
Gaskühlung für den Spurdetektor des P2-Experiments

von

Fabian Elmar Alain Greiner



Bachelorarbeit in Physik
vorgelegt dem Fachbereich Physik,
Mathematik und Informatik (FB 08)
der Johannes Gutenberg-Universität Mainz
am 14. Oktober 2019

1. Gutachter: Prof. Dr. Niklaus Berger
2. Gutachter: Prof. Dr. Michael Ostrick

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

Mainz, den 14. Oktober 2019 [Unterschrift]

Fabian Elmar Alain Greiner
Institut für Kernphysik
Johann-Joachim-Becherweg 45
Johannes Gutenberg-Universität
D-55128 Mainz
`fgreiner@students.uni-mainz.de`

*„Das Bestreben, das Universum zu verstehen,
hebt das menschliche Leben ein wenig über
eine Farce hinaus und verleiht ihm einen
Hauch von tragischer Würde.“*

-Stephen Weinberg

Zusammenfassung

Das P2-Experiment ist ein Präzisionstest des Standardmodells der Teilchenphysik. Das Experiment soll den elektroschwachen Mischungswinkel bei niedrigem Impulsübertrag in der Streuung von polarisierten Elektronen an einem unpolarisiertem Protonentarget aus flüssigen Wasserstoff messen. Mithilfe eines Spurdetektors werden die Trajektorien der Elektronen bestimmt und so der Impulsübertrag gemessen.

Die verwendeten „High Voltage Monolithic Active Pixel Senors“ (HV-MAPS) haben eine maximale Arbeitstemperatur von $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ und erzeugen eine Leistung von $200 - 400 \frac{\text{mW}}{\text{cm}^2}$. Dadurch erhitzen sich die HV-MAPS und müssen gekühlt werden. Der Spurdetektor wird mit Heliumgas abgekühlt und hat dafür ein Kanalsystem, durch die das Helium fließen kann. Für das testen der Kühlung wird ein Prototyp des Spurdetektors, der Heizstreifen statt HV-MAPS hat, verwendet.

Diese Arbeit untersucht die Kühlung am Prototypen in einer Box aus Polymethylmethacrylat. Zuerst wurde die Box mit Hilfe der Software Autodesk Inventor konstruiert und in der Werkstatt des Institutes für Physik hergestellt. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Box zum einen möglichst gasdicht wird und zum anderen auf die Seiten gestellt werden kann. In der Vakuumwerkstatt des Institut für Kernphysik wurde die Dichtigkeit überprüft und nach einigen Verbesserungen eine Dichtigkeit von $8.1 \times 10^{-6} \frac{\text{mbar}\cdot\text{L}}{\text{s}}$ erreicht.

In die fertige Box wurde der Spurdetektor montiert und anschließend sowohl mit Luft- als auch mit Heliumkühlung untersucht. Aufgrund des Aufbaus konnte am Ende der Bachelorarbeit nicht die Werte für die Spannung und den Heliumfluss aus der Simulation eingestellt werden. Jedoch sehen die Messungen sehr gut aus, sodass die Werte aus der Simulation vielversprechend erscheinen.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	iv
1. Einleitung	1
2. P2-Experiment	2
2.1. Motivation	2
2.2. Elektroschwacher Mischungswinkel	3
2.3. Helizität	4
2.4. Impulsübertrag	5
2.5. HV-MAPS	6
2.5.1. Kühlung der HV-MAPS	8
3. Theoretische Grundlagen	10
3.1. Dichte	10
3.2. Spezifische Wärmekapazität und Wärmespeicherzahl	10
3.3. Wärmeleitfähigkeit	11
3.4. Arithmetisches Mittel	12
3.5. Quantil	12
3.6. Flussmessung mit Rotameter	13
4. Versuchsaufbau	15
4.1. Spurdetektor	15
4.1.1. Gasführung	15
4.1.2. Befestigung	16
4.2. Gasfluss	17
4.3. Stromquelle und Datenauslese	18
4.4. Gesamtaufbau	20
4.4.1. Messung mit Luft	20

4.4.2. Messung mit Helium	21
5. Gasbox für den Prototypen des Spurdetektormodul	23
5.1. Design	23
5.1.1. Kragen	24
5.1.2. Boden	24
5.1.3. Deckel	25
5.1.4. Wände	26
5.1.5. Panel	26
5.1.6. Abstandshalter	26
5.2. Anschlüsse	26
5.2.1. Einlassventil und Auslassventil	27
5.2.2. Gasanschlüsse	28
5.2.3. Multipole	28
5.3. Chloroform	29
5.4. Dichtigkeit	30
6. Ergebnisse und Analyse	33
6.1. Messung der Raumtemperatur	34
6.2. Langzeitmessung mit Luft	35
6.2.1. Aufheizen	35
6.2.2. Aufheizung und Abkühlung	38
6.3. Messung ohne Box mit Luftfluss	38
6.4. Kühlung mit Luft in der Box	39
6.4.1. Ausrichtung: Liegend	40
6.4.2. Ausrichtung: Stehend	41
6.4.3. Ausrichtung: Seitlich	43
6.5. Fazit für die Luftmessung mit der Box	48
6.6. Erste Messung mit Helium	50
6.6.1. Vergleich der Heliumkühlung mit der Luftkühlung	51
6.7. Heliummessung mit innerem Fluss	53
6.8. Maximalwerte für die Heliummessung	55
6.9. Anmerkung zur Spannung	56
6.10. Fazit für die Messung mit Helium	58

7. Fazit und Ausblick	59
A. Anhang	61
A.1. Graphiken	61
A.1.1. Langzeitmessung mit Luft	61
A.1.2. Messung mit Luftfluss außerhalb der Box	66
A.1.3. Messung mit Luftfluss in der Box	67
A.1.4. Erste Messungen mit Helium in der Box	78
A.1.5. Vergleichsmessungen - Helium mit Luft	82
A.1.6. Hoher Fluss - Helium	85
A.1.7. Heliummessung mit innerem Fluss	86
A.1.8. Hohe Spannung - Helium	87
A.2. Technische Zeichnungen	88
A.3. Aufbau für Messung mit Helium	95
B. Literaturverzeichnis	97
C. Danksagung	99
Tabellenverzeichnis	100
Abbildungsverzeichnis	101

1. Einleitung

Ein natürliches Gefühl für die Objekte um uns herum besitzt jeder Mensch. Aber wie sieht es aus, wenn man sich anschaut, wie diese Objekte beschaffen sind, aus was sie bestehen? Man kommt in die Welt der „kleinsten Bauteile“, der sogenannten Elementarteilchen. Dafür haben die wenigsten Menschen ein natürliches Gefühl. Doch Kraft seines logischen Verstandes konnte sich der Mensch in den letzten Jahrhunderten mehr und mehr einen Überblick verschaffen und schuf in kleinen Schritten das Standardmodell der Elementarteilchenphysik (SM). Dieses beschreibt alle uns bekannten Elementarteilchen und drei von vier Wechselwirkungen zwischen ihnen. Die starke, schwache und elektromagnetische Wechselwirkung. Einzig die Gravitation wird nicht durch das SM erklärt.

Allerdings ist vieles am SM noch unbefriedigend, so zum Beispiel, dass die Anzahl der freien Parameter mit mindestens 18 hoch ist. Diese werden nicht vom SM vorhergesagt und müssen von Experimenten ermittelt werden. Ein solcher Parameter ist der elektroschwache Mischungswinkel. Durch die Bestimmung des elektroschwachen Mischungswinkel ergeben sich möglicherweise Hinweise auf neue Physik. Dieser soll vom P2-Experiment mit unerreichter Genauigkeit gemessen werden.

In dem Experiment werden High Voltage Monolithic Active Pixel Sensoren (HV-MAPS) an mehreren Spurdetektormodulen verwendet. Die ideale Arbeitstemperatur liegt um die 60 °C, weshalb sie während der Messung auf diese Temperatur gekühlt werden. Die Bachelorarbeit befasst sich mit der Kühlung eines Prototypen des Spurdetektormoduls und ist untergliedert in zwei einleitenden Kapiteln 2 und 3, in denen das P2-Experiment vorgestellt wird und benötigte theoretische Grundlagen erörtert werden, der Beschreibung der Versuchsaufbauten in Kapitel 4, dem anschließend der Hauptteil der Bachelorarbeit in den Kapiteln 5 und 6 und zu guter Letzt eine Zusammenfassung welche zu lesen ist in Kapitel 7.

2. P2-Experiment

Zurzeit wird in Mainz der „Mainz Energy-Recovering Superconducting Accelerator“ (MESA) gebaut. Der Elektronenbeschleuniger MESA wird seinen Elektronenstrahl zwei Experimenten zur Verfügung stellen, dem „MESA Gas Internal target eXperiment“ (MAGIX) und dem P2-Experiment¹. Der von MESA bereitgestellte Strahl stellt für P2 eine Energie von $E_{beam} = 155 \text{ MeV}$ und einen Elektronenstrom von $I_{beam} = 150 \mu\text{A}$ bereit [2]. Außerdem kann der Strahl mit einer Frequenz von 1 kHz die Helizität ändern. Die Bauarbeiten an MESA sollen 2021 vollendet sein.

Das P2-Experiment soll bei einem geringen Impulsübertrags Q^2 den elektroschwachen Mischungswinkel² Θ_w mit bisher unerreichter Genauigkeit bestimmen. Dazu beschießt man im P2-Experiment flüssigen Wasserstoff (D_2) mit dem polarisierten Elektronenstrahl von MESA. Der Elektronenstrom wird darauf hin von Cherenkov-Detektoren gemessen. Das Spurdetektormodul soll dabei den mittleren Impulsübertrag messen.

2.1. Motivation

Mit dem P2-Experiment will man den elektroschwachen Mischungswinkel bestimmen. Es gab und gibt zwar schon einige Experimente, die diesen bei verschiedenen Impulsüberträgen Q^2 gemessen haben, jedoch unterscheiden sich diese vom P2-Experiment in der Unsicherheit und dem Wert des Impulsübertrags, wie in Abbildung 2.1 zu sehen ist. Die Kombination der geringen Unsicherheit und des kleinen Impulsübertrags im P2-Experiment, macht das Experiment so besonders. Dies wird durch eine sehr hohe Luminosität von $L = 2.38 \times 10^{39} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ erreicht.

¹Das P steht für „Precision test of the Standard Model of particle physics“ [1] und die 2 als das zweite Projekt in diesem Thema.

²Auch Weinberg-Winkel genannt.

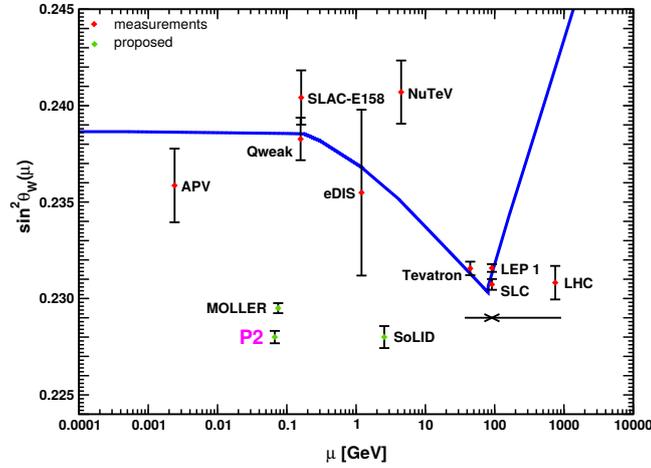


Abb. 2.1.: $\sin^2 \Theta_w$ in Abhängigkeit von der Energie. Die blaue Kurve entspricht der theoretischen Vorhersage des SM. Die grünen Punkte (zukünftige Messungen) wurden willkürlich vertikal nach unten gesetzt. Die Fehlerbalken bleiben unverändert [3].

2.2. Elektroschwacher Mischungswinkel

Bei der Vereinheitlichung von der schwachen Wechselwirkung und der Elektromagnetischen Wechselwirkung (zusammengefasst als: elektroschwache Wechselwirkung) ist der elektroschwache Mischungswinkel eine Größe in der Theorie, die in verschiedenen Zusammenhängen vorkommt und nicht von der Theorie vorhergesagt wird. Diese Größe muss also experimentell bestimmt werden. Die theoretische Vorhersage in Abbildung 2.1 wurde aus den Messungen von LEP 1 und SLC entwickelt, indem der Mittelwert der Messungen als Normierung genommen wurde.

In dieser Theorie werden die Wechselwirkungen nicht getrennt durch W^\pm , Z Bosonen (schwache Wechselwirkung) und dem Photon γ (elektromagnetische Wechselwirkung) sondern durch die $W^{1,2,3}$ und B Bosonen vermittelt. Letztere vermischen sich dabei zu Photon γ und Z Boson wie folgt:

$$\begin{pmatrix} \gamma \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \Theta_w & \sin \Theta_w \\ -\sin \Theta_w & \cos \Theta_w \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B \\ W^3 \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

[4]. Dies entspricht einer Rotationsmatrix im zweidimensionalen Raum, weswegen man, bei Θ_W , von einem Winkel spricht - dem elektroschwachen Mischungswinkel. Da dieser Winkel in vielen (mathematischen) Erklärungen zur Beschreibung verschiedener (physikalischer) Situationen auftaucht [4], eignet sich diese Größe hervorragend für einen Präzisionstest der elektroschwachen Wechselwirkung, demzufolge auch für das Standardmodell selbst.

2.3. Helizität

Unter Parität ist eine Symmetrieeigenschaft unter einer Raumspiegelung gemeint; Wirkungen der schwachen Wechselwirkung (also auch die elektroschwache Wechselwirkung) verletzen diese Symmetrieeigenschaft (P-Verletzung). Konkret bedeutet das, in diesem Experiment, dass sie, einen unterschiedlichen Einfluss auf die verschiedenen Helizitäten hat.

Die Helizität wird durch die Formel:

$$h \equiv \frac{\vec{s} \cdot \vec{p}}{|\vec{s}| \cdot |\vec{p}|} \quad (2.2)$$

definiert [4]. Sie ist also eine Projektion vom Spin \vec{s} auf den Impuls \vec{p} . Wie in Kapitel 2 erwähnt, kann der Elektronenstrahl von MESA die Helizität der Elektronen ändern. Was nach der Formel 2.2 gleichbedeutend mit der Änderung des Spins ist, da die Energie, also demzufolge auch der Impuls, des Strahles nicht geändert wird. Man hat somit entweder eine positive (*linkshändig*) oder negative (*rechtshändig*) Helizität der Elektronen, die auf das ${}^1\text{H}_2$ -Target treffen.

Die elastische Streuung vom Elektron am Proton kann entweder durch die elektromagnetische Wechselwirkung oder die schwache Wechselwirkung vonstatten gehen, zu sehen als Feynmann Diagramme in Abbildung 2.2. Die schwache Wechselwirkung wird durch den Austausch eines Z Boson beschrieben und die elektromagnetische Wechselwirkung durch den eines Photon γ [3].

Dabei wird die totale Streuung von der elektromagnetischen Wechselwirkung dominiert. Jedoch reicht der Anteil der schwachen Wechselwirkung aus, um ein Asymmetrie zu beobachten. Diese Asymmetrie ist wie folgt definiert:

$$A^{PV} \equiv \frac{N^+ - N^-}{N^+ + N^-} \quad (2.3)$$

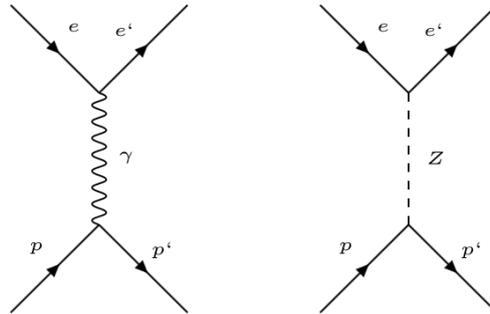


Abb. 2.2.: Feynman Diagramme für eine elastische Elektron-Proton Streuung. Links durch ein Photon, rechts durch ein Z-Boson. Zeitachse von links nach rechts.

Dabei steht A^{PV} für die P-Verletzung und N^\pm für die Anzahl der gemessenen Elektronen, mit jeweiliger positiver oder negativer Helizität. Es wird, bei einer Messdauer von $1 \times 10^4 \text{ h}^3$, eine Asymmetrie von

$$\langle A^{PV} \rangle = (39.94 \pm 0.56) \text{ ppb} \quad (2.4)$$

erwartet, mit einer relativen Ungenauigkeit von $1.4\% [2]$.

2.4. Impulsübertrag

Um den gemessenen schwachen Mischungswinkel mit der theoretischen Vorhersage aus Abbildung 2.1 zu vergleichen, muss der Impulsübertrag Q^2 bekannt sein. Dazu werden die Spurdetektoren, deren Kühlung in dieser Arbeit untersucht wird, verwendet. Wie in Abbildung 2.3 sichtbar, besitzt das Experiment eine zylinderförmigen Geometrie. Um die Mantelfläche des Zylinders werden zweimal 4 Spurdetektormodule zu gleichen Abständen senkrecht zur Mantelfläche angebracht, sodass man insgesamt 8 Spurdetektoren rings um das Experiment hat.

Die Detektoren nutzen die High Voltage Monolithic Active Pixel Senors (HV-MAPS) [10] um die Durchgänge der Elektronen zu erfassen, die hinterher von den Cherenkov-Detektoren gemessen werden. Aus den Treffern kann man dann die Trajektorie der

³Die Messdauer hat dabei nur einen Einfluss auf die Unsicherheit und nicht auf die Asymmetrie selbst.

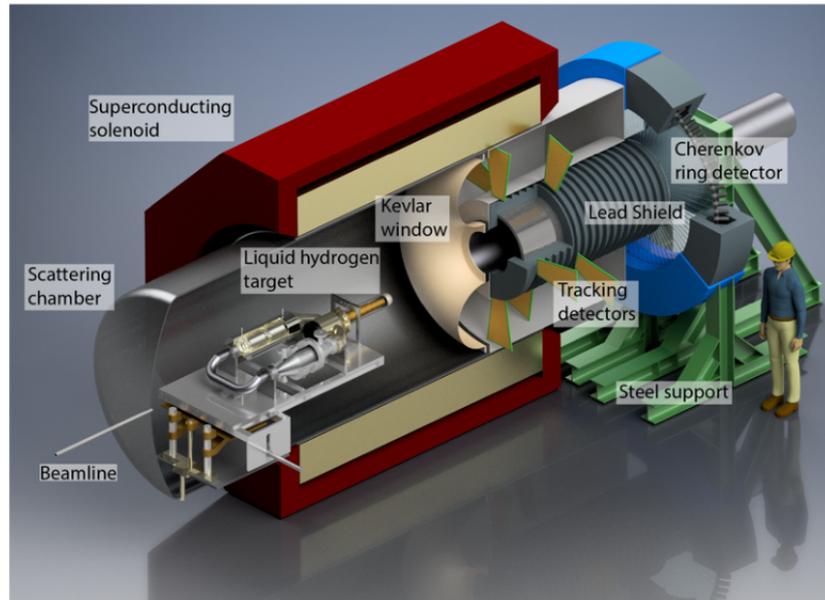


Abb. 2.3.: CAD Zeichnung des P2-Aufbau. Die „Tracking detectors“ entsprechen den Spurdetektoren [2].

Elektronen mit der Krümmung im Magnetfeld rekonstruieren und damit auf ihren Impuls schließen. Mithilfe der Impulserhaltung vor und nach der Streuung im Target, kann man dann den Impulsübertrag auf das Proton rekonstruieren.

2.5. HV-MAPS

Für das Mu3e Experiment wurden die HV-MAPS entwickelt und untersucht [9][5][6]⁴. Diese Sensoren eignen sich wegen ihrer sehr guten Auflösung und geringen Materialdicke ausgezeichnet für das P2-Experiment. Vor allem wegen ihrer geringen Materialdicke eignen sie sich, da man in dem Experiment Vielfachstreuung verhindern will. Die Dicke der Sensoren beläuft sich auf ungefähr 50 μm [9] und das mitsamt der Ausleseelektronik. Des weiteren sind die Sensoren strahlungsresistent und schnell beim Auslesen der Signale. Zwei nötige Eigenschaften, um die hohe Rate an Elektronen handhaben zu können, sowie der hohen Strahlung, die im $l\text{H}_2$ -Target⁵ entsteht, standhalten zu können.

⁴Verschiedene Arbeiten zu diesen Themen liegen auf der Internetseite <https://www.psi.ch/en/mu3e/theses> vor.

⁵Ungefähr 10^3 Photonen γ pro e^-

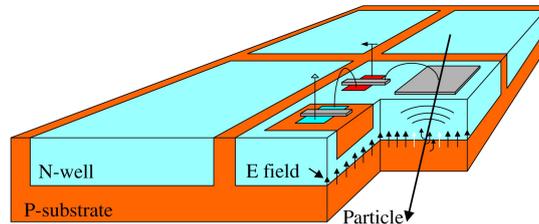
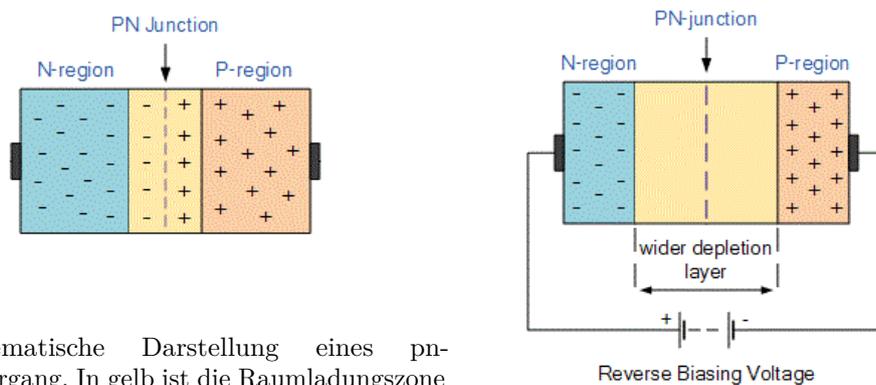


Abb. 2.4.: Schematische Darstellung von vier HV-MAPS. Die vier türkisen Wannen stellen je einen Pixel dar. [10]

Der Sensor besteht aus Silizium mit einer n-dotierten⁶ Wanne in einem p-dotierten⁷ Substrat, wie in Abbildung 2.4 dargestellt. Am p-n Übergang entsteht eine Raumladungszone, in der keine freien Ladungen vorliegen (Abbildung 2.5a). Legt man eine Spannung (bei den HV-MAPS 90 V [2]) in Sperrrichtung an [4], wird die Raumladungszone größer und der Übergang kann als Detektor genutzt werden kann (Abbildung 2.5b). Durchquert nun ein geladenes Teilchen (im P2-Experiment ein Elektron) die Raumladungszone, entstehen dabei Elektron-Loch Paare, die durch die Potentialdifferenz getrennt werden und es entsteht ein Strom, der als Signal gemessen wird.



(a) Schematische Darstellung eines pn-Übergang. In gelb ist die Raumladungszone („depletion layer“) dargestellt.

(b) PN-Übergang in Sperrschaltung.

Abb. 2.5.: Abbildungen entnommen und modifiziert aus [7].

⁶Bei einer n-Dotierung werden Donatoren im Element implementiert, also solche Elemente, die ein Valenzelektron zur Verfügung stellen.

⁷Bei der p-Dotierung werden Akzeptoren eingefügt, also Elemente, denen ein Elektron zum auffüllen der äußeren Schale fehlt (es entstehen sogenannte „Löcher“).

Die Spurdetektormodule, die aus 632 HV-MAPS bestehen, werden später im Experiment eine Leistung von 100 bis 400 mW cm⁻² erzeugen [3], welche direkt in Wärme umgewandelt wird. Da die Detektoren eine maximale Arbeitstemperatur von 70 °C haben und bei 140 °C zerstört werden, müssen die Detektoren gekühlt werden.

2.5.1. Kühlung der HV-MAPS

Zur Kühlung der Detektoren wird man gasförmiges Helium benutzen [3]. Zum einen, weil Helium eine geringe Dichte hat, was die Streuung der Elektronen am Gas minimiert, und zum anderen weil es eine hohe Wärmeleitfähigkeit hat. Da in der Bachelorarbeit mit Luft und später mit Helium gekühlt wurde, wurden einige wichtige Eigenschaften von Helium und Luft in folgender Tabelle zusammengefasst:

	Helium	Luft
Dichte ρ [kg m ⁻³]	0.162	1.177
Wärmeleitfähigkeit κ [W m ⁻¹ K ⁻¹]	0.156	0.02623
Spezifische Wärmekapazität c [J kg ⁻¹ K ⁻¹]	5193	1007
Wärmespeicherzahl s [J m ⁻³ K ⁻¹]	844	1185

Tab. 2.1.: Einige Eigenschaften von Helium und Luft. Werte entnommen aus [3]. Diese werden in 3 näher erläutert.

In der folgenden Abbildung 2.6, sieht man die Grundform des Detektors, und wie das Gas zwischen den zwei Ebenen des Detektors geführt wird.

Das Gas strömt links, zwischen den zwei Printed Circuit Boards (PCB) ein. Von dort fließt das Gas zu teilen zwischen den Ebenen des Detektors auf die andere Seite und von dort raus, und der Rest des Gases wird über die oxydiphenylene-pyromellitimide (im Folgenden mit Kapton bezeichnet) Streifen (oben und unten) direkt über die HV-MAPS geführt und auf der anderen Seite wieder zurück. Somit hat das Modul einen inneren und äußeren Fluss, bei der das Gas (Helium) die abgestrahlte Wärme, dank seiner hohen Wärmeleitfähigkeit, abführen kann. Eine genauere Beschreibung mitsamt Abbildungen findet sich im Abschnitt 4.1.

In der Bachelorarbeit wird das Detektormodul in einer Box aus Polymethyl-

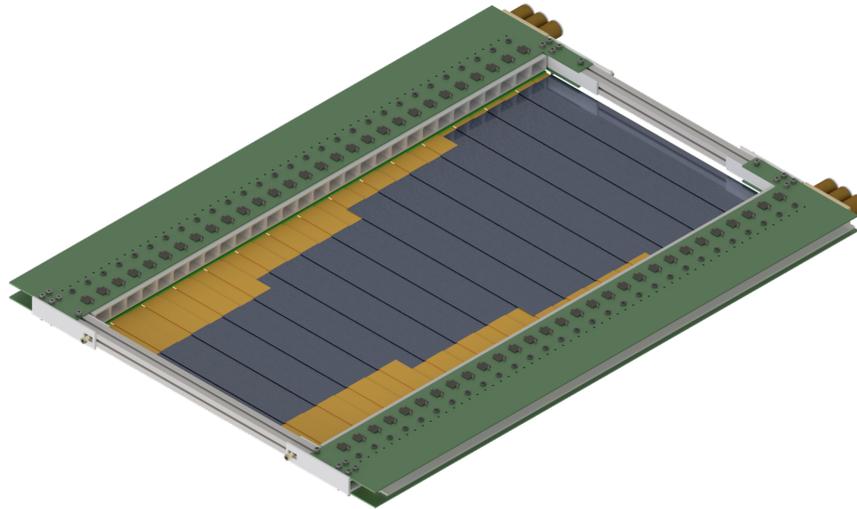


Abb. 2.6.: CAD Zeichnung des Spurdetektormoduls. Die oberen Heizstreifen wurden bei dieser Darstellung entfernt. Grün ist das PCB, gelb das Kapton, grau sind die Einlässe für das Gas zwischen obere- und unterer Ebene und schwarz die HV-MAPS [3].

methacrylat (Acrylglas⁸) befestigt, verschlossen und gekühlt. Die Ergebnisse werden am Ende der Arbeit in Kapitel 6 Analysiert. Im folgenden wird der Versuchsaufbau, Kapitel 4, und die benötigte Theorie, Kapitel 3 dazu im Detail diskutiert.

⁸Umgangssprachlich auch als Plexiglas bezeichnet.

3. Theoretische Grundlagen

Um die Ergebnisse der Bachelorarbeit zu besprechen, müssen zuerst ein paar Begrifflichkeiten erörtert werden. Alle Größen aus der Tabelle 2.1 werden als konstant angenommen, da sich ihre Werte im Experiment nur geringfügig ändern¹ und keine relevanten Auswirkung haben.

3.1. Dichte

Die Dichte ρ eines Stoffes berechnet sich aus der Masse m dieses Stoffes geteilt durch sein Volumen V :

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (3.1)$$

Im P2-Experiment soll möglichst wenig Material in der Bahn der Elektronen sein, da dies sonst zu Streuungen der Elektronen führt, und dies die Messung verfälscht, da die Elektronen entweder nicht am Detektor ankommen, oder eine falsche Trajektorie mit einem falschen Impuls rekonstruiert wird.

Wasserstoff ist mit nur $0.0900 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ das Element mit der geringsten Dichte. Helium kommt dem mit mit einer Dichte von $0.1625 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ sehr nahe, ist somit also gut geeignet für das Experiment.

3.2. Spezifische Wärmekapazität und Wärmespeicherzahl

Die spezifische Wärmekapazität c ergibt sich aus der zu- oder abgeführten Wärme ΔQ eines Stoffes dividiert durch dessen Masse m und die entsprechende Temperaturänderung ΔT :

$$c = \frac{\Delta Q}{m \cdot \Delta T}. \quad (3.2)$$

¹Je nach Größe in Abhängigkeit von Temperatur, Druck und Volumen.

Diese Formel sagt aus, wie gut oder schlecht ein Stoff thermische Energie speichern kann. Für die Kühlung wird ein Stoff gewünscht, der eine hohe spezifische Wärmekapazität hat, damit der Stoff die produzierte Wärme der Detektoren gut aufnehmen kann. Dabei nutzt man entweder die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck c_p oder die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen c_v . In dieser Arbeit wird immer ein konstanter Druck angenommen, weshalb die Größe c_p genutzt wird.

Die Wärmespeicherzahl s eines Stoffes bestimmt man mit der Multiplikation von dessen spezifischen Wärmekapazität und seiner Dichte ρ :

$$s = c \cdot \rho. \quad (3.3)$$

Schaut man dabei auf die Einheit von s , erkennt man, dass sich diese mit der Einheit von der spezifischen Wärmekapazität c im Nenner unterscheidet. Während letztere die Einheiten Kilogramm und Kelvin dort stehen hat, hat die Wärmespeicherzahl Kubikmeter und Kelvin im Nenner stehen. Die Wärmespeicherzahl gibt also an, wie gut ein Stoff Wärme pro Volumen speichern kann.

Es ist noch zu sagen, dass die Wärmespeicherzahl von Luft besser als die von Helium ist, wie in Tabelle 2.1 zu sehen, weshalb bei Helium ein größerer Volumenstrom nötig ist. Jedoch ist der Wert von Helium recht nahe an dem von Luft und es kommt noch hinzu, dass die Dichte von Helium geringer als die von Luft ist.

3.3. Wärmeleitfähigkeit

Wie der Name schon vermuten lässt, ist die Wärmeleitfähigkeit λ eine Größe zum Bemessen der Fähigkeit, wie gut ein Stoff Wärme leiten kann. Sie ist definiert als:

$$\kappa = \frac{\dot{Q} \cdot l}{A \cdot \Delta T}, \quad (3.4)$$

mit dem Wärmestrom \dot{Q} , der durchflossenen Fläche A und der zurückgelegten Strecke l . Für unsere Zwecke ist es von Vorteil, wenn die Wärmeleitfähigkeit hoch ist, da dies einen besseren Wärmestrom, also Abführung von Wärme, bedeutet.

Helium ist als Gas mit einer Wärmeleitfähigkeit von $0.156 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ ideal. Nur Wasserstoff hat mit $0.186 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ eine höhere Wärmeleitfähigkeit. Die Wärmeleitfähigkeit von Gasen die diesen Werten am nächsten kommen, sind um einen Faktor 3 kleiner, wie beispielsweise

Methan mit einer Wärmeleitfähigkeit von $0.034 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$.

3.4. Arithmetisches Mittel

Das arithmetische Mittel, im folgenden Mittelwert genannt, ist ein Begriff aus der Stochastik und beschreibt das Zentrum einer Verteilung:

$$x \equiv \frac{1}{n} \cdot \sum_i^n x_i. \quad (3.5)$$

Hierbei gibt n die Anzahl an Messungen an und x_i den i -ten Messwert. Im Zuge der Bachelorarbeit wird unter anderem die Temperatur gemessen. Man hat also eine bestimmte Anzahl von Messwerten. Bei der Temperaturmessung sind es genau 144 Messwerte, aus den 144 verschiedenen Temperatursensoren, pro Zeitintervall², die in einen Temperaturbereich liegen. Mithilfe des Mittelwerts kann man die Messwerte von relevanten Sensoren mitteln und somit auf weniger Messwerte pro Zeitintervall zurückgreifen. Dies macht die Grafiken der Messungen übersichtlicher.

Da jede Messung mit einer Unsicherheit einhergeht, gilt dies auch für den Mittelwert, diese ist wie folgt:

$$\Delta x = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_i^n (x - x_i)}. \quad (3.6)$$

3.5. Quantil

Ein Quantil ist ein Begriff aus der Statistik und ist ein Lagemaß einer Verteilung. Ein Quantil der Ordnung p (p -Quantil) gibt eine Schwelle an unter denen ein bestimmter Anteil p der Verteilung liegt. So ist beispielsweise das 0.25-Quantil der Messwert einer Verteilung welches größer als 25-Prozent der restlichen Messwerte dieser Verteilung ist. Das wohl bekannteste Quantil ist das 0.5-Quantil. Besser bekannt als Median, welcher die Verteilung gleichmäßig halbiert. In der Grafik A.47 und 6.16 wird der Median genutzt, um zu überprüfen, ob das arithmetische Mittel auch mittig liegt, da das arithmetische Mittel durch Werte die weit weg vom Zentrum liegen, verzerrt werden kann und somit ein falsches Gefühl für die Verteilung vermitteln kann. Daher ist das

²Es wurde alle 3 Sekunden 144 Messwerte aufgenommen.

0.5-Quantil ein gutes Werkzeug, um überprüfen zu können, ob das arithmetische Mittel auch tatsächlich mittig liegt.

3.6. Flussmessung mit Rotameter

Zur Messung des gesamten Volumenfluss wird unter anderem ein Rotameter von Yokogawa mit der Bezeichnung RAGN und einem maximalen Fluss von $25\,000 \frac{\text{L}}{\text{h}}$ genutzt. Für die Messung des Volumenflusses im inneren, siehe dazu Kapitel 4.1, bei der Kühlung mit Helium, wurde ein zweites Rotameter von derselben Firma, jedoch ein anderes kleineres Modell genutzt und zwar das „D1TC02300“ mit einem Maximalfluss von $2400 \frac{\text{L}}{\text{h}}$. Beide im Aufbau verwendete Rotameter benutzen eine auf Luft geeichte Anzeige. Da Helium eine andere, geringere Dichte als Luft hat, muss ein Korrekturfaktor auf den Fluss multipliziert werden, damit man die Anzeige am Rotameter verwenden kann. Dabei gilt für die Umrechnung von Helium auf Luft ein Faktor $f_L = 0.37$. Dieser Faktor ist dimensionslos und berechnet sich aus dem Verhältnis der Dichte von Luft, Helium und der Dichte des Schwebekörpers. Das Material des Schwebekörpers im Rotameter ist Polytetrafluorethylen (PTFE) [12] und hat eine Dichte von $2200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$:

$$f_L = \sqrt{\frac{(\rho_{\text{schwebe}} - \rho_{\text{Luft}}) \cdot \rho_{\text{Helium}}}{(\rho_{\text{schwebe}} - \rho_{\text{Helium}}) \cdot \rho_{\text{Luft}}}}. \quad (3.7)$$

Da die Dichte des Schwebekörpers $\rho_{\text{schwebe}} = 2200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ um ein vielfaches größer als die von Luft oder Helium ist, kann man Formel 3.7 vereinfachen zu:

$$f_L = \sqrt{\frac{\rho_{\text{Helium}}}{\rho_{\text{Luft}}}}.$$

Die Werte für Luft und Helium aus Tabelle 2.1 eingesetzt ergibt:

$$f_L = \sqrt{\frac{0.162 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{1.177 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}}$$

$$f_L \approx 0.371. \quad (3.8)$$

Für die Umrechnung von Luft auf Helium, gilt es den Kehrwert des Bruches unter der Wurzel zu nehmen.

$$f_H = \sqrt{\frac{\rho_{Luft}}{\rho_{Helium}}}$$
$$f_H \approx 2.695. \quad (3.9)$$

Will man nun einen Heliumfluss von Beispielsweise $16\,000 \frac{\text{L}}{\text{h}}$ durch das Rotameter schicken, muss man diesen Fluss mit dem Faktor $f_L = 0.37$ multiplizieren und erhält $4800 \frac{\text{L}}{\text{h}}$. Dies ist die Anzeige am Rotameter, die eingestellt werden muss, um einen Heliumfluss von $16\,000 \frac{\text{L}}{\text{h}}$ zu bekommen.

Die berechneten Korrekturfaktoren aus Formel 3.6 kommen gerundet genau auf die Literatur Werte von $f_{L_{gesamt}} = 0.37$ und $f_{H_{gesamt}} = 2.7$ [11]. Da die Einstellung am Rotameter um einen Faktor $\pm 350 \frac{\text{L}}{\text{h}}$ schwankt und demzufolge die größere Unsicherheit daraus resultiert, kann die Vereinfachung von 3.7 und die Rundung mit gutem Gewissen genutzt werden. Im folgenden, werden die Werte $f_{L_{gesamt}} = 0.37$ und $f_{H_{gesamt}} = 2.7$ verwendet.

4. Versuchsaufbau

Es wird in diesem Kapitel kurz auf den Prototyp des Spurdetektormodul und das verwendete Rotameter eingegangen und das Konzept der Box erklärt, in der das Spurdetektormodul befestigt wird, damit kann der Detektor kontrolliert mit Gas gekühlt werden. Dies sind die essentiellen Teile, die den Messungen, die im Kapitel 6 dargestellt werden, zugrunde liegen. Diese werden miteinander verbunden um die Kühlung des Spurdetektormoduls zu untersuchen.

4.1. Spurdetektor

Es wird zuallererst auf das Spurdetektormodul eingegangen. Genauer auf die Gasführung und die Befestigung. Das fertige Modul musste noch für den Versuchsaufbau angepasst werden.

4.1.1. Gasführung

Das Spurdetektormodul hat eine rechteckige Form und besteht aus einer Ober- und Unterseite, siehe dazu Abbildung 2.6.

Die Heizstreifen an der Oberseite verlaufen links von einem Printed Circuit Board (PCB) nach rechts auf das andere PCB; Dies gilt auch Analog für die Unterseite. Dabei sind die PCBs der Ober- und Unterseite an zwei Kanälen festgeklebt. Einer dieser Kanäle hat eine Verbindung durch das PCB an die Heizstreifen. Auf den Heizstreifen¹ wurde Kapton in Form des Buchstaben V derart geklebt, dass ein Heizstreifen zwei V-Kanäle hat, siehe Abbildung 4.1 und als schematische Darstellung in Abbildung 4.3. Der Kanal verläuft also in dem V-Ausschnitt zwischen dem Heizstreifen und dem Kapton zu der anderen Seite durch das PCB durch und wird dort im Kanal zwischen Ober- und Unterseite zurückgeführt. Später wird dort das Gas durchfließen.

¹Der Heizstreifen besteht im übrigen auch aus Kapton.

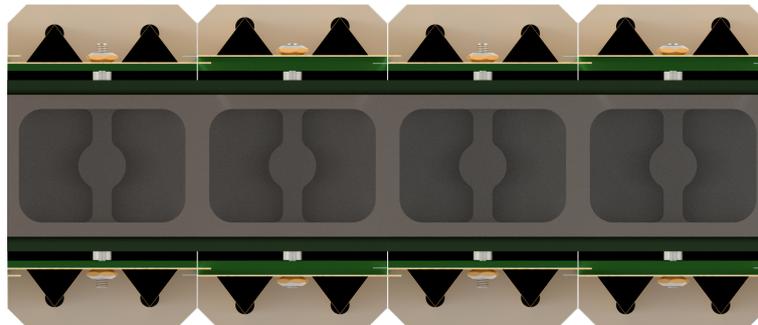


Abb. 4.1.: Querschnitt des Spurdetektormoduls. Zu sehen ist das PCB der Ober- und Unterseite (grün), die Verbindungsstücke zwischen dem PCB und den Heizstreifen (beige), der aus dem geformten Kapton resultierenden V-Ausschnitt (schwarz) sowie die Einlässe zwischen Ober- und Unterseite (grau). Ganz dünn zwischen dem V-Kanal und dem PCB, liegt der Heizstreifen (gelb) [3].

Der zweite Kühlkanal hat, sowohl links als auch rechts, zwischen der Ober- und Unterseite Einlässe, durch die Gas, unabhängig von den V-förmigen Kühlkanälen, fließen kann.

An einem Ende der PCBs sind Übergänge von den Kanälen zu Gasschläuchen angebracht. Somit kann das Gas mithilfe der Schläuchen zu- und abgeführt werden.

4.1.2. Befestigung

Das Spurdetektormodul hat am vorderen und hinterem Ende jeweils eine Schiene, an die je vier Winkel angebracht sind. Dadurch kann das Spurdetektormodul an Gewindestangen mit einem Durchmesser von $M3^2$ befestigt werden. Diese Gewindestangen sind an der Box befestigt und zusätzlich mit einer Aluminiumschiene stabilisiert. Mit dieser Technik, kann das Spurdetektormodul auf eine Höhe von bis zu 7 cm vom Boden der Box befestigt werden. Der Detektor wurde auf eine Höhe von 4 cm gesetzt.

Unterstützend dazu, wurden noch jeweils vorne und hinten zwei Abstandshalter zur Stabilisierung angebracht. Dies ist, mitsamt der Schiene und Winkel in Abbildung 4.2 zu sehen.

²Damit ist das metrische ISO-Gewinde gemeint, also 3 mm Außendurchmesser.



Abb. 4.2.: Befestigung am Prototypen. Zu sehen sind die vier M3 Gewindestangen, eine Aluminiumschiene und die zwei Abstandshalter mit schwarzem Gummiüberzug zum Schutze vor Kratzern.

4.2. Gasfluss

Der Fluss für das Gas wird mithilfe eines Rotameters gemessen und mit einem Ventil geregelt. Bei der Kühlung mit Luft wird die Luft aus einem Druckluftreservoir des Instituts für Physik zur Verfügung gestellt. Das Rotameter ist mit einem Schlauch an das Druckluftreservoir angeschlossen, und hat einen Innendurchmesser von 12 mm. Dabei darf ein Maximalfluss von $4800 \frac{\text{L}}{\text{h}}$ eingestellt werden. Mehr hat das Druckluftreservoir nicht zur Verfügung gestellt. Um die HV-MAPS auf einer Temperatur von 60°C zu halten, wurde in der Simulation folgende Flüsse ausgerechnet, bei einer Heliumtemperatur von 0°C :

	mittlere Leistung [$200 \frac{\text{mW}}{\text{m}^2}$]	hohe Leistung [$400 \frac{\text{mW}}{\text{m}^2}$]
V Kanäle	54000 L h^{-1}	86400 L h^{-1}
Innere Kanäle	21600 L h^{-1}	21600 L h^{-1}
Gesamtfluss	75600 L h^{-1}	108000 L h^{-1}

Tab. 4.1.: Berechnete Flüsse für die Kühlung mit Helium [3].

Um den Fluss im Rotameter auf die in Tabelle 4.1 bestimmten Werte für Helium einstellen zu können, muss man eine Konstante $f_L = 0.370$ hinzu multiplizieren. Diese Konstante wurden in Kapitel 3.6 eingeführt. Daraus ergeben sich folgende Werte:

	mittlere Leistung	hohe Leistung
V Kanäle	19980 L h ⁻¹	31968 L h ⁻¹
Innere Kanäle	7992 L h ⁻¹	7992 L h ⁻¹
Gesamtfluss	27972 L h ⁻¹	39960 L h ⁻¹

Tab. 4.2.: Messwerte für auf Luft kalibriertes Rotameter um Heliumflusswerte aus Tabelle 4.1 zu erhalten.

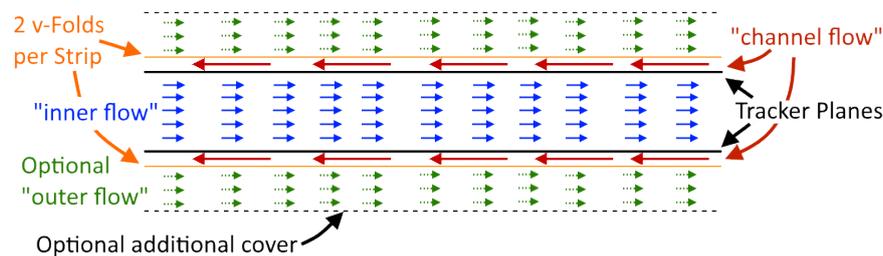


Abb. 4.3.: Skizze der verschiedenen Flüsse. Der optionale „outer flow“ wird in der Arbeit nicht verwendet. Bild entnommen aus [3].

Obwohl das Rotameter Flüsse von bis zu 25 000 $\frac{\text{L}}{\text{h}}$ zulässt, reicht es für die Messungen aus, für Helium, als auch für Luft, geringere Flüsse zu wählen. Dies ist hinreichend aus, um eine qualitative Aussage über die Kühlung der Heizstreifen zu treffen. Es wird bei den Messungen darauf hingewiesen welcher Fluss verwendet wird.

4.3. Stromquelle und Datenauslese

Es soll nur der Übersicht halber erklärt werden, wie der Strom eingespeist und die Temperatur der Heizstreifen ausgelesen wird. Diese Teile des Aufbaus wurden von M. Zimmermann [3] entwickelt und untersucht. An den Heizstreifen sind Temperatursensoren aufgeklebt, die die Temperatur an der platzierten stelle mit einer Ungenauigkeit von $\pm 0.5^\circ\text{C}$ messen.

Stromquelle

Ein Labornetzteil von Rohde&Schwarz speist das Spurdetektormodul über vier Kanäle mit Strom. Als Grundspannung wird 15 – 20 V eingestellt. Dies wird zum Heizen der Heizstreifen benötigt. Die restliche Elektrik am PCB, bezieht ihren Strom über ein

Labornetzteil von RNDLab. Dort steht eine Spannung von 5 V zur Verfügung. Über den angeschlossenen Computer kann man die Heizstreifen steuern. Dies geschieht, indem man einstellt, wie viel Spannung die Heizstreifen bekommen. Es wird ein Signal an den Spannungswandler geschickt, der die Angelegten 20 V in die eingestellte Spannung umwandelt.

Arduino Mega

Ein Arduino ist ein Mikrocontroller, welcher fähig ist, Eingabesignale zu lesen und gegebenenfalls daraus Ausgabesignale zu senden. Programmieren kann man den Arduino mit der Programmiersprache „Arduino Programming Language“. Diese ist öffentlich³ und mit ihr kann der Arduino entsprechend der benötigten Bedürfnissen angepasst werden, sowie eine „Graphical User Interface“ (GUI) erstellt werden, mit der es möglich ist, Befehle und Abfragen benutzerfreundlich an den Arduino zu schicken. Der Arduino Mega ist eine spezielle Version der Arduinobords.

Da der Arduino eine gewisse Zeit braucht, alle Daten auszulesen, das sind 144 verschiedenen Temperatursensoren, kann minimal alle 3 s das Auslesen derer erfolgen. Wenn dann noch Befehle wie Spannungserhöhung oder Anschalten der Potentiometer hinzukommen, kann es passieren, dass die Auslese der Temperatursensoren ausfällt. Dadurch kommt es, das im Plot dann weiße Streifen zu sehen sind, wie man gut in Abbildung 6.2 erkennen kann. Dies ist nicht weiter schlimm, da die Messung nicht unterbrochen wird und nach drei Sekunden die nächsten Daten aufgenommen werden. Außerdem gibt es genug Messwerte pro Messung und man kann davon ausgehen, dass sich das Verhalten der Temperatur nicht in jenem Moment Sprungartig ändert, sodass ein Ausfall der Messdaten zu einem einzelnen Zeitpunkt ignoriert werden kann.

Datenauslese

Die Temperatursensoren sind an einem Arduino Mega angeschlossen und dieser ist mit einem Computer verbunden. Über den Arduino Mega werden sowohl Informationen vom Computer an den Detektor geliefert, als auch die Auslese der Temperatur vom Arduino Mega an den Computer. Damit ist es möglich mit dem Spurdetektormodul zu kommunizieren und ihm Befehle zu geben.

Die gemessene Temperatur wird in einer CSV-Datei⁴ gespeichert. Es ermöglicht die

³Sogenannte Open-Source-Software.

⁴Im Computer die Endung „.csv“ und steht für Comma-separated values.

spätere Analyse der Temperaturdaten und diese in eine Grafik aufzutragen, was ein besseres Verständnis ermöglicht.

4.4. Gesamtaufbau

Da es zwei verschiedene Aufbauten für die Messungen gibt⁵, sollen diese im einzelnen und erklärt werden. Die zuvor beschriebenen Komponenten des Aufbaus werden miteinander verbunden. Weiter detaillierte Bilder zum Aufbau sind im Anhang A.3 zu finden.

4.4.1. Messung mit Luft

Der Gesamtaufbau für die Messung mit Luft ist in Abbildung 4.4 zu sehen.

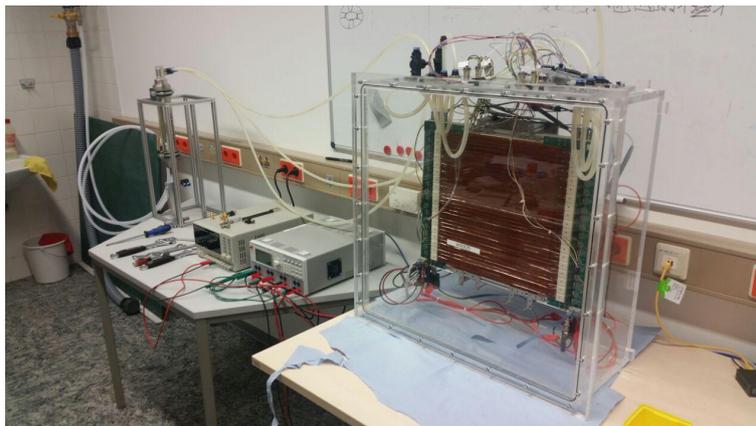


Abb. 4.4.: Aufbau für Luft. Ganz links auf dem hinteren Tisch ist das Rotameter zu sehen. Rechts daneben sind die zwei Labornetzteile RNDLab und Rohde&Schwarz. Die Gasschläuche und elektrische Verkabelung sind an den Anschlüssen oben an der Box verbunden.

Das Spurdetektormodul ist über die Multipole, welche in Kapitel 5.2.3 genauer erklärt werden, verbunden mit dem Arduino und den Labornetzteilen. Zudem ist das Spurdetektormodul verbunden mit den Gasschläuchen. Diese sind angeschlossen an das Rotameter, welcher an das Druckluftreservoir des Institut für Physik montiert ist. Der Detektor selbst ist in der Box befestigt.

⁵Ein Aufbau für die Messung mit Luft und ein Aufbau für die Helium Messung.

Der Rücklauf der Box ist offen, sodass die Luft in den Raum entweichen kann. Damit wird verhindert, dass sich in der Box ein zu großer Druck bildet, der die Box zum Bersten bringen könnte.

4.4.2. Messung mit Helium

Der Aufbau für Helium ist in Abbildung 4.5 zu sehen und wurde in der 5-Grad-Halle der KPH aufgebaut. Dort stand der Heliumvorrat, der für die Kühlung benutzt wurde. Der Aufbau unterscheidet sich geringfügig von dem Aufbau für Luft. Zum einen ist ein Überdruckventil an der Box angeschlossen, dass bei einem Überdruck von 0.2 bar öffnet. Dies ist eine Sicherheitsvorkehrung, damit sich kein unerwarteter Druck in der Box bildet und ein mögliches splintern verhindert. Zusätzlich wurde ein Manometer angebracht um den Überdruck zu messen. Damit wurde der maximale Heliumfluss bei einem Überdruck von 0.1 bar begrenzt. Des weiteren wurde ein Rücklauf angeschlossen, um das Helium wieder verwenden zu können. Um die Temperatur des Heliums zu bestimmen, wurde mithilfe eines T-Stücks noch ein Temperatursensor am Ausgang vom Rotameter verbunden, zu sehen im Anhang A.60.



Abb. 4.5.: Der Aufbau für die Heliummessung in der 5-Grad-Halle des KPH. Links auf dem Tisch sind die Labornetzteile sowie der angeschlossene Computer. Mittig die stehende Box, rechts davon die zwei Rotameter. Rechts ist zu sehen wie ein Gasschlauch am Heliumvorrat, welche die Flaschen im Hintergrund sind, angeschlossen ist.

Die wichtigste Änderung ist, dass ein zweites Rotameter angeschlossen wurde, mit dem

der Fluss in den inneren Kanälen eingestellt wird. Somit kann man die in Tabelle 4.2 ausgerechneten Werte für die V-Kanäle und die inneren Kanäle einstellen. Dabei wurde das zweite Rotameter zwischen dem ersten Rotameter und der Box angeschlossen. Also ist der innere Fluss ein Teil vom Gesamtfluss, welcher am ersten Rotameter reguliert wird.

Da der Detektor wie in Kapitel 2.4 beschrieben kreisförmig um das Experiment installiert wird, ist der Detektor jeweils vier mal um 90° gedreht, zu sehen in Abbildung 2.3. Dies kann bei der Messung berücksichtigt werden, indem man die Box aufstellt und entsprechend auf die Seite dreht, die man untersuchen will.

5. Gasbox für den Prototypen des Spurdetektormodul

Die Gasbox, im folgenden als Box bezeichnet, besteht aus Polymethylmethacrylat und dient dazu, den Prototypen des Spurdetektormodul in einer Heliumatmosphäre zu kühlen. Dafür muss die Box soweit Gasdicht sein, dass eine Messung mit ihr möglich ist. Diese Dichtigkeit wurde erreicht und wird in Abschnitt 5.4 am Ende des Kapitels betrachtet. Das Design der Box wurde mit der Software Autodesk Inventor entworfen.

5.1. Design

Es wurde entschieden die Box aus Polymethylmethacrylat (Acrylglas) zu bauen, damit man die Möglichkeit hat, in die Box zu sehen¹. Dafür hat sich, in Absprache mit der Werkstatt im Institut für Physik (IPH), Polymethylmethacrylat mit einer Dicke von 15 mm angeboten. Die 15 mm wurden deshalb gewählt, da am Boden Sacklochgewinde angebracht werden sollten² und man mindestens eine Dicke des doppelten Durchmessers der Schrauben haben sollte. Bei den ursprünglich geplanten M5-Gewinde sind dies mindestens 10 mm.

Die Bauteile wurden in der Werkstatt des IPH in Auftrag gegeben, da die Werkstatt der KPH keine Maschinen zum bearbeiten für Acrylglas dieser Größe hatte. Zusammengesetzt wurden die Bauteile in der Werkstatt des Instituts für Kernphysik (KPH). Alle technischen Zeichnungen für die Box befinden sich im Anhang A.2. Zuerst wurde ein Boden, eine Decke und vier Wände entworfen.

¹Die Box soll auch nach der Bachelorarbeit von nutzen sein und gegebenenfalls auch andere Messungen oder Aufbauten erlauben.

²Die Werkstatt des IPH hat jedoch Durchgangsbohrungen daraus gemacht.

5.1.1. Kragen

Ursprünglich sollten der Dichtungsring und die Gewindebohrungen zur Befestigung in die Wände gehen. Dies war jedoch bei 15 mm riskant, sodass unter freundlicher Beratung der Vakuumwerkstatt des Institut für Kernphysik (KPH), anschließend noch ein Kragen entworfen wurde. Dieser soll auf die Wände angebracht werden, um eine zusätzliche Fläche für Dichtung und Gewindebohrung zu geben, zu sehen in Abbildung 5.1.

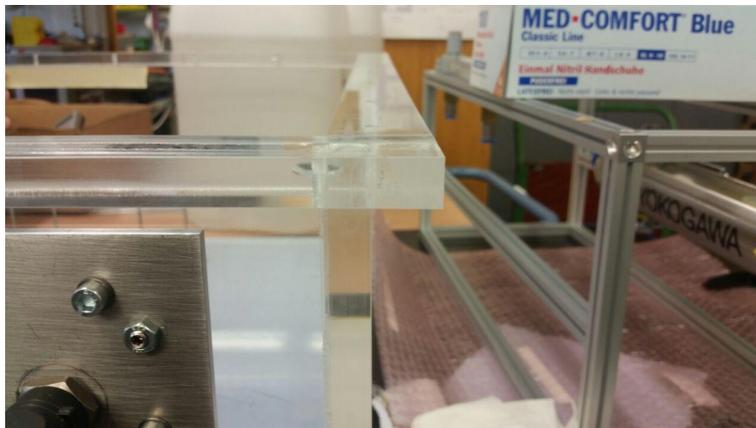


Abb. 5.1.: Seitenansicht auf Wand und Kragen. Zu sehen ist wie der Kragen zusätzlich Fläche liefert, für den Dichtungsring und die Verschraubungen.

5.1.2. Boden

Der Boden ist eine quadratische Platte mit den Maßen 600×600 mm. In den Boden der Box wurden acht Sacklochgewinde mit M3 Gewinde eingezeichnet. Diese dienen dazu, Gewindestangen einzuschrauben, an die später der Detektor festgeschraubt werden kann, wie in Kapitel 4.1.2 erläutert. Die Gewindestangen wurden zusätzlich mit einer Aluschiene stabilisiert, um zu verhindern, dass die Gewindestangen aus dem Acrylglas brechen.

Leider hat die Werkstatt der IPH Durchgangsbohrungen mit M3-Gewinde anstelle von M3-Sacklochgewinde gebohrt. Dadurch entsteht eine Undichtigkeit, da zwischen Schraube und dem Acrylglas das Helium entweichen kann. Aus diesem Grunde wurden

die M3-Gewindestangen eingeschraubt und zusätzlich von unten mit Araldit 2021 zugeklebt. Dieses Vorgehen hat ausgereicht, um diese Stelle gasdicht zu bekommen.

5.1.3. Deckel

Der Deckel ist ebenso eine rechteckige Platte, jedoch mit unterschiedlichen Maßen 670×630 mm. Der Deckel hat abweichende Maße vom Boden, da dieser mehr Auflagefläche durch die Kragen bekommen hat. Auf der Unterseite des Deckels wurde eine Nut eingefräst, in die später ein O-Ring zur Dichtung eingebracht wird. Zudem hat der Deckel in regelmäßigen Abständen Durchgangsbohrungen für M5-Schrauben, mit denen der Deckel am Kragen festgezogen werden kann.

Aufgrund einer fehlenden Angabe in der technischen Zeichnung³, wurden die Bohrungen am Deckel und am Kragen 5 mm zu weit nach innen gelegt. Ursprünglich sollten die Bohrungen außen an den Wänden vorbeigehen, um die Schrauben von unten mit einer Mutter zu kontern, jetzt allerdings treffen sie auf die Wände, sodass die Schrauben nicht mehr durch Deckel und Kragen gehen, sondern nur noch durch den Deckel und im Kragen stecken da sie auf die Oberseite der Wände treffen. Dies ist jedoch nicht weiter tragisch, da die Dichtigkeit schon davor erreicht wird. Somit ist dies lediglich ein Schönheitsfehler und schränkt den nutzen der Box nicht weiter ein.



Abb. 5.2.: Draufsicht auf eine Wand der Box. Mittig ist die Bohrung zu sehen, die genau auf die Kante der Wand trifft.

³Dieses fehlende Maß habe ich hinterher in die Zeichnung eingefügt, sodass die Zeichnung im Anhang nun komplett ist.

5.1.4. Wände

Die Wände sind rechteckige Platten, die bündig von der Seite an den Boden geklebt werden. Die Wände haben eine Höhe von 235 mm, wodurch die Box mit dem Kragen und Deckel eine Gesamthöhe von 265 mm erreicht.

In einer der Wände, die fortan als Vorderwand bezeichnet wird und die Vorderseite der Box darstellt, wurde ein Loch ausgeschnitten und insgesamt 24 Sacklochgewinde um den Ausschnitt gebohrt, um dort ein Panel mit den Durchgängen für die Elektrik und die Gasschläuche anzubringen.

5.1.5. Panel

Genau wie der Deckel, hat auch dieses Panel eine Nut, in die ein O-Ring eingelegt werden kann, um die Box gasdicht zu bekommen. Das Panel besteht aus Aluminium mit den Maßen $526 \times 211 \times 5$ mm und wurde entworfen, um später Änderungen der Anschlüsse einfacher Umzusetzen. Dadurch braucht man nicht eine neue Box zu designen, sondern man muss nur ein neues Panels entwerfen. Am Rand des Panel sind 24 Löcher für die Befestigung mit der Vorderwand, sowie 13 Löcher für die Anschlüsse gebohrt worden, zu sehen in Abbildung 5.3. Sechs von den Löchern sind für die Gasanschlüsse vorgesehen. Zwei davon sind für ein Ein- und Auslass und die restlichen fünf Löcher sind für die Verkabelung. Bis auf das Ein- und Auslassventil sind alle anderen Löcher Durchgangsbohrungen.

5.1.6. Abstandshalter

Um die Box auf die Seite legen zu können müssen noch Abstandshalter an den Wänden angebracht werden, da durch den Kragen, wie in Abbildung 5.1 zu sehen, die Box sonst schief auf der Seite liegen würde. Die Abstandshalter haben die Form eines Quaders und werden an den unteren Teil der Wände angebracht. Somit schließt ihre äußere Ebene bündig mit der des Kragen ab, womit die Box auch seitlich Waagrecht liegt.

5.2. Anschlüsse

Es wurden drei verschiedene Arten von Anschlüssen am Panel montiert. Die Ventile werden in das für sie vor gedrehte Gewindeloch geschraubt und erreichen ihre Dichtigkeit

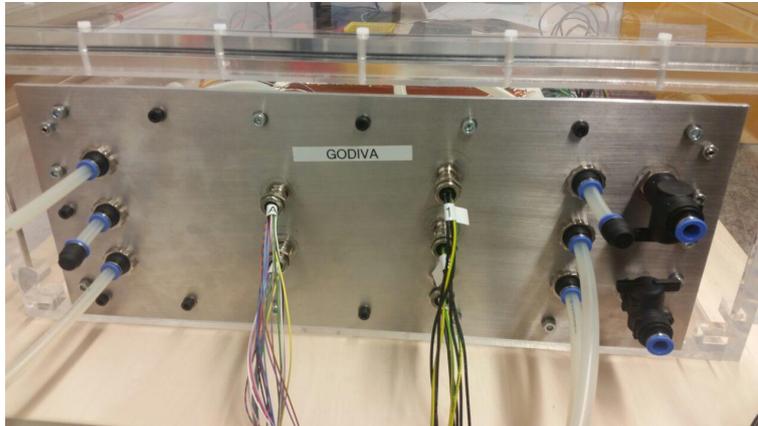


Abb. 5.3.: Panel mit den Anschlüssen. Von Links nach Rechts: Drei Anschlüsse für die Gasrückführung, zwei Multipole mit je 12 Anschlüssen, drei Multipole mit je 3 Anschlüssen, drei Anschlüsse für die Gaszuführung, zwei Ein- und Auslassventile.

mit einem Gummiring, der sich an die Wand des Panel drückt und somit zwischen Bauteil und Panelwand abdichtet. Die restlichen Anschlüsse erreichen ihre Dichtigkeit genauso, mit dem Unterschied, dass sie mit einer Mutter von der anderen Seite festgezogen werden. Dadurch kann es sein, dass sich der Gummiring verzieht. Um dies zu verhindern, wurden aus Aluminiumscheiben Kreisringe hergestellt, die um den Gummiring gelegt werden und somit das verrutschen verhindern.

Die Anschlüsse wurden so gewählt, dass sie den Anforderungen genügen und obendrein durch simple Steckverbindungen schnell gelöst und wieder angesteckt werden können. Dies ist insofern hilfreich, da die Box für die Messungen öfter gedreht wird.

5.2.1. Einlassventil und Auslassventil

Für die Möglichkeit einer Flutung der Box oder das Anbringen eines Überdruckventils, wurden zwei R 1/4 Zoll Gewinde gebohrt, in denen die Ein- und Auslassventile angebracht wurden, zu sehen in Abbildung 5.3. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit des Ablassens des momentan Gases in der Box. Die Ventile kann man je nach Bedarf austauschen und ersetzen denn sie sind lediglich angeschraubt.



Abb. 5.4.: Kreisring. Anders als Unterlegscheiben liegen sie nicht zwischen den zu befestigenden Flächen, sondern um die Dichtungsringe und verhindern somit das Wegrutschen derer.

5.2.2. Gasanschlüsse

Die Gasanschlüsse sind Übergangsverbindungen mit M12 Außengewinde. Die Schläuche werden durch einfaches Anstecken miteinander verbunden. Es ist lediglich darauf zu achten, das man möglichst gerade mit dem Schlauch an die Verbindungen drauf geht, da es sonst zu Undichtigkeiten kommen kann.

An die Box gehen die Schläuche mit einem Innendurchmesser von 6 mm rein. Diese sind direkt mit dem Rotameter verbunden; von der Box gehen die Schläuche direkt zum Anschluss an die Kanäle des Detektors.

5.2.3. Multipole

Die elektrische Verbindung erfolgt über Multipole, die in Abbildung 5.3 zu sehen sind. Dabei wurden für die Stromverbindung drei Multipole mit jeweils drei Kabelanschlüssen⁴ verwendet, die bis zu 10 A pro Kabel aushält.

Für die Datenübertragung wurden zwei Multipole mit jeweils 12 Anschlüssen genommen. Benötigt werden für diese Arbeit allerdings nur 18 Anschlüsse. Die restlichen wurden lediglich Isoliert und nicht angeschlossen, stehen aber zur Verfügung, falls mehr

⁴Zwei für Strom und ein für die Erdung.

gebraucht werden.

Diese Multipole wurden gewählt, da diese eine Gasdichte Verbindung garantieren und durch einfaches an- und abstecken zu bedienen sind. An die Enden der Kabel wurden Bananenstecker angebracht, da diese für die Labornetzeile und der Spurdetektormodul selbst, durch an- und abstecken, direkt genutzt werden können.

5.3. Chloroform

Nachdem die Bauteile fertiggestellt worden sind, wurden sie in der Werkstatt der KPH zusammengesetzt. Die Box wurde mit Chloroform geklebt. Es werden die zwei zu klebenden Flächen aneinandergelegt, dann wird mit einer Spritze das Chloroform an die Kante gespritzt. Das Chloroform zieht zwischen die Flächen ein und löst das Acrylglas. Wenn sich das Chloroform verflüchtigt, verfestigen sich die zwei Flächen, und man hat eine stabile Verbindung der Bauteile. Der Grund warum Chloroform dem Araldit 2021 Kleber bevorzugt wurde, war dass beim Kleben mit Chloroform die Bauteile der Box lediglich angelegt werden müssen, nicht wie beim Kleber, bei dem die Bauteile zusammengedrückt werden müssen und schlimmstenfalls durch das Schwimmen auf dem Kleber verrutschen. Dadurch ist auf der Box keine Spannung und die Gefahr, dass das Acrylglas aufgrund der Spannung im Laufe der Wochen zerreißt, ist verhindert. Zudem war somit das Ausrichten der Bauteil einfacher, sodass der Kragen am Ende plan auf dem Deckel lag.

Leider haben sich bei diesem Verfahren mehrere Luftblasen (Lunker) gebildet, zu sehen in Abbildung 5.5, so das bei der ersten Dichtigkeitsmessung, siehe Kapitel 5.4 festgestellt wurde, dass die Box nicht dicht ist.

Es sei noch zusätzlich erwähnt, dass die Klebung von Teststücken mit Chloroform sauber und ohne Komplikationen oder Lunker erfolgt ist, die Klebetests sind in Abbildung 5.6 zu sehen. Problematisch war bei der Box zum einen die Größe der zu klebenden Flächen, zum zweiten die Größe der Box und zuletzt die Ausrichtung der Box. Ersteres war deshalb problematisch, da man von zwei Seiten das Chloroform zugeben musste, jedoch hat sich das Chloroform so schnell verflüchtigt, dass es nicht möglich war, eine saubere Verbindung der zwei Seiten zu bekommen. Zum Zweiten war es durch die Länge der Box schwierig, alle klebenden Flächen Plan aufeinander legen zu können, sodass man von außen Druck auf die Klebenden Flächen ausüben musste, was dennoch nicht verhindern konnte, dass die Flächen Lückenfrei aufeinander liegen. Das Letztere



Abb. 5.5.: Box von Oben. Mittig zu sehen sind Lunker zwischen Wand und Kragen. Oben im Bild ist der Innenraum der Box und unten im Bild, getrennt durch die Wand der Box, der Außenraum. Zusätzlich sieht man nochmal, wie die Bohrungen auf die Wand der Box treffen, wie in Kapitel 5.1.3 Beschrieben.

war deshalb ein Problem, da es schwieriger war, das Chloroform oben hinzuzugeben, sodass sich mehr, wenn auch nur minimal, unten angesammelt hat als oben.

5.4. Dichtigkeit

Die Dichtigkeit der Box wurde gemessen mit Hilfe eines Detektors und einem Schnüffler. Dabei wird die Box auf bis zu (0.10 ± 0.05) bar mit Helium gefüllt. Anschließend wurden alle Kanten und potentiellen Öffnungen, wie zum Beispiel das Einlassventil, mit dem Schnüffler abgefahren. Der Schnüffler ist an einem Detektor angeschlossen. Der Schnüffler saugt die umstehende Luft an. Sobald nun Helium in der Luft ist, kann der Detektor das nachweisen. Da Helium in der Luft zu 0.000 524 % vorkommt, misst der Lecksucher immer einen minimalen Wert von $5.24 \frac{\text{mbar L}}{\text{s}}$.

Es wurde bei der ersten Messung festgestellt, dass die Box über keinerlei Dichtigkeit verfügt. Aufgrund der gemessenen Undichtigkeit mussten Maßnahmen ergriffen werden um die Box dicht zu bekommen. Um ein Gefühl für die nachfolgenden Werte der Leckraten zu bekommen sind in nachfolgender Tabelle ein paar Werte sowie deren Bedeutung eingetragen:

Zuerst wurden die Außenkanten mit Silikon zugeklebt. Dies hatte sofort eine messbare

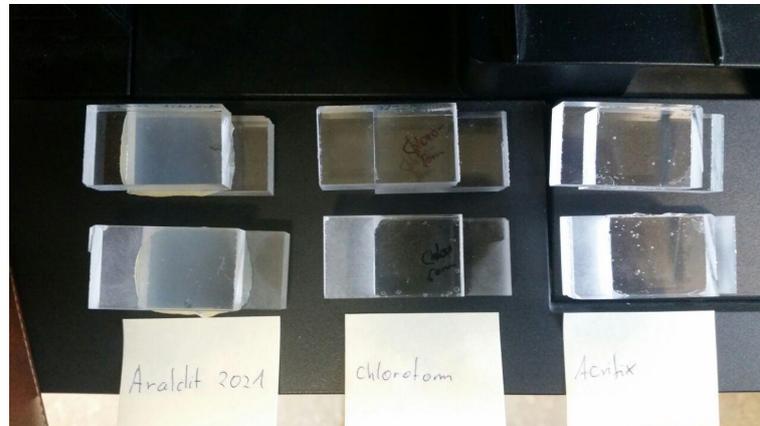


Abb. 5.6.: Die Test mit verschiedenen Kleber. Von Links nach Rechts: Araldit 2021, Chloroform und Acrifix. Die Klebefläche in der unteren Reihe wurde mit Sandpapier aufgeraut.

Leckrate [mbar l s ⁻¹]	Verlust	Leckbeschreibung
1×10^0	1 cm ³ Gasverlust pro Sekunde	Tropfender Wasserhahn
1×10^{-2}	1 cm ³ Gasverlust in 100 Sekunden	Wasserdicht
1×10^{-5}	1 cm ³ Gasverlust pro Tag	Benzin- und Öldicht
1×10^{-6}	1 cm ³ Gasverlust in 10 Tagen	Virendicht

Tab. 5.1.: Leckraten bei Helium. Diese Werte gelten für einen Druckunterschied von 5 Pa zwischen Innen- und Außendruck.

Wirkung und es konnte an den meisten Stellen eine Dichtigkeit in der Größenordnung von $2.5 \times 10^{-5} \frac{\text{mbar L}}{\text{s}}$ festgestellt werden. Jedoch zeigte sich sehr schnell, dass das Silikon nicht gut am Acrylglas haften blieb. Mit der Zeit könnte sich das Silikon lösen und die Box wieder Undicht werden. Zudem gab es noch zwei Stellen an der Box, an denen immer noch Helium austrat und eine Leckrate in der Größenordnung von $10 \times 10^{-1} \frac{\text{mbar L}}{\text{s}}$ gemessen wurden. Da es das Ziel, war die Box mindestens wasserdicht zu bekommen, also eine Rate von $1 \times 10^{-2} \frac{\text{mbar L}}{\text{s}}$ nach Tabelle 5.1 zu erreichen, war dies ein unbefriedigendes Ergebnis.

Aus diesem Grund wurde eine weitere Maßnahme ergriffen. Diese sah vor, die Innenkanten mit einem speziell für Acrylglas vorgesehenen Kleber abzukleben. Durch zusätzliches Abkleben mit Araldit 2021, einem 2-Komponentenkleber⁵, der Innenkanten

⁵Laut Hersteller besonders gut für Acrylglas geeignet.

5. Gasbox für den Prototypen des Spurdetektormodul

wurde am Ende eine Dichtigkeit im Bereich von $8.1 \times 10^{-6} \frac{\text{mbarL}}{\text{s}}$ erreicht. Dies ist ein äußerst zufriedenstellendes Ergebnis. Damit das Ergebnis verifiziert werden konnte, wurde der Druck von 0.10 bar zwei Tage lang in der Box gehalten. Dabei wurde am zweiten Tag festgestellt, dass sich der Deckel der Box deutlich sichtbar gewölbt hatte. Aus diesem Grund wird versucht, in den Messungen nicht über die 0.10 bar zu kommen, wenngleich die Box das auch aushält.

6. Ergebnisse und Analyse

Bei der Messung mit Luft wurden verschiedene Einstellungen verwendet. Die Messungen sollen nun untersucht und analysiert werden. Die verschiedenen angelegten Spannungen U bei den Messungen sind bekannt und mit einem Widerstand von $R = 1.75 \Omega$, kann man die Leistung P der Heizstreifen mit der einfachen Formel $P = \frac{U^2}{R}$ ausrechnen. Die resultierende Leistung ist in folgender Tabelle festgehalten:

Spannung [Volt]	Leistung [Watt]
0.90	0.46
1.00	0.57
1.20	0.82
1.40	1.12
2.00	2.29
2.40	3.29
2.80	4.48
2.90	4.81
3.13	5.60

Tab. 6.1.: Angelegte Spannung pro halber Heizstreifen und umgerechnete Leistung.

Diese Werte beziehen sich auf einen halben Heizstreifen, da in einem Heizstreifen zwei Heizmodule, links und rechts, sind. Bei 18 Heizstreifen pro Seite (Oben und Unten) sind das insgesamt, bei 36 Heizstreifen insgesamt 72 Heizmodule. Für eine angelegte Spannung von 1.00 V erhält man eine Gesamtleistung von 48.24 W. Zum Vergleich der simulierten Heizung in [3] steht eine totale Leistung von 556.16 W oder $200 \frac{\text{mW}}{\text{cm}^2}$, siehe dazu auch Tabelle 4.1 gegenüber. Dies ist jedoch für eine Sensorfläche von 2528 cm^2 ausgerechnet. Der Prototyp hat allerdings nur eine Heizfläche von 2016 cm^2 . Rechnet man die simulierte Leistung nun runter, kommt man auf eine total Leistung von 403.20 W, statt der 556.16 W und somit auf 5.60 W pro Heizmodul. Um dies zu erreichen, muss eine Spannung von mindestens 3.13 V angelegt werden. Eine geringere

Leistung reicht jedoch vorerst aus um das Heiz- und Kühlverhalten zu beobachten und eine erste qualitative Aussage treffen zu können. Später wird bei der Heliummessung die Spannung schrittweise erhöht und sogar eine Spannung von 2.8 V erreicht, was einer Leistung von 4.48 W pro Heizmodul oder $160 \frac{\text{mW}}{\text{cm}^2}$ entspricht, was zumindest in die Nähe der 3.13 V beziehungsweise $200 \frac{\text{mW}}{\text{cm}^2}$ kommt.

6.1. Messung der Raumtemperatur

Um zu sehen, welche Temperatur die Heizstreifen haben, wenn sie nicht gekühlt und geheizt werden, wurde eine kurze Messung im Labor durchgeführt. Damit kann man sich anschauen, ob bestimmte Temperatursensoren auffällig sind und eventuell einen systematischen Fehler haben oder sogar kaputt sind. Es sei nochmal daran erinnert, dass alle Temperaturmessungen eine Ungenauigkeit von $\pm 0.5^\circ\text{C}$ haben, wie in Kapitel 4.3 erwähnt.

Man sieht in Abbildung 6.1, dass alle Temperatursensoren im Rahmen ihrer

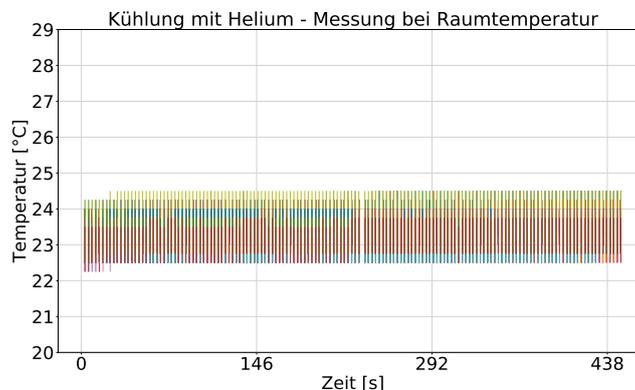


Abb. 6.1.: Messung bei Raumtemperatur. Ohne angelegte Spannung und ohne Luftstrom.

Ungenauigkeit gleichmäßig eine Temperatur von 23°C messen. Alle Messungen mit der Luftkühlung wurden im klimatisierten Labor ohne Fenster aufgezeichnet, von daher ist davon auszugehen, dass sich die Raumtemperatur während der Messungen nicht mehr als um $\pm 2^\circ\text{C}$ ändert.

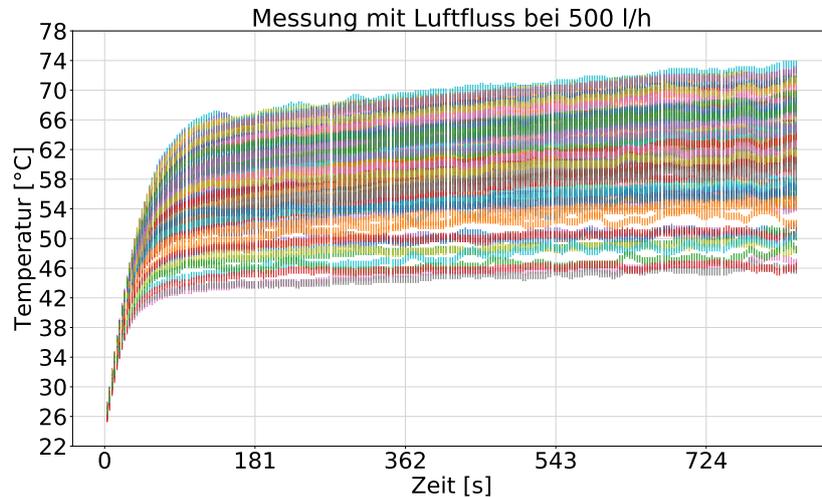


Abb. 6.2.: Messung bei einem Luftfluss von $500 \frac{\text{L}}{\text{h}}$. Die Temperatursensoren unterscheiden sich farblich. Es sind alle 144 Sensoren abgebildet.

6.2. Langzeitmessung mit Luft

Die ersten Messungen mit dem Spurdetektor in der Box werden zwar als Langzeitmessung bezeichnet, dauern aber lediglich 10 bis 17 min. Im Vergleich zu den restlichen Messungen die maximal 2 min dauern, ist dies dennoch lang. Ziel dieser ersten Messungen ist es, sich das Aufheizverhalten über einen längeren Zeitraum anzuschauen um gegebenenfalls ein thermisches Gleichgewicht zu erreichen.

6.2.1. Aufheizen

Bei den Messungen wurde eine Spannung von 1.40 V angelegt, was einer Leistung von 1.31 W entspricht. Die Box lag bei der Messung auf ihrem Boden, das Spurdetektormodul lag also. Es wurden vier verschiedene Luftströme eingestellt: kein Luftstrom, $500 \frac{\text{L}}{\text{h}}$, $1000 \frac{\text{L}}{\text{h}}$ und $1500 \frac{\text{L}}{\text{h}}$. Diese waren von Beginn an eingeschaltet. Angeschlossen waren sämtliche Kühlkanäle des Spurdetektormodul. Die Graphiken zu den restlichen Messungen sind zu sehen im Anhang A.1.1 und die für einen Luftstrom von $500 \frac{\text{L}}{\text{h}}$ in Abbildung 6.2. Es fallen sofort drei Sachen auf. Zum einen wird kein Gleichgewichtszustand erreicht, zum zweiten gibt es zwei markante Steigungen und zuletzt unterscheiden sich die Temperaturen der einzelnen Sensoren stark, am Ende

der Messung um bis 30°C . Was nicht sofort auffällt, ist die Beobachtung, dass sich die Sensoren mit niedrigerem Luftstrom schneller erhitzen und schneller über 70°C kommen. Doch dies ist zu erwarten, da bei einem schnelleren Fluss die erzeugte Wärme an den Sensoren schneller abgeführt wird.

Dass kein Gleichgewichtszustand erreicht wird ist nicht weiter überraschend. Da nur mit sehr geringen Luftströmen gekühlt wird und eine vergleichsweise dazu hohe Spannung von 1.40 V anliegt, fängt die Umgebung in der Box an, sich zu erwärmen, da die Luft die Wärme nicht effizient genug aus der Box transportiert. Dies ist zu sehen an der letzten lineare Steigung, bei der die Temperatur stetig steigt. An der ersten, wesentlich steileren Steigung ist zu erkennen, dass die Heizstreifen an den Temperatursensoren sich schnell erhitzen und anfangen, die Wärme an die Umgebung abzugeben. Dass die einzelnen Temperatursensoren sich in ihrer Endtemperatur unterscheiden ist durch ihre Position zu erklären. Sensoren, die am Rande des Modules liegen, werden durch natürliche Konvektion zusätzlich gekühlt, während die mittig liegenden Sensoren durch ihre Nachbarn noch erhitzt werden. Außerdem werden die am Eingang des Lufteinlasses liegenden Sensoren effizienter gekühlt, als Sensoren die weiter weg vom Lufteinlass sind, da sie durch die schon erwärmte Luft weniger gut gekühlt werden. Es macht auch einen Unterschied, ob die Sensoren in der oberen oder unteren Ebene sind, da die warme Luft durch natürliche Konvektion in der Box nach oben steigt. Somit müssten die äußeren Sensoren am effektivsten gekühlt werden, während die mittig liegenden Sensor am schlechtesten gekühlt werden. Die Abhängigkeit der Position kann man in der Grafik 6.3 sehr schön begutachten.

Mit größerem Volumenstrom wird man beobachten, dass sich das Hitzezentrum nach rechts verschiebt, also vom Lufteingang weg. Dies kann man sich in den Plots im Anhang A.1.1 anschauen.

Man kann nun versuchen ein Gleichgewicht bei einer kleineren Spannung von 0.9 V zu finden. Dazu wurde ein weitere Messung mit besagter Spannung und einem Luftfluss von $2400\frac{\text{L}}{\text{h}}$ durchgeführt. Wie die Grafik in Abbildung 6.4 zeigt, wurde auch hier kein Gleichgewicht gefunden. Nach dieser Messung wurde darauf verzichtet ein Gleichgewicht zu finden, da dies für die Kühlung nicht weiter von Interesse war. Ziel ist es die Kühlung der Heizstreifen zu beobachten und nicht die Kühlung der Box. Zum einem gab es zu viele Parameter, wie die Höhe des Luftfluss, die Tatsache, dass mit Luft und nicht

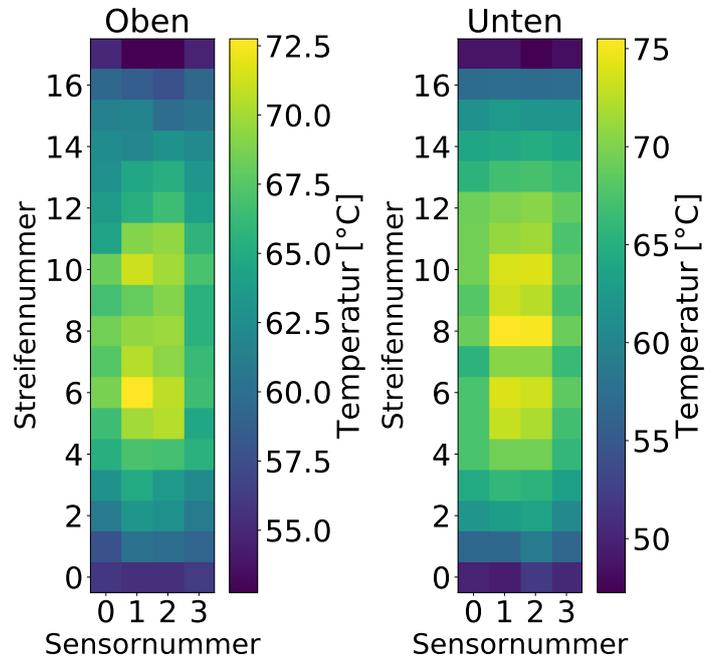


Abb. 6.3.: Temperaturprofil für die Messung ohne Luftstrom bei 1.4 V. Das linke Bild entspricht der oberen Ebene, das rechte der unteren Ebene. Beide Bilder entsprechen einer Draufsicht auf den Prototyp.

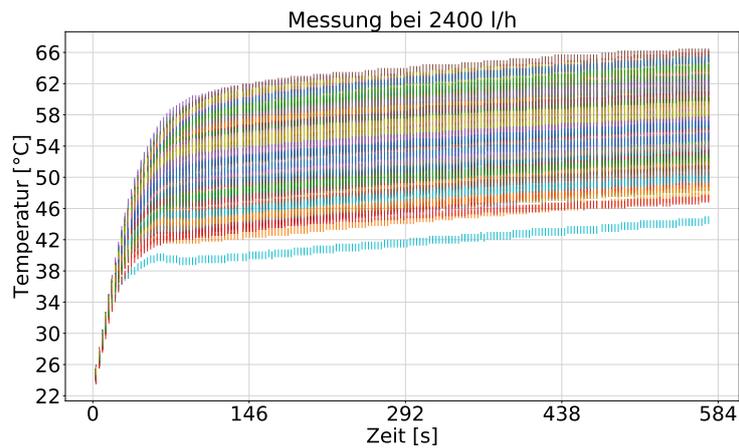


Abb. 6.4.: Messung bei einem Luftfluss von $2400 \frac{\text{L}}{\text{h}}$ und einer Spannung von 0.9 V. Es findet sich auch nach ungefähr 10 min kein Gleichgewicht.

mit Helium gekühlt wurde oder das geringe Volumen der Box im Gegensatz zu dem Volumen im späteren Experiment. Zum anderen wollte man die Sensoren nicht auf über 80 °C erhitzen, obwohl sie auch schon Temperaturen von 100 °C ausgesetzt waren. Die Befürchtung war, dass bei zu häufigen zu hohen Temperaturen, sich der Kleber der Sensoren löst und diese abfallen.

6.2.2. Aufheizung und Abkühlung

Bei den Messungen in diesem Abschnitt wurde geschaut, wie sich die aufgeheizten Sensoren abkühlen. Ein Luftfluss war von Beginn an eingeschaltet und es wurde eine Spannung an die Heizstreifen gelegt. Nach einer gewissen Zeit, wenn die Heizstreifen sich auf mindestens 45 °C erhitzt hatten, wurde die Spannung ausgeschaltet, damit die Heizstreifen sich nicht weiter erhitzen und der Luftfluss die Wärme wegtragen konnte. In der Abbildung 6.5 wurde nur die obere Ebene geheizt. Im diesem Temperaturverlauf ist eine deutliche Teilung zu erkennen. Die höheren Temperaturen wurden dabei in der oberen Ebene gemessen und die geringeren unten. Zudem fällt auf, dass die heißesten Sensoren nach 2920 s, das sind ungefähr 49 min, eine Temperatur von 38 °C haben, während sie bei der Messung, bei der beide Ebenen heizen, zu dem Zeitpunkt eine Temperatur von zirka 45 °C haben, siehe dazu die Abbildungen A.5 und A.6 im Anhang A.1.1. Demnach ist die Vermutung bestätigt, dass durch natürliche Konvektion die warme Luft nach oben steigt und die oberen Sensoren zusätzlich erhitzt.

Nach diesen Messungen wurde das Augenmerk auf den Abkühlvorgang gerichtet. Dabei wurde lediglich eine Messung gemacht, bei die der Luftfluss zuerst ausgeschaltet war und ab einer Temperatur eines Sensor von 58 °C der Luftfluss eingeschaltet wurde. Das Ergebnis war nicht weiter überraschend und sah dem Abkühlvorgang der vorherigen Messungen, wie in der Grafik 6.5 beispielsweise, ähnlich. Davon kann man sich leicht mit einem Vergleich der Grafiken 6.5 und A.7 überzeugen.

6.3. Messung ohne Box mit Luftfluss

Um später einen Vergleich mit den Messungen der Kühlung innerhalb der Box aufstellen zu können, wurden drei Messungen ohne die Box gemacht. Das Spurdetektormodul lag dabei auf einem Labortisch und war sonst identisch mit dem Aufbau für die Messung

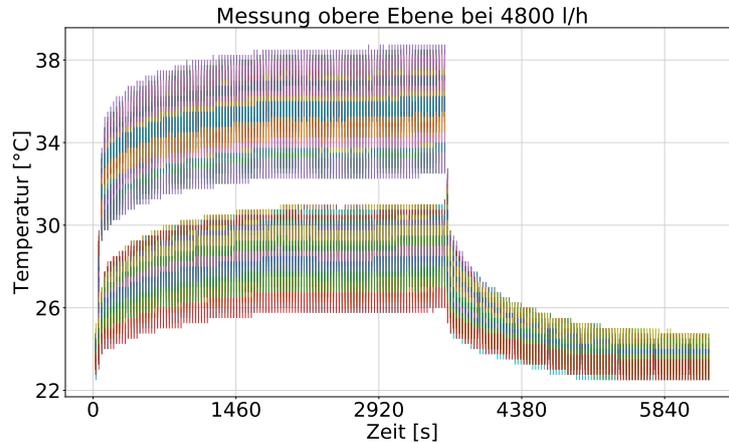


Abb. 6.5.: Langzeitmessung mit Abkühlung. Spannung obere Ebene: 0.9 V. Spannung untere Ebene: 0 V Luftfluss: $4800 \frac{\text{L}}{\text{h}}$.

mit Luft, siehe dazu Kapitel 4.

Der Luftstrom wurde auf $4800 \frac{\text{L}}{\text{h}}$ gesetzt und erst eingeschaltet, nachdem die Heizstreifen auf eine bestimmte Temperatur erhitzt wurden. Die angelegte Spannung unterscheidet sich nach Messung und wurde auf 1.0 V, 1.4 V und 1.7 V gelegt. Eine neue Erkenntnis wurde dadurch noch nicht gewonnen. In Kapitel 6.4 werden die Messungen hier mit den Messungen in der Box verglichen, um zu sehen, ob die Box die Abkühlung vielleicht sogar behindert. Die Grafiken sind im Anhang A.1.2 zu sehen in den Abbildungen A.10 und A.11 und im Kapitel 6.4.1 in Abbildung 6.7. Das Temperaturprofil unterscheidet sich nicht sichtbar von den Temperaturprofilen aus den Messungen im Kapitel 6.2.1, siehe dazu die Abbildung 6.3 und den Abbildungen im Anhang A.1.1.

6.4. Kühlung mit Luft in der Box

Nach den vorangegangenen Messungen konzentrierten sich die nachfolgenden Messungen auf das Abkühlen der Heizstreifen. Dabei wurden verschiedene Einstellungen gemessen. Diese waren primär die Ausrichtung der Box und sekundär die verschiedenen Heizleistungen, 1.0 V, 1.2 V und 1.4 V. Es ist offensichtlich, dass die Kühlung mit Zunahme der Heizleistung ineffektiver wird. Dies lässt sich in den nachfolgenden Messungen immer wieder beobachten. Mit der Spannung höher zu gehen macht keinen

Sinn, da die Abkühlung mit Luft schon an diesen Punkten recht schwach ist. Als Luftstrom wurde der zulässige Maximalfluss, vorgegeben durch das Institut für Physik, siehe Kapitel 4.2, von $4800 \frac{\text{L}}{\text{h}}$ gewählt und dieser geht auch nur durch die V-Kanäle.

6.4.1. Ausrichtung: Liegend

Da die Messungen ohne Box und die Langzeitmessungen in der Box liegend vorgenommen wurden, hat man sich zuerst die Kühlung des liegenden Detektors angeschaut, um einen direkten Vergleich mit den Messungen ohne Box aus Kapitel 6.3 zu haben.

Gegen Ende der Messung sieht man interessanterweise, dass die Temperatursensoren außerhalb der Box eine kleinere Temperaturdifferenz aufzeigen als in der Box. Das heißt jedoch nicht, dass die Heizstreifen außerhalb der Box besser gekühlt werden. Schaut man sich die Grafik genauer an, erkennt man vielmehr, dass die Temperatursensoren in der Box, nahe am Lufteinlass der V-Kanäle, besser gekühlt werden, was den größeren Temperaturunterschied zur Folge hat. Bei einer Spannung von 1 V, sieht man gegen Ende der Messung, dass die heißesten Sensoren bei beiden Messung bei ungefähr 44°C liegen.

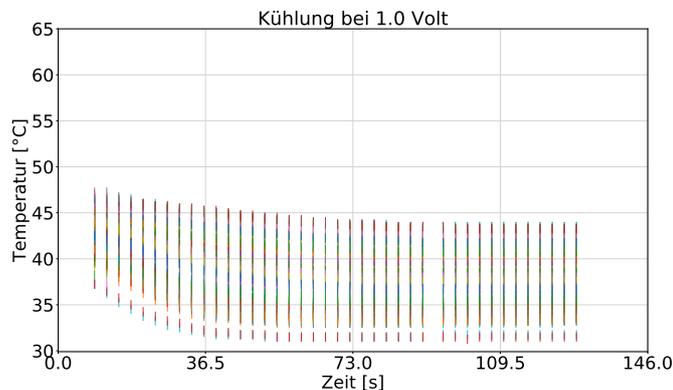


Abb. 6.6.: Temperaturverlauf der Sensoren an den Heizstreifen. Angelegte Spannung: 1.0 V. Spurdetektormodul befindet sich in der Box.

Die unterschiedlichen Spannungen sollen Aufschluss darüber geben, ob sich das Verhalten der Kühlung ändert. Es wird zwar nicht die gewünschten 7.74 W pro halbes

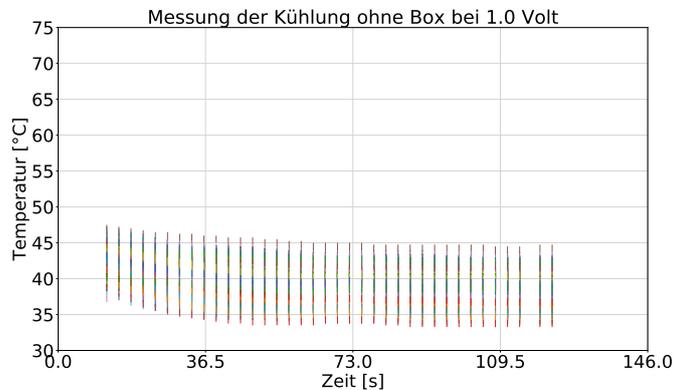


Abb. 6.7.: Temperaturverlauf der Sensoren an den Heizstreifen. Angelegte Spannung: 1.0 V.

Heizmodul erreicht, dennoch kann man eventuell durch unterschiedliche Spannungen ein Muster erkennen und Vorhersagen treffen, ob höhere Spannungen ein Problem für das Kühlprinzip sind oder nicht. Bei der Messung mit der angelegten Spannung von 1.4 V erkennt man, dass der Luftstrom bei der Messung in der Box bei einer viel höheren Temperatur eingeschaltet wurde, nämlich bei ungefähr 65 °C, im Gegensatz zur Anfangstemperatur bei der Messung außerhalb der Box, mit 60 °C. Siehe dazu die Grafiken A.10 und A.13. Am Ende der Messung liegen die Temperaturen für die Messung mit der Box bei 59 °C und die Messung außerhalb der Box bei 57 °C. Das ist eine Temperaturdifferenz von 6 °C mit der Box und 3 °C ohne die Box. Demnach ist die Kühlung mit der Box besser als die Kühlung ohne Box.

6.4.2. Ausrichtung: Stehend

Das Spurdetektormodul hat später im P2-Experiment verschiedene Ausrichtung, wie in der Abbildung 2.3 zu sehen. Eine davon wird als stehend bezeichnet, aus dem Grund, dass die Box derart aufgestellt werden muss, dass die Vorderwand, als Erinnerung siehe Kapitel 5.1.4, oben liegt, und der Detektor somit steht, wie in der Abbildung 4.4 zu sehen ist.

Die Temperaturverläufe ändern sich nicht sichtbar von den Grafiken aus 6.4.1, wovon man sich durch einen Blick auf die Grafiken A.16, A.17 und A.18 selbst überzeugen kann, weshalb nun das Augenmerk auf dem Temperaturprofil am Ende der Messung

und dem Profil der Abkühlung, damit ist die Differenz der Temperatur vom Anfang und Ende der Messung gemeint, liegt. Eine Betrachtung des Temperaturprofils zeigt, dass sich die heißesten Sensoren nun rechts oben im Modul befinden.

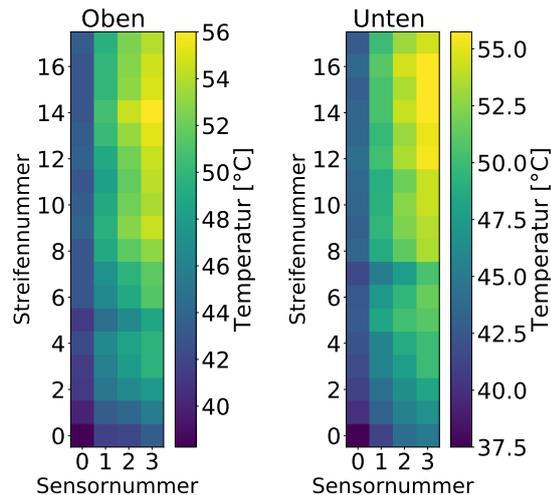


Abb. 6.8.: Temperaturprofil des Moduls. Spannung: 1.4 V. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich das Hitzezentrum rechts oben befindet.

Vergleicht man das Profil mit dem Profil der Messung im Liegen, Abbildungen im Anhang A.1.3, so sieht man, dass sich das Zentrum der Hitze nach oben verlagert hat. Dies war aus demselben Grund zu erwarten, wie die wärmeren oberen Sensoren, bei der liegenden Ausrichtung, als die unteren, da warme Luft nach oben steigt und dadurch die darüber liegenden Sensoren zusätzlich aufgeheizt werden.

Um noch weitere Aussagen treffen zu können, kann man sich das Profil der Abkühlung anschauen. Da die Temperatursensoren schon am Anfang der Messung nicht alle dieselbe Temperatur haben, ist es unmöglich zu sagen, wie gut die einzelnen Sensoren gekühlt worden sind. Das Abkühlprofil zeigt den Ort der Temperatursensoren an, wie die Plots der Temperaturprofile, siehe Beispielsweise die Grafik 6.8, mit dem entscheidenden Unterschied, dass nicht die Endtemperatur angezeigt wird, sondern wie stark die Sensoren abgekühlt werden, also die Temperaturdifferenz vom Anfang der Messung bis zum letzten Messpunkt.

In der Abbildung 6.9 kann man gut erkennen, dass die Sensoren am Lufteingang, auf der linken Seite am besten kühlen und je weiter entfernt die Sensoren vom Lufteingang sind,

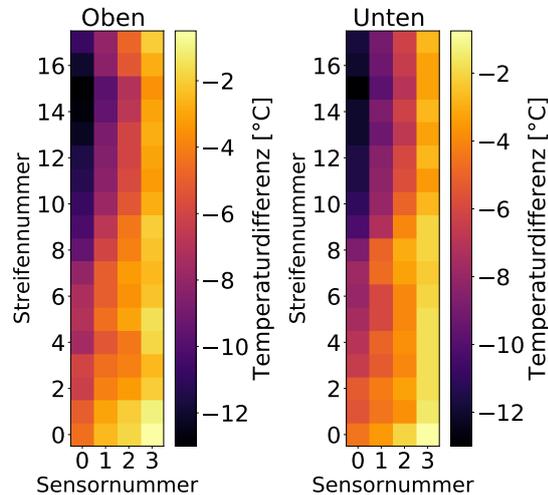


Abb. 6.9.: Temperaturdifferenz bei einer Spannung von 1.4 V.

desto schlechter werden sie gekühlt. Die Tatsache, dass die unteren rechten Sensoren nur um $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ gekühlt werden, liegt daran, dass diese Sensoren schon am Anfang nicht sehr warm wurden, da unter ihnen weniger Sensoren sind, die sie aufheizen und obendrein liegen sie am weitesten vom Lufteinlass entfernt. Das untermauert die bisherigen Beobachtungen, dass sich Sensoren durch die aufsteigende Luft zusätzlich aufheizen. Die Profile für die Spannungen von 1.0 V und 1.2 V sind im Anhang A.1.3 zu sehen. Es ist wichtig, sich nochmal in Erinnerung zu rufen, dass eine größere Temperaturdifferenz zwischen den verschiedenen Spannungen nicht zwangsläufig eine bessere Kühlung bedeutet, da der Luftfluss bei verschiedenen Anfangstemperaturen eingeschaltet wurde.

6.4.3. Ausrichtung: Seitlich

Die letzten zwei Ausrichtungen werden als links und rechts betitelt. Wenn die stehende Box einmal nach links gedreht wird, sodass die Vorderwand auf der linken Seite ist, wenn man vor der Box steht, bezeichnet dies die Ausrichtung links und wenn die Box nach rechts gedreht wird, ist dies die Ausrichtung rechts. Damit simuliert man zwei von vier Endpositionen des Spurdetektormoduls im P2-Experiment¹. Es wird bei den

¹Die anderen zwei sind stehend und kopfüber.

Messungen mit seitlich ausgerichteter Box untersucht, ob eine oder beide Ausrichtung schlechter kühlt als bei der stehenden Box und ob diese Ausrichtungen überhaupt die Kühlung der Sensoren zulässt. Es wird erwartet, dass die Kühlung wirksam ist und dass eine Ausrichtung besser kühlt als die andere, da sich der Lufteinlass einmal oben befindet (Ausrichtung rechts) und einmal unten (Ausrichtung links).

Rechts

Bei der Messung mit der Ausrichtung nach rechts, liegt der Eingang des Luftflusses oben. Die Sensoren am Lufteinlass sind die heißesten, da diese oben liegen und von der Wärme der unteren Sensoren zusätzlich geheizt werden. Das ist von Vorteil, da die Kühlung am effektivsten direkt am Eingang zu den V-Kanälen ist. Somit werden die wärmsten Sensoren am besten gekühlt. Schaut man sich nun den Temperaturverlauf an, siehe Abbildungen 6.10, A.21 und A.22, sehen die Verläufe den bisherigen Messungen ähnlich. Die Kühlung der heißesten Sensoren verläuft jedoch flacher als bei der vorherigen Messung im Stehen. Besonders auffällig ist aber, dass sich eine Lücke zwischen den Temperatursensoren, am Ende der Messungen von ungefähr 3°C , bildet, bei Abbildung 6.10 nach zirka 18 s zu erkennen. Ein weiterer Blick auf die Temperaturprofile erklärt dieses Phänomen, in den Abbildungen A.31 und 6.11a zu sehen. Der oben erwähnte Vorteil ist hier deutlich zu sehen; die oberen Sensoren werden besser gekühlt, als die unteren, sogar um ein vielfaches besser, dass die zusätzliche Aufwärmung durch die unteren Sensoren nicht bemerkbar ist. Die heißesten Sensoren befinden sich unten mittig², zwischen den Streifen sechs bis zwölf und Temperatursensoren zwei und drei. Bei allen Temperaturprofilen erkennt man eine deutliche Abgrenzung zwischen den Sensoren eins und zwei der Streifen bei der oberen Ebenen und bei der unteren Ebene zwischen null und eins. Diese Abgrenzung im Temperaturprofil ist auch die, die man im Temperaturverlauf sieht. Dabei entsprechen die kühleren Sensoren im Temperaturprofil den Temperaturverlauf unterhalb der Lücke. Die heißesten Sensoren werden auf der Abbildung rechts mittig dargestellt, das entspricht bei einer Draufsicht der gedrehten Box die Mitte der zwei unteren Spalten (Sensoren zwei und drei).

Um diese Behauptung zu untermauern, wurden aus der Abbildung 6.10 vier Temperatursensoren ausgewählt und in einem zusätzlichen Plot 6.12 abgebildet. Deutlich sieht man im oberen ersten Streifen, wie groß die Differenz zwischen Sensor

²Wenn man sich die Grafik gedreht denkt.

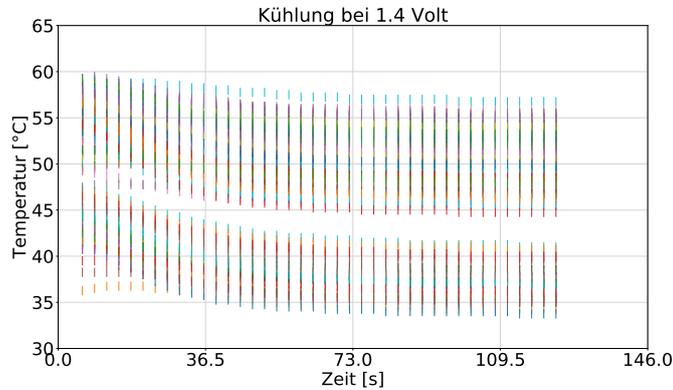
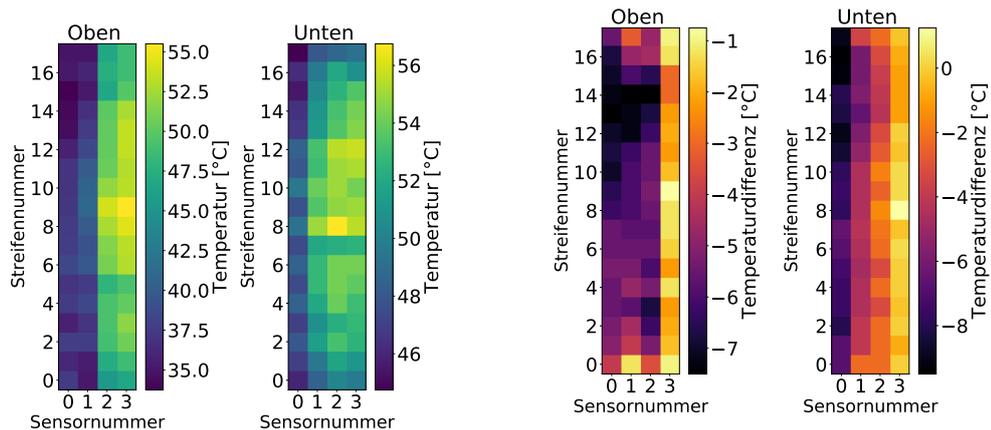


Abb. 6.10.: Temperaturverlauf bei 1.4 V.



(a) Temperaturprofil der Ausrichtung rechts. (b) Temperaturdifferenz der Ausrichtung rechts.

Abb. 6.11.: Angelegte Spannung: 1.4 V. Um die Ausrichtung der Box nachvollziehen zu können, muss man sich die Grafik um 90° nach rechts gedreht vorstellen. Zur Erinnerung: die Luft kommt von links oben, also dort wo Streifen 17 und Sensor 0 ist.

zwei (Orange) und Sensor 14 aus dem unteren vierzehnten Streifen (Rot) ist. Gut erkennbar ist auch, die Steigung der Temperatur von einigen Sensoren zu Messbeginn (obere Ebene, Streifen eins, Sensor null, in blau), trotz eingeschalteter Kühlung, während andere Sensoren (obere Ebene, Streifen fünfzehn, Sensor zwei in grün) schon gekühlt werden. Schaut man sich die Positionen der Sensoren an, fällt auf, dass die Sensoren, die

sich zu Beginn noch aufheizen, am weitesten weg vom Lufteinlass befinden. Dies könnte der Grund sein für die verzögerte Kühlung. Jedoch ist dieses Verhalten nur bei der Ausrichtung nach rechts zu beobachten. Eventuell könnte die natürliche Konvektion der Grund dafür sein indem sie aufgrund von Turbulenzen die einströmende Luft kurzfristig aufhält. Da die Kühlung nichtsdestotrotz eingesetzt hat und diese Anomalie in den anderen Messungen mit Luft nicht aufgetaucht ist, wird sie nicht weiter verfolgt, ist jedoch etwas, dass man in zukünftigen Messungen untersuchen könnte.

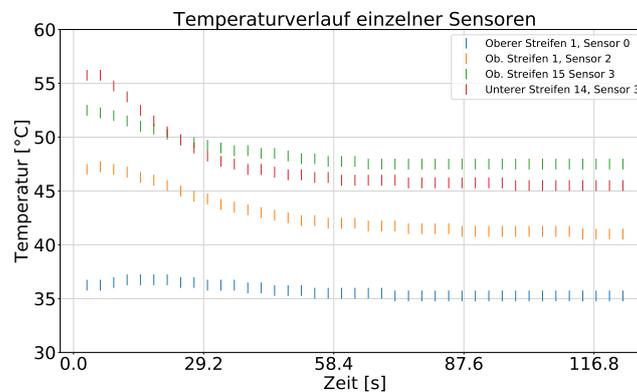


Abb. 6.12.: Temperaturverlauf bei 1.4 V für vier Temperatursensoren.

Betrachtet man das Temperaturdifferenzprofil dieser Messungen, siehe hierzu Abbildungen 6.11b und A.33, fällt auf, im Vergleich zu den Differenzprofilen der stehenden Messung, dass wesentlich mehr Sensoren ein wenig besser gekühlt werden. Lediglich die untersten Temperatursensoren, also dort wo die Luft schon aufgewärmt ist, werden nur minimal bis gar nicht gekühlt. Je nach Position der Sensoren erhitzen sie sich um 0.5°C oder kühlen um bis zu 2.5°C ab. Außerdem fällt auf, dass die untere Ebene einen größeren Gradienten hat und weniger Sensoren gut gekühlt werden. Der Differenzbereich reicht von 0.5°C bis -8.5°C , während die obere Ebene ein Differenzspektrum von -1°C bis -7.5°C besitzt. Es werden auch nur die ersten Sensoren nahe am Lufteinlass gut gekühlt, wohingegen schon die zweiten Sensoren merklich schlechter gekühlt werden. Das ist ein unerwartetes Verhalten, da die zwei Ebenen symmetrisch sind und somit ein gleiches Kühlverhalten aufweisen sollten. Obendrein ist dieses Verhalten auch nur bei der Ausrichtung nach rechts zu beobachten. Dass dies die Sensoren null und eins betrifft, könnte ein Hinweis dafür sein, dass die

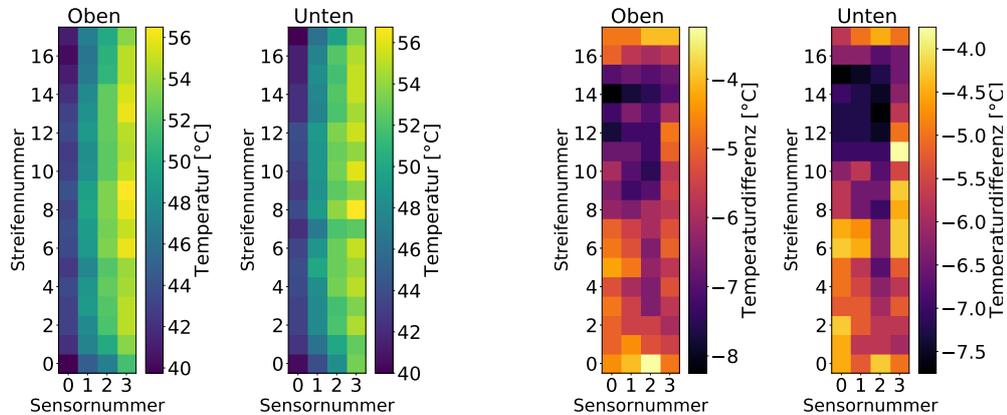
Spannung auf der oberen Ebene an der linken Seite falsch eingestellt ist. Es wurde zur Einleitung dieses Kapitels schon gesagt, dass ein Heizstreifen zwei Heizmodule hat, einmal links und rechts und die Anomalie passt genau auf diese Aufteilung. Um dies mit Sicherheit sagen zu können müsste diese Messung wiederholt werden. Unglücklicherweise wurde dies erst entdeckt, als gerade die Messungen mit Helium gemacht wurden, sodass eine einfache Wiederholung der Messung nicht möglich war. Dies ist die zweite beobachtete Anomalie und es stellt sich die Frage, ob es einen Zusammenhang zu der ersten Anomalie gibt. Aus denselben Gründen wie bei der ersten Anomalie, wird diese hier jedoch auch nicht weiter verfolgt und könnte Gegenstand von Untersuchung in noch kommenden Projekten sein.

Links

Für die Messung mit der Ausrichtung links, werden wieder dieselben Spannungen und derselbe Luftfluss gewählt. Der Eingang des Luftstromes befindet sich dieses mal unten. Ansonsten ist der Aufbau symmetrisch.

Anders als bei der Ausrichtung nach rechts, werden dieses mal die kältesten Sensoren am effektivsten gekühlt. Die Temperaturverläufe, welche in den Abbildungen A.25, A.26 und A.27 zu sehen sind, unterscheiden sich nicht sichtbar von den Temperaturverläufen der stehenden Messung. Beim Blick auf das Temperaturprofil, siehe Abbildung 6.11a, erkennt man, dass die heißeste Region ganz rechts auf alle Sensoren (drei), im Plot, verteilt ist. Für die nach links gedrehte Box, heißt das, dass sich die Hitzeregion oben befindet. Die Profile der anderen Spannungen sehen dem für 1.4 V ähnlich und können im Anhang in der Abbildung A.32 begutachtet werden. Für das Profil mit der Spannung von 1.0 V sei noch gesagt, dass es nicht unbedingt eine Bedeutung hat, dass die heißesten Sensoren lediglich 46 °C heiß sind. Ein Blick auf den Temperaturverlauf A.25 erklärt dieses Ergebnis, da man erkennt, dass die Kühlung schon bei geschätzten 50 °C aktiviert wurde und nicht wie bei den anderen Messungen bei 55 °C oder sogar 60 °C. Auch wenn man sich das Differenzprofil anschaut, erkennt man, dass die Sensoren nicht mehr oder weniger gekühlt werden, als bei einer höheren Spannung.

Des Weiteren sieht man im Differenzprofil für die 1.4 V, dass die obere Seite mehr gekühlt wird, als die untere. Dies ist auch bei der Ausrichtung nach rechts zu vermuten, sieht man hier aber deutlicher. Dies ist keine Überraschung, da von dort auch die Luft eingelassen wird. Weiterhin erkennt man, dass es keine Sensoren gibt, die sich



(a) Temperaturprofil der Ausrichtung links. (b) Temperaturdifferenz der Ausrichtung links.

Abb. 6.13.: Angelegte Spannung: 1.4 V. Um die Ausrichtung der Box nachvollziehen zu können, muss man sich die Grafik diesmal um 90° nach links gedreht vorstellen. Zur Erinnerung: die Luft kommt von rechts oben, also dort wo Streifen 17 und Sensor 0 ist.

weiter aufheizen oder ihre Temperatur beibehalten. Die am schwächsten gekühlten Sensoren werden um 2 °C gekühlt, bei der Messung mit 1.4 V sogar um mindestens 4 °C. Das kommt daher, dass wie anfangs im Paragraphen erwähnt, die kältesten Sensoren am meisten gekühlt werden. Grundsätzlich ist die Verteilung beim Temperaturprofil gleichmäßiger als bei der rechten Ausrichtung, und bei den Differenzprofile ist die Verteilung andersrum, also die linke Ausrichtung ist ungleichmäßiger als bei der rechten.

6.5. Fazit für die Luftmessung mit der Box

Bevor es an die Messung mit Helium geht, wird nochmal kurz das wichtigste aus der Messung mit Luft zusammengetragen. Bei einem Luftfluss von $4800 \frac{\text{L}}{\text{h}}$ konnte eine Spannung von maximal 1.4 V angelegt werden, was einer Leistung von $100.08 \frac{\text{mW}}{\text{cm}^2}$ entspricht. Dies ist ungefähr die Hälfte des Wertes aus der Simulation für Helium. Zudem eignet sich Luft weniger für die Kühlung als Helium. Dennoch konnten schon Erkenntnisse gewonnen werden, was das unterschiedliche Heizverhalten der Ausrichtungen angeht. Es lässt sich jedoch noch nicht mit Sicherheit sagen, welche Ausrichtung nun besser ist, falls tatsächlich eine besser sein sollte. Mit Blick auf die

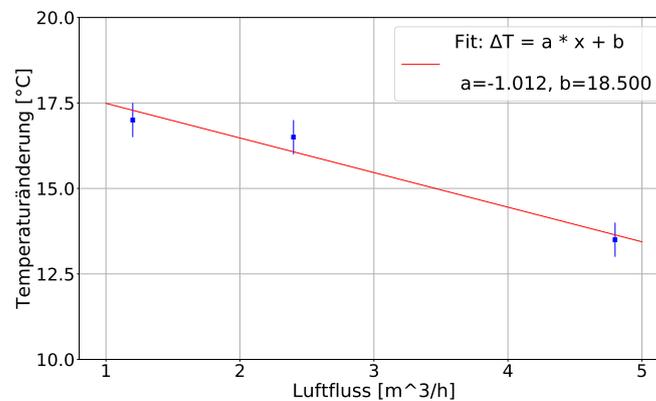


Abb. 6.14.: Linearer Fit. Spannung: 0.9 V. ΔT ist die Änderung der Temperatur der Sensoren und x die eingestellten Luftflüsse.

Temperatur- und Differenzprofile scheint es, als wäre die linke Ausrichtung die bessere. Bis auf die Messung mit der rechten Ausrichtung, wurden die anderen zwei Messungen, bei Erreichen einer oder mehrerer Sensoren der 60.5 °C, gestartet; die rechte Startete bei geschätzten 59 °C. Nach zirka 2 min hatten die heißesten Sensoren aller Ausrichtung nur noch eine Temperatur von 56.5 °C. Obwohl die Kühlung der rechten Ausrichtung bei einer geringen Temperatur gestartet wurde, ist die Endtemperatur bis auf einen Unterschied von 1 °C identisch mit den anderen Messungen. Die rechte Ausrichtung scheint demnach die schlechteste Kühlung zu haben. Die Messung mit Helium wird mehr Aufschluss darüber bringen, welche Ausrichtung die bessere Kühlung hat. Dass es keine großen Unterschiede zwischen den einzelnen Spannungen gab, ist nicht weiter verwunderlich, da dies zu einer geringen Spannung gegenüber den 3.13 V sind und die Schritte um 0.20 V nicht sehr groß sind.

Mit den getätigten Messungen, kann man sich nun anschauen, wie hoch der Fluss mit Luft sein müsste, um das Spurdetektormodul zufriedenstellend zu kühlen. Dabei werden sich die drei Messungen mit Luft angeschaut, bei denen die Spannung konstant gehalten und lediglich der Luftfluss variiert wurde.

Hier wurde für eine erste Abschätzung ein linearer Verlauf angenommen. Mit den Werten aus dem Fit, kann man nun ausrechnen, wie hoch der Fluss, für eine gewünschte Temperatur sein müsste. Dazu wird die Fitfunktion umgestellt und man erhält $x = \frac{\Delta T - b}{a}$.

ΔT [°C]	Luftfluss [m ³ /h]	Geschwindigkeit [m/s]
10	8.40	194.45
5	13.34	308.79
0	18.28	423.15

Tab. 6.2.: Benötigter Luftfluss für bestimmte ΔT und die ausgerechnete Geschwindigkeit.

Mit der Formel $x = v_s \cdot A$, dabei steht v_s für die Geschwindigkeit des Gases und A für die durch zuströmende Fläche, lässt sich die Geschwindigkeit des Gases ausrechnen. Man sieht, das man für eine Erhitzung von nicht mehr als 5 °C der Schallgeschwindigkeit³ sehr nahe kommt. Dieser Wert ist in der Hydrodynamik eine Größe, bei der neue Phänomene auftreten [14], welche in der Simulation nicht vorgesehen sind, da eine stationäre Strömung vor rausgesetzt wurde [3].

Somit scheint es, auf den ersten Blick, nicht möglich, die Temperatursensoren allein mit Luft zu kühlen. Doch diese Behauptung ist nur sehr schwach Aussagekräftig, da zum einen ohne konkrete Begründung ein linearer Verlauf angenommen wurde und zum anderen die Temperaturänderung stark von der Anfangstemperatur der Heizstreifen abhängt. Diese zwei Gründe, lassen eine fundierte Aussage nicht zu. Dennoch kann man anhand dessen eine Richtung erahnen und diese für mögliche spätere Untersuchungen als Orientierungspunkt nehmen.

6.6. Erste Messung mit Helium

Nachdem die Kühlung mit Luft problemlos vonstatten ging, wurde der Aufbau mit einem Gasschlauch an das Heliumreservoir angeschlossen. Der Fokus bei diesen Messungen liegt auf den verschiedenen Ausrichtungen und wie gut diese jeweils kühlen. Zudem wird versucht, möglichst nahe an die 3.13 V zu kommen und einen Wert für den Heliumfluss zu erreichen, der nahe an der Simulation liegt.

Dabei wurde, wie in Kapitel 4.4.2 schon erwähnt, der Rückfluss für das Helium angeschlossen. Da der Standort der Box gewechselt hat, wurde an jedem Messtag vor Beginn der eigentlichen Messung noch die Temperatur in der Box gemessen, diese war zum Zeitpunkt der ersten Messungen mit Helium befüllt, das aufgrund des geschlossenen und dichten Kreislaufes nicht mehr unkontrolliert entweichen konnte. Die Temperatur

³Diese beträgt 343.2 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Betrag an jedem Messtag (18 ± 1) °C und wurde am externen Temperatursensor, siehe Bild A.60 abgelesen.

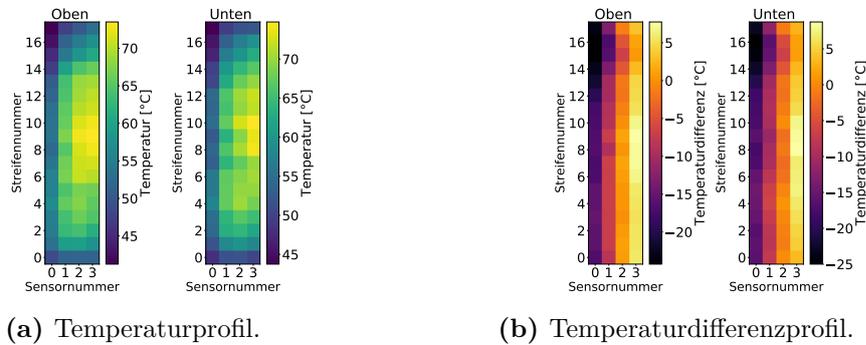
Da der Aufbau aus dem Labor komplett abgebaut, zur 5-Grad-Halle transportiert⁴ und wieder neu aufgebaut wurde, wurde geschaut ob das neue Setup auch funktioniert. Dabei wurde auch gleich ein Heliumstrom von $2500 \frac{\text{L}}{\text{h}}$ auf dem Rotameter eingestellt, diesen Wert muss man noch mit dem Korrekturfaktor $f_H = 2.7$ aus Kapitel 3.6 multiplizieren, um den echten Heliumvolumenstrom zu erhalten; dabei erhält man ein Heliumstrom von $6750 \frac{\text{L}}{\text{h}}$. Es wird im folgenden immer der wahre Heliumstrom angegeben. Die Werte für die Temperatur in der Box sind aus dem Temperaturverlauf in Abbildung A.35 zu entnehmen, und betragen ausnahmslos 18 °C, was in Übereinstimmung mit dem gemessenen Wert am Temperatursensor ist.

6.6.1. Vergleich der Heliumkühlung mit der Luftkühlung

Die nächsten Messungen sollten vergleichbar mit den Messungen für Luft sein, weshalb eine Spannung von 1.4 V angelegt wurde. Der Heliumstrom wurde auf $6750 \frac{\text{L}}{\text{h}}$ eingestellt ohne den mittleren Fluss einzuschalten und es wurden wieder die Ausrichtungen liegend, stehend, links und rechts beobachtet. Die Verläufe sind zu sehen im Anhang in den Abbildungen A.36, A.37, A.38 und A.39. Das Kühlverhalten entspricht, wie erwartet, dem der Luft. Es ist kein großer Unterschied zu den Messungen aus Kapitel 6.4 zu sehen. Es ist lediglich zu sehen, dass die Endtemperaturen einiger Sensoren 3 °C kälter sind als bei der Messung mit Luft. Dies ist jedoch nicht aussagekräftig genug um schon eine Schlussfolgerung ziehen zu können, weshalb der Heliumfluss verdoppelt wurde, auf $13500 \frac{\text{L}}{\text{h}}$ und die Spannung auf 2.0 V erhöht wurde.

Die Verläufe sind wieder den Abbildungen A.42, A.43 und A.44 im Anhang zu entnehmen. Man erkennt, dass die heißesten Sensoren am Ende der Messung bis zu 75 °C warm werden. Um dies besser zu verstehen, kann man sich wieder die Temperaturprofile und Temperaturdifferenzen anschauen, im Anhang A.45 und A.46 sowie in Abbildung 6.15 zu sehen. Da fällt allem voran die rechte Ausrichtung auf, bei die der Sensor 3 am Streifen 9 zu Beginn an 70 °C hat. Ein Blick auf das Differenzprofil zeigt zudem, dass sich dieser seit beginn der Kühlung um 5 °C erwärmt hat. Bei der stehenden Ausrichtung erwärmen sich auch einige Sensoren zu Beginn auf 70 °C und erhitzen sich anschließend um bis zu 2.5 °C. Die linke Ausrichtung hingegen weist keine

⁴Diese ist ungefähr 580 m vom Labor entfernt, also zu Fuß erreichbar.



(a) Temperaturprofil.

(b) Temperaturdifferenzprofil.

Abb. 6.15.: Angelegte Spannung: 2.0 V. Ausrichtung: Rechts. Sensor 3 am Streifen 9 ist zu Beginn auffallend heiß und erhitzt sich, nach einschalten der Kühlung um 5 °C.

derartigen Auffälligkeiten auf. Jene Sensoren, die nahe am Heliumeinlass liegen, werden um bis zu 20 °C gekühlt. Es scheint also ein Problem mit dem Heliumstrom zu sein. Dafür gibt es zwei Lösungswege. Erstens kann man den Heliumstrom erhöhen und zweitens kommt später noch der innere Fluss hinzu, zur Erinnerung siehe Abbildung 4.3. Vor allem der innere Fluss könnte dieses Problem lösen, da er demjenigen der V-Kanäle entgegengesetzt ist, also genau die unteren heißesten Sensoren zuerst kühlt.

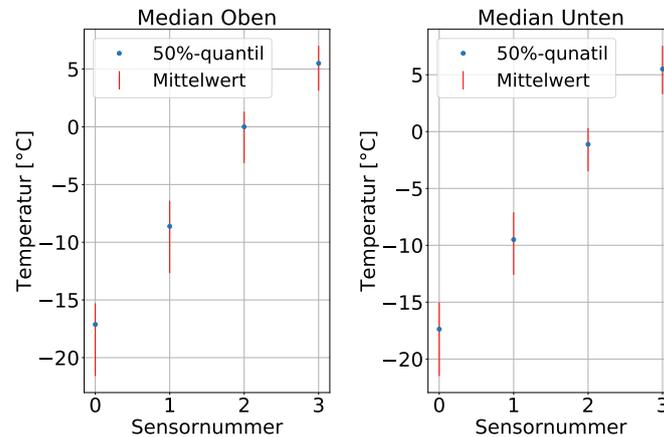


Abb. 6.16.: Mittelwert der Temperaturdifferenzen vom Anfang zum Ende der Messung, gemittelt über alle Heizstreifen. Angelegte Spannung: 2.0 V. Ausrichtung: Rechts.

Zwischen den Sensoren scheint es auch einen hohen Gradienten zu geben, zu sehen in den Temperaturprofilen, vor allem in der rechten Ausrichtung in Abbildung 6.15 zu sehen. Schaut man sich an, wie die Sensoren im Mittel gekühlt werden, sieht man das, vor allem in der rechten Ausrichtung, zwischen den Sensoren ein Unterschied von bis zu 6 °C vorhanden ist. Die linke und stehende Ausrichtungen hingegen werden in allen Sensoren im Mittel sehr gut gekühlt. Dies lässt die Vermutung keimen, dass auch die problematischsten Sensoren mit einem höherem Heliumstrom gekühlt werden könnten. Die Grafiken sind zu sehen in den Abbildungen A.47 und 6.16.

In Kapitel 6.4.3 sind wir bei der rechten Ausrichtung auf eine Anomalie gestoßen. Einige Sensoren hatten sich noch kurzzeitig aufgeheizt trotz eingeschalteter Kühlung. Dieses Verhalten ist auch hier wieder aufgetaucht. In der Grafik 6.17 sind vier Temperatursensoren aufgetragen, von denen drei Sensoren sich erst noch aufheizen, was sich aber von der oben erwähnten Beobachtung unterscheidet, da diese sich danach abkühlen.

6.7. Heliummessung mit innerem Fluss

Im vorherigen Kapitel 6.6.1 wurde vermutet, dass ein höherer Heliumstrom auch die heißesten Sensoren kühlen kann. Deshalb wird nun versucht herauszufinden, wie hoch man den Heliumfluss maximal einstellen kann, ohne die 0.1 bar Überdruck in

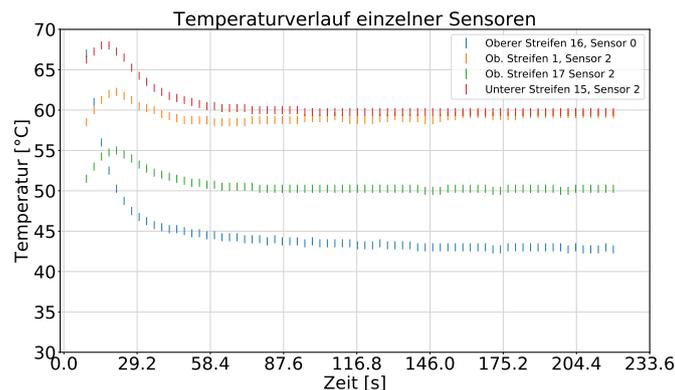
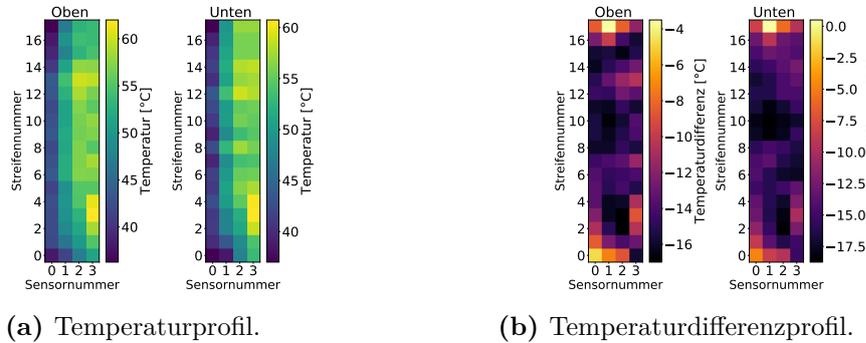


Abb. 6.17.: Verlauf einzelner Temperatursensoren. Rechte Ausrichtung mit einer angelegten Spannung von 2.0 V. Heliumstrom: $6750 \frac{\text{L}}{\text{h}}$.



(a) Temperaturprofil.

(b) Temperaturdifferenzprofil.

Abb. 6.18.: Angelegte Spannung: 2.4 V. Ausrichtung: Links. Gesamtheliumstrom: $28\,350 \frac{\text{L}}{\text{h}}$. Innerer Fluss: $5670 \frac{\text{L}}{\text{h}}$.

der Box zu überschreiten. Dabei wurden auch nach jeder Erhöhung des Heliumstroms Messungen gemacht. Aus diesen Messungen konnte jedoch lediglich die offensichtlich Schlussfolgerung gezogen werden, dass mit höherem Heliumfluss, die Wärme effektiver abgeführt werden kann. Der größtmögliche Heliumstrom wurde bei $28\,350 \frac{\text{L}}{\text{h}}$ erreicht. Ein weiterer Punkt, war das Einschalten des inneren Stromes. Um zu sehen, ob und was für eine Wirkung dieser hat, wurde die linke Ausrichtung, mit einer Spannung von 2.00 V und einem Gesamtheliumstrom von $13\,500 \frac{\text{L}}{\text{h}}$ gemessen. Dabei wurde von dem Gesamtfluss $3780 \frac{\text{L}}{\text{h}}$ in den inneren Fluss gelenkt. Die Grafiken sind im Anhang A.48 und A.49 zu sehen. Mit Einschalten des inneren Flusses hat sich die Kühlung ein wenig verschlechtert. Doch nach einigen Überlegungen, ist dies nicht verwunderlich, denn die Kühlung an den V-Kanälen ist effektiver als die im inneren Fluss. Diese Behauptung wurde auch durch eine Messung verifiziert und kann im Anhang in der Abbildung A.50 überprüft werden. Von den ursprünglichen $13\,500 \frac{\text{L}}{\text{h}}$ wurden $3780 \frac{\text{L}}{\text{h}}$ umgeleitet und fehlen nun an den V-Kanälen. Trotzdem wurden die Sensoren mit dieser Einstellung gekühlt und erreichen dieselbe Endtemperaturen. Allerdings haben bei dieser Messung mehr Sensoren eine höhere Endtemperatur als bei vorheriger.

Da die Kühlung funktionierte, wurde nun der maximale Heliumstrom $28\,350 \frac{\text{L}}{\text{h}}$, wovon $5670 \frac{\text{L}}{\text{h}}$ auf den inneren Kanal umgeleitet wurde, eingestellt. Die Spannung wurde zudem auf 2.40 V erhöht. Dies entspricht einer Leistung von $117 \frac{\text{mW}}{\text{cm}^2}$. Schon beim Blick auf den Temperaturverlauf in Abbildung A.51 erkennt man sofort, dass die heißesten Sensoren um mindestens 10°C gekühlt werden. Wenn man nun noch das Temperaturprofil und das Temperaturdifferenzprofil begutachtet, kann mit Sicherheit gesagt werden, dass

diese Kühlung mehr als ausreichend ist. Die Hitzeregion ist nicht mehr so stark zu erkennen. Vielmehr scheint es zwei kleiner heiße Regionen zu geben, welche viel kleiner sind als in den vorherigen Messungen, wie beispielsweise in Abbildung A.41 zu sehen ist, dass man nicht mehr von einer Region reden kann, sondern vielmehr von vereinzelt Sensoren.

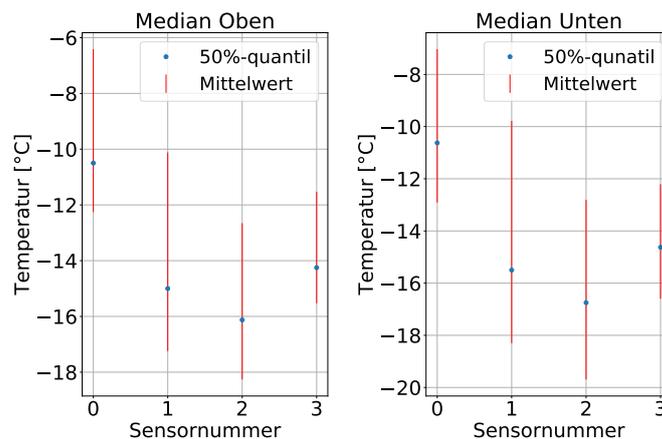


Abb. 6.19.: Mittelwert der Kühlung.

Auch das Temperaturdifferenzprofil, abgebildet in den Grafiken 6.18 und A.51 und A.50, zeigen deutlich, dass bis auf einen Sensor (Sensor 1 an Streifen 17) in der unteren Ebene alle Sensoren um mindestens $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ gekühlt werden. Beim Blick auf die Mittelwerte der Kühlung, siehe Abbildung 6.19, sehen die Ergebnisse zufriedenstellend aus. Selbst die am schlechtesten gekühlten Sensoren, werden noch um bis zu $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ im Mittel gekühlt, während die Restlich im Bereich der $15 - 16\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegen.

6.8. Maximalwerte für die Heliummessung

Da inzwischen der maximale Gesamtstrom für Helium bestimmt wurde, ist es nun an der Zeit zu sehen, wie hoch man die Spannung schalten kann, ohne die Temperatursensoren zu lange den $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ausgesetzt zu lassen. Dieses Mal wurde der Heliumstrom von Anfang an aktiviert und eine Spannung von 2.8 V eingestellt. Die Messungen wurden in den drei Ausrichtungen links, stehend und rechts gemacht. Die Temperaturverläufe sehen annähernd gleich aus und es ergibt sich keine neue Erkenntnis aus ihnen. Viel

interessanter sind die Temperaturprofile.

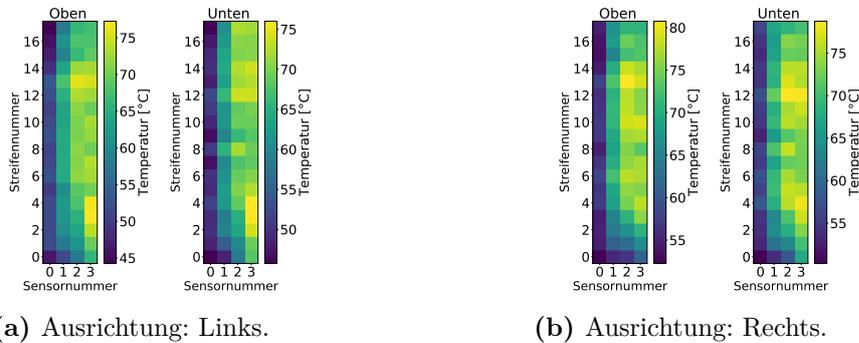


Abb. 6.20.: Angelegte Spannung: 2.4 V. Gesamtheliumstrom: $28\,350 \frac{\text{L}}{\text{h}}$. Innerer Fluss: $5670 \frac{\text{L}}{\text{h}}$.

Die Wärmeregionen sind bei allen drei Ausrichtungen ähnlich und erinnern an das Profil der liegenden Ausrichtung. Vergleiche dazu Abbildung A.40a. Die dritte Ausrichtung kann im Anhang A.52 betrachtet werden. Viel höher sollte man die Spannung nicht einstellen, zumindest nicht ohne einen höheren Heliumstrom, da die Sensoren sonst viel zu schnell aufheizen und viel zu heiß werden.

6.9. Anmerkung zur Spannung

Zur Spannung muss noch eine Sache angemerkt werden. In der Tabelle 6.1 wurde immer erwartet, dass die Spannung am Heizstreifen ankommt, die auch eingestellt wurde. Allerdings kommt diese nicht genau an und unterliegt natürlichen Verlusten durch beispielsweise der Länge der Kabel oder die Effizienz des Power Converters. Da die Spannung in der Formel $P = \frac{U^2}{R}$, siehe ersten Abschnitt in Kapitel 6, zum Quadrat eingeht, wird der Fehler beim Umrechnen in die Leistung mit immer höherer Spannung größer. Deshalb wurden bei drei ausgewählten Spannungen die tatsächliche Spannung, die an den Heizstreifen ankommt gemessen. Diese sind in folgender Tabelle zu sehen: Dabei wurden pro Spannung sechs verschiedene Heizstreifen gemessen und daraus der Mittelwert berechnet. Mit steigender Spannung scheint auch der Verlust zu steigen. Während bei 2.00 V ein Verlust von 0.98 % vorhanden ist, hat man bei 2.80 V schon einen Verlust von 0.96 %. Dies klingt nicht nach viel, doch rechnet man die Leistung mit diesen gemessenen Werten um, erhält man schon deutlich andere Ergebnisse.

Eingestellte Spannung [Volt]	Tatsächliche Spannung [Volt]
2.00	1.96
2.40	2.34
2.80	2.70

Tab. 6.3.: Angelegte Spannung und die gemessene Spannung am Heizstreifen.

Spannung [Volt]	Leistung [Watt]	Tatsächliche Leistung [Watt]
2.00	2.29	2.17
2.40	3.29	3.10
2.80	4.48	4.17

Tab. 6.4.: Angelegte Spannung, umgerechnete Leistung mit der angelegten Spannung und umgerechnete Leistung mit der gemessenen Spannung.

Da die maximale Spannung aus der Simulation von 3.13 V jedoch nicht erreicht werden konnte, spielte dies in den obigen Messungen keine dramatische Rolle. Für zukünftige Messungen, die an diese Werte herankommen, muss dies jedoch beachtet werden.

Dies lässt sich natürlich auf die Leistung übertragen. Die Differenz der Spannung aus Tabelle 6.4 verschwindet nicht einfach, sondern geht an den Kabel und Bauteilen verloren. Demnach kann man jene Komponenten als Heizung betrachten, die die Luft in der Box erwärmt. Die erzeugte Leistung vom Labornetzteil wurde niedergeschrieben und mit dieser kann man vergleichen, wie viel Leistung über die Komponenten direkt in die Umgebungsluft der Box gelangen. Wie man sieht sind diese Werte

Leistung Heizstreifen [W]	Leistung Komponenten [W]
40.14	0.07
59.25	0.15
80.64	0.41

Tab. 6.5.: Angelegte Spannung, umgerechnete Leistung mit der angelegten Spannung und umgerechnete Leistung mit der gemessenen Spannung.

sehr klein gegenüber der Gesamtleistung der Heizstreifen. Doch auch hier gilt, dass mit zunehmender Spannung diese Werte steigen. Da jedoch der innere Fluss offen ist und mit der Luft in der Box in Kontakt kommt, sind hier keine Bedenken zu sehen, dass sich in bestimmten Bereichen der Box ungewollt Hitze sammelt. Über dessen hinaus, sind die Spurdetektormodule im P2-Experiment in einem großen Heliumbehälter, in

der die möglich gesammelte Hitze um das Spurmodul entweichen kann.

6.10. Fazit für die Messung mit Helium

Die Ergebnisse der Heliummessung sind sehr zufriedenstellend. Es wurde beobachtet, wie mit steigendem Fluss die Kühlung immer effizienter wurde. Es wurden Maximalwerte von bis zu 2.4 V für die Spannung und $28\,350 \frac{\text{L}}{\text{h}}$ für den Heliumfluss erreicht, mit denen noch Messungen möglich waren, ohne dass die Temperatursensoren zu heiß wurden. Zum Vergleich seien noch einmal die Werte aus der Simulation erwähnt. Das waren für die Spannung 3.13 V und für den Heliumstrom $27\,972 \frac{\text{L}}{\text{h}}$. Die Spannung in der Messung beträgt also 80 % vom Wert der Simulation wohingegen der Heliumstrom in der Messung gerade mal 38 % vom berechneten Wert aus der Simulation beträgt. Schon das Anfassen der Box oder die Schläuche der Heliumrückführung ließen eine sehr gute Kühlung vermuten und tatsächlich wurde eine sehr gute Kühlung beobachtet. Eine weitere Erkenntnis war die, dass mit eingeschaltetem inneren Fluss die Kühlung scheinbar schlechter wird. Doch mit zunehmendem Heliumstrom wurde auch das besser. Zudem ähneln sich die Temperaturprofile der verschiedenen Ausrichtungen mit steigendem inneren Heliumfluss immer mehr. Mit geringem Gasfluss war die Kühlung stark durch natürliche Konvektion geprägt, welche bei hohem Heliumstrom nicht mehr zu sehen war.

In Kapitel 6.6 wurde die Heliumtemperatur gemessen. Diese betrug $(18 \pm 1)^\circ\text{C}$. In der Simulation wurde mit einer Heliumtemperatur von 0°C simuliert. Dies verursacht eine Verschiebung der Endtemperatur in der Messung um die Differenz der zwei Werte, also von 60°C auf 78°C . Wenn die Werte aus der Simulation in zukünftigen Experimenten eingestellt werden, muss man sich dessen bewusst sein.

7. Fazit und Ausblick

Der gebaute Prototyp des Spurdetektormoduls dient unter anderem dazu, sowohl das Design für den Heliumfluss als auch die CFD-Simulation [3] zu testen. Dort wurde für das Spurdetektormodul ein totaler Heliumfluss von $75\,600 \frac{\text{L}}{\text{h}}$ bei einer Leistung von $200 \frac{\text{mW}}{\text{cm}^2}$ berechnet, um die Sensoren auf 60°C zu halten. Für das Rotameter mussten der Heliumfluss umgerechnet werden und beläuft sich auf $27\,972 \frac{\text{L}}{\text{h}}$. Auch die Leistung musste umgerechnet werden um zu wissen, wie viel Spannung man an den Heizstreifen einstellen muss, es sind 3.13 V pro Heizmodul um eine Leistung von 2.8 W pro Heizmodul zu haben. Ziel der Arbeit war es nun das Design des Prototypen mit den berechneten Werten aus der Simulation zu testen.

Dazu musste zuerst eine Box konstruiert werden, in die das Detektormodul gelegt werden konnte, um diesen dann mit Helium zu kühlen. Die Box hatte eine äußerst zufriedenstellende Leckrate von $8 \times 10^{-6} \frac{\text{mbar}\cdot\text{L}}{\text{s}}$. Somit konnte das genutzte Helium auch wieder in die Heliumrücknahme zurück geführt werden.

Zuvor wurden jedoch noch Messungen mit Luft gemacht. Dort hat sich gezeigt, dass eine Kühlung mit einem Fluss von $4800 \frac{\text{L}}{\text{h}}$ und einer Spannung von 1.4 V die Sensoren noch kühlen kann, unabhängig von der Ausrichtung der Box. Nachdem das Kühlverhalten mit Luft bekannt war, wurde es Zeit die Box mit Helium zu kühlen.

Dabei wurden die Maximalwerte 2.40 V und $10\,500 \frac{\text{L}}{\text{h}}$ erreicht. Es war nicht möglich mit dem Fluss höher zu gehen, da der verwendete Druckminderer der Werkstatt aus der Kernphysik nicht dafür ausgelegt war und die Rückführung der Box zu kleine Schläuche hatten und auch die Spannung ließ sich nicht erhöhen, da schon jetzt die Temperatur der Sensoren rasant auf bis zu 70°C anstiegen und diese nicht unkontrolliert auf höhere Temperaturen gelangen sollten. Der Überdruck stieg auf 0.1 bar und dieser Wert sollte aus Sicherheitsgründen nicht überschritten werden. Die sehr gute Kühlung bei diesem verhältnismäßig geringen Fluss lässt es durchaus Plausibel erscheinen, dass die in der Simulation errechneten Werte realistisch sind und die Sensoren bei voller Leistung und vollem Fluss bei 60°C gehalten werden können.

Die nächsten Schritte könnten sein, den Rückfluss zu vergrößern, um einen höheren Heliumfluss zu bekommen und die Kühlung bei der höchsten Leistung von $400 \frac{\text{mW}}{\text{cm}^2}$ des Spurdetektormodul zu beobachten. Zudem könnte, für höhere Heliumströme, die Messung länger laufen, um zu sehen ob auch tatsächlich die 60°C oder überhaupt ein Gleichgewicht erreicht werden kann.

Ein weiterer Schritt wäre das genaue Einstellen der Spannung für die Heizstreifen, um die Werte aus der Simulation reproduzieren zu können. Wir wissen, dass der Widerstand von Kupfer abhängig von der Temperatur ist, und für unsere Zwecke im Bereich $R = 1.7 - 1.8 \Omega$ liegt. Zudem haben die eingebauten Power Converter im Modul eine bestimmte Effizienz in Abhängigkeit der Spannung, zwischen $\mu = 60 - 80\%$ [13]. Wenn also der Endfluss von $75\,600 \frac{\text{L}}{\text{h}}$ erreicht werden kann, muss nochmal genauer auf die einzustellende Spannung geschaut werden.

Des weiteren, könnte man sich überlegen, ob man bei einer Ausrichtungen nicht auch den Einlass für Helium wechselt, um die Einstellung der besseren Kühlung zu haben. Bei der linken Ausrichtung also den Einlass nicht links unten, sondern links oben zu haben.

Sollte man sich entschließen eine zweite Box zu bauen, sollte sich überlegt werden, ob nicht doch mit einem Zwei-Komponenten Kleber geklebt werden soll oder wieder mit Chloroform. Es hat beides seine Vor- und Nachteile. Statt wieder Acrylglas für die ganze Box zu nehmen, könnte man diesmal ein Gehäuse aus Metal, zum Beispiel Aluminium, nehmen und Fenster aus Acrylglas eingebaut werden, ähnlich dem Panel aus Aluminium.

A. Anhang

A.1. Graphiken

A.1.1. Langzeitmessung mit Luft

Temperaturverlauf - Luft

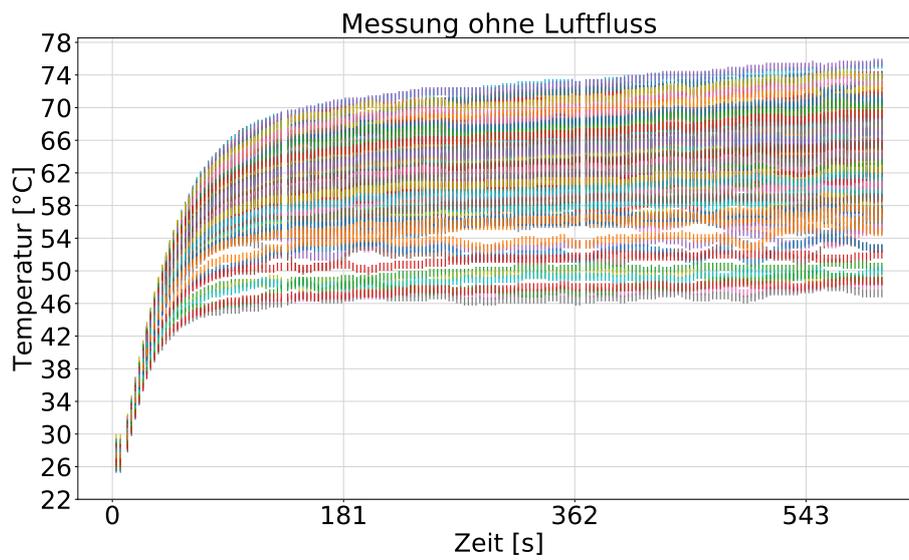


Abb. A.1.: Messung ohne Luftfluss. Heizleistung bei 1.4 V.

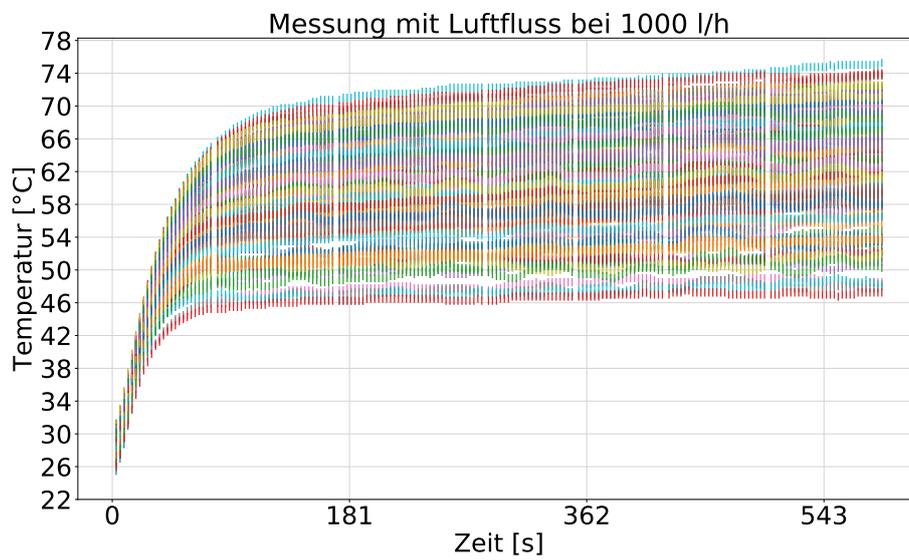


Abb. A.2.: Messung ohne Luftfluss. Heizleistung bei 1.4 V.

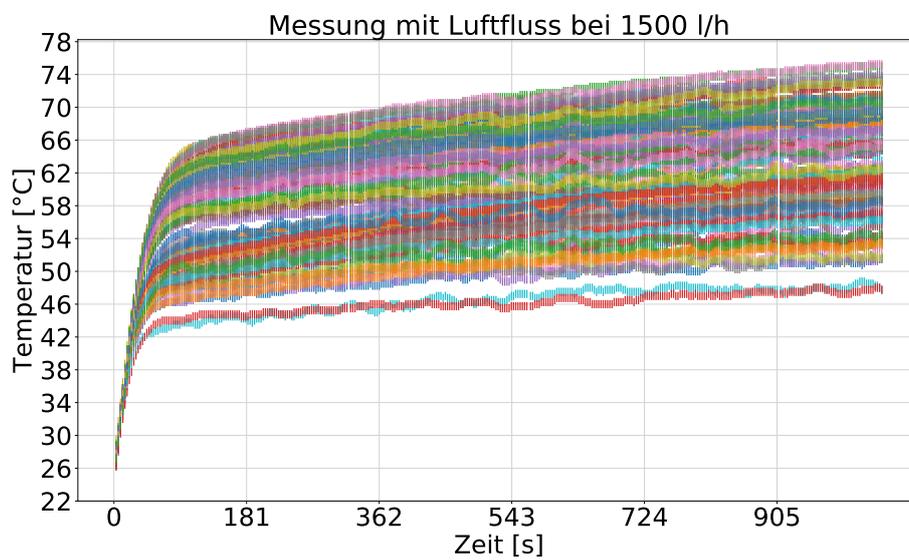


Abb. A.3.: Messung ohne Luftfluss. Heizleistung bei 1.4 V.

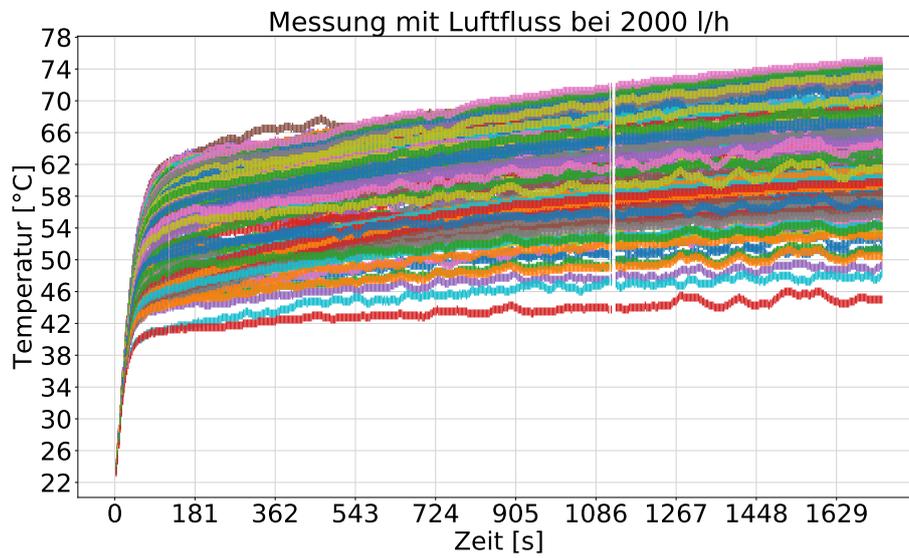


Abb. A.4.: Messung ohne Luftfluss. Heizleistung bei 1.4 V.

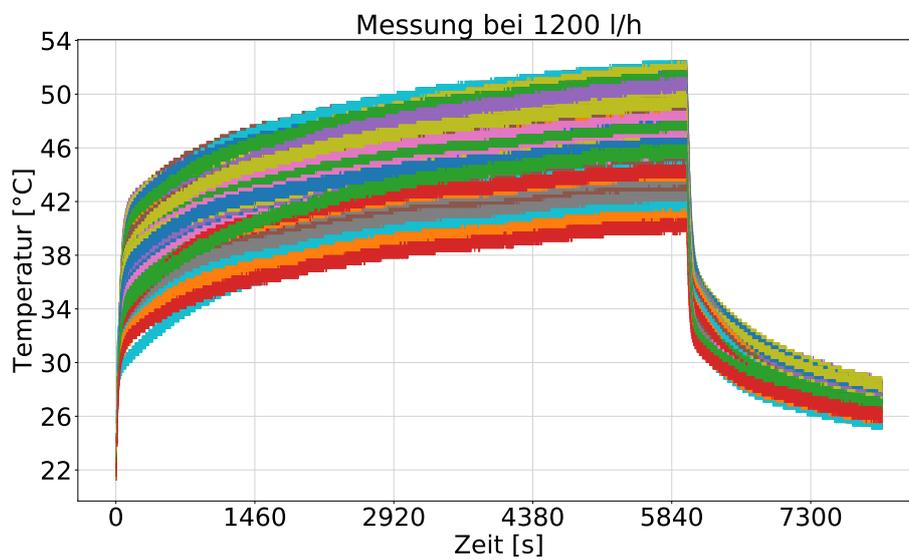


Abb. A.5.: Langzeitmessung mit Abkühlung. Spannung: 0.9 V. Luftfluss: 1200 $\frac{\text{L}}{\text{h}}$.

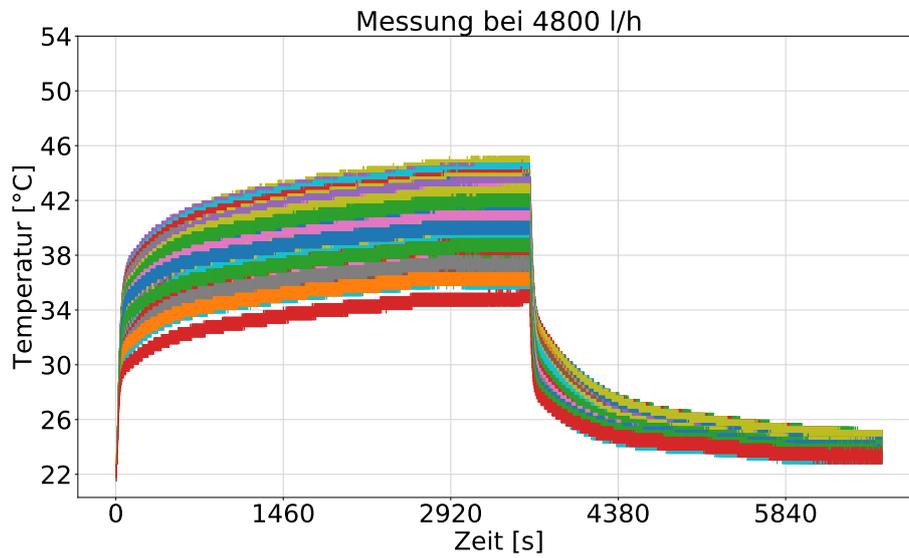


Abb. A.6.: Langzeitmessung mit Abkühlung. Spannung: 0.9 V. Luftfluss: 4800 $\frac{\text{L}}{\text{h}}$.

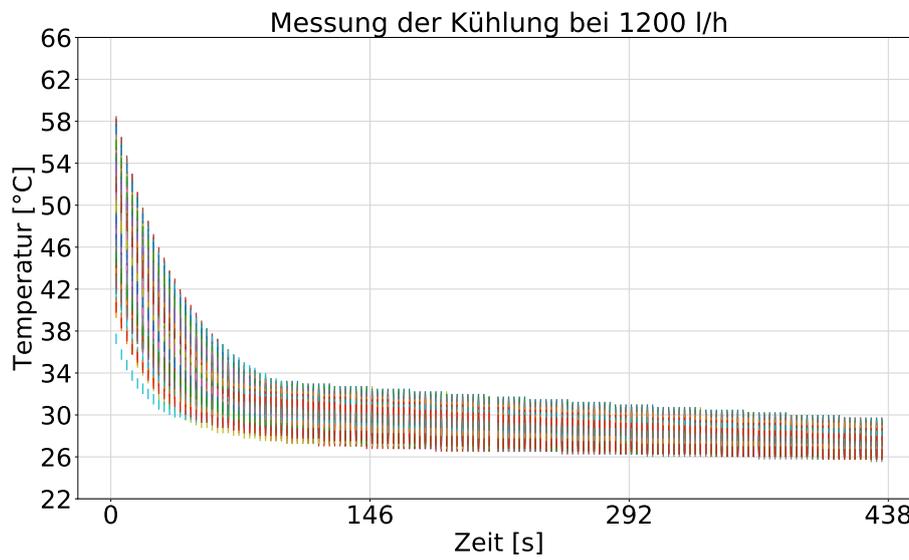
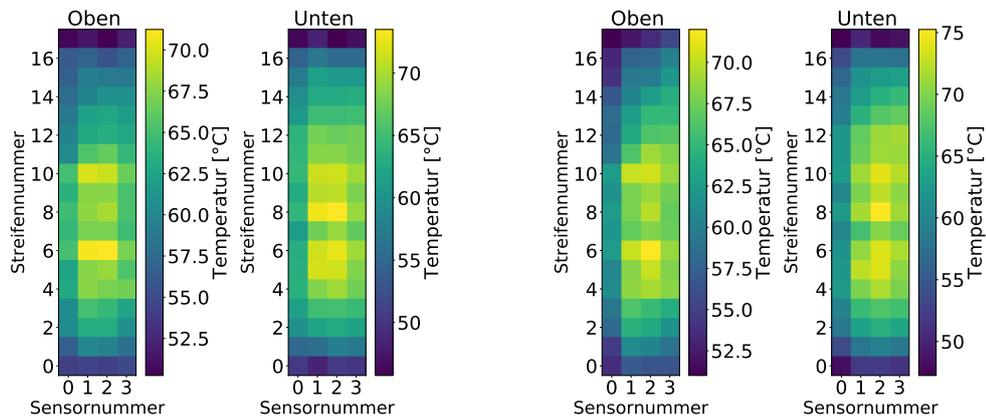


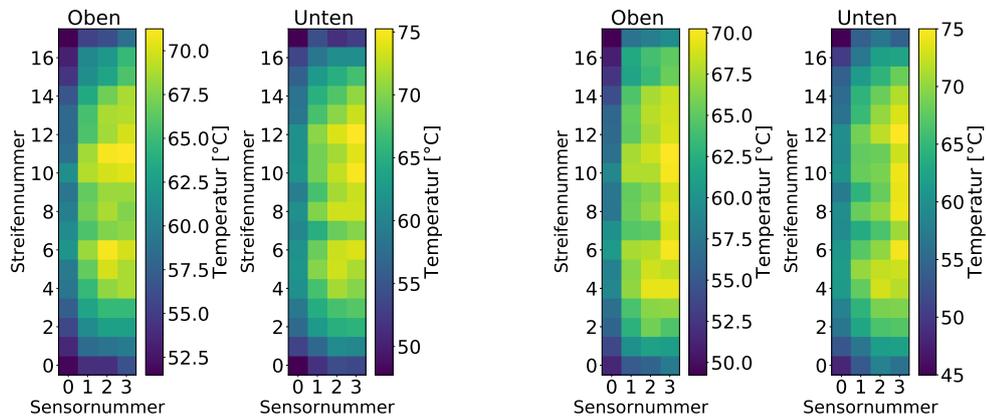
Abb. A.7.: Messung des Abkühlvorganges. Spannung: 0.9 V. Luftfluss: 4800 $\frac{\text{L}}{\text{h}}$.

Temperaturprofil - Luft



(a) Eingestellter Luftstrom von $500 \frac{\text{L}}{\text{h}}$. (b) Eingestellter Luftstrom von $1000 \frac{\text{L}}{\text{h}}$.

Abb. A.8.: Temperaturprofil für die Messung mit einer Spannung von 1.4 V. Die Profile mit der Überschrift „Oben“ entsprechen der oberen Ebene, „Unten“ steht für die untere Ebene. Beide Bilder entsprechen einer Draufsicht auf den Prototyp.



(a) Eingestellter Luftstrom von $1500 \frac{\text{L}}{\text{h}}$. (b) Eingestellter Luftstrom von $2000 \frac{\text{L}}{\text{h}}$.

Abb. A.9.: Temperaturprofil für die Messung mit einer Spannung von 1.4 V.

A.1.2. Messung mit Luftfluss außerhalb der Box

Der Luftfluss beträgt bei diesen Messungen immer $4800 \frac{\text{L}}{\text{h}}$.

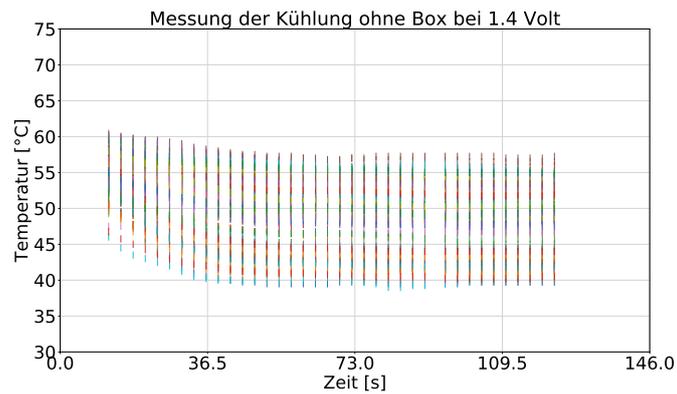


Abb. A.10.: Temperaturverlauf der Sensoren an den Heizstreifen. Angelegte Spannung: 1.4 V.

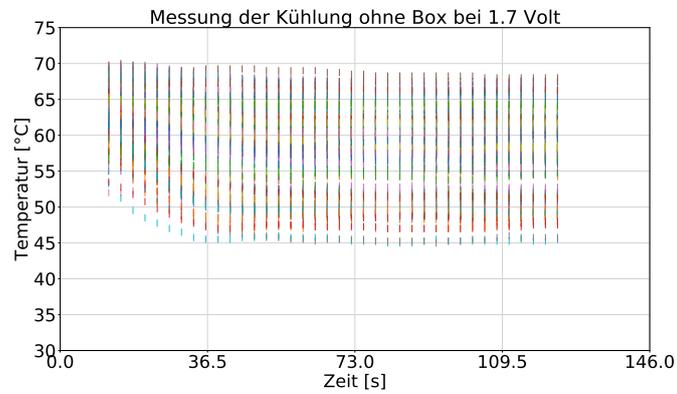


Abb. A.11.: Temperaturverlauf der Sensoren an den Heizstreifen. Angelegte Spannung: 1.7 V.

A.1.3. Messung mit Luftfluss in der Box

Temperaturverlauf - Luft - Liegend

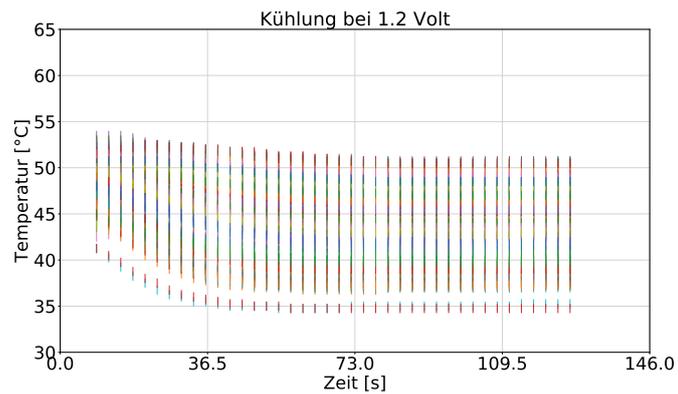


Abb. A.12.: Temperaturverlauf der Sensoren an den Heizstreifen. Angelegte Spannung: 1.2 V.

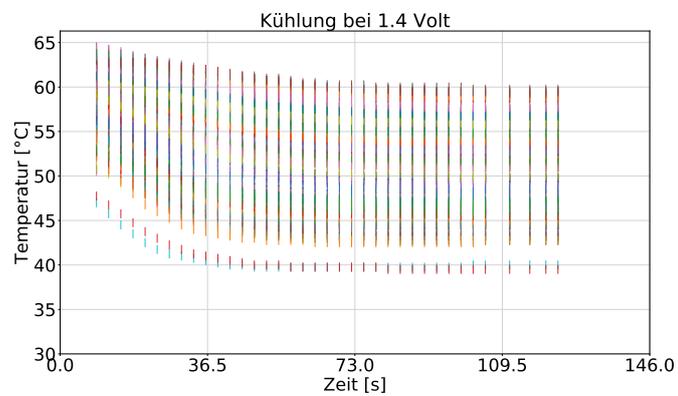
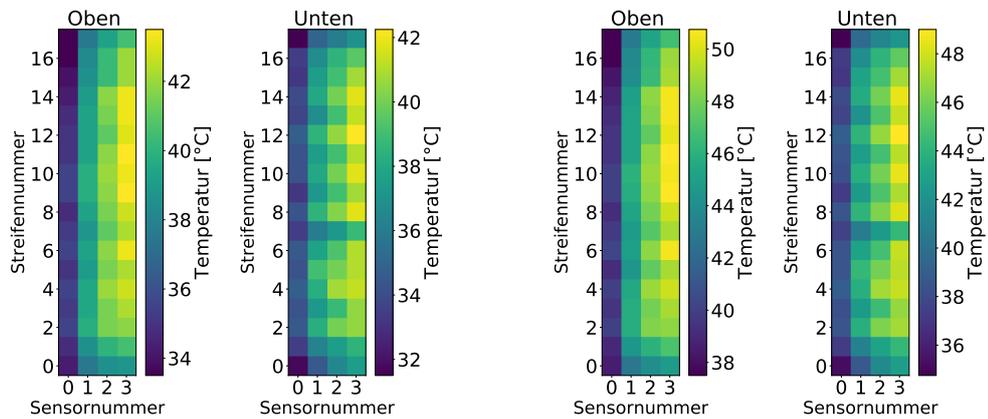


Abb. A.13.: Temperaturverlauf der Sensoren an den Heizstreifen. Angelegte Spannung: 1.4 V.

Temperaturprofil - Luft - Liegend



(a) Angelegte Spannung: 1.0 V.

(b) Angelegte Spannung: 1.2 V.

Abb. A.14.: Temperaturprofil der Sensoren.

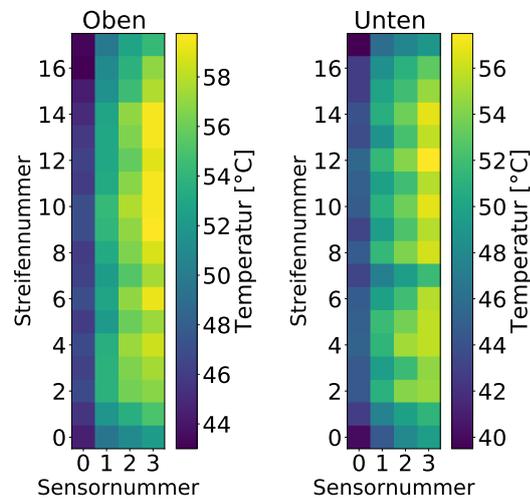


Abb. A.15.: Temperaturprofil der Sensoren. Angelegte Spannung: 1.4 V.

Temperaturverlauf - Luft - Stehend

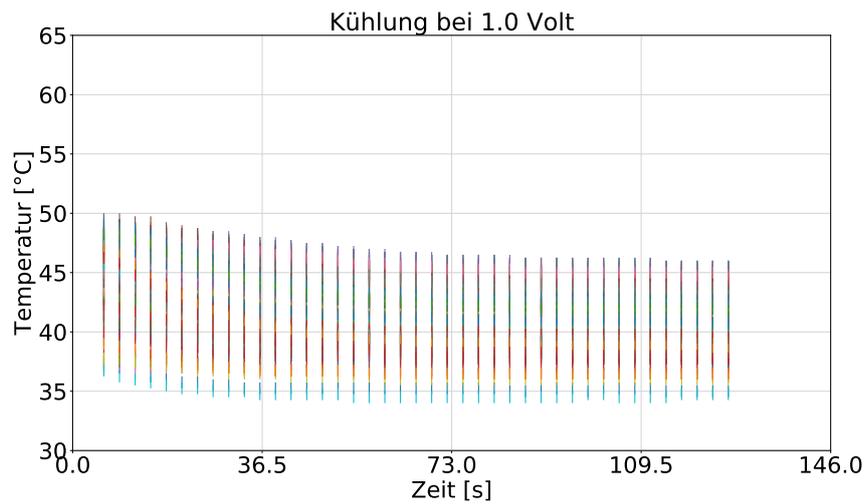


Abb. A.16.: Temperaturverlauf der Sensoren an den Heizstreifen. Angelegte Spannung: 1.0 V.

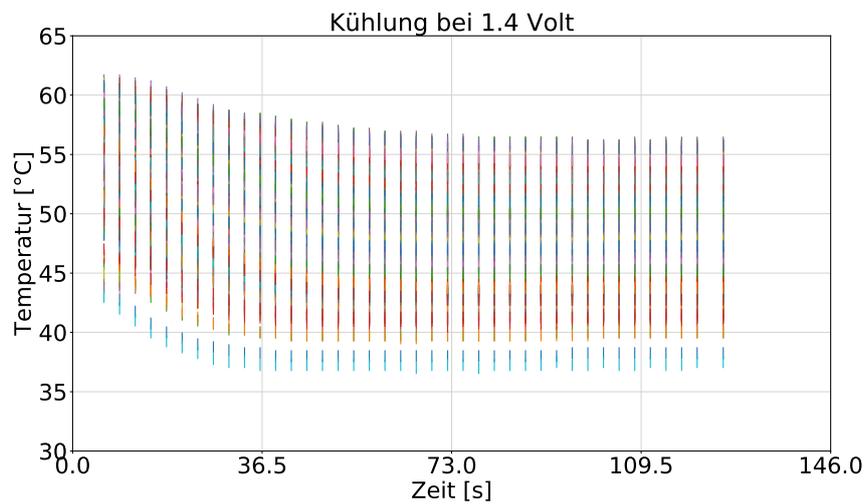


Abb. A.17.: Temperaturverlauf der Sensoren an den Heizstreifen. Angelegte Spannung: 1.4 V.

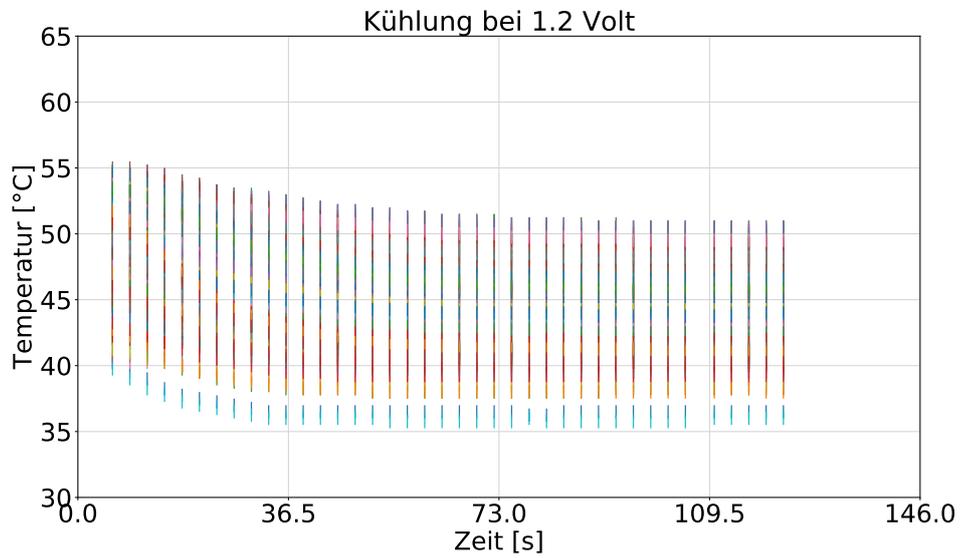
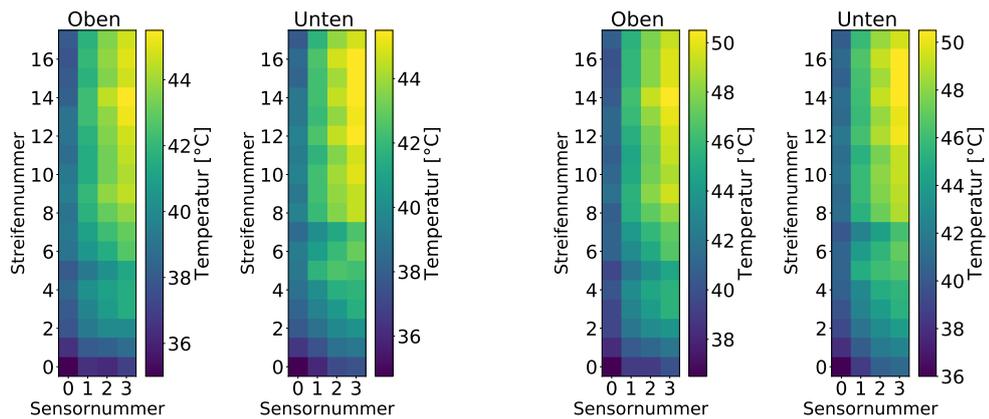


Abb. A.18.: Temperaturverlauf der Sensoren an den Heizstreifen. Angelegte Spannung: 1.2 V.

Temperaturprofil- Luft - Stehend

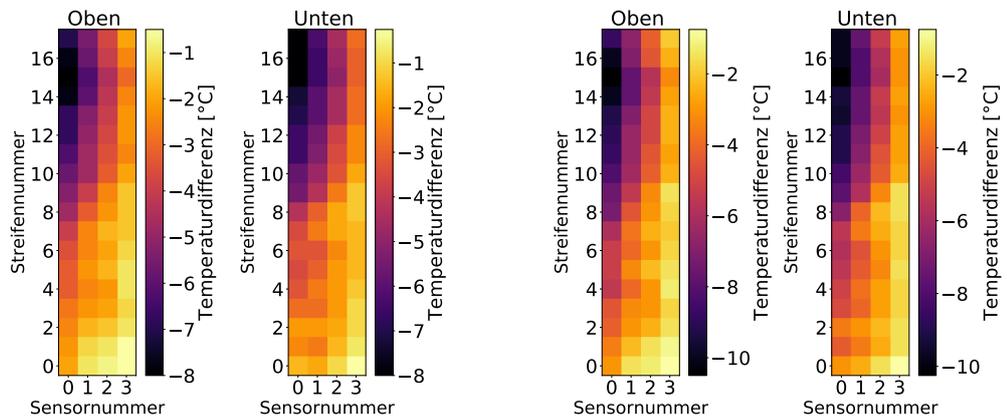


(a) Angelegte Spannung: 1.0 V.

(b) Angelegte Spannung: 1.2 V.

Abb. A.19.: Temperaturprofil der Sensoren.

Temperaturdifferenz - Luft - Stehend



(a) Angelegte Spannung: 1.0 V.

(b) Angelegte Spannung: 1.2 V.

Abb. A.20.: Temperaturdifferenz der einzelnen Sensoren.

Temperaturverlauf - Luft - Seitlich

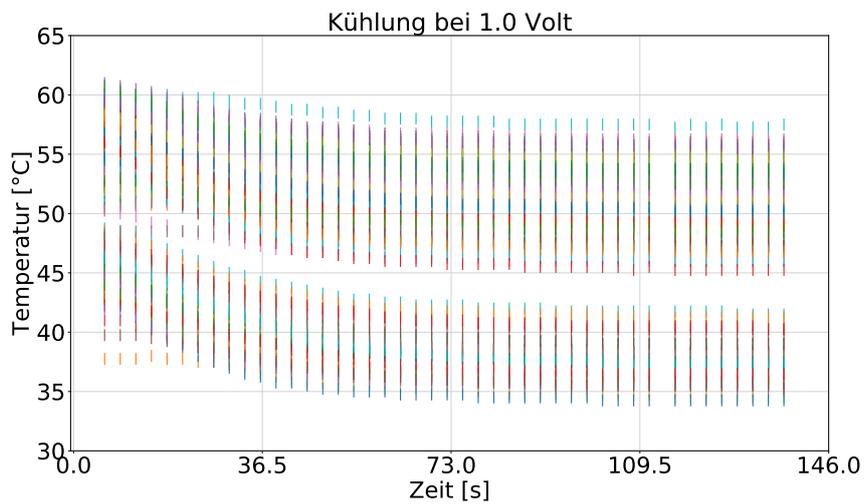


Abb. A.21.: Temperaturverlauf, rechte Ausrichtung bei 1.0 V.

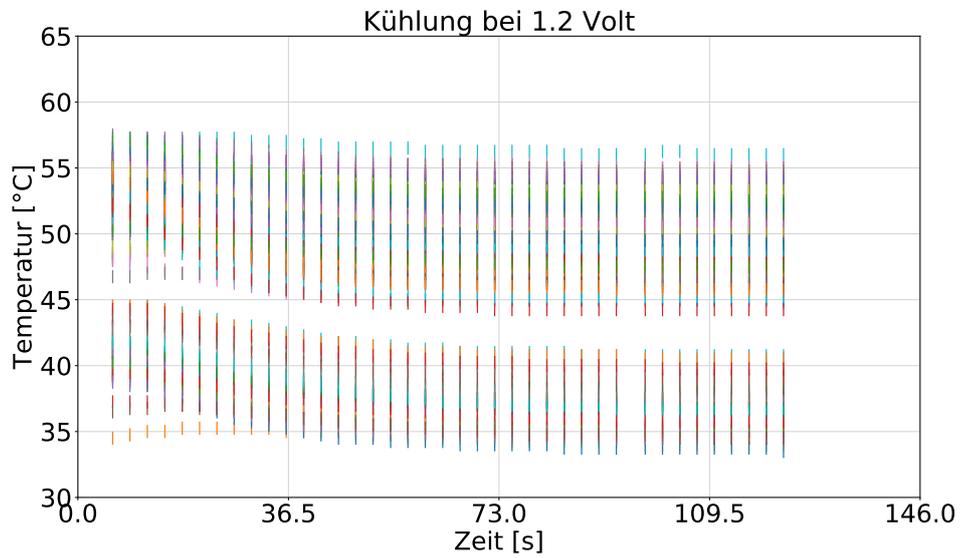


Abb. A.22.: Temperaturverlauf, rechte Ausrichtung bei 1.2 V.

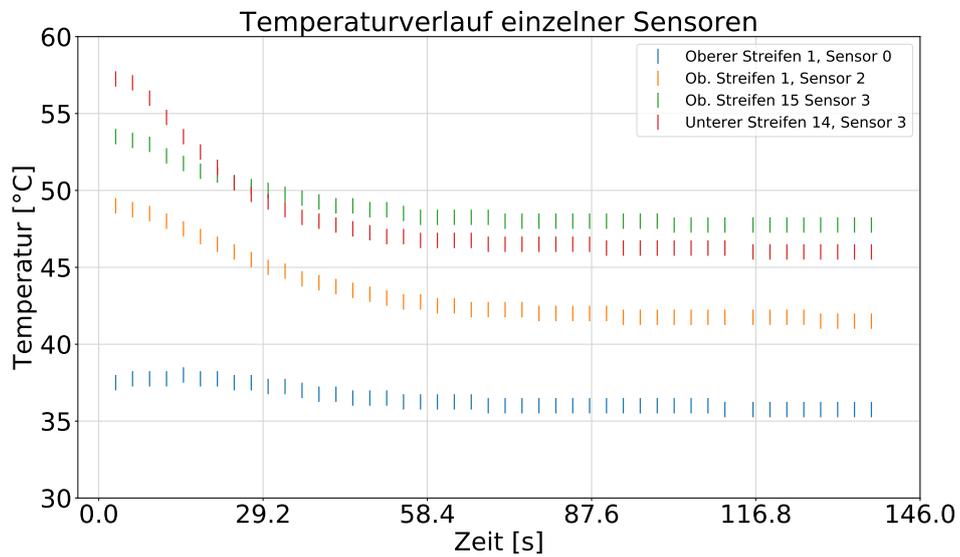


Abb. A.23.: Temperaturverlauf einzelner Sensoren, rechte Ausrichtung bei 1.0 V.

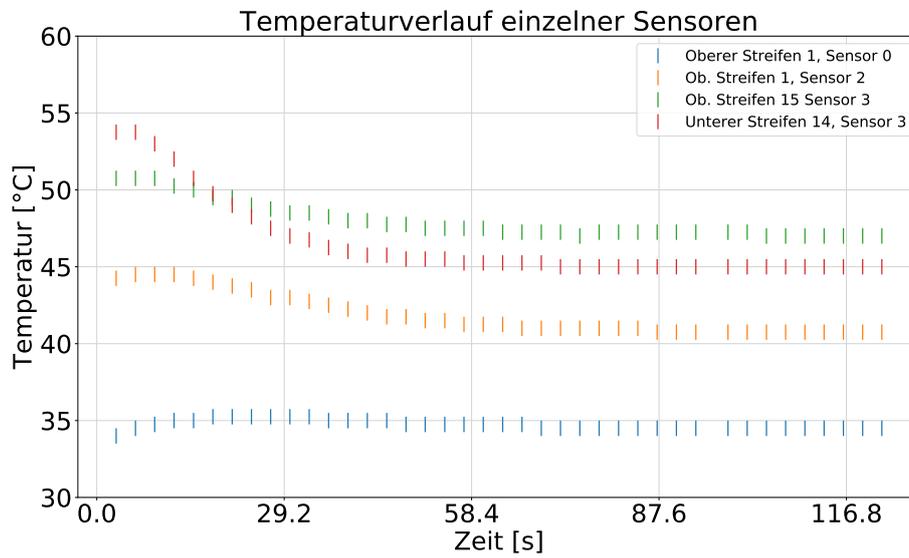


Abb. A.24.: Temperaturverlauf einzelner Sensoren, rechte Ausrichtung bei 1.2 V.

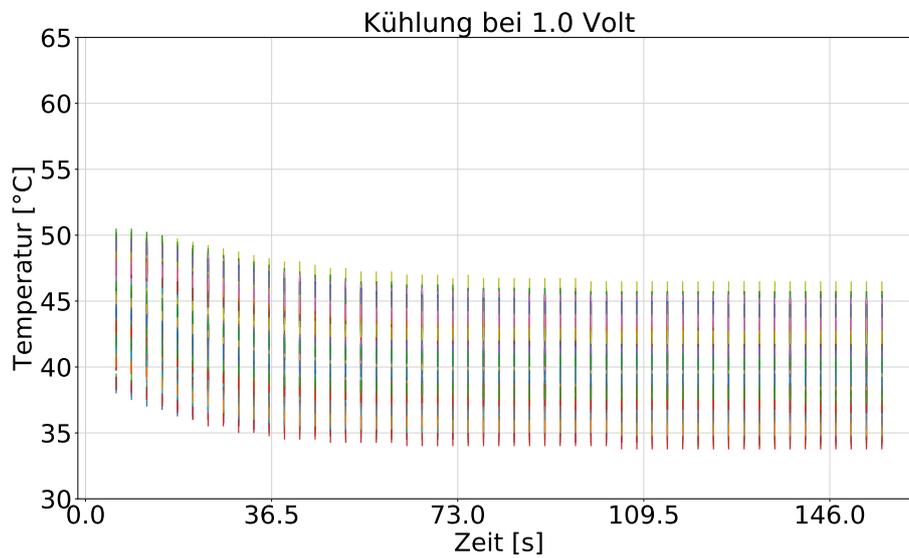


Abb. A.25.: Temperaturverlauf einzelner Sensoren, linke Ausrichtung bei 1.0 V.

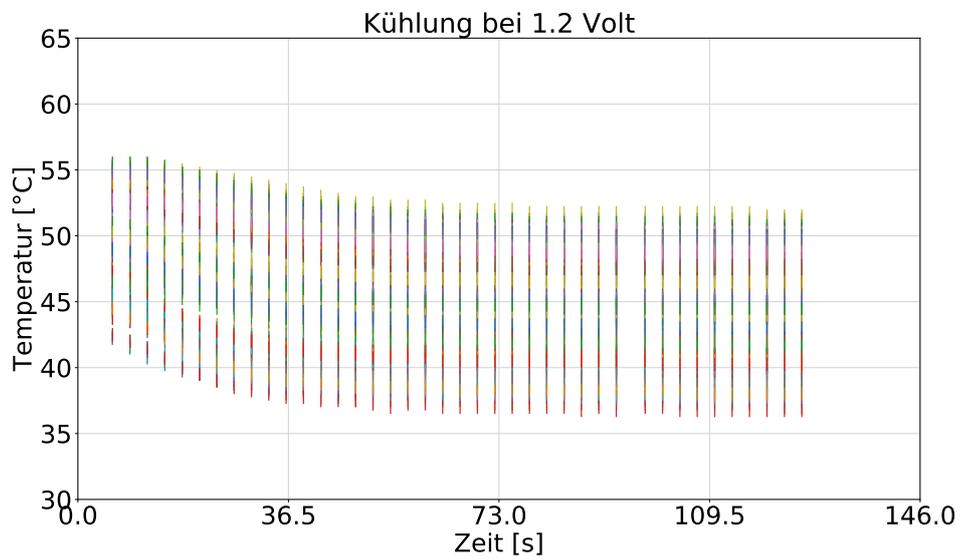


Abb. A.26.: Temperaturverlauf einzelner Sensoren, linke Ausrichtung bei 1.2 V.

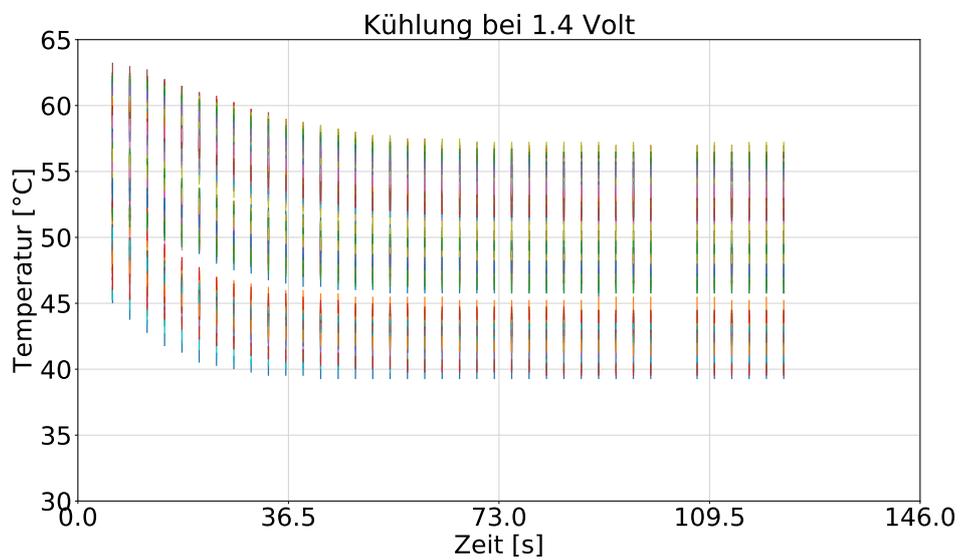


Abb. A.27.: Temperaturverlauf einzelner Sensoren, linke Ausrichtung bei 1.4 V.

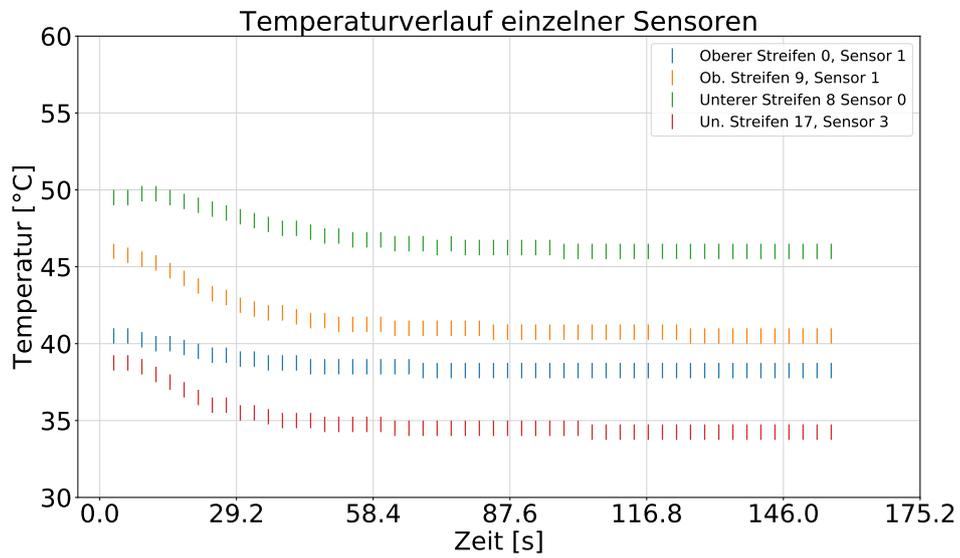


Abb. A.28.: Temperaturverlauf einzelner Sensoren, linke Ausrichtung bei 1.0 V.

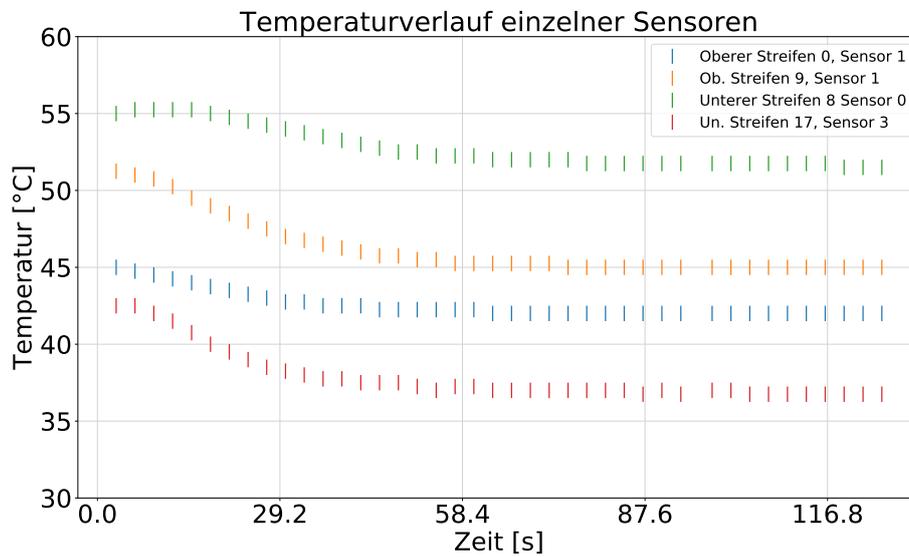


Abb. A.29.: Temperaturverlauf einzelner Sensoren, linke Ausrichtung bei 1.2 V.

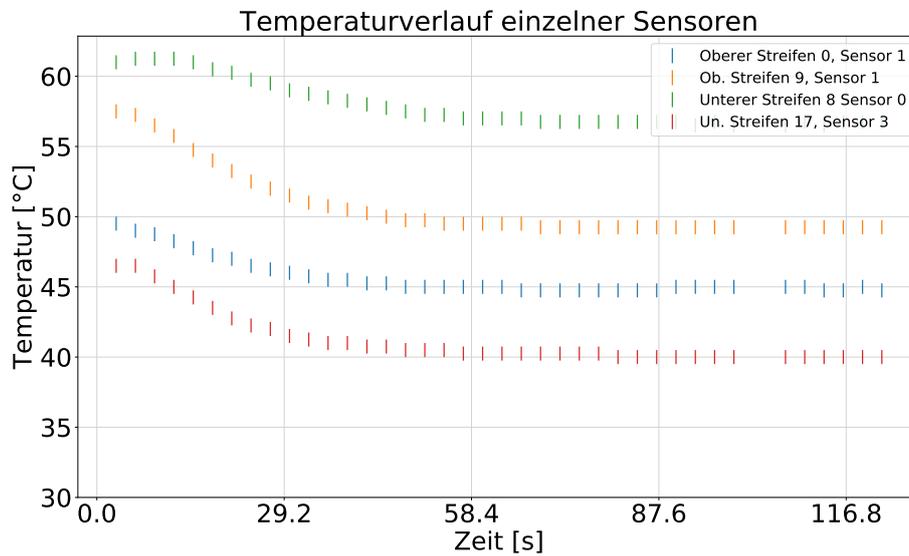
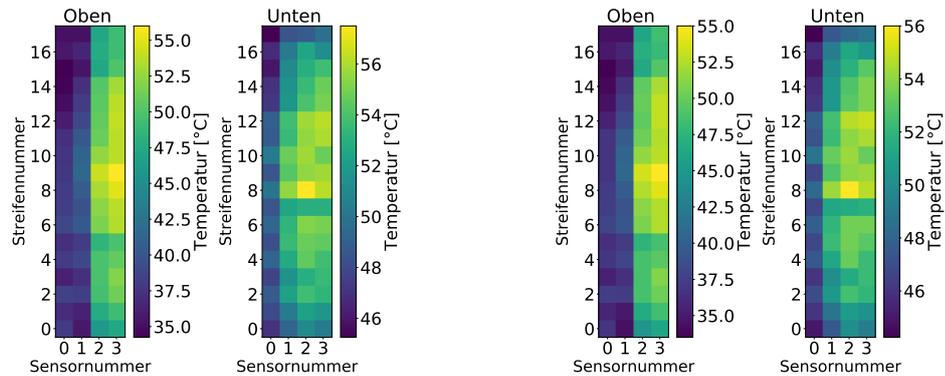


Abb. A.30.: Temperaturverlauf einzelner Sensoren, linke Ausrichtung bei 1.4 V.

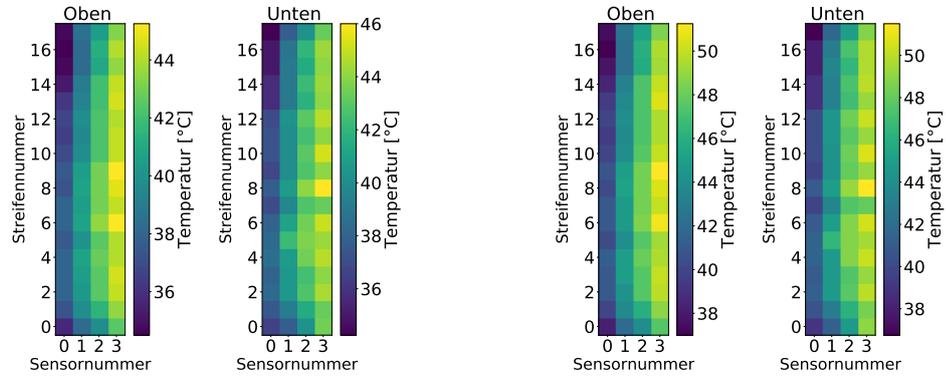
Temperaturprofil - Luft - Seitlich



(a) Temperaturprofil bei 1.0 V.

(b) Temperaturprofil bei 1.2 V.

Abb. A.31.: Temperaturprofile mit der Ausrichtung rechts. Um die Ausrichtung der Box nachvollziehen zu können, muss man sich die Grafik um 90° nach rechts gedreht vorstellen.

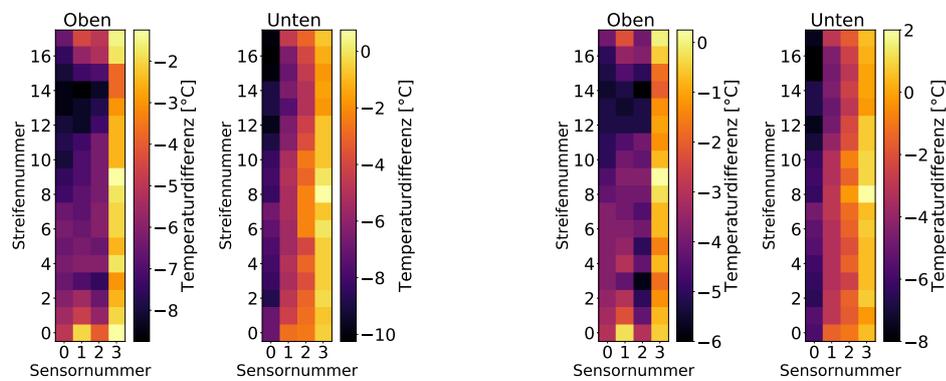


(a) Temperaturprofil bei 1.0 V.

(b) Temperaturprofil bei 1.2 V.

Abb. A.32.: Temperaturprofile mit der Ausrichtung links. Um die Ausrichtung der Box nachvollziehen zu können, muss man sich die Grafik um 90° nach links gedreht vorstellen.

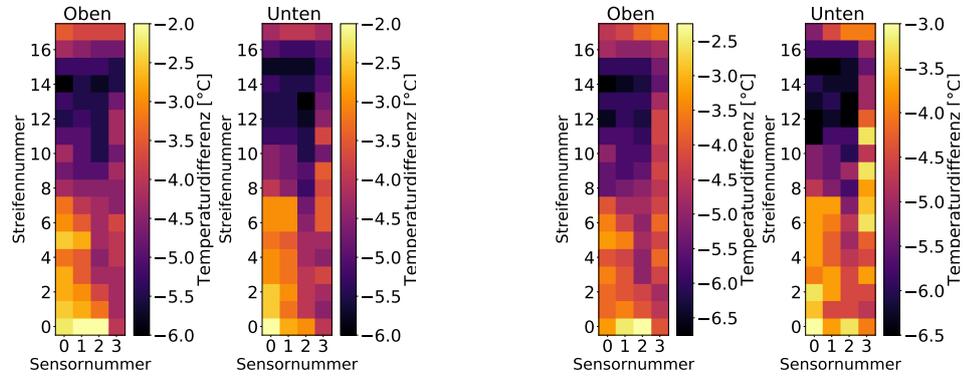
Temperaturdifferenz - Luft - Seitlich



(a) Temperaturdifferenzprofil bei 1.0 V.

(b) Temperaturdifferenzprofil bei 1.2 V.

Abb. A.33.: Temperaturdifferenzprofile mit der Ausrichtung rechts.



(a) Temperaturdifferenzprofil bei 1.0 V. (b) Temperaturdifferenzprofil bei 1.2 V.

Abb. A.34.: Temperaturdifferenzprofile mit der Ausrichtung links.

A.1.4. Erste Messungen mit Helium in der Box

Es wird immer der echte Heliumfluss angegeben und nicht der am Rotameter eingestellte Wert. Die ersten Messungen haben immer einen Heliumfluss von $6750 \frac{\text{L}}{\text{h}}$.

Temperaturverlauf - Helium

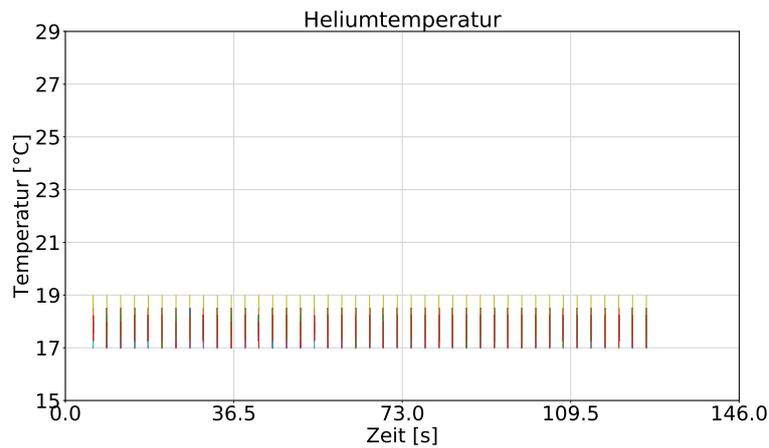
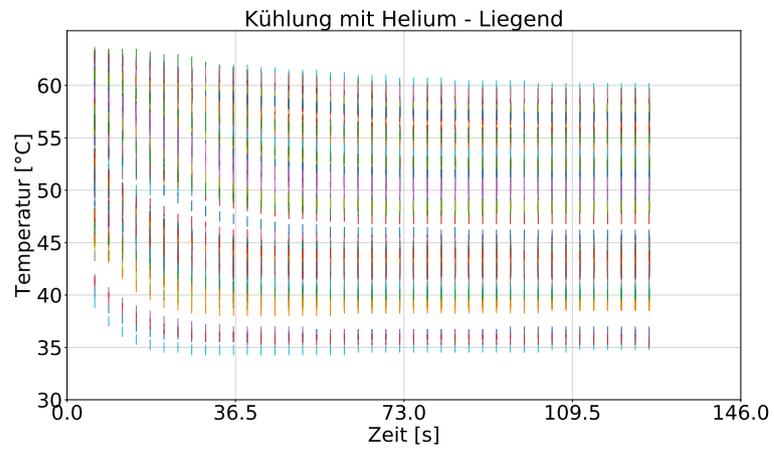


Abb. A.35.: Messung der Temperatur in der mit Helium gefüllten Box. Ausrichtung: Liegend. Ohne Spannung.



11

Abb. A.36.: Messung der Temperatur in der mit Helium gefüllten Box. Ausrichtung: Liegend. Spannung: 1.4 V.

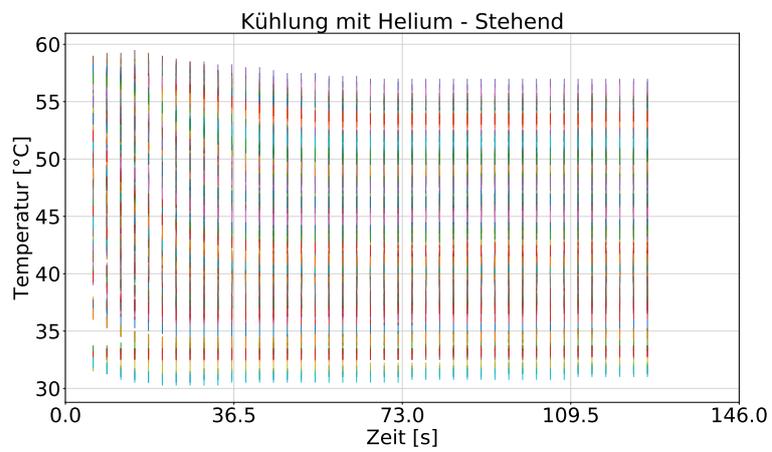


Abb. A.37.: Messung der Temperatur in der mit Helium gefüllten Box. Ausrichtung: Stehend. Spannung: 1.4 V.

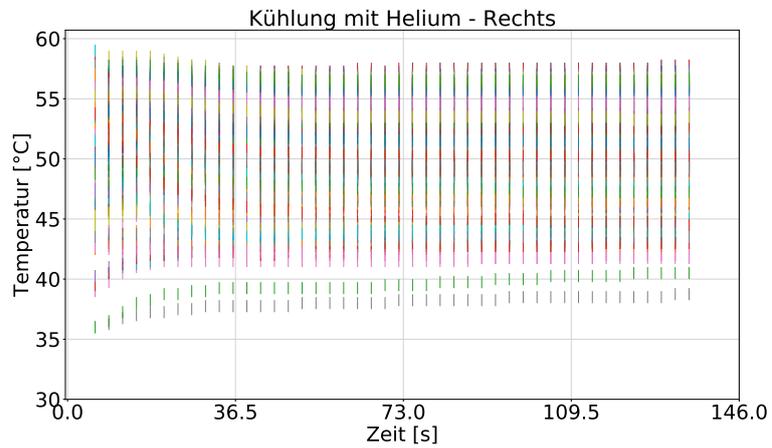


Abb. A.38.: Messung der Temperatur in der mit Helium gefüllten Box. Ausrichtung: Rechts. Spannung: 1.4 V.

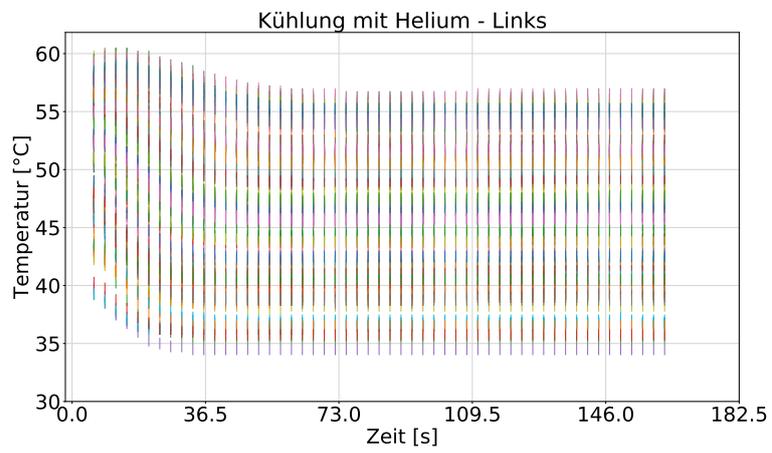


Abb. A.39.: Messung der Temperatur in der mit Helium gefüllten Box. Ausrichtung: Links. Spannung: 1.4 V.

Temperaturprofil - Helium

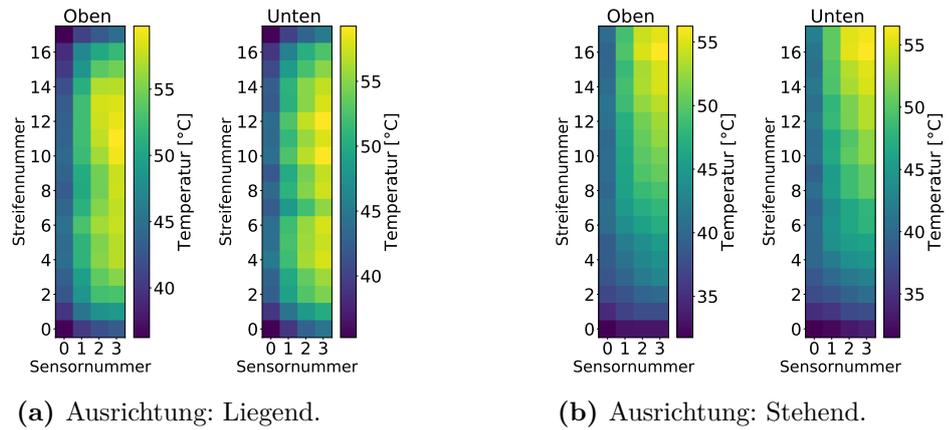


Abb. A.40.: Temperaturdifferenzprofil bei 1.4 V.

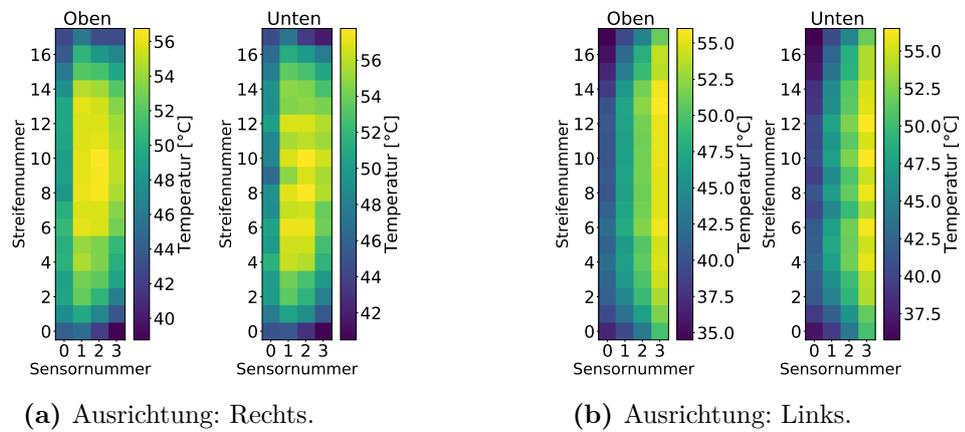


Abb. A.41.: Temperaturdifferenzprofil bei 1.4 V.

A.1.5. Vergleichsmessungen - Helium mit Luft

Die ersten Messungen haben immer einen Heliumfluss von $13\,500 \frac{\text{L}}{\text{h}}$.

Temperaturverlauf - Helium

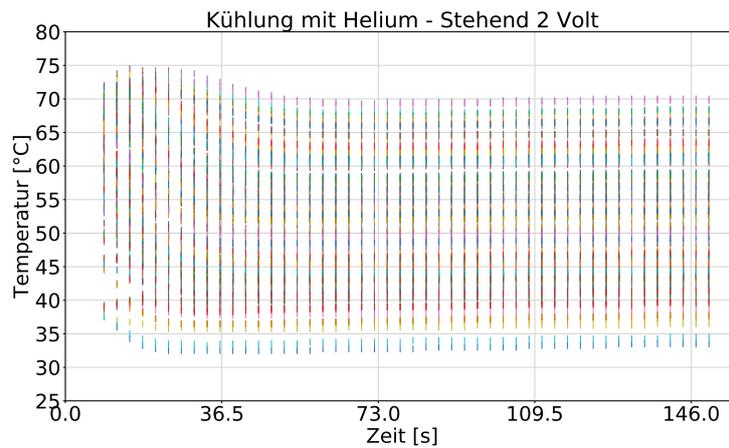


Abb. A.42.: Messung der Temperatur in der mit Helium gefüllten Box. Ausrichtung: Stehend. Spannung: 2.0 V.

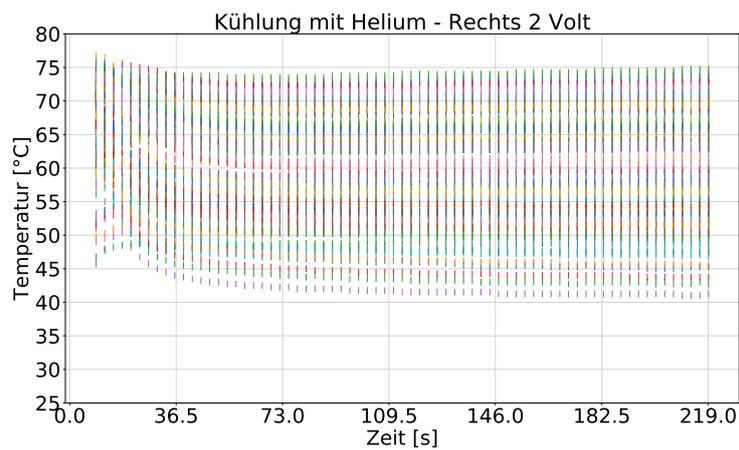


Abb. A.43.: Messung der Temperatur in der mit Helium gefüllten Box. Ausrichtung: Rechts. Spannung: 2.0 V.

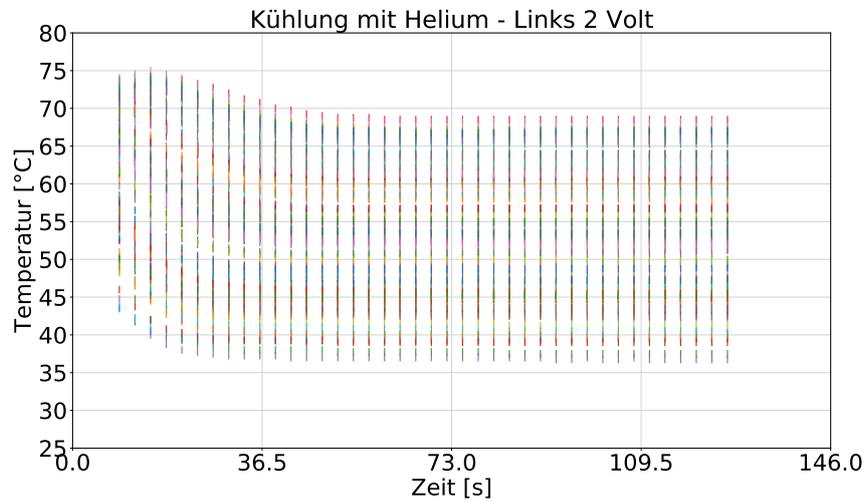


Abb. A.44.: Messung der Temperatur in der mit Helium gefüllten Box. Ausrichtung: Links. Spannung: 2.0 V.

Temperaturprofil und Temperaturdifferenzen - Helium

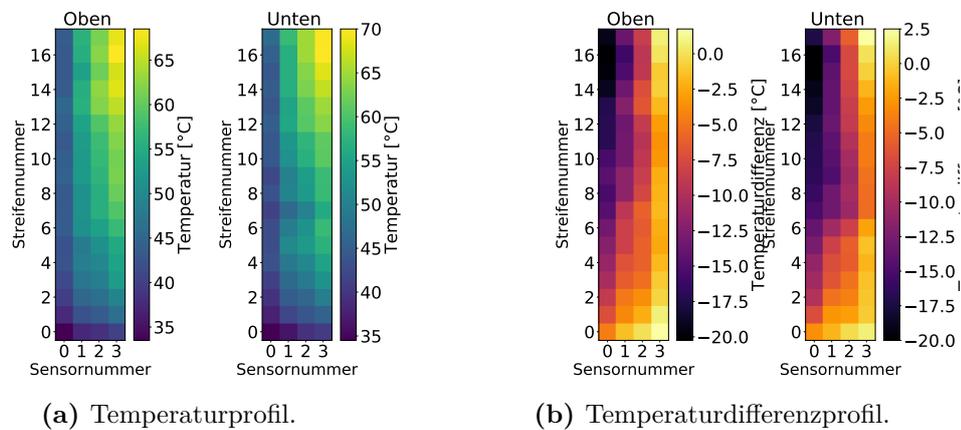


Abb. A.45.: Angelegte Spannung: 2.0 V. Ausrichtung: Stehend.

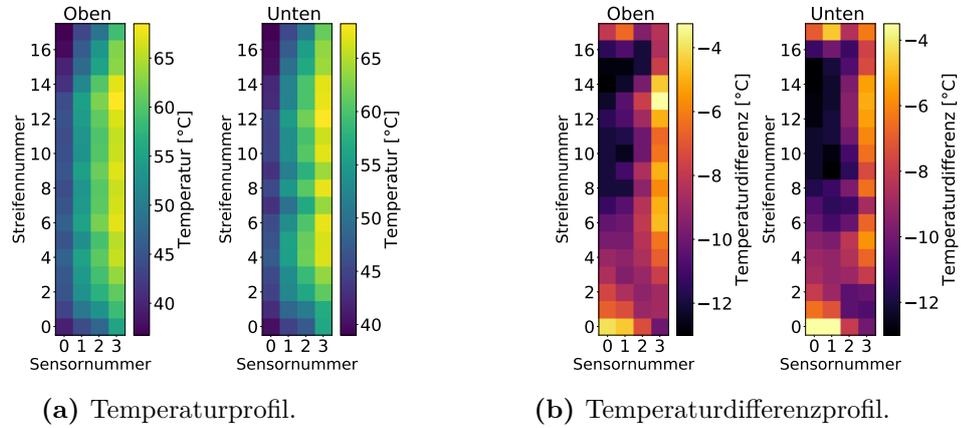


Abb. A.46.: Angelegte Spannung: 2.0 V. Ausrichtung: Links.

Arithmetisches Mittel - Helium

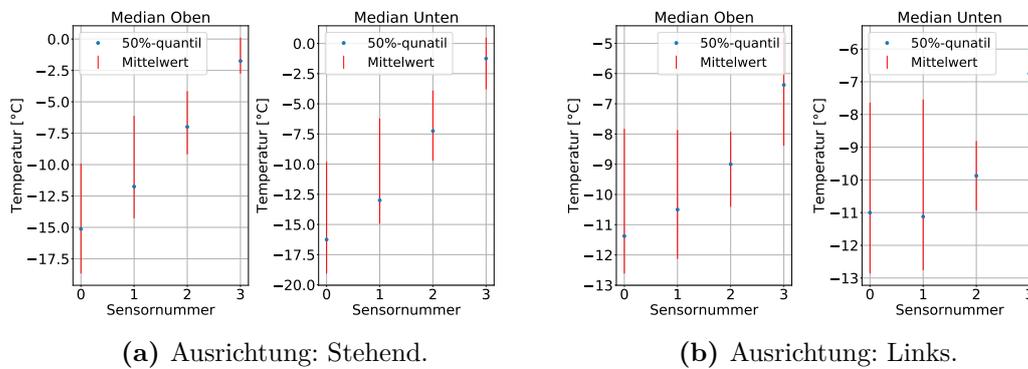


Abb. A.47.: Mittelwert der Kühlung. Angelegte Spannung: 2.0 V.

A.1.6. Hoher Fluss - Helium

Im folgenden Abschnitt ist die Ausrichtung immer Links.

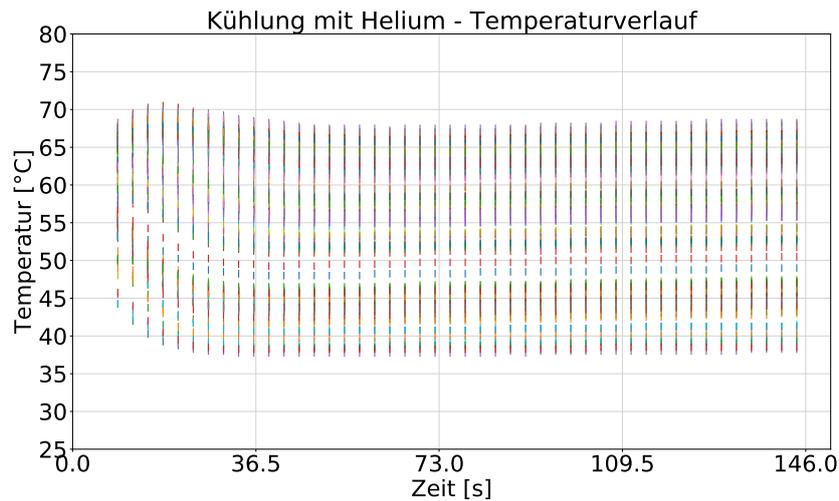
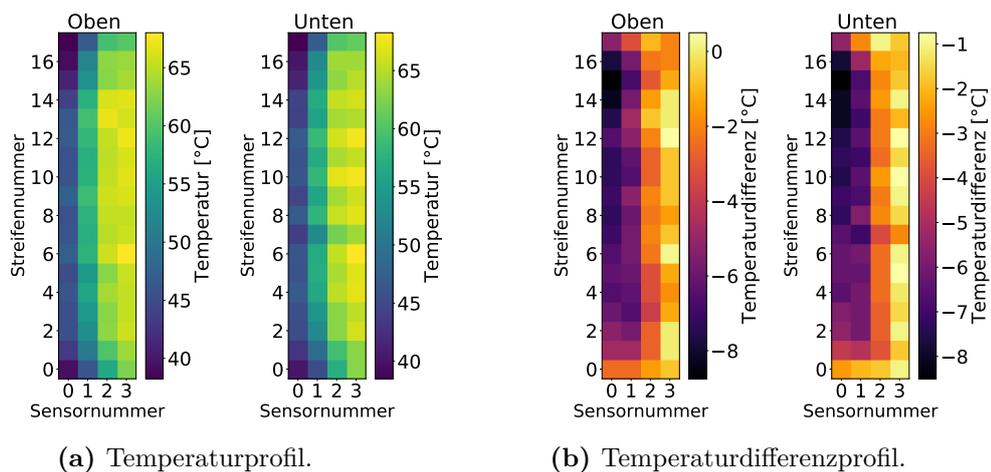


Abb. A.48.: Temperaturverlauf mit einer Spannung von 2.00 V und einem Gesamtheliumstrom von $13\,500 \frac{\text{L}}{\text{h}}$. Davon gehen $3780 \frac{\text{L}}{\text{h}}$ in den inneren Fluss.



(a) Temperaturprofil.

(b) Temperaturdifferenzprofil.

Abb. A.49.: Angelegte Spannung: 2.0 V. Gesamtfluss: $13\,500 \frac{\text{L}}{\text{h}}$. Innerer Fluss: $3780 \frac{\text{L}}{\text{h}}$.

A.1.7. Heliummessung mit innerem Fluss

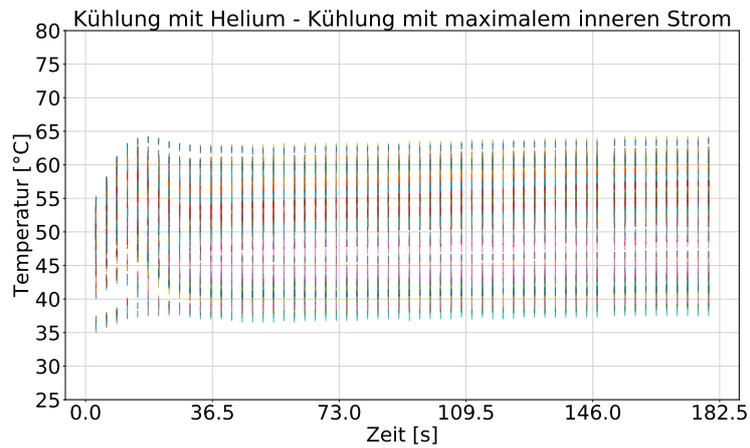


Abb. A.50.: Temperaturverlauf bei einer Spannung von 2.4 V und einem Gesamtfluss von $28\,350 \frac{\text{L}}{\text{h}}$, davon geht der gesamte Fluss in den inneren Kanal. Ausrichtung Stehend. Die Kühlung ist wesentlich schlechter im Vergleich mit Abbildung A.42

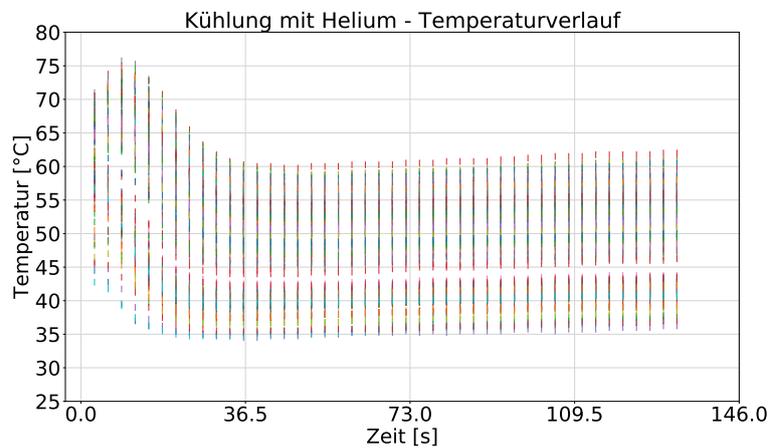


Abb. A.51.: Temperaturverlauf bei einer Spannung von 2.4 V und einem Gesamtfluss von $28\,350 \frac{\text{L}}{\text{h}}$, davon gehen $5670 \frac{\text{L}}{\text{h}}$ in den inneren Kanal. Ausrichtung Links.

A.1.8. Hohe Spannung - Helium

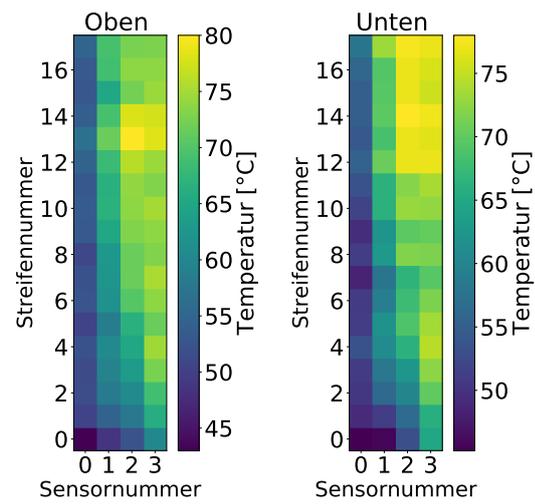


Abb. A.52.: Ausrichtung: Stehend. Angelegte Spannung: 2.4 V. Gesamtheliumstrom: $28\,350 \frac{\text{L}}{\text{h}}$. Innerer Fluss: $5670 \frac{\text{L}}{\text{h}}$.

A.2. Technische Zeichnungen

Sämtliche Maße sind in Millimeter.

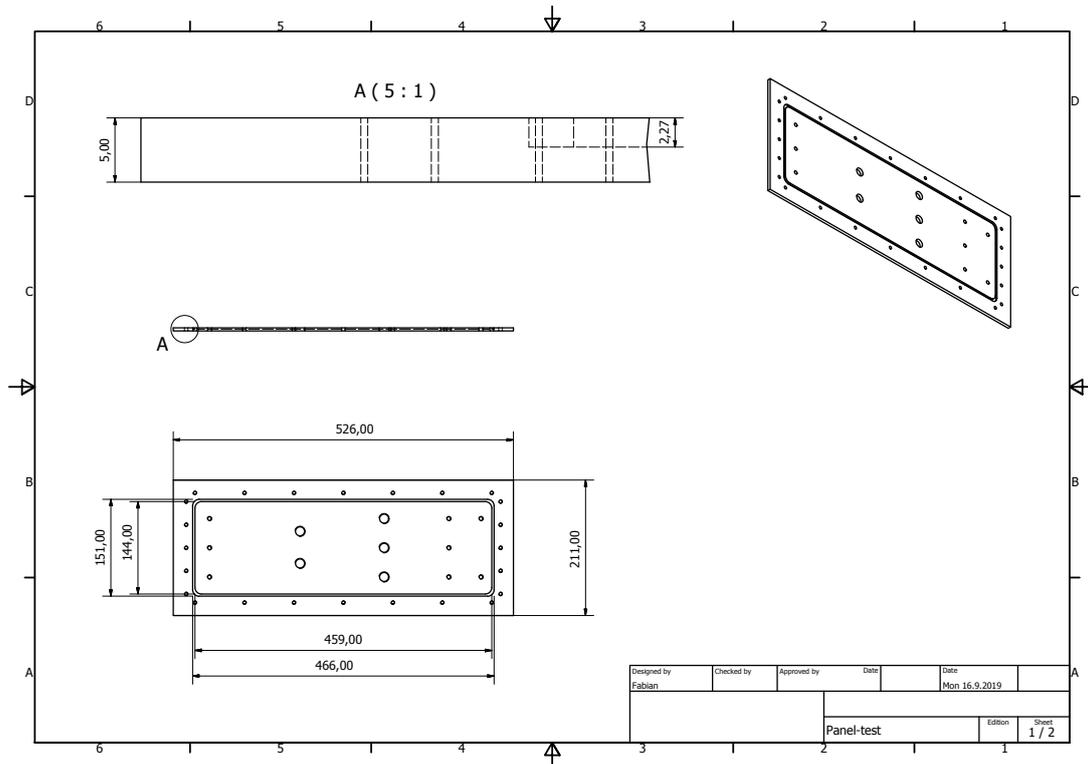


Abb. A.53.: Technische Zeichnung des Panels. Seite 1/3.

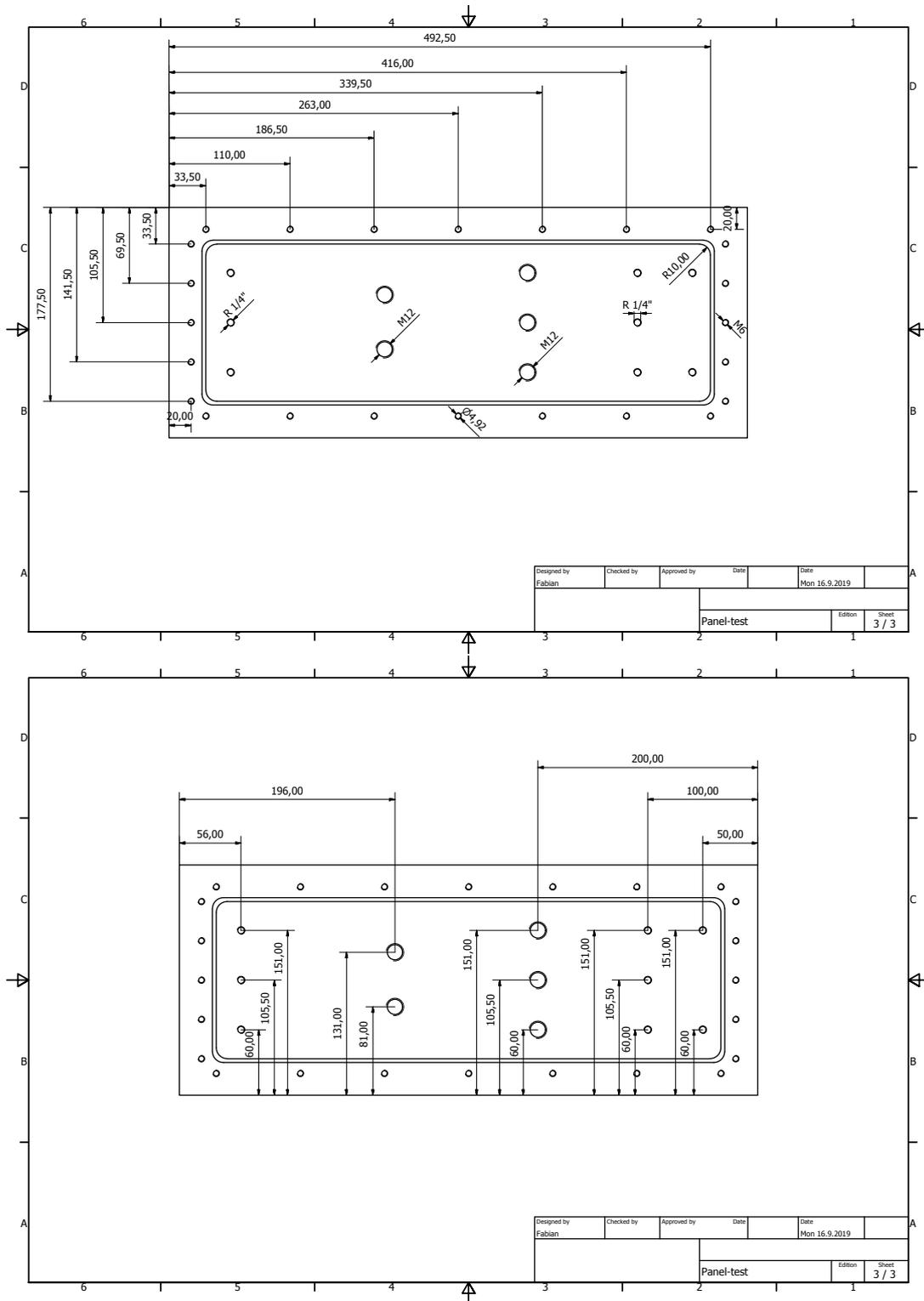


Abb. A.54.: Technische Zeichnung des Panels. Seite 2/3 und 3/3.

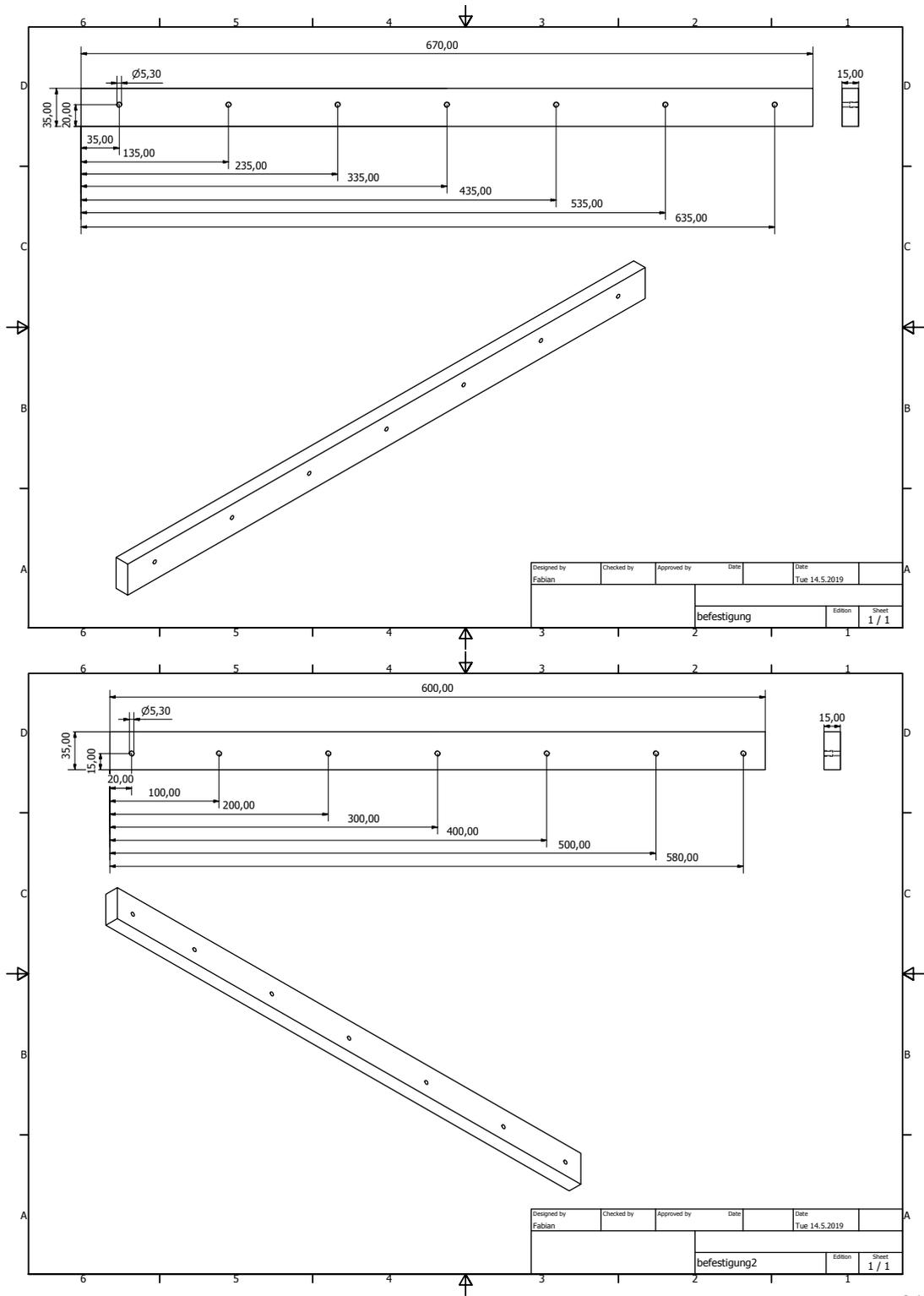


Abb. A.56.: Technische Zeichnung des Kragen.

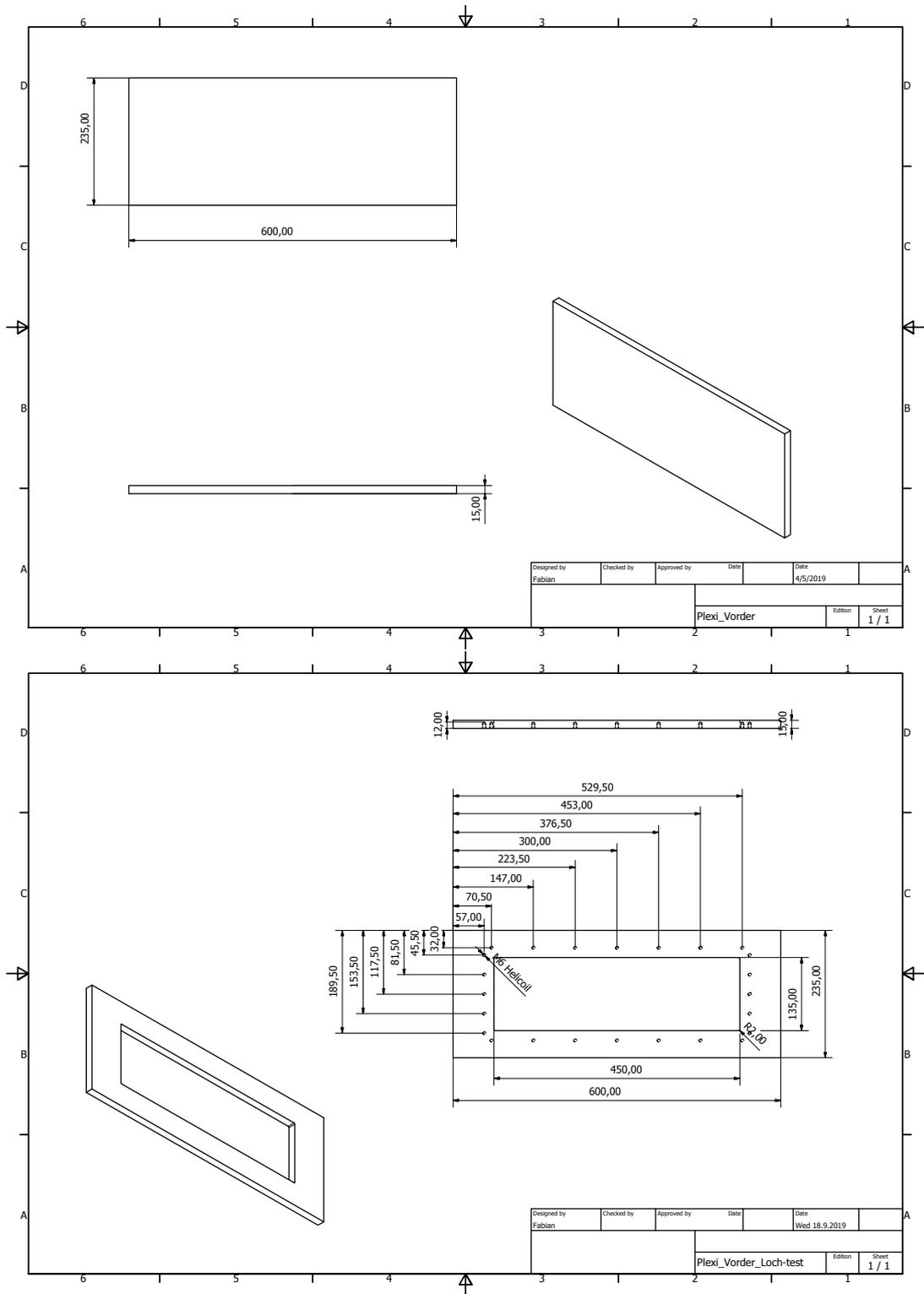


Abb. A.57.: Technische Zeichnung der Hinterwand und der Vorderwand (unten).

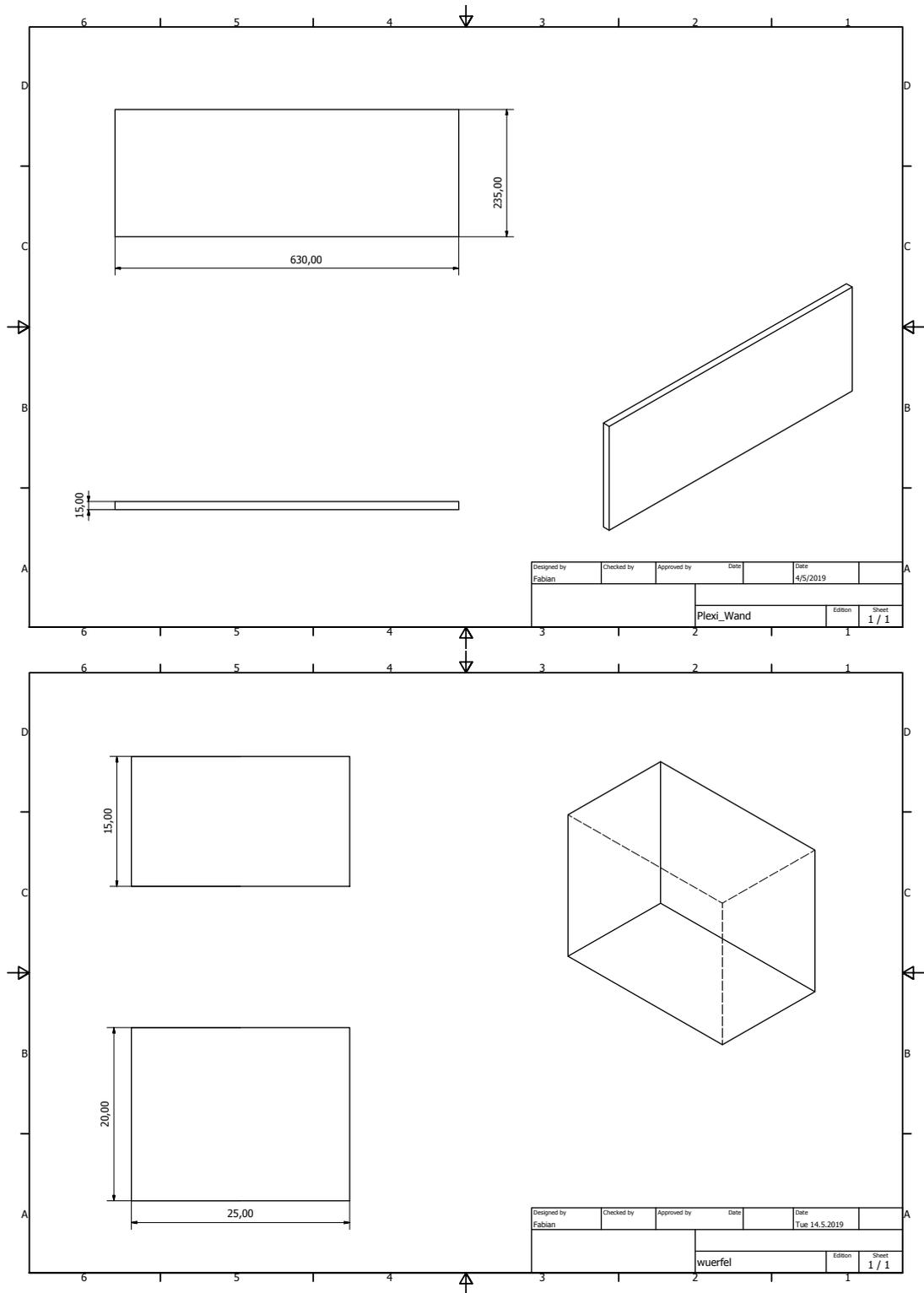


Abb. A.58.: Technische Zeichnung der Seitenwände (oben) und Abstandshalter (unten).

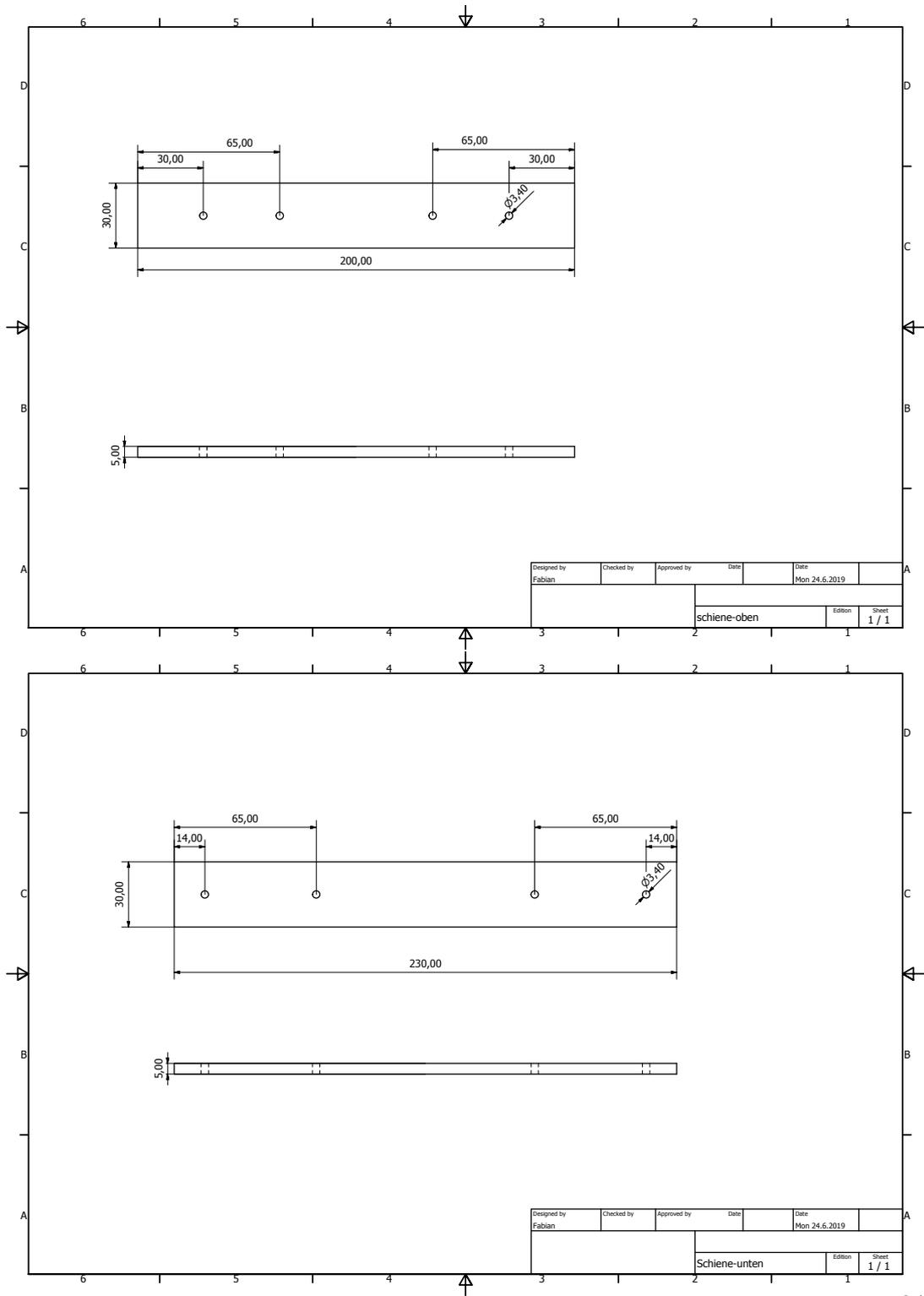


Abb. A.59.: Technische Zeichnung der Aluminiumschiene oben (oben) und unten (unten).

A.3. Aufbau für Messung mit Helium

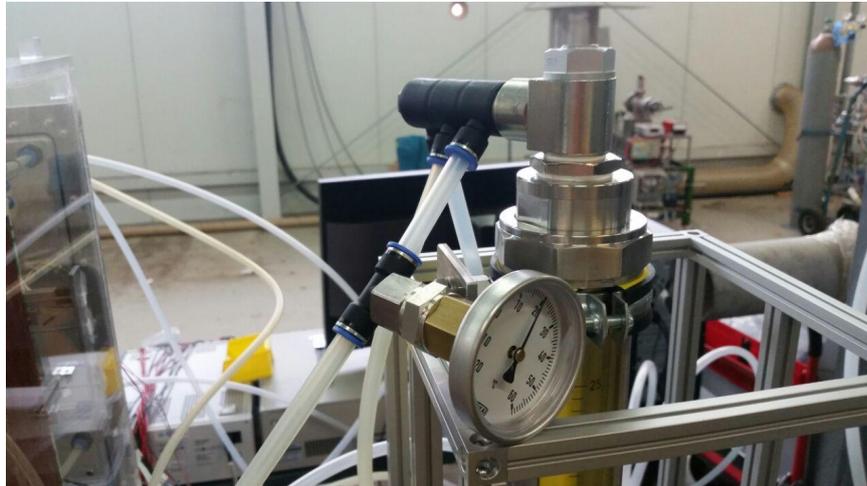


Abb. A.60.: Temperatursensor am Ausgang des großen Rotameter.



Abb. A.61.: Zusammenführung des Rückflusses der Heliumleitung.

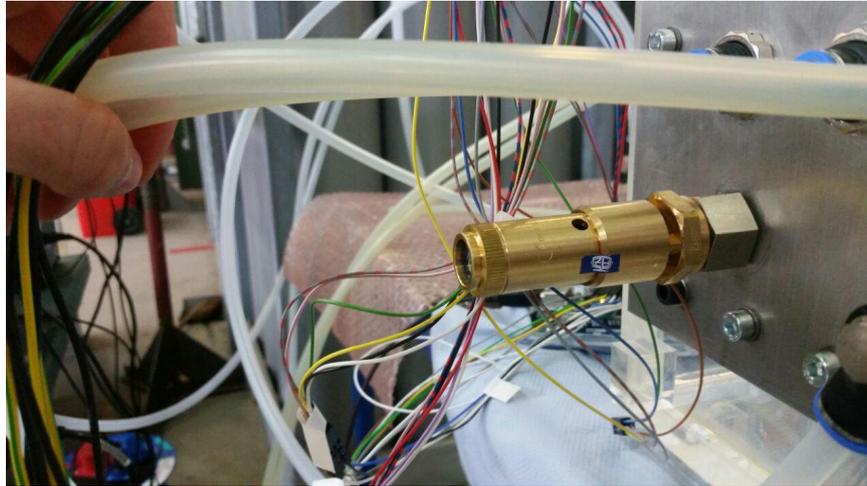


Abb. A.62.: Druckventil am R1/4-Zoll Gewinde, anstelle des Auslassventils.

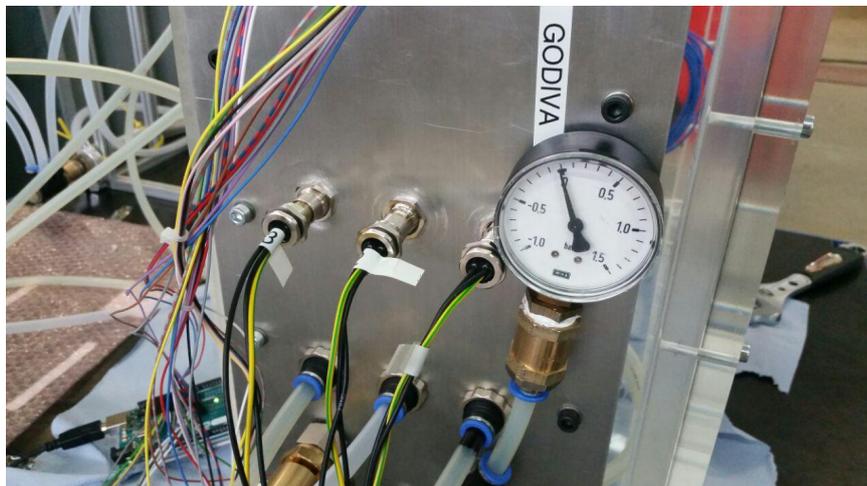


Abb. A.63.: Manometer an einem Rückfluss zum messen des Drucks in der Box.

B. Literaturverzeichnis

- [1] Projekte aus dem „Collaborative Reseach Centre 1044“
<https://sfb1044.uni-mainz.de/projects/>
(Aufgerufen am 26.08.2019)
- [2] D. Becker et al. "The P2 Experiment - A future high-precision measurement of the electroweak mixing angle at low momentum transfer"
arXiv:1802.04759v2 [nucl-ex]
<https://arxiv.org/abs/1802.04759>
The European Physical Journal A. (2018). 1434-601X
- [3] M. Zimmermann - Doktorarbeit "Particle Rate Studies And Technical Design Development For The P2 Silicon Pixel Tracking Detector"
Johannes-Gutenberg Universität Mainz, 2019
- [4] B. Povh, K. Rith, C. Scholz, F. Zetsche, W. Rodejohann "Teilchen und Kerne - Eine Einführung in die physikalischen Konzepte"
Springer Spektrum, 9. Auflage, Heidelberg 2013.
- [5] M. Deflorin - Masterarbeit "Helium Cooling of Silicon Pixel Detector for Mu3e Experiment"
Masterarbeit, University of Applied Sciences and Arts Northwestern Switzerland, 2019
- [6] D. Salgado Llamas - Bachelorarbeit "Tuning of the MuPix8 High-Voltage Active Pixel Sensor"
Johannes Gutenberg-Universität Mainz, 2018
- [7] Bilder entnommen aus
https://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode_2.html
(Aufgerufen am 26.08.2019)

- [8] F. Stieler - Bachelorarbeit "Test der Mechanik und Kühlung des Spurdetektors für das P2-Experiment"
Johannes Gutenberg-Universität Mainz, 2019
- [9] J. P. Hammerich "Studies of HV-MAPS-Analog Performance"
Bachelorarbeit, Universität Heidelberg, 2015
- [10] I. Perić "A novel monolithic pixelated particle detector implemented in high-voltage CMOS technology"
Nucl. Inst. Meth. A. 582.3 : 876-885, 2007.
- [11] Werte entommen aus
http://www.kundert-ing.ch/display.cfm/id/103421/disp_type/display/filename/Schwebekoerper-Durchflussmesser_Handbuch.pdf
(Aufgerufen am 12.09.2019)
- [12] Entnommen aus
https://web-material3.yokogawa.com/RAGN_IM_E_ed4_pub24072017.pdf
(Aufgerufen am 19.09.2019)
- [13] Entnommen aus dem Datenblatt
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmz22005.pdf> (Aufgerufen am 07.10.2019)
- [14] W. Greiner, H. Stock "Hydrodynamik"
Verlag Harri Deutsch, 4. Auflage, Frankfurt am Main 1991.

C. Danksagung

Allem voran möchte ich meiner Familie danken, ohne die mir das Studium gar nicht erst möglich wäre, da sie mich vor allem menschlich und finanziell unterstützt haben und immer noch tun.

Meiner Arbeitsgruppe unter Niklaus Berger bin ich sehr zu dank verpflichtet, für die familiäre Aufnahme, Beratung und Hilfe, die sie mir während der Arbeit gaben, allem voran Niklaus Berger, Carsten Grzesik und Marco Zimmermann.

Der mechanischen Werkstatt und der Vakuumwerkstatt aus der KPH spreche ich auch meinen Dank aus, für die freundliche und tatkräftige Hilfe beim Design und Kleben der Box, dabei geht ein ganz besonderer Dank an Manuel Ohliger für die unschätzbare und freundliche Hilfe beim Designen, Leckratensuche und Reperatur der Box sowie die vielen kleinen Hinweise, die mir eine Menge Arbeit erspart haben und werden.

Auch Andrea Brogna aus dem Prisma Detector Lab soll hier nochmal gedankt werden, für die Beratung in Sachen Verkabelung und für das Erledigen der undankbare Aufgabe des Crimpens der Elektroanschlüsse.

Tabellenverzeichnis

2.1. Einige Eigenschaften von Helium und Luft. Werte entnommen aus [3]. Diese werden in 3 näher erläutert.	8
4.1. Berechnete Flüsse für die Kühlung mit Helium [3].	17
4.2. Messwerte für auf Luft kalibriertes Rotameter um Heliumflusswerte aus Tabelle 4.1 zu erhalten.	18
5.1. Leckraten bei Helium. Diese Werte gelten für einen Druckunterschied von 5 Pa zwischen Innen- und Außendruck.	31
6.1. Angelegte Spannung pro halber Heizstreifen und umgerechnete Leistung.	33
6.2. Benötigter Luftfluss für bestimmte ΔT und die ausgerechnete Geschwindigkeit.	50
6.3. Angelegte Spannung und die gemessene Spannung am Heizstreifen. . .	57
6.4. Angelegte Spannung, umgerechnete Leistung mit der angelegten Spannung und umgerechnete Leistung mit der gemessenen Spannung.	57
6.5. Angelegte Spannung, umgerechnete Leistung mit der angelegten Spannung und umgerechnete Leistung mit der gemessenen Spannung.	57

Abbildungsverzeichnis

2.1.	$\sin^2 \Theta_w$ in Abhängigkeit von der Energie. Die blaue Kurve entspricht der theoretischen Vorhersage des SM. Die grünen Punkte (zukünftige Messungen) wurden willkürlich vertikal nach unten gesetzt. Die Fehlerbalken bleiben unverändert [3].	3
2.2.	Feynman Diagramme für eine elastische Elektron-Proton Streuung. Links durch ein Photon, rechts durch ein Z-Boson. Zeitachse von links nach rechts.	5
2.3.	CAD Zeichnung des P2-Aufbau. Die „Tracking detectors“ entsprechen den Spurdetektoren [2].	6
2.4.	Schematische Darstellung von vier HV-MAPS. Die vier türkisen Wannen stellen je einen Pixel dar. [10]	7
2.5.	Abbildungen entnommen und modifiziert aus [7].	7
2.6.	CAD Zeichnung des Spurdetektormoduls. Die oberen Heizstreifen wurden bei dieser Darstellung entfernt. Grün ist das PCB, gelb das Kapton, grau sind die Einlässe für das Gas zwischen obere- und unterer Ebene und schwarz die HV-MAPS [3].	9
4.1.	Querschnitt des Spurdetektormoduls. Zu sehen ist das PCB der Ober- und Unterseite (grün), die Verbindungsstücke zwischen dem PCB und den Heizstreifen (beige), der aus dem geformten Kapton resultierenden V-Ausschnitt (schwarz) sowie die Einlässe zwischen Ober- und Unterseite (grau). Ganz dünn zwischen dem V-Kanal und dem PCB, liegt der Heizstreifen (gelb) [3].	16
4.2.	Befestigung am Prototypen. Zu sehen sind die vier M3 Gewindestangen, eine Aluminiumschiene und die zwei Abstandshalter mit schwarzem Gummiüberzug zum Schutze vor Kratzern.	17

4.3.	Skizze der verschiedenen Flüsse. Der optionale „outer flow“ wird in der Arbeit nicht verwendet. Bild entnommen aus [3].	18
4.4.	Aufbau für Luft. Ganz links auf dem hinteren Tisch ist das Rotameter zu sehen. Rechts daneben sind die zwei Labornetzteile RNDLab und Rohde&Schwarz. Die Gasschläuche und elektrische Verkabelung sind an den Anschlüssen oben an der Box verbunden.	20
4.5.	Der Aufbau für die Heliummessung in der 5-Grad-Halle des KPH. Links auf dem Tisch sind die Labornetzteile sowie der angeschlossene Computer. Mittig die stehende Box, rechts davon die zwei Rotameter. Rechts ist zu sehen wie ein Gasschlauch am Heliumvorrat, welche die Flaschen im Hintergrund sind, angeschlossen ist.	21
5.1.	Seitenansicht auf Wand und Kragen. Zu sehen ist wie der Kragen zusätzlich Fläche liefert, für den Dichtungsring und die Verschraubungen.	24
5.2.	Draufsicht auf eine Wand der Box. Mittig ist die Bohrung zu sehen, die genau auf die Kante der Wand trifft.	25
5.3.	Panel mit den Anschlüssen. Von Links nach Rechts: Drei Anschlüsse für die Gasrückführung, zwei Multipole mit je 12 Anschlüssen, drei Multipole mit je 3 Anschlüssen, drei Anschlüsse für die Gaszuführung, zwei Ein- und Auslassventile.	27
5.4.	Kreisring. Anders als Unterlegscheiben liegen sie nicht zwischen den zu befestigenden Flächen, sondern um die Dichtungsringe und verhindern somit das Wegrutschen derer.	28
5.5.	Box von Oben. Mittig zu sehen sind Lunker zwischen Wand und Kragen. Oben im Bild ist der Innenraum der Box und unten im Bild, getrennt durch die Wand der Box, der Außenraum. Zusätzlich sieht man nochmal, wie die Bohrungen auf die Wand der Box treffen, wie in Kapitel 5.1.3 Beschrieben.	30
5.6.	Die Test mit verschiedenen Kleber. Von Links nach Rechts: Araldit 2021, Chloroform und Acrifix. Die Klebefläche in der unteren Reihe wurde mit Sandpapier aufgeraut.	31
6.1.	Messung bei Raumtemperatur. Ohne angelegte Spannung und ohne Luftstrom.	34

6.2. Messung bei einem Luftfluss von $500 \frac{\text{L}}{\text{h}}$. Die Temperatursensoren unterscheiden sich farblich. Es sind alle 144 Sensoren abgebildet. . . .	35
6.3. Temperaturprofil für die Messung ohne Luftstrom bei 1.4 V. Das linke Bild entspricht der oberen Ebene, das rechte der unteren Ebene. Beide Bilder entsprechen einer Draufsicht auf den Prototyp.	37
6.4. Messung bei einem Luftfluss von $2400 \frac{\text{L}}{\text{h}}$ und einer Spannung von 0.9 V. Es findet sich auch nach ungefähr 10 min kein Gleichgewicht.	37
6.5. Langzeitmessung mit Abkühlung. Spannung obere Ebene: 0.9 V. Spannung untere Ebene: 0 V Luftfluss: $4800 \frac{\text{L}}{\text{h}}$	39
6.6. Temperaturverlauf der Sensoren an den Heizstreifen. Angelegte Spannung: 1.0 V. Spurdetektormodul befindet sich in der Box.	40
6.7. Temperaturverlauf der Sensoren an den Heizstreifen. Angelegte Spannung: 1.0 V.	41
6.8. Temperaturprofil des Modules. Spannung: 1.4 V. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich das Hitzezentrum rechts oben befindet.	42
6.9. Temperaturdifferenz bei einer Spannung von 1.4 V.	43
6.10. Temperaturverlauf bei 1.4 V.	45
6.11. Angelegte Spannung: 1.4 V. Um die Ausrichtung der Box nachvollziehen zu können, muss man sich die Grafik um 90° nach rechts gedreht vorstellen. Zur Erinnerung: die Luft kommt von links oben, also dort wo Streifen 17 und Sensor 0 ist.	45
6.12. Temperaturverlauf bei 1.4 V für vier Temperatursensoren.	46
6.13. Angelegte Spannung: 1.4 V. Um die Ausrichtung der Box nachvollziehen zu können, muss man sich die Grafik diesmal um 90° nach links gedreht vorstellen. Zur Erinnerung: die Luft kommt von rechts oben, also dort wo Streifen 17 und Sensor 0 ist.	48
6.14. Linearer Fit. Spannung: 0.9 V. ΔT ist die Änderung der Temperatur der Sensoren und x die eingestellten Luftflüsse.	49
6.15. Angelegte Spannung: 2.0 V. Ausrichtung: Rechts. Sensor 3 am Streifen 9 ist zu Beginn auffallend heiß und erhitzt sich, nach einschalten der Kühlung um 5°C	52

6.16. Mittelwert der Temperaturdifferenzen vom Anfang zum Ende der Messung, gemittelt über alle Heizstreifen. Angelegte Spannung: 2.0 V. Ausrichtung: Rechts.	52
6.17. Verlauf einzelner Temperatursensoren. Rechte Ausrichtung mit einer angelegten Spannung von 2.0 V. Heliumstrom: $6750 \frac{\text{L}}{\text{h}}$	53
6.18. Angelegte Spannung: 2.4 V. Ausrichtung: Links. Gesamtheliumstrom: $28\,350 \frac{\text{L}}{\text{h}}$. Innerer Fluss: $5670 \frac{\text{L}}{\text{h}}$	54
6.19. Mittelwert der Kühlung.	55
6.20. Angelegte Spannung: 2.4 V. Gesamtheliumstrom: $28\,350 \frac{\text{L}}{\text{h}}$. Innerer Fluss: $5670 \frac{\text{L}}{\text{h}}$	56
A.1. Messung ohne Luftfluss. Heizleistung bei 1.4 V.	61
A.2. Messung ohne Luftfluss. Heizleistung bei 1.4 V.	62
A.3. Messung ohne Luftfluss. Heizleistung bei 1.4 V.	62
A.4. Messung ohne Luftfluss. Heizleistung bei 1.4 V.	63
A.5. Langzeitmessung mit Abkühlung. Spannung: 0.9 V. Luftfluss: $1200 \frac{\text{L}}{\text{h}}$	63
A.6. Langzeitmessung mit Abkühlung. Spannung: 0.9 V. Luftfluss: $4800 \frac{\text{L}}{\text{h}}$	64
A.7. Messung des Abkühlvorganges. Spannung: 0.9 V. Luftfluss: $4800 \frac{\text{L}}{\text{h}}$	64
A.8. Temperaturprofil für die Messung mit einer Spannung von 1.4 V. Die Profile mit der Überschrift „Oben“ entsprechen der oberen Ebene, „Unten“ steht für die untere Ebene. Beide Bilder entsprechen einer Draufsicht auf den Prototyp.	65
A.9. Temperaturprofil für die Messung mit einer Spannung von 1.4 V.	65
A.10. Temperaturverlauf der Sensoren an den Heizstreifen. Angelegte Spannung: 1.4 V.	66
A.11. Temperaturverlauf der Sensoren an den Heizstreifen. Angelegte Spannung: 1.7 V.	66
A.12. Temperaturverlauf der Sensoren an den Heizstreifen. Angelegte Spannung: 1.2 V.	67
A.13. Temperaturverlauf der Sensoren an den Heizstreifen. Angelegte Spannung: 1.4 V.	67
A.14. Temperaturprofil der Sensoren.	68
A.15. Temperaturprofil der Sensoren. Angelegte Spannung: 1.4 V.	68

A.16. Temperaturverlauf der Sensoren an den Heizstreifen. Angelegte Spannung: 1.0 V.	69
A.17. Temperaturverlauf der Sensoren an den Heizstreifen. Angelegte Spannung: 1.4 V.	69
A.18. Temperaturverlauf der Sensoren an den Heizstreifen. Angelegte Spannung: 1.2 V.	70
A.19. Temperaturprofil der Sensoren.	70
A.20. Temperaturdifferenz der einzelnen Sensoren.	71
A.21. Temperaturverlauf, rechte Ausrichtung bei 1.0 V.	71
A.22. Temperaturverlauf, rechte Ausrichtung bei 1.2 V.	72
A.23. Temperaturverlauf einzelner Sensoren, rechte Ausrichtung bei 1.0 V. .	72
A.24. Temperaturverlauf einzelner Sensoren, rechte Ausrichtung bei 1.2 V. .	73
A.25. Temperaturverlauf einzelner Sensoren, linke Ausrichtung bei 1.0 V. . .	73
A.26. Temperaturverlauf einzelner Sensoren, linke Ausrichtung bei 1.2 V. . .	74
A.27. Temperaturverlauf einzelner Sensoren, linke Ausrichtung bei 1.4 V. . .	74
A.28. Temperaturverlauf einzelner Sensoren, linke Ausrichtung bei 1.0 V. . .	75
A.29. Temperaturverlauf einzelner Sensoren, linke Ausrichtung bei 1.2 V. . .	75
A.30. Temperaturverlauf einzelner Sensoren, linke Ausrichtung bei 1.4 V. . .	76
A.31. Temperaturprofile mit der Ausrichtung rechts. Um die Ausrichtung der Box nachvollziehen zu können, muss man sich die Grafik um 90° nach rechts gedreht vorstellen.	76
A.32. Temperaturprofile mit der Ausrichtung links. Um die Ausrichtung der Box nachvollziehen zu können, muss man sich die Grafik um 90° nach links gedreht vorstellen.	77
A.33. Temperaturdifferenzprofile mit der Ausrichtung rechts.	77
A.34. Temperaturdifferenzprofile mit der Ausrichtung links.	78
A.35. Messung der Temperatur in der mit Helium gefüllten Box. Ausrichtung: Liegend. Ohne Spannung.	78
A.36. Messung der Temperatur in der mit Helium gefüllten Box. Ausrichtung: Liegend. Spannung: 1.4 V.	79
A.37. Messung der Temperatur in der mit Helium gefüllten Box. Ausrichtung: Stehend. Spannung: 1.4 V.	79

A.38.Messung der Temperatur in der mit Helium gefüllten Box. Ausrichtung: Rechts. Spannung: 1.4 V.	80
A.39.Messung der Temperatur in der mit Helium gefüllten Box. Ausrichtung: Links. Spannung: 1.4 V.	80
A.40.Temperaturdifferenzprofil bei 1.4 V.	81
A.41.Temperaturdifferenzprofil bei 1.4 V.	81
A.42.Messung der Temperatur in der mit Helium gefüllten Box. Ausrichtung: Stehend. Spannung: 2.0 V.	82
A.43.Messung der Temperatur in der mit Helium gefüllten Box. Ausrichtung: Rechts. Spannung: 2.0 V.	82
A.44.Messung der Temperatur in der mit Helium gefüllten Box. Ausrichtung: Links. Spannung: 2.0 V.	83
A.45.Angelegte Spannung: 2.0 V. Ausrichtung: Stehend.	83
A.46.Angelegte Spannung: 2.0 V. Ausrichtung: Links.	84
A.47.Mittelwert der Kühlung. Angelegte Spannung: 2.0 V.	84
A.48.Temperaturverlauf mit einer Spannung von 2.00 V und einem Gesamtheliumstrom von $13\,500 \frac{\text{L}}{\text{h}}$. Davon gehen $3780 \frac{\text{L}}{\text{h}}$ in den inneren Fluss.	85
A.49.Angelegte Spannung: 2.0 V. Gesamtfluss: $13\,500 \frac{\text{L}}{\text{h}}$. Innerer Fluss: $3780 \frac{\text{L}}{\text{h}}$	85
A.50.Temperaturverlauf bei einer Spannung von 2.4 V und einem Gesamtfluss von $28\,350 \frac{\text{L}}{\text{h}}$, davon geht der gesamte Fluss in den inneren Kanal. Ausrichtung Stehend. Die Kühlung ist wesentlich schlechter im Vergleich mit Abbildung A.42	86
A.51.Temperaturverlauf bei einer Spannung von 2.4 V und einem Gesamtfluss von $28\,350 \frac{\text{L}}{\text{h}}$, davon gehen $5670 \frac{\text{L}}{\text{h}}$ in den inneren Kanal. Ausrichtung Links.	86
A.52.Ausrichtung: Stehend. Angelegte Spannung: 2.4 V. Gesamtheliumstrom: $28\,350 \frac{\text{L}}{\text{h}}$. Innerer Fluss: $5670 \frac{\text{L}}{\text{h}}$	87
A.53.Technische Zeichnung des Panels. Seite 1/3.	88
A.54.Technische Zeichnung des Panels. Seite 2/3 und 3/3.	89
A.55.Technische Zeichnung des Boden (oben) und des Deckels (unten).	90
A.56.Technische Zeichnung des Kragen.	91
A.57.Technische Zeichnung der Hinterwand und der Vorderwand (unten).	92

A.58. Technische Zeichnung der Seitenwände (oben) und Abstandshalter (unten).	93
A.59. Technische Zeichnung der Aluminiumschiene oben (oben) und unten (unten).	94
A.60. Temperatursensor am Ausgang des großen Rotameter.	95
A.61. Zusammenführung des Rückflusses der Heliumleitung.	95
A.62. Druckventil am R1/4-Zoll Gewinde, anstelle des Auslassventils.	96
A.63. Manometer an einem Rückfluss zum messen des Drucks in der Box.	96