

# Digitales Messsystem mit aktiver Messbereichserweiterung zum Einsatz in physikalischen Praktika

(Digital measurement system with active range  
extension for physics laboratory courses)

Bachelorarbeit  
von

**Dominik Braig**

am Institut für Experimentelle Teilchenphysik

Referent: Prof. Dr. Günter Quast  
Korreferent: Dr. Hans Jürgen Simonis

Bearbeitungszeit: 01.08.2019 – 15.01.2020

ETP\_Bachelor\_2020-08





# Erklärung zur Selbstständigkeit

Ich versichere, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst habe und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, die wörtlich oder inhaltlich übernommenen Stellen als solche kenntlich gemacht und die Satzung des KIT zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis in der gültigen Fassung vom 27.11.2014 beachtet habe.

Karlsruhe, den 15.01.2020, \_\_\_\_\_  
Dominik Braig

Als Prüfungsexemplar genehmigt von

Karlsruhe, den 15.01.2020, \_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Günter Quast



# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Motivation	1
1.2. Konzeption	2
<b>2. Aufbau und Eigenschaften des Messkoffers</b>	<b>5</b>
<b>3. Grundlagen</b>	<b>7</b>
3.1. Signalweg	7
3.2. Bauteile	8
3.3. Operationsverstärker-Grundsaltungen	9
3.4. Schutzschaltung	11
3.5. Dämpfung von Störungen	13
<b>4. Charakterisierung der Baugruppen</b>	<b>15</b>
4.1. ADC im Vergleich mit PicoScope	15
4.2. ADC Kanäle	17
4.3. Pegelwandler	17
4.4. DC/DC-Wandler	17
4.5. Schutzschaltung	19
4.6. Digital-Analog-Konverter	19
4.7. Strom-/Spannungssensor	20
4.8. Elektrometer	20
<b>5. Beispielversuche mit dem Messkoffer</b>	<b>23</b>
5.1. Kraftmessung mit einer Wägezelle	23
5.2. Versuche zur Elektrostatik	24
5.3. Thermoeffekt	26
5.4. Hall-Effekt	26
5.5. Photoeffekt	27
<b>6. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>31</b>
<b>Anhang</b>	<b>33</b>
A. Inter-Integrated Circuit (I <sup>2</sup> C)	33
B. Open-Collector	33
C. Innenwiderstand des Elektrometers	34
D. Weitere Fotos des Messkoffers	35
E. Bauteilliste	36
F. Github	39
G. Anhang Messergebnisse Halleffekt	39
H. Schaltplan	42



# Abbildungsverzeichnis

2.1. <b>Draufsicht auf Platine</b> . . . . .	6
2.2. <b>Messkoffer mit Steckplatte, Raspberry Pi und Kleinteilen</b> . . . . .	6
3.1. <b>Signalverlauf</b> Das gemessene Signal wird mittels Verstärkung / Abschwächung auf einen geeigneten Wertebereich für die Analog-Digital-Wandlung skaliert. Bei der Pegelwandlung werden negative Spannungen auf positive abgebildet. Der Analog-Digitalwandler kann das an seinen Arbeitsbereich angepasste Signal verarbeiten. Am Computer kann die Messung ausgewertet werden. . . . .	8
3.2. <b>Messaufbau, Steckplatte und Computer</b> Das Signal verläuft vom Messaufbau (links) über die Steckplatte (Mitte) zum Computer (rechts). Die analogen Komponenten befinden sich auf der linken Seite der Steckplatte, die digitalen auf der rechten. Das Breadboard unten links dient für weitere individuelle Schaltungen. [2], [3] . . . . .	8
3.3. <b>Spannungsfolger</b> Der invertierende Eingang des OPV wird mit dem Ausgang verbunden. Die Ausgangsspannung $U_a$ ist gleich der Eingangsspannung $U_e$ . Der Innenwiderstand wird verändert. [14] . . . . .	10
3.4. <b>Pegelwandler</b> Durch zwei $1\text{ M}\Omega$ -Widerstände als Spannungsteiler am Eingang des Spannungsfolger können negative Eingangsspannungen auf einen positiven Wertebereich abgebildet werden. [14] (bearbeitet) . . . . .	10
3.5. <b>Referenzspannung</b> Mit dem Potentiometer (links) kann die Eingangsspannung verändert werden, welche durch den Spannungsfolger am niederohmigen Ausgang (rechts) abgegriffen werden kann. [erstellt mit KiCAD] . . . . .	11
3.6. <b>Differenzverstärker</b> Die Differenz der beiden Eingänge $U_{e+} - U_{e-}$ wird verstärkt und als Ausgangsspannung $U_a$ ausgegeben. Die Verstärkung wird durch die Widerstände $R_1$ und $R_2$ festgelegt und durch die Betriebsspannung und die Sättigung des OPVs begrenzt.[15] (bearbeitet) . . . . .	11
3.7. <b>Instrumentenverstärker</b> Beispielschaltung mit drei Operationsverstärkern. Der Instrumentenverstärker stellt eine Verbesserung des Differenzverstärkers dar. [16] . . . . .	12
3.8. <b>Schutzschaltung</b> Der Ausgang wird vor zu hoher beziehungsweise zu niedriger Eingangsspannung geschützt. Die jeweilige Diode $D_1$ , beziehungsweise $D_2$ leitet in diesem Fall den Strom über den Vorwiderstand $R$ nach $U_{DD}$ beziehungsweise Masse ab. Ist die Spannung weder zu hoch, noch zu gering, so befinden sich beide Dioden in Sperrrichtung. [17] (bearbeitet) . . . . .	12
4.1. <b>Validierung des ADC mithilfe eines PicoScopes</b> Die Spannungswerte des Eingangs A0 vom ADC stimmen im Bereich von 0 V bis 5 V gut mit denen des PicoScopes überein. . . . .	16
4.2. <b>Überprüfung der vier Eingänge des ADC auf Abweichungen untereinander</b> Alle vier Eingänge des ADC weichen zum berechneten Mittelwert vernachlässigbar stark ab. . . . .	16
4.3. <b>Validierung des Pegelwandlers</b> Die gemessene Ausgangsspannung weicht von der theoretisch erwarteten geringfügig ab. Es ist ein systematischer Fehler zu erkennen, der aber noch im akzeptierten Bereich liegt. . . . .	18

4.4. <b>Test des DC/DC-Wandlers auf Störungen (vorher)</b> Mit dem Einschalten des DC/DC-Wandlers sind Störungen auf der Eingangsspannung zu erkennen.	18
4.5. <b>Test des DC/DC-Wandlers auf Störungen (nachher)</b> Durch den Einbau von Kondensatoren zwischen der Betriebsspannung und der Masse konnten die Peaks geglättet und die Störungen reduziert werden.	18
4.6. <b>Schutzschaltung</b> Durch Einsatz einer Schutzschaltung werden die Eingangsspannungen am ADC nahezu nicht verändert.	19
4.7. <b>DAC</b> Die mit dem ADC gemessene Ausgangsspannung des DAC weicht von der erwarteten Spannung im Promille-Bereich ab.	20
4.8. <b>Strom-/Spannungssensor</b> Der Strom-/Spannungssensor misst die mit dem DAC angelegte Spannung mit hinreichender Genauigkeit.	21
4.9. <b>Elektrometer als Spannungsfolger</b> Das Elektrometer als Spannungsfolger gibt bis zu einer Spannung von $U_{\text{Sat}} \approx 3,1 \text{ V}$ die Ausgangsspannung hinreichend genau in Abhängigkeit seiner Eingangsspannung aus. Oberhalb dieser Spannung ist der OPV in der Sättigung.	21
5.1. <b>Kraftmessung</b> Die Spannung der Wägezelle steigt mit zunehmender Kraft an. Die Offset-Spannung, welche ohne ein angehängtes Massestück anliegt, wird von den restlichen Spannungswerten abgezogen. Die gemessenen Werte sind mit einer Ursprungsgeraden kompatibel.	24
5.2. <b>Influenz</b> Zeitlicher Verlauf der Spannung am Kondensator bei mehrmaliger Veränderung des Abstandes zum geladenen Stab. Der beobachtete Offset von circa $-0,2 \text{ V}$ kann an der Abweichung des Pegelwandlers liegen (Kap. 4.3).	25
5.3. <b>Ladungslöffel</b> Zeitlicher Verlauf der Spannung am Kondensator bei Annäherung und Berührung mit einer geladenen Kugel. Bei ca. $66 \text{ s}$ wird der Kondensator geerdet, sodass die Spannung $0 \text{ V}$ beträgt. Bei Annäherung der geladenen Kugel steigt der Betrag der Spannung am Kondensator durch Influenz an. Bei Berührung der Kugel an der Kondensatorplatte ( $t \approx 67,9 \text{ s}$ ) erreicht die Spannung einen konstanten Wert.	25
5.4. <b>Thermoeffekt mit einem Peltier-Element</b> Zu Beginn wird eine Seite mit der Hand ( $T_{\text{Hand}} \approx 35^\circ \text{C}$ ) erwärmt, während die andere Seite auf einer kalten Tischplatte ( $T_{\text{Tisch}} \approx 19^\circ \text{C}$ ) aufliegt. Anschließend wird das Peltier-Element gedreht. Die y-Achse zeigt die um den Faktor 12 verstärkte Thermospannung an.	26
5.5. <b>Halleffekt, zeitlicher Signalverlauf</b> zeitlicher Verlauf des Spulenstroms und des daraus berechneten Magnetfelds, sowie der gemessenen Hallspannung	27
5.6. <b>Halleffekt, Spulenstrom über Hallspannung</b>	28
5.7. <b>Photoeffekt</b> Aufladung eines Kondensators an einer Vakuum-Photozelle für verschiedene Wellenlängen des einfallenden Lichts	29
5.8. <b>Photoeffekt</b> Gegenspannung gegen Frequenz des Lichts aufgetragen mit linearer Regression. Die Steigung entspricht dem Verhältnis $h/e$ .	29
B.1. <b>Open-Collector Schaltung</b> (eigenes Werk)	34
C.2. <b>Elektrometer-Operationsverstärker mit abstehenden Füßchen des nicht invertierenden Eingangs</b>	34
D.3. <b>Halterung links</b>	35
D.4. <b>Koffer ohne Platine und Steckplatte</b>	35

D.5. Verkabelung zwischen Platine und Steckplatte	Die zusammengehö-	
	rigen Leitungen sind gebündelt und in unterschiedlichen Farben gewählt,	
	sodass schnell erkannt werden kann, welches Kabel welche Anschlüsse ver-	
	bindet.	35
D.6. Platine Rückseite		35
D.7. Herausgeführte USB-Anschlüsse und HDMI-Ausgang		35
D.8. Messkoffer		35
G.9. Halleffekt, Rohdaten		40
G.10. Halleffekt, Mittelung benachbarter Messwerte		40
G.11. Halleffekt, Mittelung benachbarter Messwerte und Entfernen der		
Ausreißer		40





# 1. Einleitung

Ziel dieser Arbeit ist der Entwurf und die Validierung eines Prototyps für ein Messsystem, mit dem es möglich ist, elektrische Ströme und Spannungen zu messen und digital auszuwerten. Ziel des Messerfassungssystems ist es, durch den Einsatz von einfachen bereits bekannten Schaltungen Studierenden beim Umgang mit diesem System Transparenz und ein besseres Verständnis digitaler Messtechnik zu vermitteln. Eingesetzt werden soll der Messkoffer im Anfängerpraktikum der Fakultät für Physik des KIT. Dafür wird neben der Transparenz auch eine ausreichend hohe Messgenauigkeit im Prozentbereich angestrebt.

Nachfolgend wird der Inhalt und die Bedeutung der Thematik dieser Arbeit beschrieben. Danach werden die Eigenschaften des entworfenen Messkoffers vorgestellt. Anschließend werden die für das Verständnis der Arbeit notwendigen Grundlagen und Funktionen einzelner Komponenten erklärt, gefolgt von zwei Kapiteln mit Messungen. Hier werden zunächst die verbauten Komponenten validiert und anschließend verschiedene physikalische Effekte mit diesem Messsystem untersucht. Nach einer Zusammenfassung werden im Anhang weitere Erklärungen, Zeichnungen, Diagramme, eine Bauteilliste und ein Link von GitHub aufgeführt, unter welchem sämtliche Dateien zu diesem Projekt veröffentlicht werden.

## 1.1. Motivation

In der Physik geht es um die Beschreibung von Naturphänomenen. Es werden Theorien aufgestellt, welche anschließend im Experiment durch geeignete Messungen bestätigt werden. Oder es werden Messungen gemacht, die mit den bisherigen Theorien nicht kompatibel sind und daher einer neuen Erklärung bedürfen. In vielen Bereichen der Physik kommen Messungen somit eine große Bedeutung zu.

In der Elektrodynamik werden meist mithilfe eines Oszilloskops elektrische Spannungen gemessen. Herkömmliche Oszilloskope zielen darauf ab, Signale möglichst genau und einfach zu messen. Die dafür notwendigen eingebauten Funktionen vergrößern den Schaltungsaufbau jedoch derart, dass dieser komplex und intransparent wird. Einem Fachmann erschließt sich dieser zwar, doch Schülern und Studenten bleibt die Schaltung meist unverständlich. Da ein angehender Physiker fast täglich mit Messwerten zu tun hat, sollte er auch über die grundlegenden Kenntnisse verfügen, wie diese Messwerte aufgenommen wurden.

Um ein Verständnis für die Messungen zu bekommen wurde dieses Messerfassungssystem entwickelt. Es soll in geeigneten Praktikumsversuchen eingesetzt werden, um neben dem Gewinnen von Messdaten auch Grundlagen digitaler Messtechnik zu vermitteln, sodass der Benutzer lernt, wie und warum ein Signal angepasst werden muss, um es später am Computer auszuwerten.

Eine grafische Anzeige der Messung erfolgt digital auf dem integrierten Linux-basierten Mini-Computer. Eine direkte Auswertung darauf ist ebenfalls möglich.

## 1.2. Konzeption

Die didaktischen und praktischen Ziele werden hier in vier Punkten zusammengefasst. Wie diese umgesetzt werden können soll nun thematisiert werden.

### Transparenz

Um die verbauten Schaltungen auf der Platine zu verstehen, sollen diese so einfach wie möglich gehalten werden. Das bedeutet, dass für die einzelnen Komponenten vor allem Grundsaltungen zum Einsatz kommen werden, welche auf das Nötigste reduziert sind. Da solche Schaltungen jedoch störanfällig sein können, ist zu prüfen, ob auf Kosten der Einfachheit Schaltungen erweitert werden müssen, um solche Störungen zu vermeiden (Kap. 3.5, 4 und Anhang A).

Um die Schaltungen besser zu verstehen, wird eine Steckplatte oberhalb der Platine vorgesehen, auf welche nur die notwendigen Anschlüsse herausgeführt werden. Das hat den Vorteil, dass nur die Anschlüsse zu sehen sind, welche für den Benutzer auch relevant sind. Bauteile und Chips werden nicht auf der Steckplatte sichtbar sein, da sich Schülern und Studierenden die Funktionsweise einer Schaltung mithilfe eines Schaltplans leichter erschließt, als bei einem direkten Blick auf den Chip. Des Weiteren sind diese mit Schaltplänen vertraut, während Bauteilbezeichnungen oft unbekannt sind. Aus diesem Grund sollen auf dem eingesparten Platz zwischen den Anschlüssen die entsprechenden Schaltungen abgebildet werden, sodass ein leichtes Verständnis der inneren Verkabelung gegeben ist. Damit die Transparenz des Innenlebens dadurch jedoch nicht beeinträchtigt wird, soll die Steckplatte durch einen Klick-Mechanismus befestigt werden, mit welchem diese schnell entfernt und die Platine mit den Chips von Interessierten betrachtet werden kann.

Die verbauten Komponenten und der finale Schaltplan sind in den Anhängen E und H aufgeführt.

### Verständliche Anordnung der Komponenten

Aus didaktischen Gründen soll die Anordnung der Komponenten so gewählt werden, dass der Signalweg leicht verständlich ist. Um einfacher nachvollziehen zu können, welche Signale wo verarbeitet werden, wird dieser so gewählt, dass das Signal von links kommt, dann verarbeitet wird und nach rechts weiter geht. Sind mehrere Verarbeitungsschritte notwendig, dann wird die entsprechende Komponente zwischengeschaltet, sodass nach dem gleichen Prinzip der Signalweg von links nach rechts geht. Der Signalverlauf wird in Kapitel 3.1 genauer erläutert.

### Aktive Messbereichserweiterung

Damit das Messsystem universell einsetzbar ist, wird ein möglichst großer Messbereich angestrebt. Da die Schnittstelle zwischen analogem Signal und dem eingebauten Computer, der Analog-Digital-Wandler (ADC, engl. analog digital converter), jedoch einen eher kleinen Arbeitsbereich hat, muss dieser aktiv erweitert werden. Das bedeutet, dass mittels aktiver Bauteile, hier Operationsverstärkern (im Folgenden als „OPV“ abgekürzt), ein Signal so angepasst und verstärkt wird, dass es mit dem ADC ausgelesen werden kann. Somit können Spannungen im  $\mu\text{V}$ -Bereich, kleine Ströme von hochohmigen Quellen und Pegelanpassungen untersucht werden, was mit einem einfachen ADC nicht möglich ist. Diese Messbereichserweiterung wird mit bekannten Operationsverstärker-Grundsaltungen durchgeführt, welche im zweiten und dritten Semester am KIT behandelt werden. Im nächsten Kapitel werden die hier verbauten Grundsaltungen kurz erläutert.

**Stabilität und einfache Wartung**

Das digitale Messwerterfassungssystem soll in größeren Stückzahlen im Anfängerpraktikum und in Schulen Anwendung finden. Dafür ist es wichtig, dass es robust und wartungsarm ist. Aus diesem Grund werden empfindliche Bauteile steckbar konzipiert und nicht fest verlötet, wie es bei gängigen Messgeräten der Fall ist. Solche mit Steckbrücken versehenen Bauteile, auch Breakout-Boards genannt, haben den Vorteil, dass sie, falls sie defekt sind, durch Ausstecken entfernt und durch neue ersetzt werden können. Für diesen Prozess ist somit kein Löt Aufwand oder technisches Expertenwissen vonnöten.

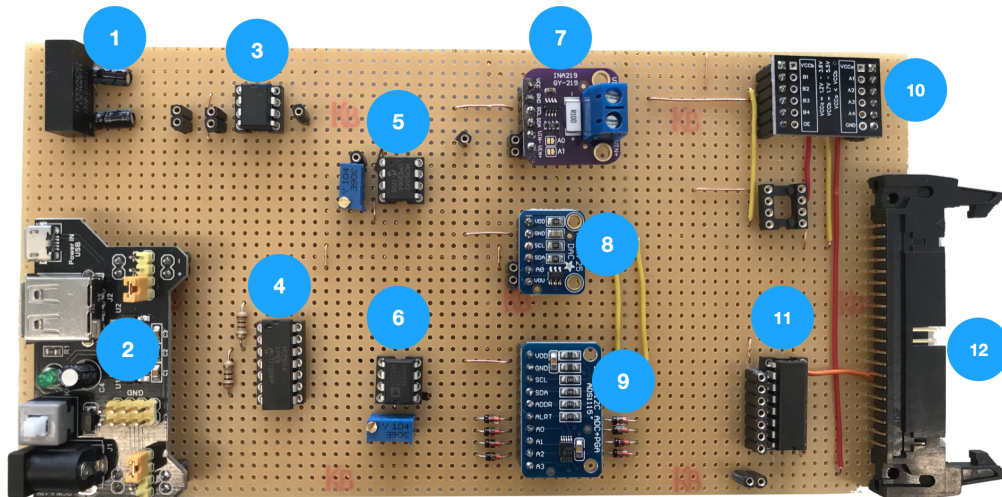
Des Weiteren sollen Schutzschaltungen verbaut werden, welche die Bauteile vor Überspannung schützen. Für mechanischen und elektrischen Schutz sind die Bauteile und der Mikrocomputer mit einer Abdeckung versehen. Das gesamte Messsystem ist in einem Koffer untergebracht, in welchem auch alle notwendigen Kleinteile geordnet verstaut werden können.



## 2. Aufbau und Eigenschaften des Messkoffers

Die Elektronik des Prototyps befindet sich auf einer 200 mm x 100 mm großen Punkt-Streifenrasterplatine, auf welcher fest verlötete Bauteile, sowie Fassungen für Breakout Boards angebracht sind. Die Platine ist in Abbildung [2.1](#) zu sehen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden die für den Nutzer wichtigen Anschlüsse auf eine 3D-gedruckte Steckplatte (Abb. [3.2](#)) herausgeführt, auf welcher die Anschlüsse - zur besseren Handhabung mit größeren 2 mm Buchsen bestückt - zugänglich sind. Auf der Steckplatte sind die Anschlussbuchsen mit den jeweiligen Schaltbildern abgebildet, wobei die in Kapitel [1](#) erwähnte Anordnung umgesetzt wurde. Entsprechend befinden sich die analogen Komponenten auf der linken, die digitalen auf der rechten Seite. Damit das Messsystem kompakt ist, wurde die Steckplatte über der Platine in einer ebenfalls 3D-gedruckten Halterung befestigt, welche leicht geöffnet werden kann. Für einen mobilen Einsatz wurde die Platine mit der Steckplatte und dem Einplatinencomputer, hier ein Raspberry Pi, in einem Organizer-Koffer untergebracht, welcher zugleich als mechanischer Schutz dient. Die für gängige Messungen notwendigen Kleinteile, wie Verbindungskabel für die Steckplatte, Adapter für die Anschlüsse der Steckplatte auf das kleinere 1/10“-Universalsteckbrett (Breadboard) sowie gängige Widerstände und Kondensatoren befinden sich ebenfalls im Koffer. Das Netzteil und die kabellose Tastatur mit integriertem Touchpad zur Steuerung des Raspberry Pi kann ebenfalls im Koffer verstaut werden. Für die Bildübertragung kann ein externer Monitor über den herausgeführten HDMI-Anschluss angeschlossen werden oder es wird eine Bildschirmübertragung auf ein Notebook beispielsweise über den Dienst VNC [\[1\]](#) hergestellt. Ebenfalls sind drei USB-Anschlüsse zur besseren Zugänglichkeit herausgeführt (Anhang [D](#)). Die Dokumentation beziehungsweise Anleitung kann im Deckel angebracht werden. Der Messkoffer ist in Abbildung [2.2](#) zu sehen.

Für einen breiten Anwendungsbereich wurde eine aktive Messerweiterung vorgenommen. Diese beinhaltet bereits die Komponenten Elektrometer, Pegelwandler und Instrumentenverstärker (Kap. [3](#)). Falls für eine Messung weitere Anpassungen notwendig sind, so können diese auf dem universellen Steckbrett, auch Breadboard genannt, getätigt werden. Weiter wurden zwei I<sup>2</sup>C Schnittstellen (Anhang [A](#)) für Sensoren vorgesehen. Damit ist es möglich, beliebige Sensoren, welche mit I<sup>2</sup>C kommunizieren, mit dem Raspberry Pi auszulesen. Weiter sind auf der Steckplatte zwei beliebig programmierbare Status-LEDs, zwei digitale Eingänge und drei digitale Ausgänge angebracht, mit welchen weitere Sensoren und Aktoren eingebunden werden können. Die Funktionen dieser Komponenten werden in Kapitel [3](#) erklärt.



- |                       |                            |  |
|-----------------------|----------------------------|--|
| 1 DC/DC-Wandler       | 5 Referenzspannung         | 9 Analog-Digital-Konverter                     |
| 2 Spannungsversorgung | 6 Instrumentenverstärker   | 10 I <sup>2</sup> C-Pegelwandler (Anhang A)    |
| 3 Elektrometer        | 7 Strom-/Spannungssensor   | 11 Digitale Open-Collector Ausgänge (Anhang B) |
| 4 Pegelwandler        | 8 Digital-Analog-Konverter | 12 Anbindung an Raspberry Pi                   |

Abbildung 2.1.: Draufsicht auf Platine

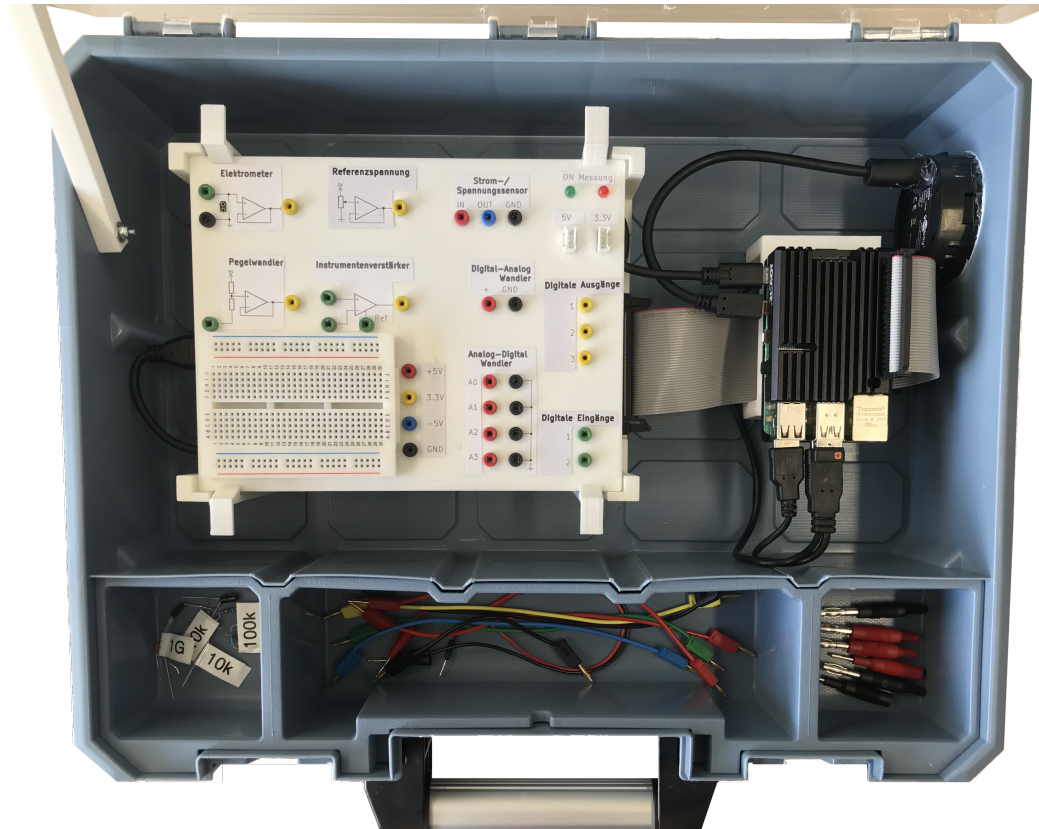


Abbildung 2.2.: Messkoffer mit Steckplatte, Raspberry Pi und Kleinteilen

## 3. Grundlagen

Im nachfolgenden Kapitel werden zum Verständnis dieser Arbeit die notwendigen Grundlagen erklärt. Zunächst wird der Signalweg erläutert, welcher Ausgangspunkt der didaktisch motivierten Anordnung der Bauteile ist. Danach wird auf die Funktionen der verbauten Komponenten eingegangen, welche in Kapitel [2](#) bereits erwähnt wurden. Auf diese folgen wichtige Grundsaltungen.

### 3.1. Signalweg

Welche Schritte nötig sind, um ein Signal am Computer auszuwerten, soll nun aufgezeigt werden. Ein Schema des Signalverlaufs ist in Abbildung [3.1](#) zu sehen.

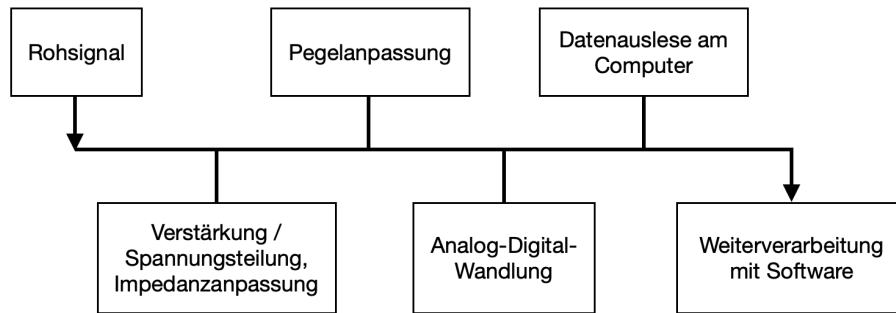
Grundsätzlich ist das Ziel, ein analoges Messsignal mithilfe eines Computers auszuwerten. Die Schnittstelle zwischen den analogen und digitalen Komponenten ist der ADC. Dieser hat die Funktion einem analogen Signal - einer Spannung - innerhalb seines Messbereichs mit einer bestimmten Genauigkeit einen digitalen Wert zuzuordnen. In der Regel besitzt das Messsignal jedoch noch nicht die Eigenschaften, die der Analog-Digital-Wandler fordert: Die Eingangsspannung kann zu groß oder klein beziehungsweise negativ sein und der Eingangswiderstand (= Eingangsimpedanz) kann zu klein sein, sodass der ADC das Signal verfälscht. Es bedarf daher einigen Anpassungen, damit das Signal im Messbereich des ADC liegt.

Warum aufgrund des Innenwiderstands die Messung verfälscht werden kann, wird nun kurz erklärt.

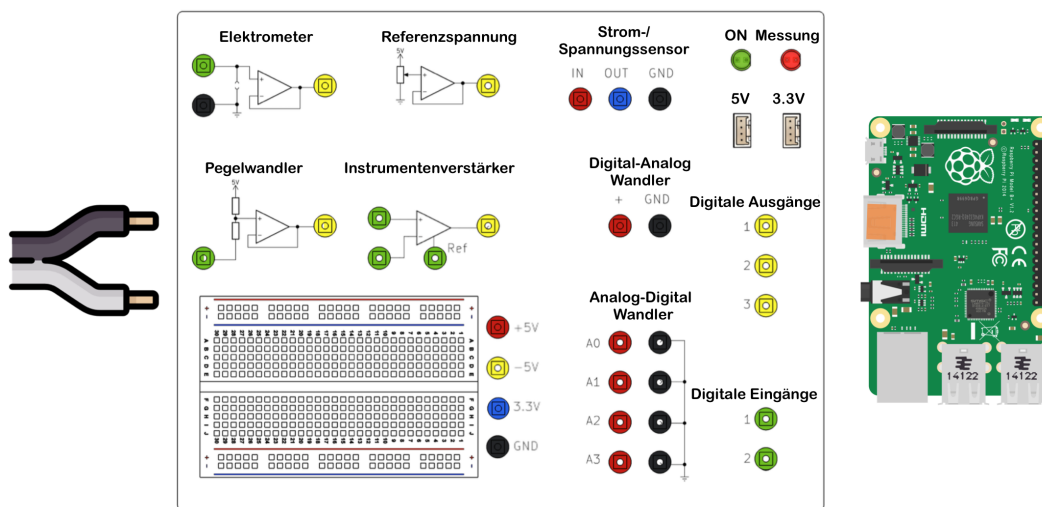
Die Spannung einer realen Spannungsquelle nimmt aufgrund des nichtverschwindenden Innenwiderstands der Quelle mit zunehmendem Stromfluss ab. Deshalb sollte bei einer Spannungsmessung der Stromfluss so klein wie möglich gehalten werden, was durch einen großen Innenwiderstand des Messgeräts ermöglicht wird. Im idealen Fall hat das Messgerät einen unendlich großen Innenwiderstand, um den Stromfluss dort wo die Spannung abgegriffen wird nicht zu verändern und um somit die Spannung richtig zu messen. Herkömmliche Messgeräte haben einen Innenwiderstand im  $k\Omega$ - beziehungsweise  $M\Omega$ -Bereich und können daher nur in bestimmten Bereichen eingesetzt werden. Durch Vorschalten eines OPVs als Spannungsfolger zwischen Spannungsquelle und Messgerät kann der Innenwiderstand vergrößert werden und die Spannung behält mit der Messung ihren Wert nahezu bei. In diesem Messsystem ist ein Spannungsfolger mit einem Eingangswiderstand im  $T\Omega$ -Bereich verbaut (Elektrometer). Damit lassen sich unter anderem diverse Elektrostatik-Versuche demonstrieren (Kap. [5.2](#)).

Im nächsten Schritt wird untersucht, ob die Spannung im richtigen Wertebereich des ADC liegt oder ob sie verstärkt oder mit Spannungsteilern verringert werden muss. Negative Spannungen können beispielsweise mit einem Pegelwandler (Kap. [3.3](#)) in positive umgewandelt werden. Dieser bildet in der in diesem Messkoffer verbauten Schaltung Spannungen von  $-5\text{ V}$  bis  $5\text{ V}$  linear auf einen Bereich von  $0\text{ V}$  bis  $5\text{ V}$  ab.





**Abbildung 3.1.: Signalverlauf** Das gemessene Signal wird mittels Verstärkung / Abschwächung auf einen geeigneten Wertebereich für die Analog-Digital-Wandlung skaliert. Bei der Pegelwandlung werden negative Spannungen auf positive abgebildet. Der Analog-Digitalwandler kann das an seinen Arbeitsbereich angepasste Signal verarbeiten. Am Computer kann die Messung ausgewertet werden.



**Abbildung 3.2.: Messaufbau, Steckplatte und Computer** Das Signal verläuft vom Messaufbau (links) über die Steckplatte (Mitte) zum Computer (rechts). Die analogen Komponenten befinden sich auf der linken Seite der Steckplatte, die digitalen auf der rechten. Das Breadboard unten links dient für weitere individuelle Schaltungen. [2], [3]

Nach den notwendigen Impedanz- und Spannungsanpassungen kann das analoge Signal im ADC in ein digitales Signal umgewandelt werden. Damit können dann die Messdaten am Computer dargestellt, gespeichert und ausgewertet werden. Die Reihenfolge dieser Schritte spiegelt sich aus didaktischen Gründen in der Anordnung der Komponenten auf dem Steckbrett wider (Abb. [3.2]). So sind die analogen Bauteile, wie das Elektrometer oder der Pegelwandler, ganz links angebracht, nahe am Eingangssignal. Digitale Bauteile wie der ADC sind weiter rechts angeordnet, ganz rechts befindet sich der Computer.

### 3.2. Bauteile

Mit den nachfolgenden Bauelementen lassen sich Schaltungen zur Anpassung des Eingangssignals bauen. Die Funktionen der einzelnen Komponenten werden nun kurz erklärt. Detailliertere Informationen können aus der Fachliteratur [4] und den jeweiligen Datenblättern [5-12] entnommen werden, wovon auch die Informationen dieses Kapitels stammen.

#### Operationsverstärker

Ein Operationsverstärker ist ein elektrisches Bauelement mit einer großen Spannungsverstärkung. Die Eingangsseite besitzt die zwei Eingänge  $U_{inv}$  und  $U_{n. inv.}$ . Die zwischen



den Eingängen anliegende Spannungsdifferenz  $U_D = U_{n. inv} - U_{inv.}$  wird verstärkt. Der invertierende Eingang wird  $U_{inv}$  genannt, weil die hier anliegende Spannung bei der Differenzspannung  $U_D$  abgezogen wird. Die Ausgangsspannung  $U_A$  setzt sich aus dieser Differenz  $U_D$  und dem Verstärkungsfaktor  $A$  zusammen:  $U_A = U_D \cdot A$ . Dieser befindet sich in der Größenordnung  $10^6$ . Da der Verstärker nur Ausgangsspannungen bis zu seiner Versorgungsspannung ausgeben kann, wird in der Grundsaltung die Ausgangsspannung bereits bei Spannungen von  $U_D$  im  $\mu V$ -Bereich durch die Versorgungsspannung des Operationsverstärkers begrenzt. Wichtige Grundsaltungen mit OPVs sind in [3.3] erklärt.

### Analog-Digital-Wandler

Der Analog-Digital-Wandler ist eine zentrale Komponente dieses Messsystems. Er wandelt analoge Signale in einen digitalen Datenstrom um, sodass dieser am Computer weiterverarbeitet werden können. Dabei muss das Eingangssignal in einem bestimmten Spannungsbereich liegen - hier 0 V bis 5 V. Der verbaute ADC ADS1115 wurde ausgewählt, da er mit vier Eingängen und einer Auflösung von 16 Bit recht günstig zu erwerben ist. Die Anzahl der Eingänge macht es möglich, mehrere Spannungen gleichzeitig zu messen.

### Digital-Analog-Konverter

Dieses Bauteil, im Folgenden als „DAC“ abgekürzt, ist die inverse Komponente des ADC: ein digitaler Datenstrom wird in ein analoges Signal umgewandelt. Die maximale Ausgangsspannung und der Ausgangsstrom sind ebenso wie die Genauigkeit bauteilabhängig. Wichtig ist diese Komponente, wenn ein digitales Signal eine analoge Ausgabe auslösen soll, wie beispielsweise einen Motor zeitgleich zu einer Messung anzusteuern.

### Strom-/Spannungssensor

Dieser Sensor kann benutzt werden, um Ströme zu ermitteln. Effektiv entspricht dieses Bauteil einem ADC, welcher den Spannungsabfall über einen geeichten  $0,1 \Omega$  Widerstand misst und in einen Strom umrechnet. Es ist auch möglich, eine Spannungsmessung mit diesem Sensor durchzuführen. Da der oben genannte ADC hierfür aber bessere Eigenschaften, wie beispielsweise eine höhere Genauigkeit oder mehr Eingänge hat, wird dieser für Spannungsmessungen vorgezogen.

### Raspberry Pi

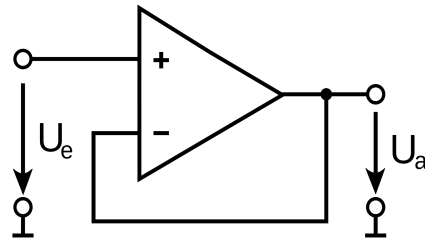
Als Computer wird hier ein Raspberry Pi verwendet. Dabei handelt es sich um einen kompakten Einplatinencomputer im Kreditkartenformat. Die verbaute Hardware ist mit vier Kernen, 1,5 GHz Prozessortaktung, 2 GB RAM und ihren weiteren Eigenschaften für diese Anwendungen absolut ausreichend.

## 3.3. Operationsverstärker-Grundsaltungen

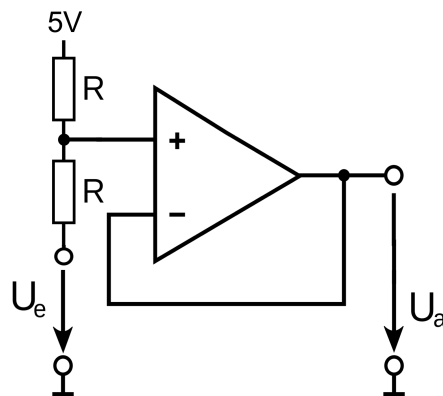
Im Folgenden werden die OPV-Grundsaltungen erklärt, die für das Verständnis dieser Arbeit wichtig sind.

### Spannungsfolger

Ein Operationsverstärker als Spannungsfolger verändert den Innenwiderstand, sodass die in Kapitel [3.1] genannten Probleme bei Messungen aufgrund des Innenwiderstands umgangen werden können. Beim idealen Spannungsfolger ist die Ausgangsspannung gleich der Eingangsspannung, der Eingangswiderstand unendlich und der Ausgangswiderstand null. Der Schaltplan für den Spannungsfolger ist in Abbildung [3.3] zu sehen. Der invertierende Eingang und der Ausgang des OPV sind miteinander verbunden, was dazu führt, dass die Spannung, die am nicht-invertierenden Eingang anliegt, auch am Ausgang anliegt. Die Berechnung ist mit der Maschen- und Knotenregel möglich ([4, S. 68]). Die maximale Ausgangsspannung wird durch die Sättigung des OPV begrenzt. Diese Eigenschaft wird in Kapitel [4.3] und [4.8] näher untersucht.



**Abbildung 3.3.: Spannungsfolger** Der invertierende Eingang des OPV wird mit dem Ausgang verbunden. Die Ausgangsspannung  $U_a$  ist gleich der Eingangsspannung  $U_e$ . Der Innenwiderstand wird verändert. [14]



**Abbildung 3.4.: Pegelwandler** Durch zwei  $1\text{ M}\Omega$ -Widerstände als Spannungsteiler am Eingang des Spannungsfolgers können negative Eingangsspannungen auf einen positiven Wertebereich abgebildet werden. [14] (bearbeitet)

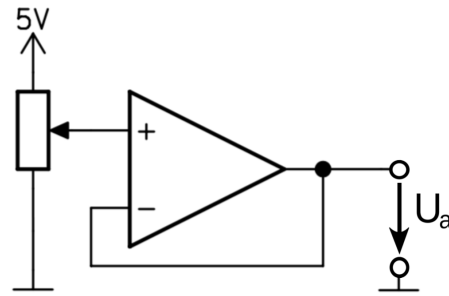
Nicht nur für Spannungsmessungen, sondern auch für die Ansteuerung von niederohmigen Aktoren wie beispielsweise Motoren kann die Schaltung zwischengeschaltet werden. Ein Vorteil davon ist, dass der Strom vom OPV kommt und nicht von der hochohmigen Quelle. Dadurch sinkt die Spannung der Quelle nicht mit zunehmendem Stromfluss, sondern stellt konstant die geforderte Spannung bereit [13, S. 695].

### Pegelwandler

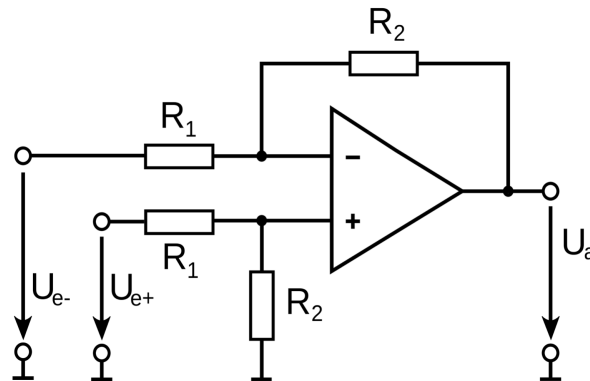
Die Schaltung als Spannungsfolger ist mit einer Abwandlung auch als Pegelwandler verbaut, welcher negative Spannungen auf positive abbildet (Abb. 3.4). Hierbei werden an den Eingang zwei  $1\text{ M}\Omega$ -Widerstände als Spannungsteiler angeschlossen, wobei einer davon mit  $+5\text{ V}$  verbunden wurde und der andere einen offenen Anschluss besitzt. An diesen kann eine Spannung zwischen  $-5\text{ V}$  und  $5\text{ V}$  angeschlossen werden. Dadurch, dass der nicht-invertierende Eingang die Spannung zwischen  $5\text{ V}$  und dem Signal abgreift und der Spannungsfolger die Verstärkung 1 hat, beträgt die Ausgangsspannung  $U_A = \frac{U_E + 5\text{ V}}{2}$ , wobei  $U_E$  die Spannung des Signals gegen Masse ist.

### Referenzspannung

Weiter wurde ein Spannungsfolger mit einem Potentiometer am Eingang verbaut, der wieder als Spannungsteiler dient und mit der Betriebsspannung und der Masse verbunden ist (Abb. 3.5). Somit können Spannungen zwischen  $0\text{ V}$  und  $5\text{ V}$  am nicht-invertierenden Eingang eingestellt und durch den Spannungsfolger die Ausgangsspannung abgegriffen werden.



**Abbildung 3.5.: Referenzspannung** Mit dem Potentiometer (links) kann die Eingangsspannung verändert werden, welche durch den Spannungsfolger am niederohmigen Ausgang (rechts) abgegriffen werden kann. [erstellt mit KiCAD]



**Abbildung 3.6.: Differenzverstärker** Die Differenz der beiden Eingänge  $U_{e+} - U_{e-}$  wird verstärkt und als Ausgangsspannung  $U_a$  ausgegeben. Die Verstärkung wird durch die Widerstände  $R_1$  und  $R_2$  festgelegt und durch die Betriebsspannung und die Sättigung des OPVs begrenzt. [15] (bearbeitet)

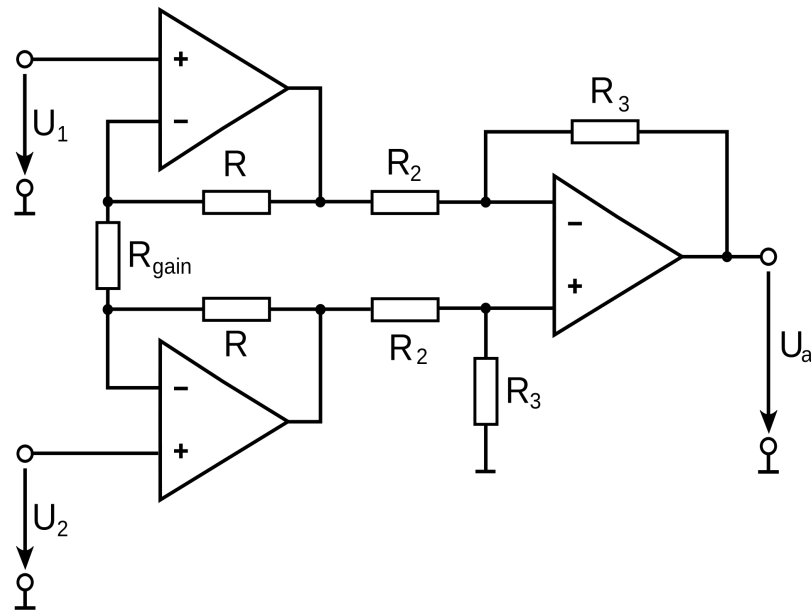
Damit die Ausgangsspannung belastbar ist, wird wieder der Spannungsfolger eingesetzt. Diese Schaltung stellt somit eine veränderliche belastbare Spannungsquelle mit geringem Ausgangswiderstand und einem Wertebereich von 0 V bis 5 V dar.

### Differenzverstärker

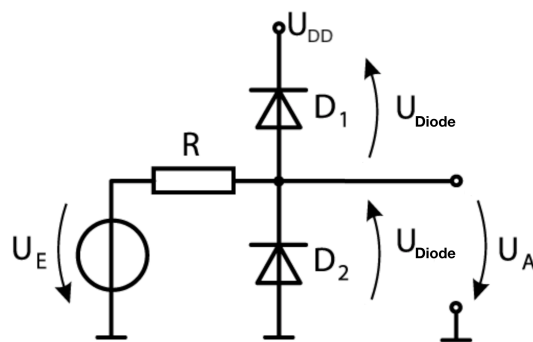
Ein OPV mit der Beschaltung aus Abbildung [3.6] wird Differenzverstärker genannt. Am Ausgang kann die um einen Verstärkungsfaktor  $A$  verstärkte Eingangsspannung abgegriffen werden. Der Verstärkungsfaktor kann mit der Wahl der Widerstände  $R_1$  und  $R_2$  festgelegt werden:  $A = \frac{R_2}{R_1}$ . Eine Einschränkung dieser Schaltung ist jedoch die niedrige Eingangsimpedanz, Veränderungen des Verstärkungsfaktors durch Temperaturschwankungen und weitere Störeinflüsse, sodass meistens in der Praxis und auch hier Instrumentenverstärker (Abb. [3.7]) verwendet werden. Grundlage hierfür bildet ein Differenzverstärker mit je einem Spannungsfolger an beiden Eingängen. Verbaut wurde ein Instrumentenverstärker vom Typ AD623 mit einem Potentiometer zur Regulierung des Verstärkungsfaktors zwischen 2 und 1000.

### 3.4. Schutzschaltung

Um den Analog-Digital-Wandler vor Überspannung zu schützen, wird eine Schutzschaltung (Abb. [3.8]) aus zwei Dioden und einem Widerstand vorgeschaltet. Die Funktionsweise ist folgendermaßen: Wird eine Eingangsspannung  $U_E$  mit  $U_E > (U_{DD} + U_{Diode})$ , wobei  $U_{DD}$  die Betriebsspannung von 5 V und  $U_{Diode}$  der Spannungsabfall an der Diode ist, angeschlossen, so fließt der Strom über den Widerstand  $R$  durch die Diode  $D_1$ .



**Abbildung 3.7.: Instrumentenverstärker** Beispielschaltung mit drei Operationsverstärkern. Der Instrumentenverstärker stellt eine Verbesserung des Differenzverstärkers dar. [16]



**Abbildung 3.8.: Schutzschaltung** Der Ausgang wird vor zu hoher beziehungsweise zu niedriger Eingangsspannung geschützt. Die jeweilige Diode  $D_1$ , beziehungsweise  $D_2$  leitet in diesem Fall den Strom über den Vorwiderstand  $R$  nach  $U_{DD}$  beziehungsweise Masse ab. Ist die Spannung weder zu hoch, noch zu gering, so befinden sich beide Dioden in Sperrrichtung. [17] (bearbeitet)

Der Eingang des ADC, welcher an  $U_A$  anliegt, liegt somit an  $U_{DD} + U_{\text{Diode}}$  und nicht an der zu hohen Eingangsspannung. Die Diode  $D_2$  schützt den ADC auf analoge Weise vor negativer Überspannung. Die in dieser Arbeit verwendeten Dioden sind Silizium-Dioden mit einem Spannungsabfall  $U_{\text{Diode}} \approx 0,7 \text{ V}$ . Die Betriebsspannung des ADC liegt bei  $U_{DD} = 5 \text{ V}$ , sodass an den Eingängen maximal  $5,7 \text{ V}$  anliegen und der ADC keinen Schaden nimmt (Kap. 4.5).

### 3.5. Dämpfung von Störungen

Schwankungen auf der Betriebsspannung und elektromagnetische Störungen der Umgebung sind unvermeidbar. Elektrische Bauteile haben daher Toleranzen, in denen ein digitales Signal als HIGH oder LOW erkannt wird. Sind die Störungen jedoch zu groß, so kommt es zu Problemen und ein LOW-Pegel kann beispielsweise als HIGH-Pegel erkannt werden oder umgekehrt. Abhilfe kann hier eine Signalglättung mit einem parallel geschalteten Kondensator oder ein Hoch-/Tief- oder Bandpass schaffen.

Bei einer schwankenden Spannung kann ein Kondensator das Signal glätten. Spannungsspitzen können reduziert werden und es bleibt eine Restwelligkeit bestehen, die bei richtiger Dimensionierung im aktuellen HIGH- oder LOW-Pegel liegt.

In der Praxis ist es üblich, zwei Kondensatoren parallel zwischen der zu glättenden Leitung und Masse zu schalten, wobei einer davon vor allem die hochfrequenten Störungen glättet (Keramik-Kondensator) und der andere die weniger hochfrequenten (Elektrolyt-Kondensator). In dieser Arbeit wurde dies ebenfalls so umgesetzt. Der Einfluss dieser beiden Kondensatoren auf Störungen ist in Abbildung 4.4 und 4.5 zu sehen.



## 4. Charakterisierung der Baugruppen

Im Folgenden werden die verbauten Komponenten validiert und untersucht, in welchen Messbereichen diese benutzt werden können. Die einzelnen Messungen werden größtenteils nach dem gleichen Verfahren durchgeführt, welches nun kurz erläutert wird.

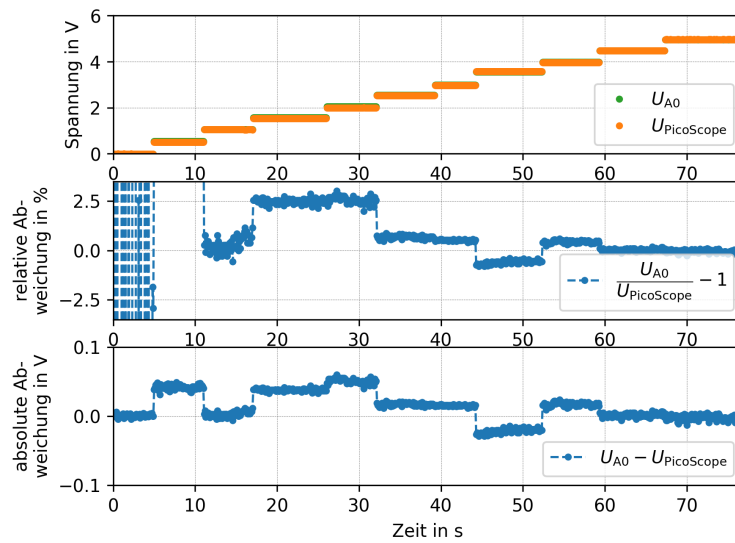
Für eine allgemeine Untersuchung, ob eine Komponente korrekt arbeitet, wird die Ausgangsspannung in Abhängigkeit zur Eingangsspannung gemessen. Für jedes Bauteil kann anhand der Eingangsspannung eine theoretische Ausgangsspannung berechnet werden, welche mit der tatsächlich gemessenen Ausgangsspannung verglichen wird. So wird beim Spannungsfolger beispielsweise erwartet, dass die Ausgangsspannung gleich der Eingangsspannung ist; beim Pegelwandler, dass die Ausgangsspannung  $U_A = \frac{U_{\text{ein}} + 5\text{V}}{2}$  ist. Die Eingangsspannung wird variiert, sodass herausgefunden werden kann, in welchem Arbeitsbereich der erwartete Zusammenhang gilt. Hierbei ist darauf zu achten, dass ein kontinuierliches Hochfahren der Eingangsspannung ungünstig ist, da das Messgerät, hier der ADC, die Spannungen nicht exakt gleichzeitig messen kann, sondern nacheinander (Sampling). Dadurch entsteht ein kleiner Zeitversatz, welcher bei sich zeitlich ändernden Spannungen die Messung verfälscht. Besser ist es, die Eingangsspannung in kleinen Stufen zu erhöhen und nach jeder Erhöhung kurz zu warten. Für die Auswertung wird dann jeweils der Bereich betrachtet, bei der die Eingangsspannung nicht erhöht wird. Für eine bessere Darstellung werden die Messwerte der Anstiege in die folgenden Plots nicht mitaufgenommen. Die Datennahme erfolgt hierbei mit der Software „PhyPiDAQ“ (Anhang [F](#)), mit welcher verschiedene Messmodi mit einem graphischen Interface ausgewählt und die entsprechenden Parameter angepasst werden können.

### 4.1. ADC im Vergleich mit PicoScope

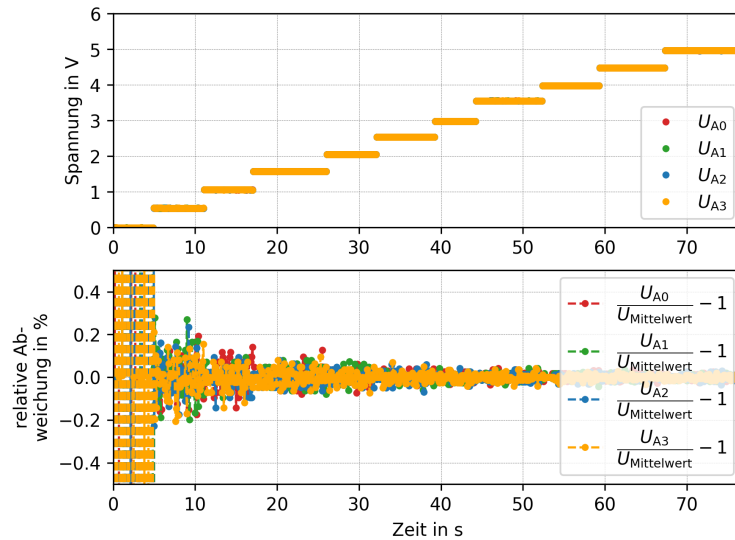
Als erstes soll der ADC validiert werden, da dieser für künftige Spannungsmessungen eingesetzt wird. Hierzu wird eine Spannung zum einen mit einem Kanal des ADC, zum anderen mit einem parallel geschalteten Referenzmessgerät, einem *PicoScope 2000-Series*, gemessen. Die anliegende Spannung ist somit gleich und die Messwerte lassen sich vergleichen.

Für eine korrekte Messung mit dem Analog-Digital-Konverter wird zunächst geprüft, ob er linear arbeitet und keinen Offset besitzt. Die Spannung wird mithilfe eines Potentiometers nach dem oben erklärten Verfahren von 0 V bis 5 V hochgefahren. Die Spannung liegt am Eingang A0 des ADC an.

Der Plot ist in Abbildung [4.1](#) zu sehen. Es lässt sich erkennen, dass sich die Spannungswerte des PicoScopes und des ADC recht genau entsprechen. Bei kleinen Spannungen ist die relative Abweichung größer als bei großen Spannungen. Das hat den Grund, dass bei der relativen Abweichung absolute Abweichungen bei kleinen Spannungen stärker ins Gewicht fallen als bei großen Spannungen. Aufgrund des kleinen Nenners divergiert somit der Bruch  $\frac{U_{\text{ADC}}}{U_{\text{PicoScope}}}$ . Die absolute Abweichung ist maximal 50 mV, was für diese Zwecke als ausreichend empfunden wird. Die relative Abweichung hat insgesamt eine Tendenz in die positive Richtung, was auf eine systematische Abweichung hinweist. Der Effekt ist im Promille-Bereich und damit so klein, dass dieser auch von einer Abweichung des PicoScopes stammen könnte und für die geforderten Zwecke vernachlässigt werden kann. Der Eingang A0 kann somit für künftige Messungen im Bereich von 0 V bis 5 V eingesetzt werden.



**Abbildung 4.1.: Validierung des ADC mithilfe eines PicoScopes** Die Spannungswerte des Eingangs A0 vom ADC stimmen im Bereich von 0 V bis 5 V gut mit denen des PicoScopes überein.



**Abbildung 4.2.: Überprüfung der vier Eingänge des ADC auf Abweichungen untereinander** Alle vier Eingänge des ADC weichen zum berechneten Mittelwert vernachlässigbar stark ab.



## 4.2. ADC Kanäle

Weiter wurde untersucht, ob auch die anderen Eingänge des ADC für eine Messung geeignet sind. Es wird wieder mithilfe eines Potentiometers eine Spannung zwischen 0 V bis 5 V eingestellt und im stationären Fall gemessen. Das Signal liegt an den vier Eingängen A0 - A3 des ADC an. Es wird die relative Abweichung der einzelnen Eingänge zum Mittelwert aus den vier Eingängen geplottet (Abb. 4.2). Bei einer Spannung unter  $U \approx 0,5$  V ist die relative Abweichung aus dem gleichen Grund wie bei Kapitel 4.1 groß, während die absolute Abweichung jedoch klein ist. Diese bestätigt in diesem Bereich die hinreichende Güte des Bauteils. Da sich dieser Effekt bei allen folgenden Messungen im Bereich kleiner Spannungen wiederholt, wird in den weiteren Messungen nicht weiter darauf eingegangen. Bei Spannungen über 0,5 V ist zu erkennen, dass Abweichungen untereinander im Promille-Bereich liegen, was für diese Anwendung absolut hinreichend ist. Es gibt im gesamten Arbeitsbereich von 0 V bis 5 V keine signifikanten Abweichungen. Die Anforderungen des Analog-Digital-Wandlers wurden somit erfolgreich validiert und so kann dieser für weitere Messungen verwendet werden.

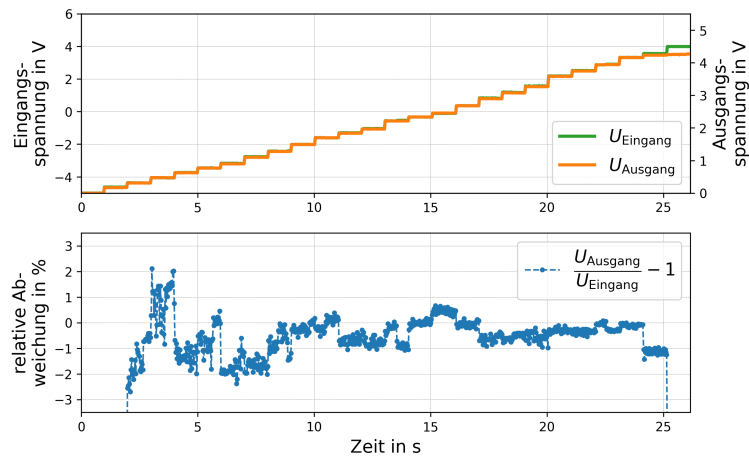
## 4.3. Pegelwandler

Da der ADC erfolgreich validiert wurde, kann dieser für die folgenden Untersuchungen als Referenzmessgerät verwendet werden. Damit wird zunächst der Pegelwandler geprüft. Der Testaufbau entspricht dem in Kapitel 4 Beschriebenen, wobei dieses Mal die Spannung zwischen  $-5$  V und  $5$  V eingestellt wird. Die Abbildung 4.3 zeigt im oberen Plot die Eingangsspannung sowie die Ausgangsspannung. Es wurden zwei y-Achsen verwendet, wobei die linke Skala für die Eingangsspannung und die rechte für die Ausgangsspannung gilt. Des Weiteren ist der Nullpunkt bei der Ausgangsspannung auf  $-5$  V bei der Eingangsspannung gelegt. Dadurch kann nun direkt gesehen werden, ob der Pegelwandler das Eingangssignal wie gefordert abbildet. Es ist zu erkennen, dass die Ausgangsspannung bis zu einer Eingangsspannung von  $U_E \approx 3,39$  V recht linear mit dieser ansteigt. Die Spannungswerte passen gut mit den Erwartungen überein. Bei  $U_E \approx 3,39$  V ist der Operationsverstärker gesättigt, was daran zu erkennen ist, dass die Ausgangsspannung nicht mehr weiter ansteigt. Der Pegelwandler kann daher nur bis zu der Eingangsspannung von  $3,39$  V verwendet werden.

In der unteren Darstellung ist die relative Abweichung der Ausgangsspannung zur Eingangsspannung zu sehen. Es ist ein Offset in den negativen Bereich erkennbar, was darauf hinweist, dass die tatsächliche Ausgangsspannung geringfügig kleiner ist als die erwartete. Dieser systematischer Fehler kann darauf zurückzuführen sein, dass bei dem Spannungsteiler die beiden  $1\text{ M}\Omega$ -Widerstände nicht genau gleich groß sind. Abhilfe schaffen würden hier Widerstände mit einer höheren Genauigkeit, was aus Kostengründen aber nicht in Betracht gezogen wird. Günstiger wäre es, mehrere der verwendeten Widerstände vor dem Verlöten auf den Widerstandswert zu überprüfen und so ein Paar zu finden, bei dem beide Widerstände möglichst genau den gleichen Widerstandswert aufweisen. Es können auch Widerstände benutzt werden, welche von dem angegebenen Wert von  $1\text{ M}\Omega$  abweichen, solange der andere Widerstand im gleichen Maße abweicht. Der exakte Wert ist für die Funktion des Pegelwandlers unerheblich. Insgesamt liegt die relative Abweichung trotzdem auch hier im akzeptablen Prozentbereich und somit wurde bei diesem Prototyp auf einen Austausch der Widerstände verzichtet.

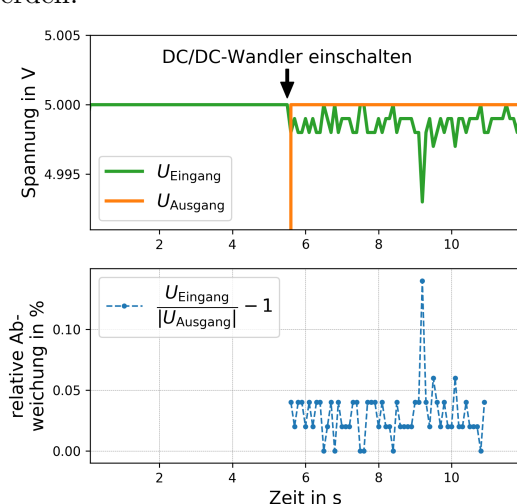
## 4.4. DC/DC-Wandler

Es folgt nun der Test des DC/DC-Wandlers, welcher für die Generierung der Spannung von  $-5$  V eingesetzt wird. Bekanntlich kann es aufgrund des DC/DC-Wandlers zu Fluktuationen auf dem Spannungsverlauf kommen, sowohl auf der Eingangsspannung von  $5$  V,

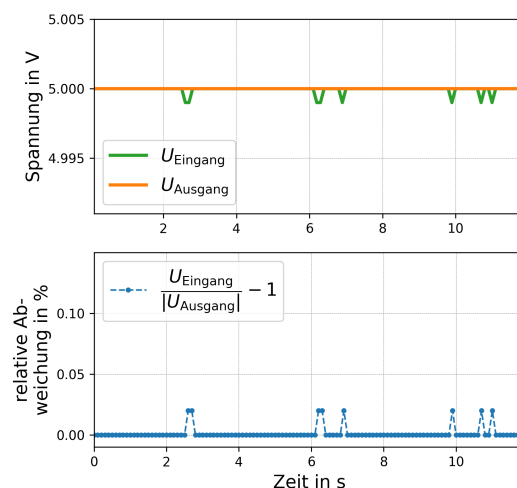


**Abbildung 4.3.: Validierung des Pegelwandlers** Die gemessene Ausgangsspannung weicht von der theoretisch erwarteten geringfügig ab. Es ist ein systematischer Fehler zu erkennen, der aber noch im akzeptierten Bereich liegt.

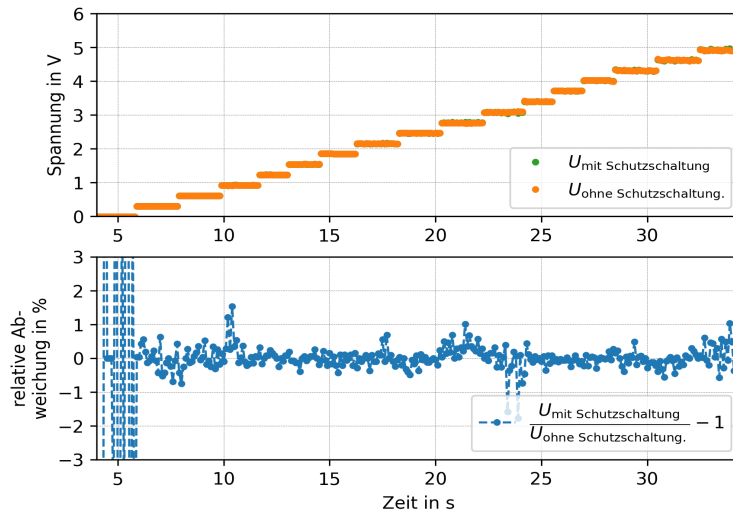
als auch auf der Ausgangsspannung von  $-5\text{ V}$ . Solche Störungen können dazu führen, dass andere Bauteile nicht mehr korrekt arbeiten. Überprüft wurde daher sowohl die Eingangsspannung, als auch die Ausgangsspannung. Die zeitlichen Verläufe sind in der Abbildung 4.4 dargestellt. Es ist zu sehen, dass die Eingangsspannung von  $5\text{ V}$  mit dem Anschalten des DC/DC-Wandlers zu rauschen beginnt. Die Amplituden der Ausschläge sind im mV-Bereich. Die Ausgangsspannung sieht ungestört aus. Da die Messung mit dem ADC, welcher an diesen  $5\text{ V}$  der Eingangsspannung angeschlossen ist, durchgeführt wurde, ist es auch möglich, dass dieser die Spannungen in Abhängigkeit von seiner Betriebsspannung misst. Da diese schwankt, wäre die Messung somit verfälscht. Um diesen Effekt zu reduzieren, wird eine Signalglättung mit je zwei Kondensatoren am Eingang und am Ausgang des DC/DC-Wandlers vorgenommen. Die Messung wird wiederholt und die Ergebnisse sind in Abbildung 4.5 rechts dargestellt. Es ist eine deutliche Dämpfung der Störungen zu sehen. Es wird davon ausgegangen, dass diese Reststörungen die Messungen mit dem ADC in keinem merklichen Maße verfälschen. Das Bauteil kann somit eingesetzt werden.



**Abbildung 4.4.: Test des DC/DC-Wandlers auf Störungen (vorher)** Mit dem Einschalten des DC/DC-Wandlers sind Störungen auf der Eingangsspannung zu erkennen.



**Abbildung 4.5.: Test des DC/DC-Wandlers auf Störungen (nachher)** Durch den Einbau von Kondensatoren zwischen der Betriebsspannung und der Masse konnten die Peaks geglättet und die Störungen reduziert werden.



**Abbildung 4.6.: Schutzschaltung** Durch Einsatz einer Schutzschaltung werden die Eingangsspannungen am ADC nahezu nicht verändert.

#### 4.5. Schutzschaltung

Es soll geprüft werden, ob eine Schutzschaltung vor den Eingängen des ADC die Messung verfälscht. Hierzu wird mit dem Potentiometer ein Spannungsteiler gebildet, mit welchem Spannungen von 0 V bis 5 V abgegriffen werden können. Diese werden zum einen direkt an den Eingang A0 des ADC und zum anderen über eine Schutzschaltung, bestehend aus zwei Dioden und einem Vorwiderstand, an den Eingang A1 angeschlossen (Abb. 3.8). Dass beide Eingänge eine vernachlässigbar kleine Abweichung untereinander aufweisen, wurde in Kapitel 4.2 aufgezeigt. In Abbildung 4.6 sind die Messungen von Kanal A0 und A1 gezeigt. Es ist zu erkennen, dass sich diese kaum unterscheiden, wie es erwartet wurde.

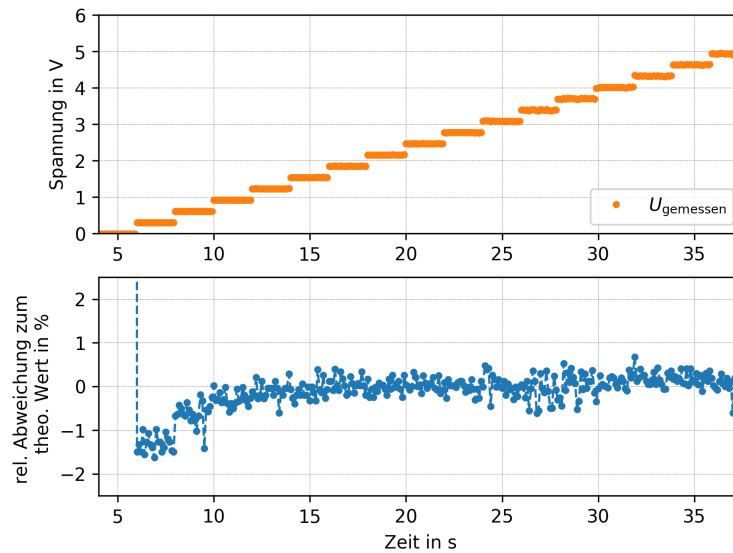
Im Weiteren soll geprüft werden, ob die Schutzschaltung die Eingänge des ADC tatsächlich vor einer Überspannung schützt. Hierzu wird mit einer Gleichspannungsquelle eine Spannung erzeugt, welche an den geschützten Eingang des ADC angelegt wird. Die Spannung wird langsam auf 6 V erhöht und anschließend wieder auf 0 V abgesenkt, um zu sehen, ob der ADC immer noch die gleichen Spannungswerte anzeigt wie die Quelle. Dies ist, wie zu erwarten war, der Fall. Danach wird der Vorgang mehrmals wiederholt und die maximale Spannung jedes Mal erhöht. Die Spannungswerte werden vom ADC jedes Mal korrekt angezeigt. Dieser Test wird bis zu einer Spannung von  $U = 30\text{ V}$  durchgeführt und verläuft erfolgreich. Der Eingang ist somit bis zu dieser Spannung geschützt.

Die weiteren Eingänge des ADC werden ebenfalls mit Schutzdioden ausgestattet.

#### 4.6. Digital-Analog-Konverter

Der verbaute DAC wird so angesteuert, dass er Spannungen von 0 V bis zur maximalen Spannung in 16 gleich großen Schritten nacheinander ausgeben soll. Es wird erwartet, dass mit jeder Stufe die Ausgangsspannung um den Wert  $\frac{U_{\max}}{16}$  erhöht wird. Die maximale Spannung wird durch Mitteln der letzten Stufe zu  $U_{\max} = 4,94\text{ V}$  mit dem ADC bestimmt. Anschließend lassen sich die weiteren 15 Spannungen theoretisch berechnen. Der Vergleich mit den vom ADC gemessenen Spannungen ist in Abbildung 4.7 zu sehen. Es lässt sich erkennen, dass die Abweichung im gesamten Wertebereich von 0 V bis zu 4,94 V in der akzeptierten Toleranz liegt.

Bei dieser Messung flossen sehr kleine Ströme im mA-Bereich. Wird gefordert, dass größere Ströme fließen, so sollte entweder analog zu diesem Verfahren zunächst überprüft werden, ob die ausgegebene Spannung immer noch hinreichend genau generiert wird oder es wird ein OPV als Spannungsfolger hinter dem DAC verwendet.



**Abbildung 4.7.:** DAC Die mit dem ADC gemessene Ausgangsspannung des DAC weicht von der erwarteten Spannung im Promille-Bereich ab.

**Tabelle 4.1.:** Validierung des Stromsensor mithilfe eines Multimeters

Mit Multimeter ge- messener Strom in A	Mit Stromsensor ge- messener Strom in A	Relative Abweichung $\frac{I_{\text{Stromsensor}}}{I_{\text{Multimeter}}} - 1$ in %
0,001	0,000	-100
0,334	0,333	0,3
0,667	0,677	1,5
1,018	1,024	0,6
1,337	1,342	0,4
1,660	1,668	0,5
2,003	2,013	0,5

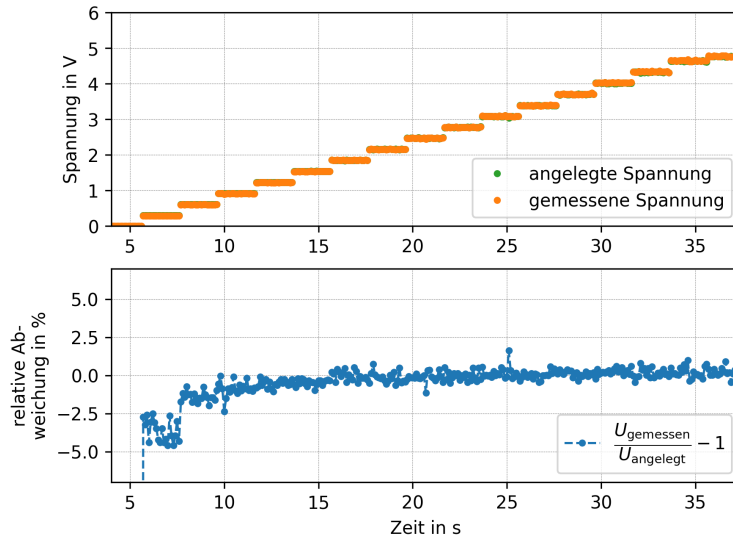
#### 4.7. Strom-/Spannungssensor

Mit dem bereits verifizierten DAC wird analog zu Kapitel 4.6 eine Spannung generiert, welche sowohl mit dem Strom-/Spannungssensor, als auch mit dem ebenfalls verifizierten ADC gemessen wird. Die aufgenommenen Messwerte des ADC werden daher als Referenz herangezogen und mit den Messwerten des Strom-Spannungssensors verglichen. Die übereinandergelegten Messwerte sind in Abbildung 4.8 zu sehen. Die Abweichung ist selbst bei recht kleinen Spannungen noch im erlaubten Bereich und der Sensor kann daher für eine Einkanal-Spannungsmessung ebenfalls verwendet werden.

Die Untersuchung einer Strommessung kann wegen fehlender Messgeräte nur mit einem Handmultimeter durchgeführt werden. Hierzu wird der Stromfluss durch eine Spule mithilfe eines Handmultimeters und des Strom/Spannungssensors gemessen. Die gemessenen Stromstärken im Bereich zwischen 0 A und 2 A - in 0,33 A-Schritten variiert - stimmen im Rahmen der akzeptierten Toleranz überein (Tab. 4.1).

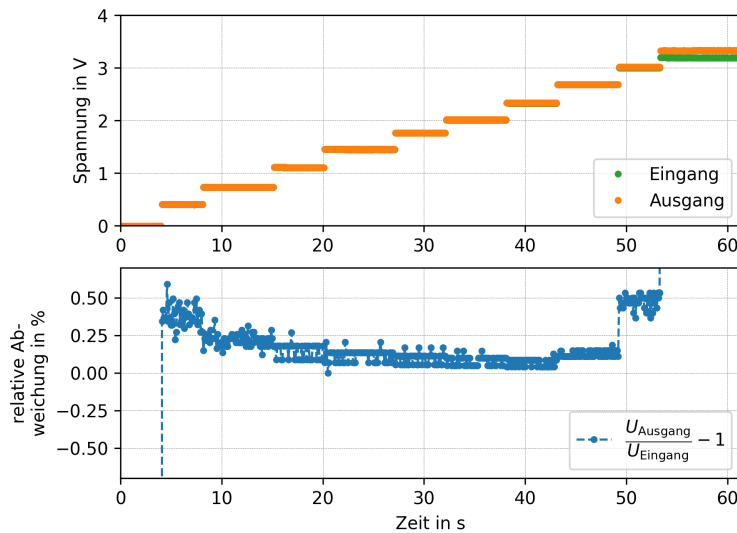
#### 4.8. Elektrometer

Das verbaute Elektrometer wird nun ebenfalls darauf untersucht, ob es als Spannungsfolger korrekt funktioniert. Es wird mithilfe einer externen Spannungsquelle eine Spannung zwischen dem Eingang und der Masse angelegt, welche von 0 V beginnend wieder stufenweise



**Abbildung 4.8.: Strom-/Spannungssensor** Der Strom-/Spannungssensor misst die mit dem DAC angelegte Spannung mit hinreichender Genauigkeit.

erhöht wird. Die Eingangsspannung und die Ausgangsspannung des Elektrometers werden am ADC aufgenommen. Es ist zu erkennen, dass der Operationsverstärker bei ungefähr 53 s seine Sättigungsspannung mit  $U_{\text{Sat}} \approx 3,1 \text{ V}$  erreicht hat (vgl. Abb. 4.9). Unterhalb dieser Spannung liegt die Abweichung der Ausgangsspannung zur Eingangsspannung im Promillebereich. Das Bauteil erfüllt somit die Funktion als Spannungsfolger. Ein Test des Innenwiderstands wird qualitativ in Kapitel 5.2 durchgeführt.



**Abbildung 4.9.: Elektrometer als Spannungsfolger** Das Elektrometer als Spannungsfolger gibt bis zu einer Spannung von  $U_{\text{Sat}} \approx 3,1 \text{ V}$  die Ausgangsspannung hinreichend genau in Abhängigkeit seiner Eingangsspannung aus. Oberhalb dieser Spannung ist der OPV in der Sättigung.



## 5. Beispielversuche mit dem Messkoffer

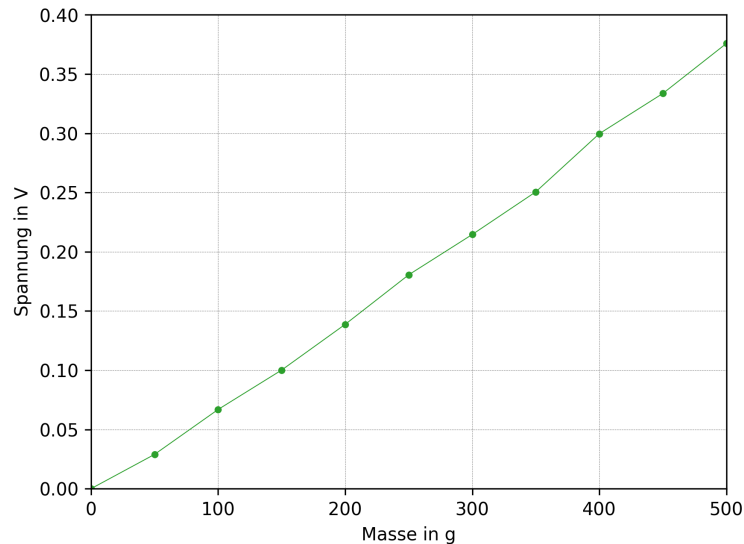
Im Folgenden werden verschiedene Versuche beschrieben, die illustrieren, wie Messungen mit diesem Messkoffer durchgeführt und ausgewertet werden können. Das Messsystem ist nicht auf diese Auswahl von Versuchen beschränkt und kann bei vielen weiteren Messungen verwendet werden.

### 5.1. Kraftmessung mit einer Wägezelle

Mithilfe einer Wägezelle soll eine Kraftmessung durchgeführt werden. Es wird überprüft, ob die an der Wägezelle anliegende Spannung linear mit der angehängten Masse ansteigt, wie es erwartet wird.

Zunächst wird die Wägezelle mit einer Betriebsspannung von 5 V versorgt und an eine Vorrichtung geschraubt, sodass Massestücke daran angehängt werden können. Die Spannungsdifferenz der beiden Ausgänge der Wägezelle ist ein Maß für die anliegende Kraft. Da dieser Unterschied typischerweise im mV-Bereich liegt, wird eine Verstärkung der Spannung mit dem Instrumentenverstärker vorgenommen. Der Ausgang des Instrumentenverstärkers wird mit dem Eingang A0 des ADC verbunden. Da der notwendige Verstärkungsfaktor unbekannt ist, wird dieser zunächst klein eingestellt und während der Messung anschließend erhöht, bis sich das Signal in einem geeigneten Wertebereich befindet. Da die Polarität der Spannung ebenfalls unbekannt ist, wird eine Referenzspannung abgegriffen und mit dem dazugehörigen Anschluss des Instrumentenverstärkers verbunden. Diese verschiebt die Ausgangsspannung um den Wert der Referenzspannung, sodass negative Spannungen zu positiven Spannungen verschoben werden können. Anschließend muss diese Verschiebung wieder abgezogen werden. Dazu wird die Referenzspannung an den Eingang A1 des ADC angelegt und A0 - A1 als Ausgabe gewählt.

Ist der Aufbau abgeschlossen, so kann die Messung gestartet und mit verschiedenen Massen der Verstärkungsfaktor so gewählt werden, dass eine Spannung sichtbar ist. Der Verstärkungsfaktor beträgt hier  $A = 18$ . Bei laufender Messung werden nacheinander Massestücke bis 500 g in 50 g Schritten an die Wägezelle gehängt. Des Weiteren wird die Spannung aufgenommen, wenn kein Massestück angehängt ist. Anschließend werden die Messwerte exportiert und die Spannungen den jeweiligen angehängten Massen zugeordnet. Durch zeitliches Mitteln der Spannungswerte während der Zeit, als das jeweilige Massestück angehängt war, kann jeder Masse ein Spannungswert zugeordnet werden. Es ergeben sich somit zehn Spannungswerte zu den zehn Massestücken (Abb. 5.1). Es ist zu erkennen, dass die Spannung proportional zur angehängten Masse ist. Die Spannung, welche gemessen wird, ohne dass ein Massestück angehängt ist, wird als Offset-Spannung von den anderen Spannungen abgezogen. Nach Bestimmung der Ausgleichsfunktion kann diese Wägezelle somit als Waage für Massen bis 500 g eingesetzt werden.



**Abbildung 5.1.: Kraftmessung** Die Spannung der Wägezelle steigt mit zunehmender Kraft an. Die Offset-Spannung, welche ohne ein angehängtes Massestück anliegt, wird von den restlichen Spannungswerten abgezogen. Die gemessenen Werte sind mit einer Ursprungsgeraden kompatibel.

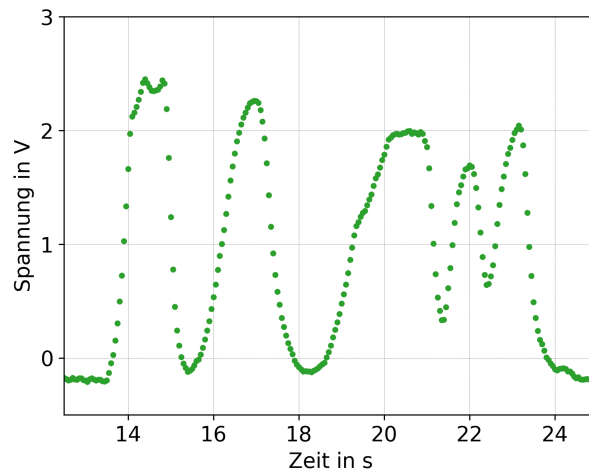
## 5.2. Versuche zur Elektrostatik

Im folgenden Versuch soll der Effekt Influenz dargestellt werden. Des Weiteren lässt sich derselbe Aufbau ebenfalls zur Demonstration eines Ladungsöffels verwenden.

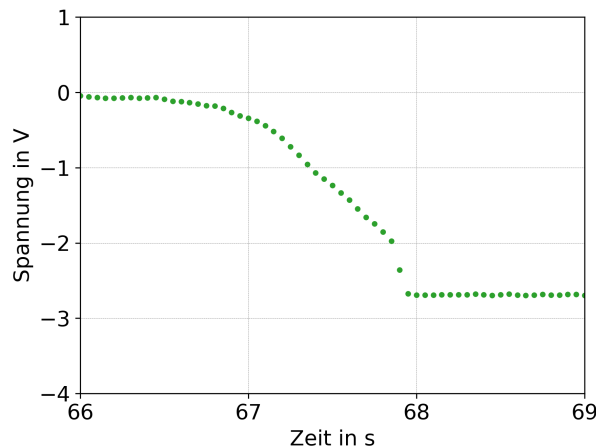
An das Elektrometer wird eine offene, runde Kondensatorplatte mit einem Durchmesser von  $d \approx 5$  cm angeschlossen. Die Masse des Messkoffers wird auf das Erdpotential gezogen. Zwischen der Kondensatorplatte und der Erde wird ein Kondensator mit der Kapazität von 1 nF angeschlossen. Der Ausgang des Elektrometers wird mit dem Pegelwandler verbunden und dieser wiederum mit dem ADC. Somit können sowohl positive, als auch negative Spannungen ausgelesen werden. Softwareseitig wird die Funktion des Pegelwandlers folgendermaßen kompensiert:  $U_{\text{Kondensator}} = 2 \cdot U_{\text{gemessen}} - 5 \text{ V}$ . Bevor die Messung beginnt, wird die Kondensatorplatte mit Hilfe eines Leiters mit dem Erdpotential verbunden, sodass diese ungeladen ist. Wird nun ein geladener Körper der Kondensatorplatte angenähert, so bewirkt das elektrische Feld des geladenen Körpers eine Kraft auf die freien Elektronen der Kondensatorplatte, welche daraufhin - je nach Ladung des Körpers - zu diesem hin beziehungsweise von diesem weg beschleunigt werden (Influenz). Dieser Prozess wird dadurch beschränkt, dass durch die Ladungsverschiebung ein elektrisches Feld aufgebaut wird, welches der beschleunigenden Kraft entgegenwirkt. Die Ladungstrennung kann als elektrische Spannung gemessen werden, welche zwischen Erde und der Kondensatorplatte anliegt, also gerade auf der Eingangsseite des Elektrometers. Es ist anzumerken, dass für diesen Versuch zwingend ein Messgerät mit einem sehr großen Innenwiderstand erforderlich ist, da sonst der größere Stromfluss zwischen dem Eingang des Elektrometers und der Erde zu einem Ladungsausgleich an der Kondensatorplatte führt und der Effekt somit nicht sichtbar ist. Eine Überprüfung des Innenwiderstands befindet sich im Anhang [C](#).

Als Körper wird ein Kunststoffstab verwendet, welcher an einem Wollpullover gerieben wurde, sodass dieser sich aufgeladen hat. Anschließend wird er der Kondensatorplatte angenähert, wobei der Abstand mehrmals variiert wird. Die aufgenommene Kurve in [Abbildung 5.2](#) zeigt den zeitlichen Verlauf der Spannung am Kondensator an. Die Veränderung der Spannung mit dem Abstand des Stabs ist gut zu erkennen. Anhand des Vorzeichens der Spannung ist weiter zu erkennen, dass der Stab positiv geladen ist.



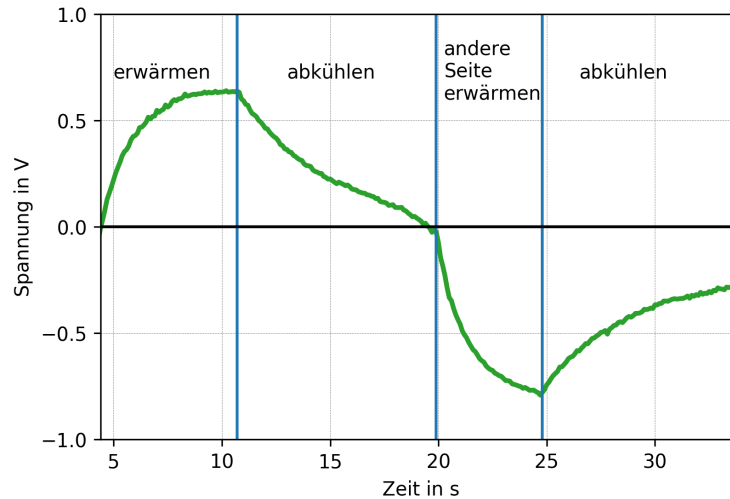


**Abbildung 5.2.: Influenz** Zeitlicher Verlauf der Spannung am Kondensator bei mehrmaliger Veränderung des Abstandes zum geladenen Stab. Der beobachtete Offset von circa  $-0,2\text{ V}$  kann an der Abweichung des Pegelwandlers liegen (Kap. 4.3).



**Abbildung 5.3.: Ladungslöffel** Zeitlicher Verlauf der Spannung am Kondensator bei Annäherung und Berührung mit einer geladenen Kugel. Bei ca. 66 s wird der Kondensator geerdet, sodass die Spannung  $0\text{ V}$  beträgt. Bei Annäherung der geladenen Kugel steigt der Betrag der Spannung am Kondensator durch Influenz an. Bei Berührung der Kugel an der Kondensatorplatte ( $t \approx 67,9\text{ s}$ ) erreicht die Spannung einen konstanten Wert.

Nun folgt die Demonstration des Ladungslöffels. Hierzu wird eine Metallkugel an einem Wollpullover gerieben und anschließend die entladene Kondensatorplatte damit berührt. Abbildung 5.3 zeigt den Verlauf der Spannung an. Der Anstieg der Kondensatorspannung bei Berührung mit der Kugel lässt auf die Ladung schließen. Mit  $\Delta Q = C \cdot \Delta U$ , einer bekannten Kapazität von  $1\text{ nF}$  und der Spannungsdifferenz von  $-2,7\text{ V}$  beträgt die übertragene Ladung  $-2,7\text{ nC}$ .



**Abbildung 5.4.: Thermoeffekt mit einem Peltier-Element** Zu Beginn wird eine Seite mit der Hand ( $T_{\text{Hand}} \approx 35^\circ\text{C}$ ) erwärmt, während die andere Seite auf einer kalten Tischplatte ( $T_{\text{Tisch}} \approx 19^\circ\text{C}$ ) aufliegt. Anschließend wird das Peltier-Element gedreht. Die y-Achse zeigt die um den Faktor 12 verstärkte Thermospannung an.

### 5.3. Thermoeffekt

Es soll qualitativ der Thermoelektrische Effekt illustriert werden, welcher besagt, dass sich in einem Stromkreis aus zwei verschiedenen Leitern an den Kontaktstellen eine Spannung einstellt, wenn diese eine unterschiedliche Temperatur haben [18].

Hierzu wird ein Peltier-Element verwendet, welches aus einer Hintereinanderschaltung vieler Thermoelemente besteht. Dieses wird an den Instrumentenverstärker angeschlossen. Da die Polarität der Spannung wieder unbekannt ist, wird analog zur Kraftmessung mit einer Wägezelle (Kap. 5.1) eine Referenzspannung angeschlossen und softwareseitig wieder abgezogen. Der Verstärkungsfaktor wird erhöht, bis sich die Spannung in einem geeigneten Messbereich befindet. Hier wurde der Verstärkungsfaktor 12 verwendet. Nun kann eine Seite des Peltier-Elements mit der Hand erwärmt werden, während die andere Seite auf der kalten Tischplatte liegt. Es ist zu sehen, dass die Spannung ansteigt und sich einem Grenzwert annähert. Wird das Peltier-Element herumgedreht, so ändert sich das Vorzeichen der Spannung. Die Erwartungen wurden somit bestätigt.

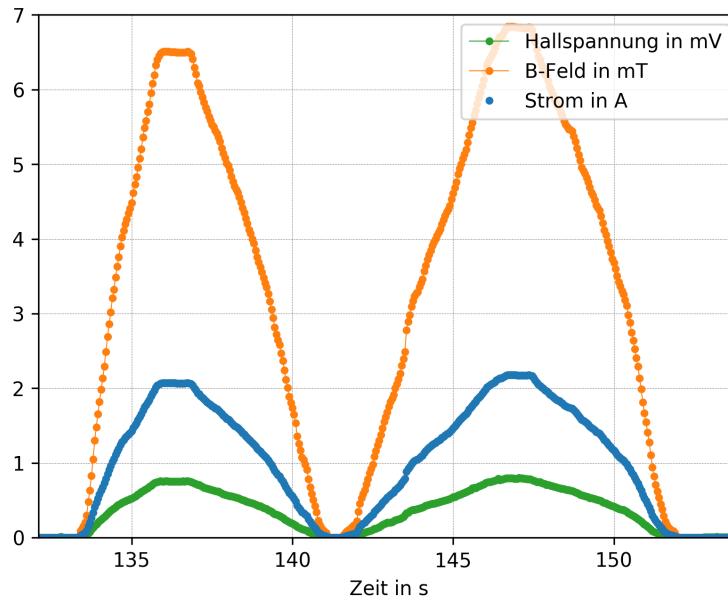
### 5.4. Hall-Effekt

Mit einem Hallsensor soll der Zusammenhang zwischen der Hallspannung und dem Strom durch eine lange Spule untersucht werden. Es wird erwartet, dass die Hallspannung proportional mit dem Strom ansteigt [19].

Eine Spule der Länge  $l = 30\text{ cm}$  mit  $n = 750$  Windungen wird von einem regelbaren Strom durchflossen. Der Hallsensor wird in der Mitte der Spule platziert, da dort das Magnetfeld in guter Näherung durch

$$B = \mu_0 \cdot \frac{I \cdot N}{l} \quad (5.1)$$

beschrieben werden kann und Randeffekte vernachlässigt werden können. Die Hallspannung wird an den Instrumentenverstärker mit einer Verstärkung von 102 angeschlossen. Der Strom-Spannungssensor wird in Reihe mit der Spule geschaltet, um den Stromfluss zu messen. Die Messung wird gestartet und der Strom wird langsam bis auf  $I = 2\text{ A}$  erhöht und anschließend wieder langsam auf  $I = 0\text{ A}$  verringert.



**Abbildung 5.5.: Halleffekt, zeitlicher Signalverlauf** zeitlicher Verlauf des Spulenstroms und des daraus berechneten Magnetfelds, sowie der gemessenen Hallspannung

Bei der Auswertung wird zur Glättung des Signals eine Mittelung zweier Messwerte vorgenommen:  $U_{i,mid} = \frac{U_i + U_{i+1}}{2}$ , wobei  $i$  den jeweiligen Messpunkt beschreibt. Weiter wird der Offset des Hallsensors kompensiert, sodass bei einem Strom von  $I = 0$  A auch keine Hallspannung anliegt. Das geschieht durch eine lineare Regression der Stromstärke über Spannung und anschließender Kompensation des Spannungsoffsets bei  $I = 0$  A.

Der Signalverlauf ist in Abbildung 5.5 dargestellt. Der Zusammenhang der Hallspannung mit dem Spulenstrom ist in Abbildung 5.6 zu sehen. Wie in der Theorie vorhergesagt, kann dieser durch eine Gerade beschrieben werden.

Zur weiteren Untersuchung des Hallsensors könnte nun der Hall-Koeffizient berechnet und mit dem angegebenen Wert verglichen werden. Weiter ließe sich bei gegebenen Hall-Koeffizient das Magnetfeld der Berechnung und Messung vergleichen.

## 5.5. Photoeffekt

Im Folgenden wird der Photoeffekt genauer untersucht. Es soll für sechs verschiedene Wellenlängen im Bereich von  $\lambda = 360$  nm bis  $\lambda = 590$  nm jeweils die sich ergebende Gegenspannung gemessen werden. Anschließend soll das Verhältnis  $h/e$ , wobei  $h$  das Plancksche Wirkungsquantum und  $e$  die Elementarladung ist, bestimmt werden.

Als Lichtquelle wird eine Quecksilber-Lampe verwendet, da diese auch im UV-Bereich Licht emittiert. Mit Linsen wird der Lichtstrahl gebündelt und mit Interferenzfiltern auf die jeweilige Wellenlänge reduziert. Durch das Auftreffen der Photonen auf der Kathode werden Elektronen herausgelöst und auf der zunächst neutral geladenen Platte stellt sich ein positiver Ladungsüberschuss ein. Treffen Elektronen auf die gegenüberliegende Anode, so wird diese negativ geladen. Durch die Ladungstrennung zwischen Anode und Kathode entsteht ein ansteigendes elektrisches Feld, welches weitere Elektronen, die von der Kathode zur Anode fliegen, abbremst. Im Gleichgewicht ist die Bremskraft so groß, dass selbst Elektronen mit maximaler kinetischer Energie nicht mehr bei der Anode ankommen. Die Spannung zwischen Kathode und Anode ist dann maximal. Der Anstieg der Spannung mit der Zeit ist für verschiedene Wellenlängen in Abbildung 5.7 zu sehen.

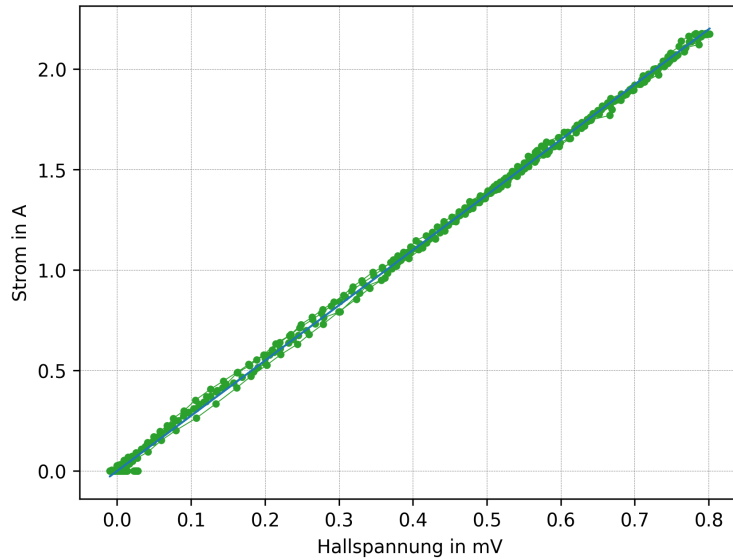
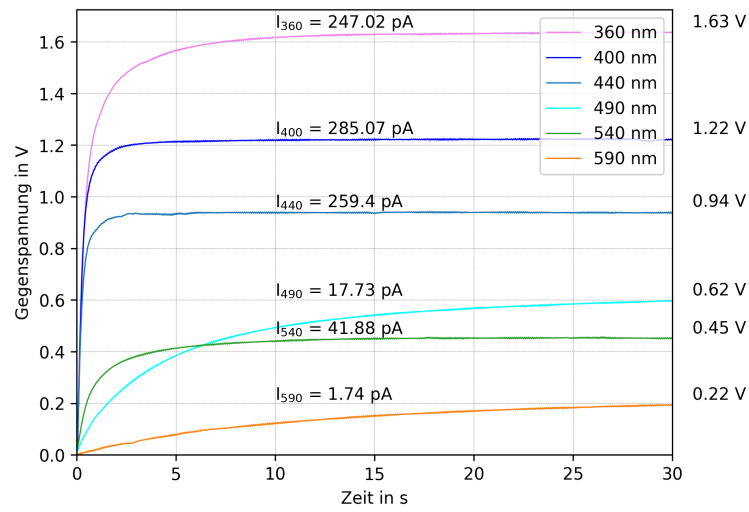


Abbildung 5.6.: Halleffekt, Spulenstrom über Hallspannung

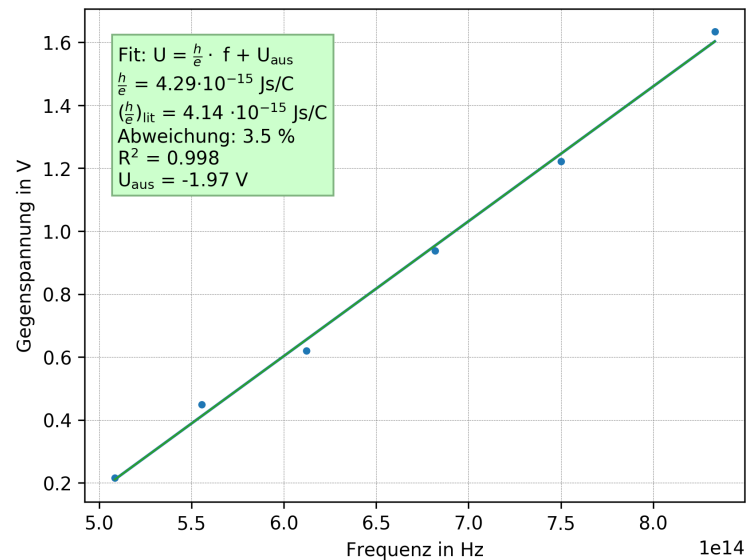
Um das Verhältnis  $h/e$  zu berechnen, wird zunächst die Energiebilanz aufgestellt. Das einfallende Licht mit der Wellenlänge  $\lambda$  hat die Frequenz  $\nu = \frac{c}{\lambda}$  und die Energie  $E_{\text{Licht}} = h\nu$ . Die herausgelösten Elektronen haben nach Abzug der Austrittsarbeit die kinetische Energie  $E_{\text{kin}} = E_{\text{Licht}} - E_{\text{A}}$ . Für die Energie des elektrischen Felds gilt  $E_{\text{Feld}} = U \cdot e$ , wobei  $U$  die Gegenspannung und  $e$  die Elementarladung ist. Im stationären Fall ist die Energie des elektrischen Feldes gleich groß wie die kinetische Energie,  $E_{\text{Feld}} = E_{\text{kin}}$ , sodass sich eingesetzt  $U \cdot e = h\nu - E_{\text{A}}$  ergibt. Für die Spannung  $U$  gilt schließlich  $U = h/e \cdot \nu + \frac{E_{\text{A}}}{e}$ . Das Verhältnis  $h/e$  entspricht der Steigung im  $U - \nu$ -Diagramm in Abbildung 5.8. Der y-Achsenabschnitt entspricht der Austrittsarbeit  $E_{\text{A}}$ , wobei ein negatives Vorzeichen dafür steht, dass diese Arbeit aufgebracht werden muss.

Die Abweichung von  $(h/e)_{\text{gemessen}}$  zum Literaturwert von  $h/e = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ Js/C}$  [20] beträgt 3,5 %, was auf eine sehr präzise Messung hindeutet und das gesetzte Ziel des Messens im Prozentbereich erfüllt. Die Austrittsarbeit für eine Kalium-Kathode beträgt  $E_{\text{A}} = 2,25 \text{ eV}$ . Der y-Achsenabschnitt entspricht  $|U| = 1,97 \text{ V}$ . Da hier keine weiteren Effekte wie zum Beispiel Kontaktspannungen berücksichtigt werden, ist die Bestimmung der Austrittsarbeit mit diesem Verfahren grundsätzlich nur mit größeren Unsicherheiten möglich [21]. Obwohl auf eine ausführliche Berechnung an dieser Stelle verzichtet wird und der y-Achsenabschnitt weit weg von den gefitteten Messwerten extrapoliert wird, stimmt die Größenordnung der extrapolierten Austrittsarbeit trotzdem gut mit der erwarteten überein.

Weiter lässt sich aus der Kondensatoraufladung in Abbildung 5.7 der Photostrom berechnen. Es ist zu sehen, dass dieser im Piko-Bereich liegt. Bei 590 nm war der Strom am kleinsten, was sich an der verhältnismäßig langsamen Aufladung zeigt.



**Abbildung 5.7.: Photoeffekt** Aufladung eines Kondensators an einer Vakuum-Photozelle für verschiedene Wellenlängen des einfallenden Lichts



**Abbildung 5.8.: Photoeffekt** Gegenspannung gegen Frequenz des Lichts aufgetragen mit linearer Regression. Die Steigung entspricht dem Verhältnis  $h/e$ .



## 6. Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde demonstriert, dass es möglich ist, ein transparentes Messsystem zu entwerfen, mit welchem genaue Messungen durchgeführt und zudem Grundlagen digitaler Messtechnik vermittelt werden können. Die entwickelte Platine mit aktiver Messbereichserweiterung umfasst moderne Verstärker mit sehr hohen Innenwiderständen und Verstärkungsfaktoren, welche ein weites Anwendungsfeld, unter anderem für Messungen sehr kleiner Ströme und Spannungen im mV-Bereich, erschließen. Moderne, digitale Messmethoden, welche hier transparent und quelloffen umgesetzt wurden, können dank der geringen Kosten in Praktika und Schulen zur Verwendung kommen. Zudem erleichtern die verbauten Schutzmechanismen und einfache Wartungsmöglichkeiten den dortigen Einsatz. Die hohe Präzision erlaubt es, das digitale Messerfassungssystem nicht nur für zahlreiche Schülerexperimente, sondern auch für empfindliche Messungen, wie beim Photoeffekt in Kapitel 5 gezeigt, einzusetzen, welche am Computer mittels moderner Software ausgewertet werden können.

Die entworfene Platine kommt ohne unbekannte Schaltungen aus und greift auf die im bisherigen Studienverlauf kennengelernten zurück. Somit ist gewährleistet, dass der Schaltplan verstanden wird und der Hauptfokus auf der Anwendung dieser Schaltungen liegt. Durch den Einsatz im Anfängerpraktikum können die Kenntnisse in Kursen zur Elektronik und Elektrodynamik durch praktische Anwendung gefestigt und erweitert werden.

Ausblickend bietet es sich an, einen Einführungsversuch im physikalischen Praktikum mit diesem System zu betreiben, bei dem die Grundlagen digitaler Messtechnik anhand dieses Messsystems vermittelt werden. Wie in Kapitel 5 demonstriert, können mehrere bereits bestehende Versuche leicht auf dieses Messsystem umgestellt werden, sodass die Inhalte der jeweiligen Versuche weiterhin vermittelt und praktische Erfahrungen der Messtechnik gefördert werden können. Vor der Vervielfältigung des Koffers und der allgemeinen Einführung könnte die Bedienung des Messerfassungssystems mit einigen freiwilligen Praktikumsgruppen getestet und der Koffer entsprechend angepasst werden.

Der nächste Schritt ist dann das Herausbringen einer gefrästen oder geätzten Platine, welche nicht mehr selbst zusammengelötet werden muss. Damit kann das System schneller und kostengünstiger in einer größeren Stückzahl produziert werden. Weiter ist geplant eine Version mit einem eingebauten Display zu erstellen, sodass der Messkoffer als autarkes Messsystem einsetzbar wäre. Abrundend könnte der Messkoffer mit einer Vorrichtung für eine handelsübliche Powerbank ausgestattet werden, welche als Stromversorgung genutzt wird, sodass dieser bei Messungen an Orten eingesetzt werden kann, an welchen eine Verbindung zu einer Steckdose nicht möglich ist.





# Anhang

## A. Inter-Integrated Circuit (I<sup>2</sup>C)

I<sup>2</sup>C ist ein weit verbreiteter Datenbus, welcher die Kommunikation zwischen verschiedenen integrierten Schaltungen ermöglicht. Ein Vorteil dieses Busses ist, dass nur zwei Leitungen zwischen den kommunizierenden Geräten benötigt werden: SDA (engl., serial data) und SCL (engl., serial clock). Auf der erst genannten werden die eigentlichen Daten gesendet und empfangen, auf der letzteren die Taktimpulse, welche nötig sind, da sich die Geräte untereinander in der Regel in Takt und Phase unterscheiden. Dank der Adressierbarkeit können bis zu 112 Geräte auf einem I<sup>2</sup>C-Bus angesteuert werden [22].

Da es bei dem Prototyp zunächst zu Signalabbrüchen kam, wurde jeweils ein 10 k $\Omega$  Pull-up-Widerstand von den beiden Leitungen SDA und SCL nach 5V sowie jeweils ein 100 pF Kondensator zwischen SDA und Masse sowie zwischen SCL und Masse verbaut. Der Widerstand hat die Funktion, die Werte der bereits integrierten Pull-up-Widerstände zu verringern, sodass ein größerer Strom auf den Leitungen fließt, was dafür sorgt, dass die Signale durch äußere Störungen nicht so sehr beeinflusst werden. Der Widerstandswert orientiert sich am maximal erlaubten Stromfluss dieser Leitungen, der Anstiegszeit der Signale, der Betriebsspannung und am LOW-Pegel [23]. Die Kondensatoren reduzieren Störungen, die aufgrund steiler Signalfanken bei kurzen Verbindungen oder durch äußere Einflüsse entstehen. Die Kapazität hängt unter anderem von der Kabellänge, der Frequenz und der Betriebsspannung ab und wurde hier empirisch gewählt.

Auf der Platine des Messkoffers wurde ein I<sup>2</sup>C-Pegelwandler verbaut (Bauteil 10, Abb. [2.1]). Dieser wandelt das HIGH-Signal der beiden Leitungen von den ursprünglichen 3,3 V nach 5 V um, da manche Bauteile den höheren Pegel fordern. Beide Spannungen des Datenbusses können auf der Steckplatte abgegriffen werden, sodass eine Vielzahl weiterer I<sup>2</sup>C-kompatiblen Geräte angeschlossen werden kann.

## B. Open-Collector

Die in Abbildung [2.1] dargestellten Open-Collector Ausgänge stellen eine digitale Ausgabemöglichkeit des Koffers dar. Der abgebildete Chip beinhaltet sieben Transistoren in Emitterschaltung mit je einem Ausgang des Raspberry Pi an der Basis. Die vereinfachte Schaltung ist in Abbildung [B.1] dargestellt. Diese Schaltung bewirkt, dass der maximal erlaubte Stromfluss der Raspberry Pi Ausgänge nicht überschritten wird und auch Verbraucher angeschlossen werden können, welche mehr Strom benötigen als die maximal erlaubten 16 mA der Raspberry Pi Ausgänge [24].

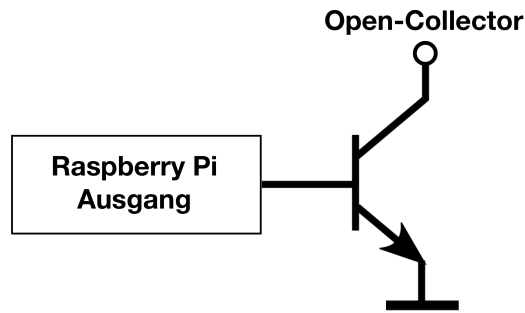


Abbildung B.1.: Open-Collector Schaltung (eigenes Werk)

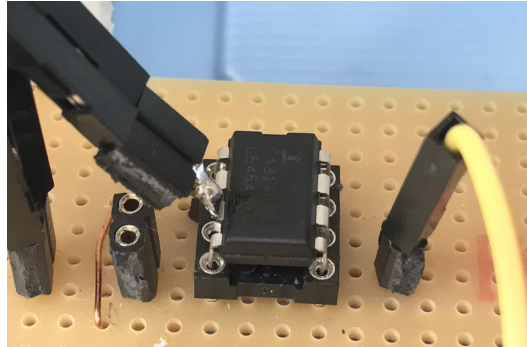


Abbildung C.2.: Elektrometer-Operationsverstärker mit abstehenden Füßchen des nicht invertierenden Eingangs

### C. Innenwiderstand des Elektrometers

Das verbaute Elektrometer hat einen Innenwiderstand von  $R_I = 10^{12} \Omega$ . Dieser Widerstand ist so groß, dass selbst der Oberflächenwiderstand der Platine, auf dem der Chip aufgebracht ist, kleiner ist und damit der gesamte Innenwiderstand reduziert wird. Um dieses Problem zu umgehen, wurde das Füßchen des Eingangs am Chip nicht auf der Platine angebracht und anschließend von dort aus mit der Steckplatte verbunden, sondern direkt mit der zur Steckplatte führenden Leitung verlötet (Abb. C.2). Im Experiment zeigt sich das Ergebnis darin, dass sich eine mit dem Elektrometer verbundene geladene Kondensatorplatte deutlich langsamer entlädt als vorher, was auf einen größeren Innenwiderstand zurückzuführen ist. Das Problem konnte somit behoben werden.

## D. Weitere Fotos des Messkoffers



Abbildung D.3.: Halterung links

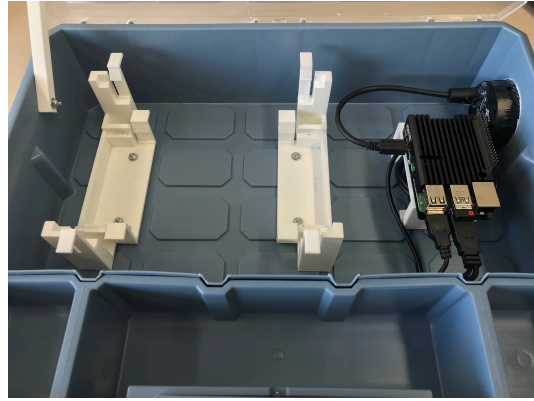


Abbildung D.4.: Koffer ohne Platine und Steckplatte

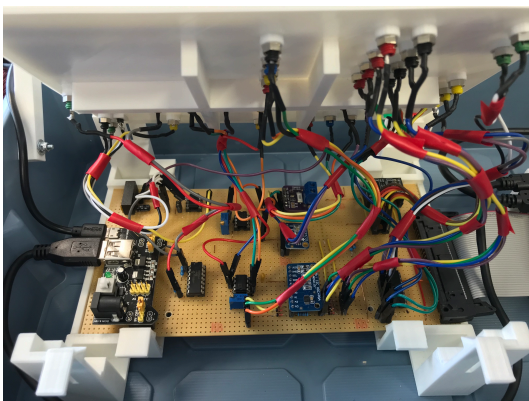


Abbildung D.5.: Verkabelung zwischen Platine und Steckplatte

Die zusammengehörigen Leitungen sind gebündelt und in unterschiedlichen Farben gewählt, sodass schnell erkannt werden kann, welches Kabel welche Anschlüsse verbindet.

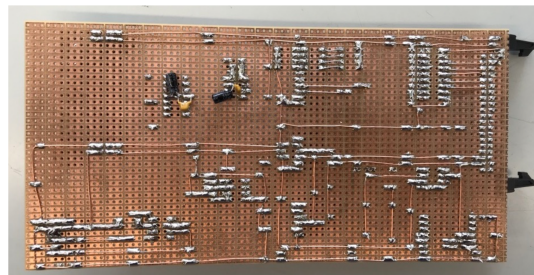


Abbildung D.6.: Platine Rückseite



Abbildung D.7.: Herausgeführte USB-Anschlüsse und HDMI-Ausgang

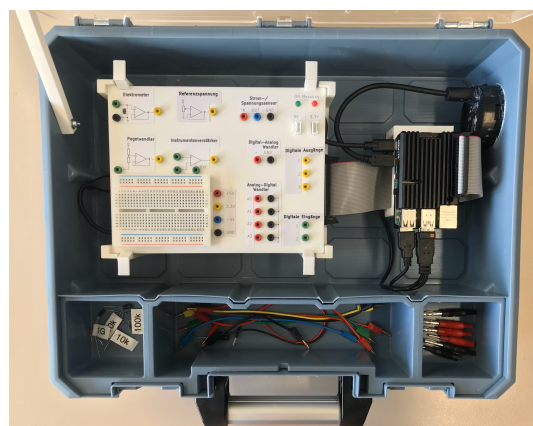


Abbildung D.8.: Messkoffer

## E. Bauteilliste

Tabelle E.1.: Bauteilliste

Beschreibung	Bestell- nummer	Menge	Zulieferer	Preis in Euro	Gesamt in Euro
<b>Steckplatte</b>					
Miniatur-Buchse, 2 mm, schwarz	MBI 1 SW	8	Reichelt	0,79	6,32
Miniatur-Buchse, 2 mm, rot	MBI 1 RT	7	Reichelt	0,79	5,53
Miniatur-Buchse, 2 mm, grün	MBI 1 GN	7	Reichelt	0,79	5,53
Miniatur-Buchse, 2 mm, gelb	MBI 1 GE	8	Reichelt	0,79	6,32
Miniatur-Buchse, 2 mm, blau	MBI 1 BL	2	Reichelt	0,79	1,58
Arduino - Grove Universal-Buchse, 4-Pin (10er Set)	GRV CONNEC4PIN	1	Reichelt	1,25	1,25
LED Grün 5 mm	RND 135-00122	1	Reichelt	0,06	0,06
LED Rot 5 mm	RND 135-00126	1	Reichelt	0,06	0,06
Breadboard	RND 255-00005	1	Reichelt	1,90	1,90
Buchsenleiste 2,54 mm, 1x20	MPE 115-1-020	4	Reichelt	1,20	4,80
Filament für 3D Drucker		120 g			
<b>Platine</b>					
Operationsverstärker, 1-fach, DIP-8	CA 3140 DIP	1	Reichelt	0,99	0,99
Instrumentationsverstärker, 1-fach, DIP-8	AD 623 ANZ	1	Reichelt	6,35	6,35
Seven-Darlington-Arrays, DIP-16	ULN 2003A	1	Reichelt	0,30	0,30
Operationsverstärker, 2-fach, DIP-8	MCP 6042-I/P	1	Reichelt	0,66	0,66
DC-DC 5V Wandler	TMA 0505D	1	Reichelt	5,50	5,50
Analog/Digital Konverter ADS1115	RPI ADC 4CH	1	Reichelt	3,30	3,30
Diode für Schutzschaltung			Reichelt		
Level Shifter	DEBO LEV SHIFTER	1	Reichelt	4,15	4,15
Operationsverstärker 4-fach	MCP 604-I/P	1	Reichelt	0,85	0,85
INA219 Strom-/Spannungssensor	DEBO SENS POWER	1	Reichelt	2,80	2,80
Digital-Analog-Konverter	802236543 - 62	1	Conrad	5,89	5,89

Tabelle E.2.: Bauteilliste

Beschreibung	Bestell- nummer	Menge	Zulieferer	Preis in Euro	Gesamt in Euro
Widerstand 10 k $\Omega$ , 1%	VI MBA 02040C1002	6	Reichelt	0,05	0,3
Widerstand 1 M $\Omega$ , 0.1%	ARC MRA0207 1M B	2	Reichelt	0,37	0,74
Widerstand 47 $\Omega$ , 1%	VI MBB 02070C4709	6	Reichelt	0,03	0,18
Widerstand 100 $\Omega$ , 1%	VI MBB 02070C1000	1	Reichelt	0,04	0,04
Keramik-Kondensator 10 nF	KERKO 10N	1	Reichelt	0,06	0,06
Keramik-Kondensator 100 nF	KERKO 100N	4	Reichelt	0,06	0,24
Keramik-Kondensator 100 pF	KERKO 100P	4	Reichelt	0,05	0,2
Elektrolyt-Kondensator 47 $\mu$ F	M-A 47U 100	4	Reichelt	0,21	0,84
Elektrolyt-Kondensator 10 $\mu$ F	KS-A 10U 16	4	Reichelt	0,11	0,44
Punkt- Streifenraasterplatine	H25PS200	1	Reichelt	2,60	2,60
IC Sockel 16 Pole	MPE 001-1-016-3	1	Reichelt	0,35	0,35
IC-Sockel 14 Pole	MPE 001-1-014-3	1	Reichelt	0,29	0,29
IC Sockel 8 Pole	MPE 001-1-008-3	4	Reichelt	0,26	1,04
Präzisionspotentiometer	64Y-100K	2	Reichelt	0,21	0,42
Flachbandkabel	RPI T-COBBLER P	1	Reichelt	3,60	3,60
<b>Gehäuse und Computer</b>					
Raspberry Pi 4, 2 GB RAM	RASP PI 4 B 2GB RAM	1	Reichelt	49,00	49,00
Raspberry Pi Ladegerät	GOO 56746	1	Reichelt	8,50	8,50
Power supply	DEBO BREAD POWER	1	Reichelt	4,50	4,50
Speicherkarte 32GB	SDSQUAR 032GGN6MA	1	Reichelt	7,95	7,95
USB Hub	DESKHUB 60- SW	1	Reichelt	6,00	6,00
HDMI Adapter Micro HD- MI	DELOCK 65391	1	Reichelt	5,95	5,95
Filament für 3D Drucker		170 g			

Tabelle E.3.: Bauteilliste

Beschreibung	Bestell- nummer	Menge	Zulieferer	Preis in Euro	Gesamt in Euro
Tastatur mit Mauspad	LOGITECH K400PRO	1	Reichelt	29,95	29,95
USB A USB C Kabel	GOOBAY 55467	1	Reichelt	2,40	2,40
Kühlgehäuse Raspberry Pi passiv	2140237 - 62	1	Conrad	15,49	15,49
Jumper Kabel	096853 - 62	1	Conrad	2,79	2,79
Isolierband			Reichelt		
Schrauben M2.5 20 mm		4			
Schrauben M3 12 mm		7			
Unterlegscheiben für M3 Schrauben		14			
Pfostenstecker, 40-polig, mit Verriegelung, gew.	PSL 40W	1	Reichelt	0,49	0,49
Universalkoffer	8519544	1	Hornbach	17,95	17,95
<b>Zubehör</b>					
Messleitung 2 mm rot 15 cm	1385668 - 62	2	Conrad	2,49	4,98
Messleitung 2 mm grün 15 cm	1385671 - 62	2	Conrad	2,49	4,98
Messleitung 2 mm blau 15 cm	1385669 - 62	1	Conrad	2,49	2,49
Messleitung 2 mm schwarz 15 cm	1385667 - 62	2	Conrad	2,49	4,98
Messleitung 2 mm gelb 15 cm	1385670 - 62	1	Conrad	2,49	2,49
Messleitung 2 mm rot 30 cm	1385676 - 62	1	Conrad	2,49	2,49
Messleitung 2 mm schwarz 30 cm	1385675 - 62	1	Conrad	2,49	2,49
Adapterstecker, 2 mm Stecker / 4 mm Buchse, rot	MZS 2 RT	2	Reichelt	1,45	2,90
Adapterstecker, 2 mm Stecker / 4 mm Buchse, schwarz	MZS 2 SW	2	Reichelt	1,45	2,90
Adapterstecker, 4 mm Stecker / 2 mm Buchse, rot	MZS 4 RT	2	Reichelt	2,30	4,60
Adapterstecker, 4 mm Stecker / 2 mm Buchse, schwarz	MZS 4 SW	2	Reichelt	2,30	4,60
SUMME					266,90

## F. Github

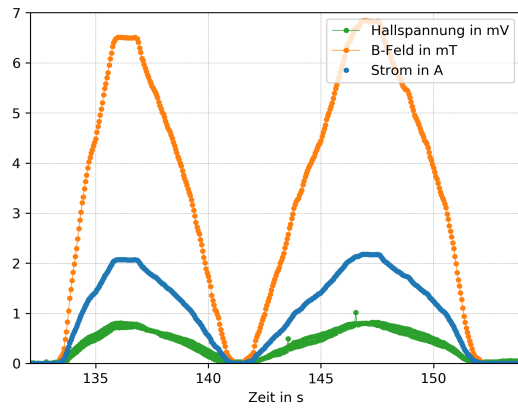
Die Dokumente dieser Arbeit und das Softwarepaket können unter dem Link <https://github.com/GuenterQuast/PhyPiDAQ> heruntergeladen werden. Weiterentwicklungen werden ebenfalls dort veröffentlicht.

## G. Anhang Messergebnisse Halleffekt

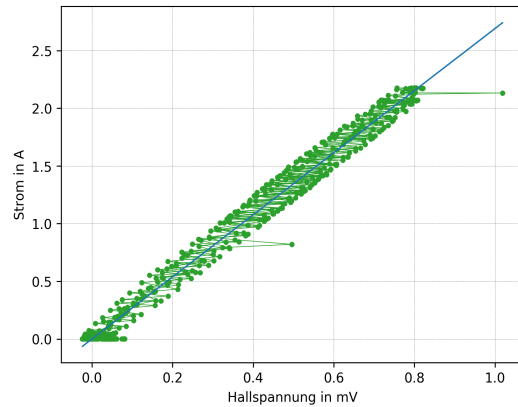
In der Abbildung [G.9](#) sind die Rohdaten der Halleffekt-Messung dargestellt. Es ist eine deutliche Störung zu sehen, obwohl bereits ein RC-Tiefpass mit  $R = 10\text{ k}\Omega$  und  $C = 1\text{ }\mu\text{F}$  verbaut ist, welcher eine Grenzfrequenz von  $f_G = 15,9\text{ Hz}$  besitzt. Nach Mittelung benachbarter Messwerte gemäß  $U_{i,mid} = \frac{U_i + U_{i+1}}{2}$ , wobei  $i$  den jeweiligen Messpunkt beschreibt, ist die Störung größtenteils kompensiert. Der zeitliche Abstand zweier Messpunkte beträgt  $T = 50\text{ ms}$ , sodass die Frequenz demnach ungefähr  $20\text{ Hz}$  beträgt. Die Störungen könnten mit einem Tiefpass mit einer niedrigeren Grenzfrequenz weiter reduziert werden, sodass diese Mittelung eventuell nicht mehr nötig ist. Dies wird aber nicht weiter untersucht, da die Mittelung bereits zufriedenstellende Ergebnisse mit sich bringt. Weiter sind in Abbildung [G.9](#) zwei Messwerte zu erkennen, welche sich deutlich von den benachbarten unterscheiden. Die Abweichung zum Verlauf der anderen Werte ist hierbei so groß und die Menge der mit Abweichungen behafteten Messwerte sehr klein im Vergleich zur gesamten Messreihe, dass davon ausgegangen werden kann, dass diese Messwerte durch Störungen verursacht wurden, welche hier nicht näher untersucht werden. Aus diesem Grund werden diese zwei Messpunkte für die finalen Diagramme in Abbildung [G.11](#) entfernt.

Zur Untersuchung, ob die Abweichungen der Strom-Spannungskennlinie einen Drift als Ursache haben, wurde das Verhältnis  $\frac{\text{Hallspannung}}{\text{Spulenstrom}}$  gegen die Zeit aufgetragen (Abb. [G.11 \(c\)](#)). Es ist ein leichter Trend, dass das Verhältnis mit der Zeit kleiner wird, zu sehen. Dieser Drift könnte auf eine Erwärmung der Spule zurückzuführen sein. Die Messung sollte daher mit kleineren Spulenströmen durchgeführt werden, oder schneller, sodass die Erwärmung geringer ist und der systematische Fehler reduziert wird. Da der Fehler jedoch klein ist, wird auf eine erneute Messung verzichtet.



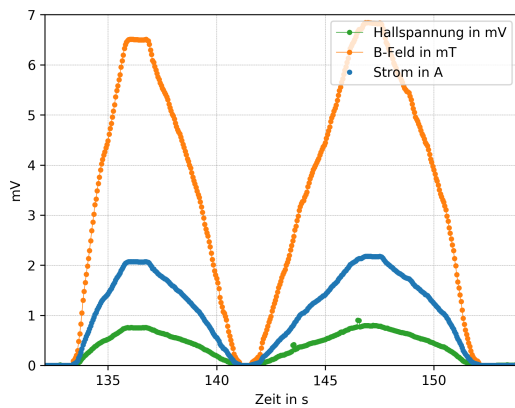


(a) Zeitlicher Verlauf von Strom, Hallspannung und berechnetem Magnetfeld

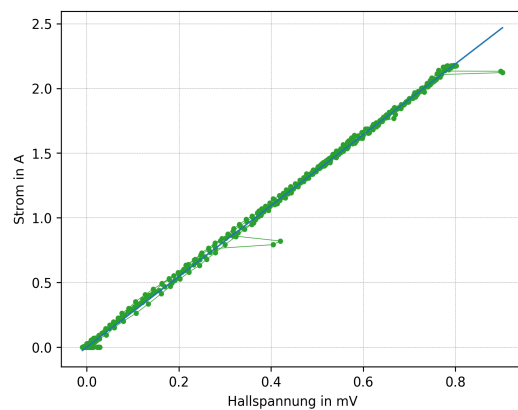


(b) Strom-Spannungs-Kennlinie

**Abbildung G.9.: Halleffekt, Rohdaten**

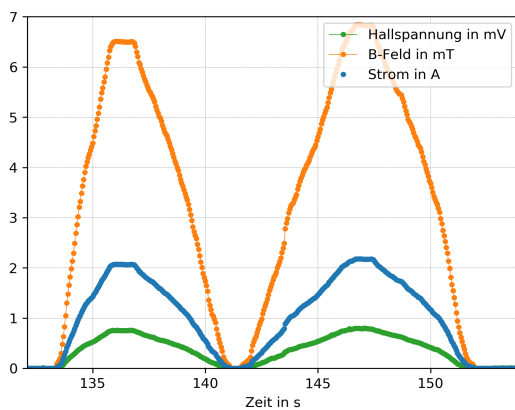


(a) Zeitlicher Verlauf von Strom, Hallspannung und berechnetem Magnetfeld

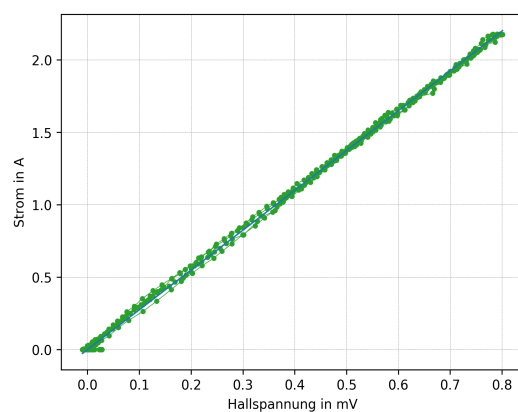


(b) Strom-Spannungs-Kennlinie

**Abbildung G.10.: Halleffekt, Mittelung benachbarter Messwerte**



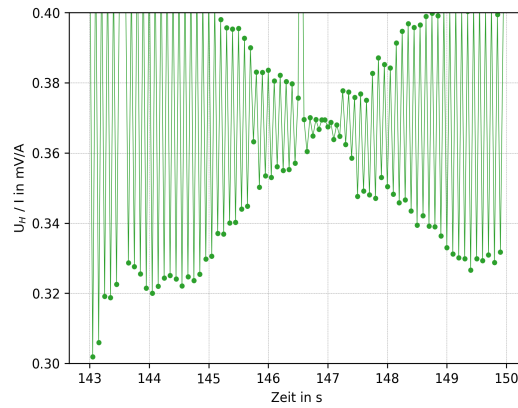
(a) Zeitlicher Verlauf von Strom, Hallspannung und berechnetem Magnetfeld



(b) Strom-Spannungs-Kennlinie

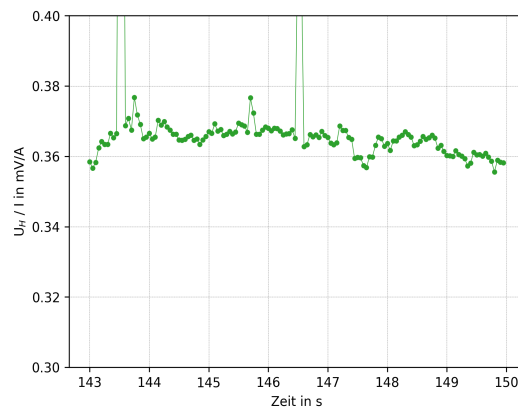
**Abbildung G.11.: Halleffekt, Mittelung benachbarter Messwerte und Entfernen der Ausreißer**





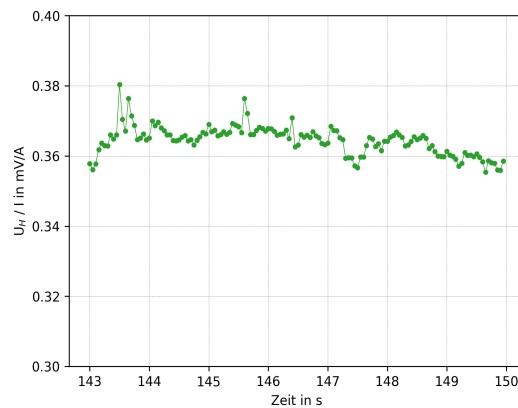
(c) zeitlicher Verlauf des  
Spannungs-Strom-Verhältnisses

**Abbildung G.9: Halleffekt, Rohdaten**



(c) zeitlicher Verlauf des  
Spannungs-Strom-Verhältnisses

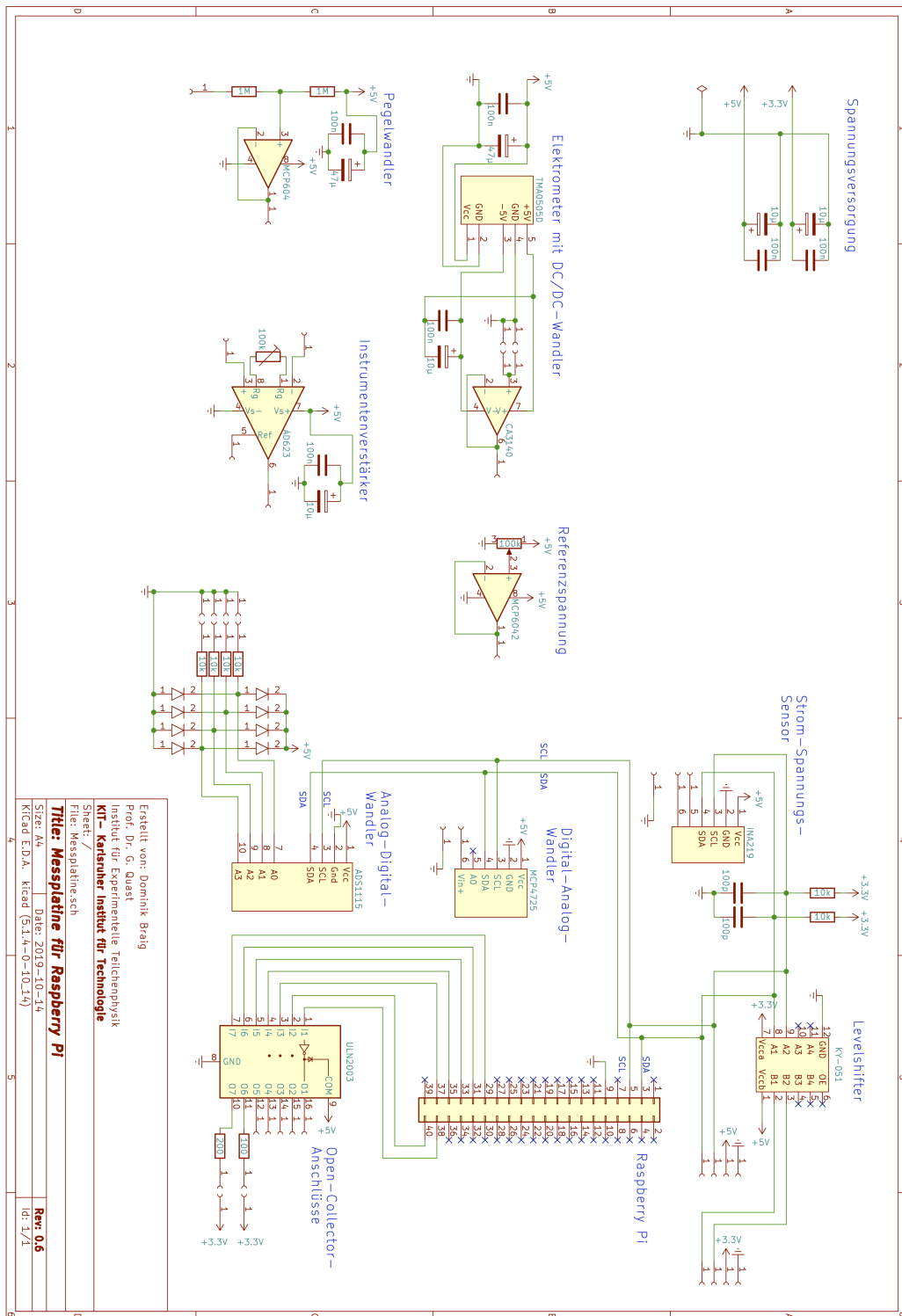
**Abbildung G.10: Halleffekt, Mittelung  
benachbarter Messwerte**



(c) zeitlicher Verlauf des  
Spannungs-Strom-Verhältnisses

**Abbildung G.11: Halleffekt, Mittelung  
benachbarter Messwerte und Entfernen  
der Ausreißer**

## H. Schaltplan



Erstellt von: Dominik Baig  
 Prof. Dr. G. Quast  
 Institut für Experimentelle Teilchenphysik  
 KIT – Karlsruher Institut für Technologie

Sheet: /  
 Titel: Messplatine für Raspberry Pi  
 Date: 2019-10-14  
 Rev: 0.6

Size: A4  
 Kicad E.D.A. Kicad (5.14.0-10.14)

Rev: 0.6  
 10/1/1

# Literatur

- [1] VNC. URL: <https://www.realvnc.com/> (besucht am 21.11.2019).
- [2] *Wires free icon*. o.D. URL: [https://www.flaticon.com/free-icon/wires\\_649789](https://www.flaticon.com/free-icon/wires_649789) (besucht am 21.11.2019).
- [3] Multiverso Chicote. *Raspberry Pi 3 Icon*. o.D. URL: [https://www.clipartkey.com/view/iiohwJh\\_raspberry-pi-3-icon/](https://www.clipartkey.com/view/iiohwJh_raspberry-pi-3-icon/) (besucht am 21.11.2019).
- [4] Joachim Federau. *Operationsverstärker : Lehr- und Arbeitsbuch zu angewandten Grundsaltungen*. Wiesbaden, 2017. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-16373-0>.
- [5] Texas Instruments. *ADS111x Ultra-Small, Low-Power, I2C-Compatible, 860-SPS, 16-Bit ADCs With Internal Reference, Oscillator, and Programmable Comparator*. 2009. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1114.pdf> (besucht am 13.12.2019).
- [6] Texas Instruments. *INA219 Zero-Drift, Bidirectional Current/Power Monitor With I2C Interface*. 2008. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina219.pdf> (besucht am 13.12.2019).
- [7] Microchip. *MCP601/602/603/604 2.7V to 5.5V Single Supply CMOS Op Amps*. 2000. URL: [http://www.ee.ic.ac.uk/pcheung/teaching/E2\\_experiment/MCP604.pdf](http://www.ee.ic.ac.uk/pcheung/teaching/E2_experiment/MCP604.pdf) (besucht am 13.12.2019).
- [8] Microchip. *MCP6041/2/3/4 600 nA, Rail-to-Rail Input/Output Op Amps*. 2001. URL: [https://www.dexsilicium.com/Microchip\\_MCP6041.pdf](https://www.dexsilicium.com/Microchip_MCP6041.pdf) (besucht am 13.12.2019).
- [9] Microchip. *MCP4725 12-Bit Digital-to-Analog Converter with EEPROM Memory in SOT-23-6*. 2009. URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/22039d.pdf> (besucht am 13.12.2019).
- [10] Traco Power. *DC/DC Converters TMA Series, 1 Watt*. 2018. URL: <https://www.renesas.com/eu/en/www/doc/datasheet/ca3140-a.pdf> (besucht am 13.12.2019).
- [11] Renesas. *CA3140, CA3140A 4.5MHz, BiMOS Operational Amplifier with MOSFET Input/Bipolar Output*. 2005. URL: <https://www.renesas.com/eu/en/www/doc/datasheet/ca3140-a.pdf> (besucht am 13.12.2019).
- [12] Texas Instruments. *TXB0104 4-Bit Bidirectional Voltage-level Translator With Automatic Direction Sensing and 15-kV ESD Protection*. 2006. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/txb0104.pdf> (besucht am 13.12.2019).
- [13] Leonhard Stiny. *Grundwissen Elektrotechnik und Elektronik : Eine leicht verständliche Einführung*. Wiesbaden, 2018. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-18319-6>.
- [14] Daniel Braun. *Voltage follower with 4 clamps*. 2007. URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Voltage\\_follower\\_4clamp.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Voltage_follower_4clamp.svg) (besucht am 21.11.2019).
- [15] Daniel Braun. *Differential Amplifier*. 2007. URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Differential\\_Amplifier.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Differential_Amplifier.svg) (besucht am 21.11.2019).
- [16] wdw. *Circuit Diagram of an Instrumentation Amplifier (InAmp) with three OpAmp's*. 2009. URL: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Instrumentation\\_Amplifier\\_3OpAmp.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Instrumentation_Amplifier_3OpAmp.svg) (besucht am 21.11.2019).

- [17] Scherzo. *Eingangsschutzschaltung*. 2013. URL: <https://www.physikerboard.de/topic,34457,-eingangsschutzschaltung.html> (besucht am 13.12.2019).
- [18] Frederick Lessmann. *Mikro-Energieversorgung ohne Batterie und Kabel, Lichttechnisches Institut (LTI), KIT*. 2018. URL: [https://www.sek.kit.edu/downloads/180320\\_Datenblatt\\_Mikro-Energieversorgung\\_DE\\_Druckfreigabe.pdf](https://www.sek.kit.edu/downloads/180320_Datenblatt_Mikro-Energieversorgung_DE_Druckfreigabe.pdf) (besucht am 19.12.2019).
- [19] Robert Resnick Jearl Walker David Halliday. *Fundamentals of Physics*. 10th Edition. Wiley, 2007. ISBN: 978-1-11823072-5.
- [20] Y. Sumino u. a. "Review of Particle Physics". In: *Phys. Rev. D* 98 (3 2018), S. 030001. DOI: [10.1103/PhysRevD.98.030001](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.98.030001) URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.98.030001>
- [21] F. Herrmann und M. Pohlig R. von Baltz. *Didaktik der Physik, Atlanten der Physik (115): Der photoelektrische Effekt*. Praxis Magazin, PdN-PhiS 6/58. Jg. 2009, S 47-49.
- [22] Jean-Marc Irazabal und Steve Blozis. *I2C MANUAL*. 2003. URL: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN10216.pdf> (besucht am 14.01.2019).
- [23] Rajan Arora. *I2C Bus Pullup Resistor Calculation*. 2015. URL: <http://www.ti.com/lit/an/slva689/slva689.pdf> (besucht am 19.12.2019).
- [24] Gert van Loo. *GPIO pads control*. 2012. URL: <https://matt.ucc.asn.au/mirror/electron/GPIO-Pads-Control2.pdf> (besucht am 18.12.2019).
- [25] Joachim Federau. *Operationsverstärker : Lehr- und Arbeitsbuch zu angewandten Grundsaltungen*. Wiesbaden, 2017. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-16373-0>.
- [26] Rüdiger Follmann. *Das Raspberry Pi Kompendium*. Berlin, Heidelberg, 2018. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-58144-5>.