnung, Erstellt durch Open-Source-Software FreeCAD	JJ
Abbildung 54: Vorbohren und Gewindeschneiden für das Ventilgewinde	KK
Abbildung 55: Vorbereiten der Kontaktflächen und Einkleben des Ventils	KK
Abbildung 56: Ausrichten und Verkleben des Thermosensors und der Schlauchtülle.....	LL
Abbildung 57: Vorbereiten des Bleches (hier mit vier statt drei Bohrungen)	LL
Abbildung 58: Verklebte Spritze	MM
Abbildung 59: Verfüllter Zwischenraum für mehr Stabilität.....	MM
Abbildung 60: Ausschnitt von laufender Messung (Luftentweichen).....	OO
Abbildung 61: Darstellung der Messergebnisse über die Zeit mit exponentieller Kurvenanpassung.....	PP
Abbildung 62: Sensor BMP280 mit verbundenen und beschrifteten Jumper-Kabeln....	AAA
Abbildung 63: BMP280 mit Schlagschutz.....	BBB
Abbildung 64: Vorpräparierte Spraydose mit Hilfsmitteln für den Umgang mit Epoxidharz	BBB
Abbildung 65: In Epoxidharz fixierter Spraydosenaufbau	CCC
Abbildung 66: Entmantelter, fertiger Versuchsaufbau	CCC
Abbildung 67: Verlauf des Druckes und der Temperatur bei Erwärmung der Spraydose	DDD
Abbildung 68: Öffentlich zugängliche Github-Seite von PhyPiDAQ.....	HHH
Abbildung 69: Startseite/Desktop des Raspberry Pi - Betriebssystems.....	III
Abbildung 70: Ansicht des Verzeichnisses "PhyPi"	JJ
Abbildung 71: Ansicht des Verzeichnisses "pi" mit dem Ordner "Python_Projektchen"	KKK
Abbildung 72: Ansicht der PhyPiDAQ-Startseite	LLL
Abbildung 73: Ansicht des Ordners "WorkDir_aller_Projekte" im Verzeichnis "Projekte"	MMM
Abbildung 74: Beispielhafte Verkabelung (Thermoelement mit MAX31855).....	MMM
Abbildung 75: Aktivieren der relevanten Schnittstellen über "Einstellungen → Raspberry Pi-Konfiguration"	NNN
Abbildung 76: Verkabelung des ADS1115 über I ² C. Quelle: Adafruit.....	NNN
Abbildung 77: Verkabelung des MAX31855 über SPI. Quelle: Adafruit.....	OOO

Abbildung 78: Verkabelung zweier DS18B20, welche über einen One-Wire-Bus ausgelesen werden	PPP
Abbildung 79: IDE des Programms "Thonny" mit einem lauffähigen Code zur Auslesung eines Thermoelements über ein MAX31855-Verstärkerboard.....	QQQ
Abbildung 80: Öffnen von PhyPiDAQ über die Desktop-Verknüpfung oder das Ausführen des Programms "phypi.py"	RRR
Abbildung 81: Auswahl der "Default"-Config über das Ordner-Symbol der Leiste "DAQ Config"	RRR
Abbildung 82: Auswahl des Pfades in „Work Dir“, worin die erstellten Projekte inklusive aller Messwerte und Grafiken gespeichert werden sollen	SSS
Abbildung 83: Ausschnitt aus der Default-Haupt-Config	TTT
Abbildung 84: Für die Temperaturmessung mit einem Thermoelement angepasste Haupt-Config	VVV
Abbildung 85: Device-Config des MAX31855, über welchen ein Thermoelement ausgelesen werden kann.....	WWW
Abbildung 86: In einem Texteditor geöffnete Haupt-Config	XXX
Abbildung 87: Anpassung der Haupt-Config durch Eingeben der Kalibrationswerte, Löschen/Aktivieren von Befehlen und Anpassen der Kommentare.....	YYY
Abbildung 88: In PhyPiDAQ geladene, soeben angepasste Haupt-Config.....	YYY
Abbildung 89: Ausschnitt einer beispielhaften Messung der Versorgungsspannung (blau) und der Kondensatorspannung (braun) beim An- und Ausschalten.....	ZZZ
Abbildung 90: Anbindung des ADS1115 an den Raspberry Pi (Quelle: Adafruit).....	BBBB
Abbildung 91: Anbindung des MAX31855 an den Raspberry Pi (Quelle: Adafruit)...	CCCC
Abbildung 92: Anbindung des MAX31865 an den Raspberry Pi (Quelle: Adafruit)...	CCCC
Abbildung 93: Links: Anbindung des DS18B20 an den Raspberry Pi (Quelle: tutorials-raspi), rechts: Verkabelung zweier DS18B20 an einem GPIO-Pin.....	DDDD
Abbildung 94: Anbindung des Drucksensors über den ADS1115 an den Raspberry Pi (Eigendarstellung).....	DDDD

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich ausgewählter Systeme zur Messwerterfassung und -verarbeitung.....	16
Tabelle 2: Anforderungen verschiedener Prozesse an den Versuchsaufbau.....	50
Tabelle 3: Vergleich ausgewählter Temperatursensoren	A
Tabelle 4: Ergebnisse der PT100 - Kalibration.....	F
Tabelle 5: Ergebnisse der MAX31855 (Adafruit) - Kalibration.....	H
Tabelle 6: Ergebnisse der MAX31855 (2) - Kalibration	I
Tabelle 7: Latenzen der Temperatursensoren bei Erwärmung	J
Tabelle 8: Latenzen der Temperatursensoren bei Abkühlung	K
Tabelle 9: Materialien für die Fertigung des Prototyps 2	FF
Tabelle 10: Materialien für Prototyp 3	II
Tabelle 11: Messwerte des Luftentweichens	NN
Tabelle 12: Legende der im Folgenden genutzten Begriffe.....	FFF
Tabelle 13: Benötigte Artikel für das grundlegende experimentelle Setup	GGG
Tabelle 14: Anschluss des Drucksensors und des ADS1115 an den Raspberry Pi	EEEE
