

Maturitätsarbeit

Bau einer kontinuierlichen Nebelkammer

Betreuer: Giorgio Lardi, Patric Müller



Ambra Schneebeili
Föhrenstrasse 11
8050 Zürich
ambra@schneebeilistark.com

Zürich, 6. Januar 2025
Liceo Artistico

1 Abstract

Im Rahmen meiner Maturitätsarbeit habe ich eine Nebelkammer entwickelt, um kosmische Strahlung zu detektieren. Ziel der Arbeit war es, die Kammer kontinuierlich betreiben zu können. Mithilfe eines Arduinobords, mehreren Peltier-elementen, einer Ethanolpumpe und einem Heizelement konnte eine funktionsfähige Kammer konstruiert werden, in welcher während mehrerer Stunden Spuren beobachtet werden konnten. Mit der fertigen Kammer habe ich Messungen durchgeführt, um einen möglichen Unterschied zwischen der Anzahl Spuren bei Tag respektive Nacht zu detektieren. Die Spuren wurden mit einem Smartphone aufgenommen, in den Videos gezählt und ausgewertet. Dabei liess sich ein Unterschied in der Anzahl Spuren zwischen Mittag und Mitternacht von 29% messen. Diese Tageszeit Abhängigkeit ist grösser, als in der bestehende Literatur zu kosmischer Strahlung publiziert wurde.

Inhaltsverzeichnis

1	Abstract	
2	Einleitung	1
3	Theoretische Grundlagen	2
3.1	Funktionsweise einer Nebelkammer	2
3.2	Geschichte der Nebelkammer	3
3.3	Kontinuierliche Nebelkammer	3
3.4	Ionisierende Strahlung	3
3.4.1	Alphastrahlung	4
3.4.2	Betastrahlung	5
3.4.3	Indirekt Ionisierende Strahlung	7
3.5	Kosmische Strahlung	8
3.5.1	Geschichte der kosmischen Strahlung	8
3.5.2	Kosmische Strahlung	8
3.5.3	Radioaktivität in der Atmosphäre	9
3.6	Spezielle Relativitätstheorie	10
3.6.1	Beispiel atmosphärischer Myonen	10
3.7	Tageszeit Abhängigkeit	12
4	Bau einer kontinuierlichen Nebelkammer	13
4.1	Erste Prototyp-Reihe	13
4.1.1	Prototyp 1.1	13
4.1.2	Prototyp 1.2	13
4.1.3	Prototyp 1.3	14
4.2	Erster Versuch	15
4.2.1	Elektronik/Arduino	16
4.2.2	Gehäuse	22
4.2.3	Fazit der ersten Kammer	22
4.3	Zweite Prototypenserie	23
4.3.1	Prototyp 2.1	23
4.3.2	Prototyp 2.2	24
4.3.3	Prototyp 2.3	24
4.4	Die kontinuierliche Kammer	25
4.4.1	Betrieb	25
5	Messungen	28
5.1	Methode	28

6	Resultate	31
7	Diskussion	34
8	Fazit	35
9	Danksagung	36
	Literatur	37
A	Anhang 1	39
	A.1 Arduinocode	39

2 Einleitung

Während meiner Zeit am Liceo Artistico entdeckte ich mein Interesse an physikalischen Konzepten, insbesondere an der Teilchenphysik. Diese Faszination motivierte mich, für meine Maturitätsarbeit ein Projekt in diesem Bereich durchzuführen. Ich entschied mich dafür, eine Nebelkammer zu bauen, da sie zu den frühen Experimenten der Teilchenphysik gehört und grundlegende Prozesse der ionisierenden Strahlung anschaulich macht.

Ursprünglich verfolgte ich das Ziel, eine kontinuierlich funktionierende Nebelkammer zu entwickeln, mit der ich kosmische Strahlung messen könnte. Im Verlauf meiner Arbeit stellte ich jedoch fest, dass es schwierig war, kosmische Strahlung zu verlässlich von anderen Strahlungsquellen wie Umgebungsstrahlung oder anthropogener Strahlung zu unterscheiden. Daher beschloss ich den Fokus meines Projekts darauf zu legen, einen möglichen Unterschied in der Radioaktivität in der Luft zwischen Tag und Nacht zu untersuchen.

3 Theoretische Grundlagen

Die theoretischen Grundlagen dieser Arbeit befassen sich mit der Funktionsweise und Bedeutung der Nebelkammer sowie den physikalischen Prozessen und Phänomenen, die bei der Detektion und Analyse ionisierender Strahlung eine Rolle spielen. Zunächst wird erläutert, wie eine Nebelkammer funktioniert und welche physikalischen Prinzipien zur Visualisierung der Spuren ionisierender Teilchen in einem übersättigten Alkoholdampf führen. Anschliessend wird die historische Entwicklung der Nebelkammer beschrieben, angefangen mit der Erfindung durch Charles Thomson Rees Wilson [Wil97] bis hin zur kontinuierlichen Nebelkammer, die eine längere Betriebsdauer ermöglicht und speziell zur Beobachtung kosmischer Strahlung entwickelt wurde. In 3.4 wird die Natur ionisierender Strahlung untersucht, einschliesslich ihrer verschiedenen Arten, wie Alpha- und Betastrahlung, und wie sich diese in einer Nebelkammer visualisieren lassen. Ein weiterer Schwerpunkt dieses Kapitels liegt auf der Untersuchung der kosmischen Strahlung sowie der natürlichen Hintergrundstrahlung. Abschliessend wird der Theorieteil dieser Arbeit durch einen Einblick in die spezielle Relativitätstheorie und deren Einfluss auf kosmische Teilchen beendet. Dieses Kapitel legt somit die theoretische Grundlage für das Verständnis der Nebelkammer und die mit ihr durchführbaren Experimente.

3.1 Funktionsweise einer Nebelkammer

In einer Nebelkammer wird ein übersättigter Alkoholdampf hergestellt, ein Zustand, in dem die Konzentration des Alkoholdampfes die Sättigungsgrenze überschreitet, sodass das Gas bereit ist, bei kleinsten Störungen oder Keimen zu kondensieren. Dieser Zustand wird durch eine schnelle Expansion oder Abkühlung des Gases erreicht, was den Alkoholdampf in eine instabile Phase überführt, in der er kondensationsbereit bleibt, ohne von selbst zu kondensieren.

Wenn dann ionisierende Strahlung mit den Molekülen dieses Gases kollidiert, ionisiert sie diese Moleküle, indem sie Elektronen entfernt und positiv geladene Ionen hinterlässt. Die ionisierende Strahlung erzeugt auf ihrem Weg eine Ionenspur im Gas, wobei die Ionen als Kondensationskeime für den Alkoholdampf dienen. Der Dampf kondensiert an diesen geladenen Keimen und bildet sichtbare Tröpfchen. Die Tröpfchenspur visualisiert die Bahn des ionisierenden Teilchens und ermöglicht Rückschlüsse auf die Art und Energie des Primärteilchens anhand von Spurform, -länge und -dichte [Sch11a].

3.2 Geschichte der Nebelkammer

Charles Thomson Rees Wilson baute 1911 die erste Nebelkammer [Sch11a], mit der er erfolgreich die Existenz von Alpha- und Betateilchen nachweisen konnte. 1927 erhielt er für seine Methode zur Sichtbarmachung von Teilchenbahnen den Nobelpreis. Die Funktionsweise seiner Nebelkammer basierte auf dem Prinzip einer Expansionsnebelkammer.

Bei der Expansionsnebelkammer wird übersättigter Dampf durch die Expansion der Kammer erzeugt. Das Volumen der Kammer wird schnell vergrößert, wodurch der Druck und somit auch die Temperatur sinkt. Der Nachteil an dieser Kammer ist, dass die Temperatur nur für eine sehr kurze Zeit abkühlt. Die Kammer hat daher eine Betriebszeit von etwa einer Sekunde. Sie eignet sich nicht zur längeren Beobachtungen kosmischer Strahlen. Um diese Einschränkungen zu überwinden, wurden Verbesserungen angestrebt, die zu kontinuierlich arbeitenden Nebelkammern führten [Har52].

3.3 Kontinuierliche Nebelkammer

Im Gegensatz zur Expansionsnebelkammer wird die Übersättigung bei einer kontinuierlichen Nebelkammer durch eine Temperaturdifferenz innerhalb der Kammer konstant aufrechterhalten. Dies wird durch das Kühlen der Bodenplatte sowie das gleichzeitige Heizen des oberen Teils der Kammer erreicht. Im oberen Bereich der Kammer verdampft das Ethanol. Das Gas kühlt sich ab, wenn es in die Nähe der kalten Bodenplatte kommt und es wird übersättigt. Das Temperaturgefälle zwischen Bodenplatte und Deckel erzeugt knapp über dem Boden die übersättigte Schicht, in der die ionisierende Strahlung detektiert werden kann. Diese Methode erlaubt eine stetige Übersättigung ohne die Notwendigkeit einer wiederholten Expansion. Diese Art Nebelkammer, 1936 von Alexander Langsdorf entwickelt, kann über längere Zeit betrieben werden und eignet sich für die Beobachtung kosmischer Strahlung [Sch11a].

3.4 Ionisierende Strahlung

Ionisierende Strahlung hat so viel Energie, dass sie die Materie, in die sie eindringt, auf atomarer oder molekularer Ebene verändern kann. Chemische Verbindungen können aufgebrochen oder Atome ionisiert werden. Ionisierende Strahlung entsteht hauptsächlich durch den radioaktiven Zerfall von Atomkernen. Ein Atomkern kann ohne äußere Einwirkung in einen anderen Kern übergehen und dabei ionisierende Strahlung freisetzen; dieser Vorgang wird als radioaktiver Zerfall bezeichnet. Die radioaktiven Atomkerne werden Radionuklide genannt; zu

ihnen gehören zum Beispiel Uran oder Radon.

In der Nuklidkarte (Abb. 1) werden alle bekannten Isotope der Elemente dargestellt. Sie zeigt, welche Kerne stabil oder radioaktiv sind und welche Zerfallsarten, wie Alpha- oder Betastrahlung auftreten [Mar22a].

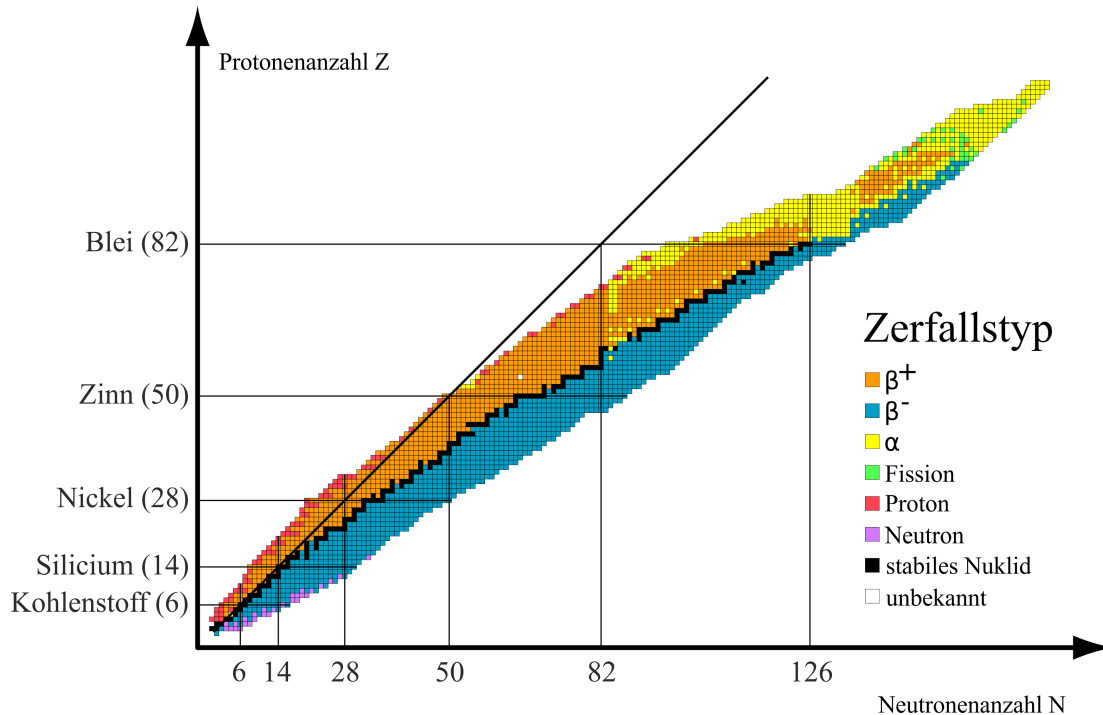


Abbildung 1: Nuklidkarte [Rap18]

Neben den bekannten Strahlungsarten, wie Alpha- oder Betastrahlung, können auch andere Teilchen ionisierend sein, solange sie geladen sind und genügend Energie haben. Ionisierende Strahlung lässt sich in einer Nebelkammer sichtbar machen, indem sie auf ihrem Weg durch den übersättigten Alkoholdampf eine Spur von Tröpfchen hinterlässt. Gammastrahlung zählt auch zur Ionisierenden Strahlung, obwohl sie aus ungeladenen Photonen besteht, da sie durch Wechselwirkung mit Materie Elektronen aus Atomen herauslösen kann. Sie wird daher als indirekt ionisierende Strahlung bezeichnet.

3.4.1 Alphastrahlung

Alphastrahlung entsteht, wenn schwere Atomkerne instabil werden und Alpha-Teilchen, bestehend aus zwei Protonen und zwei Neutronen, emittieren. Das heißt im Grunde, dass ein Heliumkern abgespalten wird. Diese Abgabe verringert die Masse des Kerns und macht ihn stabiler. Alphazerfall tritt in Atomen auf, in welchen die starke Wechselwirkung, welche den Atomkern zusammen hält, die elektromagnetische Abstossung der Protonen kaum ausgleichen kann. Dies ist

der Fall für schwere Atomkerne, da die Reichweite der starken Wechselwirkung auf etwa drei Femtometer ($3\text{fm} = 10^{-15}\text{m}$) begrenzt ist. Im Vergleich dazu hat ein Heliumatomkern einen Durchmesser von rund einem 1fm. Mit steigender Massenzahl wird auch der Atomkern grösser. Der Durchmesser eines Atomkerns kann mit folgender Formel berechnet werden:

$$r = r_0 \cdot A^{1/3}$$

Wobei r der Durchmesser des Atomkerns ist, $r_0 \approx 1.5\text{fm}$, eine Konstante und A die Massenzahl des Atoms [Mar22b].

So beträgt der Durchmesser eines Urankerns 16 fm. Der Durchmesser ist somit grösser als die Reichweite der starken Wechselwirkung. Dies macht ein Urankern instabil, sodass er via Alphazerfall radioaktiv zerfällt. Ein Alphazerfall vergrössert demnach die Stabilität des Kerns, indem es dessen Grösse verringert [Sch11b].

Alphateilchen sind positiv geladen und haben aufgrund ihrer relativ grossen Masse und zweifachen positiven Ladung eine hohe Ionisierungsfähigkeit. Sie sind stark ionisierend, besitzen jedoch nur eine geringe Reichweite. In Luft legen Alphateilchen lediglich wenige Zentimeter zurück, bevor sie ihre Energie verlieren und sich durch das Einfangen zweier Elektronen zu neutralen Heliumatomen rekombinieren.

In einer Nebelkammer hinterlassen Alphateilchen aufgrund ihrer intensiven Ionisierung gut sichtbare, deutliche Spuren. Diese sind kurz und vergleichsweise breit, was auf die hohe Energieabgabe pro Wegstrecke zurückzuführen ist (Abb. 2).

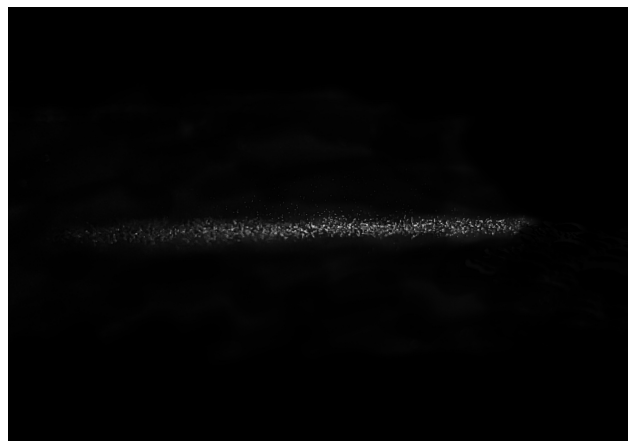


Abbildung 2: Spur eines Alphateilchen in meiner Nebelkammer.

3.4.2 Betastrahlung

Beim Beta-Minus-Zerfall wandelt sich ein Neutron in ein Proton um, begleitet von der Emission eines Elektrons und eines Antielektronenneutrinos. Dies geschieht,

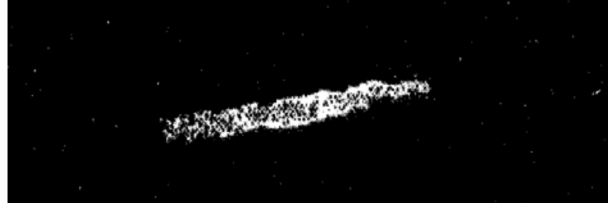


Abbildung 3: Spur eines Alphateilchens zum Vergleich aus der Literatur[Kuh12].

wenn der Atomkern einen Überschuss an Neutronen hat und daher instabil ist. Im Feynman-Diagramm (Abb. 4) [Fey49] wird dieser Vorgang durch die schwache Wechselwirkung illustriert: Ein Neutron besteht aus einem up-Quark und zwei down-Quarks. Durch die schwache Wechselwirkung wird eines dieser down-Quarks in ein up-Quark umgewandelt, und das Neutron wird zu einem Proton. Die schwache Wechselwirkung verändert die Quark-Konfiguration und nutzt das W^- -Boson als Austauschteilchen, dargestellt durch eine wellenförmige Linie im Feynman-Diagramm (Abb. 4). Bei diesem Prozess wird ein Elektron emittiert, um die Ladung auszugleichen. Da jedoch nach der Entdeckung des Elektrons im Zerfall ein Energiedefizit beobachtet wurde, postulierte man die Existenz eines zusätzlichen Teilchens – des Neutrinos. Dieses Antineutrino sorgt nicht nur für die Energieerhaltung, sondern gewährleistet auch den Erhalt der Leptonenzahl. Es trägt keine elektrische Ladung und gehört zur Lepton-Familie, wie das Elektron. Durch diese Wechselwirkung erreicht der instabile Atomkern einen stabileren Zustand.

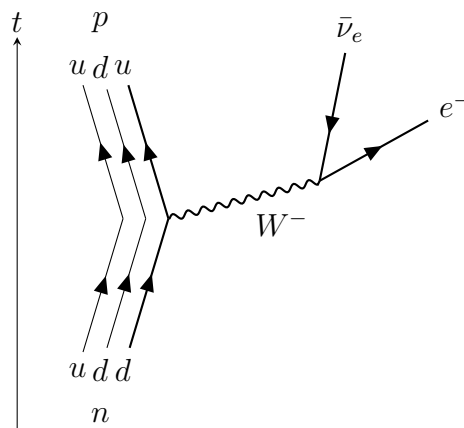


Abbildung 4: Feynman-Diagramm eines Beta-Minus-Zerfalls

Beim Beta-Plus-Zerfall (Abb.5) hingegen wird ein Proton zu einem Neutron und ein Positron wie auch ein Elektroneutrino werden emittiert.

In einer Nebelkammer können sowohl die Elektronen als auch die Positronen

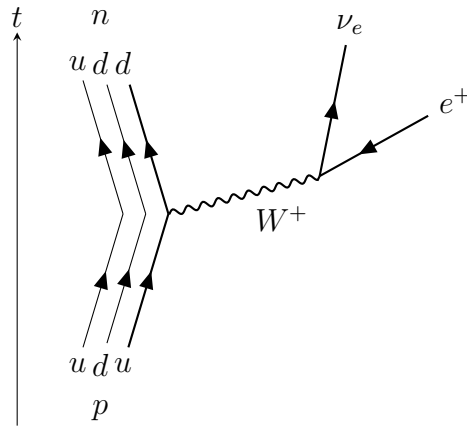


Abbildung 5: Feynman-Diagramm eines Beta-Plus-Zerfalls

beobachtet werden. Ein Positron ist das Antiteilchen des Elektrons. Sie ionisieren den übersättigten Ethanoldampf in der Kammer und hinterlassen eine von Auge sichtbare Kondensationsspur (Abb. 6). Jedoch müssen die beobachteten Elektronen nicht zwingend aus einem Beta-Zerfall stammen. Sie können bei verschiedenen Zerfällen von schweren Teilchen oder auch durch Paarproduktion aus Photonen entstehen. Es gibt noch weitere Prozesse, in welchen Elektronen entstehen, auf die ich hier nicht eingehen werde.

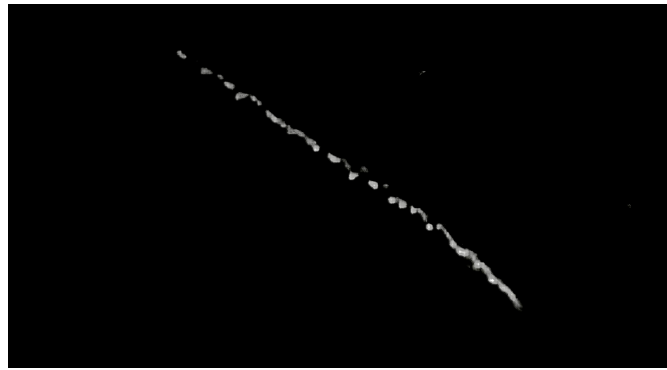


Abbildung 6: Spur eines Elektrons oder Positrons in meiner Nebelkammer.

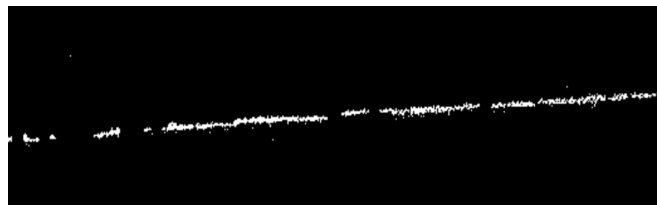


Abbildung 7: Spur eines Elektrons zum Vergleich aus der Literatur [Kuh12].

3.4.3 Indirekt Ionisierende Strahlung

Indirekt ionisierende Strahlung umfasst hochenergetische Photonen und neutrale Teilchen, deren ionisierende Wirkung nicht direkt aus ihrer eigenen Ladung resultiert, sondern vielmehr in der Erzeugung von geladener Sekundärstrahlung liegt. Wie in Abbildung 8 ersichtlich, trifft ein Photon oder ein neutrales Teilchen auf ein Atom, wobei dadurch ein Valenzelektron gelöst wird. Dieser Prozess wird Compton-Effekt genannt. Das einfallende Teilchen verliert dabei an Energie und das Elektron agiert als ionisierende Strahlung.

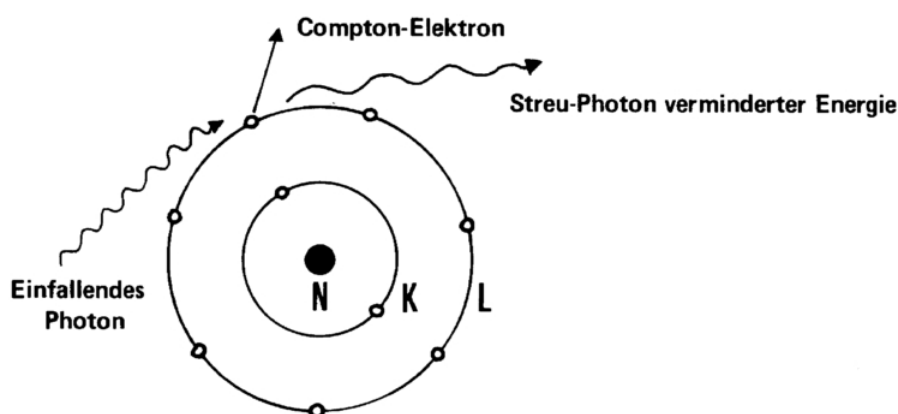


Abbildung 8: Illustration des Compton-Effekts [Lan24].

Die Sekundärstrahlung ist entscheidend für die ionisierenden Effekte, die in Materie beobachtet werden können. Im Gegensatz zu direkt ionisierender Strahlung, wie sie bei Alpha- und Betazerfällen vorkommt, kann indirekt ionisierende Strahlung ihre ionisierende Wirkung erst entfalten, nachdem sie mit der Materie interagiert hat. Typische Beispiele hierfür sind Röntgenstrahlung, Gammastrahlung und Neutronenstrahlung, die in verschiedenen Anwendungen und in der Natur vorkommen.

3.5 Kosmische Strahlung

Kosmische Strahlung bezeichnet eine Form von Strahlung, die aus dem Weltraum kommt und auf die Erde trifft. Diese Strahlung spielt eine bedeutende Rolle in der Astroteilchenphysik, da sie tiefere Einblicke in Prozesse in unserem Universum erlaubt. Sie setzt sich aus primären Teilchen wie Protonen, Elektronen und ionisierten Atomen zusammen, die bei der Kollision mit Molekülen der Erdatmosphäre Sekundärteilchen erzeugen.

3.5.1 Geschichte der kosmischen Strahlung

Die Entdeckung der kosmischen Strahlung geht auf Victor Hess [Ang12] zurück, der 1912 bei einem historischen Heissluftballonflug erstmals nachwies, dass die Intensität ionisierender Strahlung mit der Höhe zunimmt. Hess stieg bis auf eine Höhe von 5300 Metern und verwendete ein Elektrometer, ein empfindliches Gerät zur Messung elektrischer Ladungen, um die Strahlungsintensität zu bestimmen [Ang12]. Dabei stellte er fest, dass die gemessene Strahlung in großer Höhe etwa dreimal höher war als auf Meereshöhe, was darauf hinwies, dass diese nicht von der Erde, sondern aus dem Weltraum stammen musste. Für diese bahnbrechende Entdeckung erhielt Hess 1936 den Nobelpreis für Physik.

3.5.2 Kosmische Strahlung

Kosmische Strahlung besteht aus 89% Protonen, 10% Heliumkerne und etwa 1% aus schweren Atomkernen [CER]. Sie wird abhängig von ihrem Ursprung in verschiedene Kategorien unterteilt: Solarstrahlung, galaktische kosmische Strahlung und extragalaktische Strahlung.

Solarstrahlung stammt von der Sonne und ist besonders während starker Sonnenaktivitäten, wie Sonnenstürmen, intensiv. Sie besteht überwiegend aus Protonen und Heliumkernen, die während Sonneneruptionen in den Weltraum geschleudert werden. Galaktische kosmische Strahlung hat ihren Ursprung ausserhalb des Sonnensystems und durchdringt die Galaxie. Die Häufigkeitsverteilung der Atomkerne in der galaktischen kosmischen Strahlung entspricht weitgehend der solaren Elementhäufigkeit. Extragalaktische Strahlung stammt aus Regionen ausserhalb unserer Galaxie und ist weniger gut erforscht. Sie kann energiereiche Teilchen enthalten, die durch Prozesse in entfernten Galaxien beschleunigt wurden.

Beim Eintritt in die Erdatmosphäre kollidieren primäre kosmische Teilchen mit Molekülen der Luft und erzeugen dabei eine Kaskade von Sekundärteilchen, die als Teilenschauer bezeichnet wird. Zu den entstehenden Sekundärteilchen zählen Myonen, Pionen, Neutrinos, Elektronen und Positronen. Diese Teilchen besitzen unterschiedliche Energielevel und können weitere Reaktionen in der Atmosphäre auslösen. Die Sekundärstrahlung kann bis zur Erdoberfläche gelangen und trägt zur Radioaktivität auf der Erdoberfläche bei.

Kosmische Strahlung liefert wertvolle Erkenntnisse über hochenergetische Prozesse im Universum und hat das Forschungsfeld der Astroteilchenphysik wesentlich geprägt. Ihre Untersuchung ist nicht nur für die Grundlagenforschung von Bedeutung, sondern hat auch praktische Relevanz, etwa für den Strahlenschutz in der Raumfahrt und die Erkundung extraterrestrischer Phänomene.

3.5.3 Radioaktivität in der Atmosphäre

Die Radioaktivität in der Atmosphäre lässt sich in drei Hauptquellen einteilen: Primordiale, kosmogene und anthropogene Radionuklide, die sich durch ihre Entstehung und ihre Bedeutung für Umwelt und Menschen unterscheiden. Primordiale Radionuklide werden durch ihre lange Halbwertszeit charakterisiert. Diese entspricht dem Alter unseres Sonnensystems. Sie wurden mit dem Sonnensystem zusammen erschaffen. Dazu gehört zum Beispiel das Uran-Isotop ^{238}U . Dieses kommt überwiegend in der Lithosphäre vor, kann aber in Nuklide zerfallen, welche in terrestrische Schichten der Atmosphäre gelangen können.

Kosmogene Radionuklide entstehen durch Wechselwirkungen kosmischer Strahlung mit atmosphärischen Teilchen. Beispielsweise kann ein hochenergetisches Primärteilchen, wie ein Proton, mit einem Luftmolekül kollidieren, wodurch neue Radionuklide erzeugt werden. Bei solchen Kollisionen können hochenergetische Hadronen und Leptonen entstehen. Hadronen, wie Pionen wiederum können in Myonen und Neutrinos zerfallen und die Myonen wiederum in Elektronen und Neutrinos. Sekundäre Teilchen wie Elektronen und Myonen besitzen oft ausreichend Energie, um weitere Reaktionen in der Atmosphäre auszulösen.

Anthropogene Radioaktivität entsteht durch Aktivitäten des Menschen, wie die Entsorgung nuklearer Abfälle oder Atomunfälle, zum Beispiel die Katastrophe von Tschernobyl. Atomwaffentests sowie die medizinische Anwendung von radioaktiven Isotopen sind weitere Quellen anthropogener Strahlung [Gäg95].

3.6 Spezielle Relativitätstheorie

Die Spezielle Relativitätstheorie (SRT) bildet die fundamentale Grundlage für das Verständnis vieler physikalischer Phänomene, die in der Analyse kosmischer Strahlung und der Wechselwirkungen von Teilchen von Bedeutung sind. Insbesondere bei hochenergetischen Teilchen, die sich mit beinahe Lichtgeschwindigkeit bewegen, wie sie häufig in kosmischer Strahlung vorkommen, sind relativistische Effekte zu beobachten. Das Phänomen der Zeitdilatation ist entscheidend, um zu erklären, wie instabile Teilchen wie Myonen trotz ihrer kurzen Lebensdauer die Erdoberfläche erreichen können.

Dieses Kapitel bietet die theoretische Basis für die Interpretation der Beobachtungen mit der Nebelkammer.

Das Grundprinzip der Speziellen Relativitätstheorie, entwickelt von Albert Einstein [Ein05], besagt, dass die Gesetze der Physik in allen Inertialsystemen gleich sind und dass die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum für alle Beobachter konstant ist, unabhängig von deren Relativbewegung. Dies führt zu der Erkenntnis, dass

Raum und Zeit nicht absolute Grössen sind, sondern relativ zum Beobachter. Phänomene wie Zeitdilatation und Längenkontraktion resultieren daraus, dass die Zeit langsamer vergeht und Längen verkürzt erscheinen, je schneller sich ein Objekt relativ zu einem Beobachter bewegt.

3.6.1 Beispiel atmosphärischer Myonen

Das Phänomen der Zeitdilatation kann anhand Beobachtungen von Myonen aufgezeigt werden. Myonen sind wie Elektronen Leptonen und gehören somit zu den Elementarteilchen. Myonen haben ähnliche Eigenschaften wie Elektronen, sind aber um einiges schwerer. Ausserdem sind Myonen instabil und können in Neutrinos und Elektronen zerfallen, wie in Abbildung 9 ersichtlich. Ihre Halbwertszeit beträgt $(T_{1/2}) = 2\mu s$. Was bedeutet, das nach $2\mu s$ die Hälfte der initialen Myonen zerfallen sind.

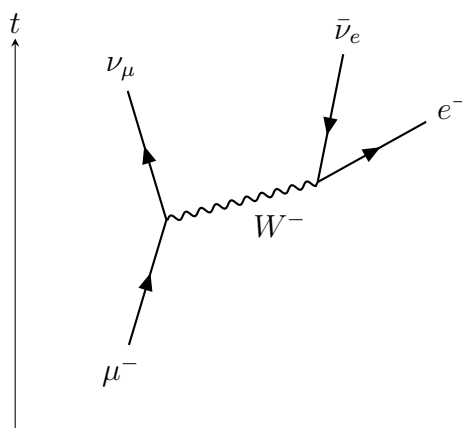


Abbildung 9: Zerfall eines Myons in ein Elektron und zwei Neutrinos.

Myonen entstehen überwiegend in einer Höhe von 9 bis 12 km über dem Meer, durch die dort stattfindenden Kollisionen der kosmischen Strahlung mit den Molekülen der Erdatmosphäre. Die Geschwindigkeit dieser Myonen beträgt relativ zur Erde $0.998 \cdot c$, wobei c die Lichtgeschwindigkeit ist. Aus Sicht der klassischen Physik würde man die Distanz, welche ein Myon in seiner Lebensdauer von $2 \mu s$ zurücklegt auf:

$$0.998 \cdot c \cdot T_{1/2} = 0.998 \cdot 3 \cdot 10^8 m/s \cdot 2 \cdot 10^{-6} s \approx 600m$$

berechnen. Dennoch kann die Mehrheit dieser Myonen auf der Erdoberfläche gemessen werden. Die Myonen können demnach auch eine Strecke von 9 bis 12 km überwinden.

Aus Sicht der Speziellen Relativitätstheorie ist dies aber einfach erklärbar. Denn

die Halbwertszeit $(T_{1/2})_R$ muss zuerst in die Halbwertszeit $(T_{1/2})_{Erde} = \gamma(T_{1/2})_R$ aus Sicht eines Beobachters auf der Erdoberfläche umgerechnet werden. Da die Geschwindigkeit des Myons fast der Lichtgeschwindigkeit entspricht, findet eine Verlängerung der Lebensdauer des Myons statt.

Mit dem Lorentzfaktor [Ein05]:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

ergibt sich:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-(0.998)^2}} \approx 15,$$

und damit ist die Halbwertszeit im Bezugssystem der Erde:

$$(T_{1/2})_{Erde} = \gamma(T_{1/2})_R \approx 15 \times 2 \mu s = 30 \mu s.$$

Mit einer Halbwertszeit von $30 \mu s$ beträgt die Flugdistanz 9 km, was erklärt, wieso wir Myonen auf der Erdoberfläche messen können.

3.7 Tageszeit Abhängigkeit

Da 5% der kosmischen Strahlung ihren Ursprung in der Sonne hat [Fri], kann bei Erdoberflächen basierten Messungen ein Unterschied in der Anzahl kosmischer Strahlen zwischen Tag und Nacht vermutet werden. In [Mes60] wurden kosmische Neutronen untersucht. Da neutrale Teilchen nicht durch intergalaktische Magnetfelder abgelenkt werden, können sie ihrem Entstehungsort zugeordnet werden. Die Autoren von [Mes60] publizierten einen Tag-/Nachtunterschied der gemessenen Neutronenstrahlung von etwa 1%. Der geladene Teil der Sonnenstrahlung wird durch intergalaktische Magnetfelder, wie auch das Erdmagnetfeld abgelenkt und trifft daher beinahe isotrop auf die Erdoberfläche.

Die natürliche Hintergrundstrahlung auf der Erde weist auch eine Tageszeit Abhängigkeit auf: Der reduzierte Luftdruck bei Nacht ermöglicht es dem gasförmigen Radon in Gebäuden höher aufzusteigen, weshalb nachts eine höhere Radonkonzentration gemessen werden kann [Por+94].

4 Bau einer kontinuierlichen Nebelkammer

In meiner Maturitätsarbeit habe ich mich auf den Bau einer kontinuierlichen Nebelkammer fokussiert, dabei war es mir wichtig, dass ich sie möglichst lange ohne Aufsicht laufen lassen kann. Ich wollte die einzelnen Heiz- und Pumpelemente über ein Programm steuern und koordinieren können.

4.1 Erste Prototyp-Reihe

Zu Beginn meiner Arbeit habe ich verschiedene Versuche mit einfachen Kammern gebaut. Diese basierten auf dem Prinzip der Diffusionsnebelkammer. Das Ziel der Prototypen war es zu testen, ob das Projekt im Grunde funktionieren kann und welche Schwierigkeiten ich dabei vermutlich antreffen werde.

4.1.1 Prototyp 1.1

Für die Kühlung des Bodens habe ich ein Kühlpaket mit einem Kühlkörper kombiniert und mit Aluminiumband verschlossen. Diese Packung habe ich im Gefrierfach heruntergekühlt. Für die Kammer selbst habe ich ein Tupperware verwendet. An die Decke habe ich ein Stück Filz geklebt, welches ich in Ethanol tränkte. Auf die Kammer stellte ich ein weiteres Tupperware, welches ich mit kochendem Wasser befüllte und so als Heizung agieren liess.

Der Filz wurde vom sich darüber befindenden kochenden Wasser erhitzt, und das Ethanol verdampfte. Es bildete sich aber kein übersättigtes Gas.

Der Filz hielt nicht gut an der Decke und auch der Temperaturgradient war nicht optimal. Die Wärme konnte nicht gut übertragen werden durch die Tupperware hindurch.

4.1.2 Prototyp 1.2

Bei der zweiten Versuchsreihe habe ich den Boden des Tupperwares ausgeschnitten, so dass das Gas in direkten Kontakt mit dem Kühlpack kam. Auch die Trennwand zwischen der Nebelkammer und dem Wasserreservoir habe ich herausgenommen und durch Aluminiumband ersetzt, welches gut Wärme leitet. Den Filz habe ich mit Magneten am Aluminiumband befestigt. Die Kammer hatte nun die Masse $0.15 \cdot 0.15 \cdot 0.07m$, siehe Abbildung 10.

Dieser Aufbau funktionierte ebenfalls nicht. Die Kammer war nicht dicht, weder zwischen der Kühlung und der Kammer noch zwischen der Heizung und der Kammer.



Abbildung 10: Prototyp 1.2

Um das Dichte-Problem zu beheben, versuchte ich die Kammer mit Fensterkitt, Vaseline und Aluminiumband abzudichten. Doch führte dies zu keinem Ergebnis.

4.1.3 Prototyp 1.3

Ich habe die Kammer von Grund auf neu aufgebaut. Sie hat das Volumen $0.1m^3$ (Abb.11) , und besteht ebenfalls aus Tupperware. Den Deckel des Tupperwares habe ich mit der Kühlflüssigkeit befüllt und mit einem Aluminiumband verschlossen. Der Deckel des Tupperwares wurde so direkt zur Bodenkühlung meiner Kammer. Auf die Kammer habe ich ein weiteres Tupperware gestellt für meine Wasserheizung. Bei diesem habe ich jedoch den Boden herausgeschnitten und es dann auf die Kammer geklebt und mit Aluminiumband abgedichtet. Dies habe ich getan, damit sich nur eine Schicht Kunststoff zwischen dem mit Magneten befestigten in Ethanol getränkten Filz und der Heizung befand. So habe ich sicherstellen können, dass die Kammer oben Luftdicht verschlossen ist. Das Dichte-Problem am Boden konnte ich umgehen, indem sich die Kühlung in den Deckel des Tupperwares integriert wurde und ich so nur das Tupperware verschliessen musste.

Was ich dabei nicht berücksichtigte war, dass sich der Deckel des Tupperwares durch die Kälte leicht zusammenzog und das ganze wiederum nicht dicht war. Dieses Problem konnte ich aber umgehen, indem ich zwischen den Deckel und den Rest der Kammer Vaseline strich. Die Vaseline konnte diesen kleinen Spalt überbrücken und so bildete sich ein übersättigtes Gas. Es waren Spuren verschiedener Teilchen zu sehen (Abb. 12).



Abbildung 11: Prototyp 1.3



Abbildung 12: Erste Spur

Die maximale Beobachtungszeit betrug etwa eine Viertelstunde. Dann war der Temperaturgradient nicht mehr gross genug, da sich das Wasser abgekühlt und der Kühlkörper sich erwärmt hat.

4.2 Erster Versuch

Für die finale Ausführung der Nebelkammer sollte auf die bisher verwendete Methode der Erhitzung durch heisses Wasser und die Kühlung mittels Kühlflüssigkeit verzichtet werden. Stattdessen wollte ich eine automatische Regelung oder Steuerung über ein Touchpad bauen. Zu diesem Zweck habe ich mögliche Bauteile und deren Steuerungsmöglichkeiten untersucht. Schliesslich habe ich mich dazu entschieden, die Steuerung der Kammer mit einem Arduino-Bausatz zu realisieren. Im weiteren Verlauf der Planung habe ich ein 3D-Modell mit Blender erstellt (Abb. 13) und darauf geachtet, dass die ausgewählten Bauteile mit dem Arduino-System kompatibel waren.

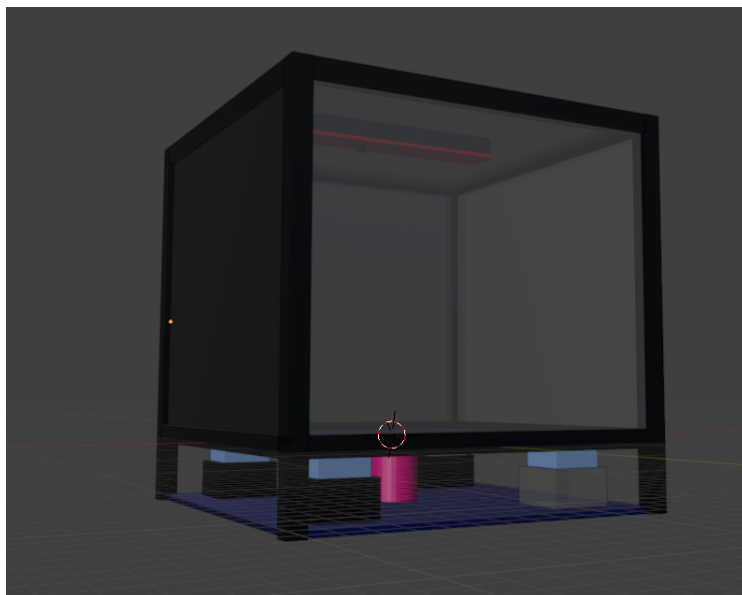


Abbildung 13: 3D-Modell der Nebelkammer in Blender.

Damit eine Nebelkammer funktionstüchtig ist, muss sie übersättigten Dampf produzieren können. Dies wird durch einen Temperaturgradient erreicht. Bei meinen Prototypen habe ich dafür die Decke erhitzt und den Boden gekühlt. Für meine Kammer wollte ich aber, dass man von oben in die Kammer sehen kann und so eine grössere Beobachtungsfläche hat. Der Temperaturgradient kommt bei diesem Modell demnach durch die Temperaturdifferenz zwischen dem gasförmigen Ethanol und der gekühlten Bodenplatte zustande. Die Bodenplatte wird mittels Peltier Elementen gekühlt. Eine Seitenwand der Kammer besteht aus Kunststoff. An diese Wand habe ich auf der Innenseite ein U-Profil angebracht, welches von einem Heizelement erhitzt wird. Über einen Schlauch kann Ethanol von aussen in das U-Profil gepumpt werden. Dort wird das flüssige Ethanol erhitzt und das Ethanolgas verbreitet sich in der Kammer. Die restlichen vier Wände der quader-

förmigen Kammer bestehen aus Glas und dienen der Beobachtung aus verschiedenen Perspektiven.

4.2.1 Elektronik/Arduino

Im Folgenden werden die technischen Komponenten der Kammer und ihre Funktionsweise beschrieben. Die Kammer setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen, die ich vor dem Einbau einzeln getestet habe. Die Ethanolzufuhr wurde mit einer Pumpe realisiert. Hierfür wurde eine Scheibenwischerpumpe für Autos verwendet (Abb. 14). Diese Pumpen sind einfach aufgebaut und leicht zu regulieren. Die Pumpe funktioniert mit einem 6 Volt Netzteil und wird über einen MOSFET reguliert.



Abbildung 14: Pumpe für Ethanol Zufuhr.

MOSFETs (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistors) sind eine spezielle Art von Transistoren. Ein Transistor ist ein elektronisches Halbleiterbauelement, das zur Steuerung von elektrischen Spannungen und Strömen dient. Ein MOSFET besitzt drei Anschlüsse: Gate (Steueranschluss), Drain (Abfluss) und Source (Zufluss) [Bar97]. In der vorliegenden Anwendung wird die Source mit dem Netzteil verbunden und der Drain mit der Pumpe. Der Stromfluss in der Drain-Source-Strecke wird durch die Spannung zwischen Gate und Source reguliert. Diese Steuerung erfolgt, indem das Gate mittels eines Arduinoboards vom Computer aus angesteuert wird. Über das Arduinoboard kann ich auch ein 4 x 4 Tasten Touchpad (15) ansteuern. Ich habe das ganze System so programmiert,

dass ich über das Touchpad die Pumpe an und ausschalten kann. Drückt man nun manuell den Buchstaben A auf dem Touchpad geht die Pumpe an, bei B wird sie ausgeschaltet.

Das in Abbildung 16 dargestellte Heizelement wird ebenfalls mithilfe eines MOSFETs gesteuert. Dieses Heizelement erfordert jedoch eine höhere Leistung und ist an ein separates Netzteil mit 12 Volt angeschlossen, welches bis zu 230 Watt liefert. Auf dem Heizelement wurde ein Temperatursensor installiert. Die erfasste Temperatur wird auf einem Display angezeigt, wobei die Hauptfunktion des Temperatursensors die Regelung des Heizelements ist. Abbildung 15 zeigt, wie das Arduinoboard angeschlossen ist, um das Touchpad, den Temperatursensor, wie auch das Display zu steuern. Die Pumpe, sowie auch das Heizelement haben separate Netzteile mit passender Spannung. Diese beiden Bauelemente werden über die beiden MOSFETs gesteuert.

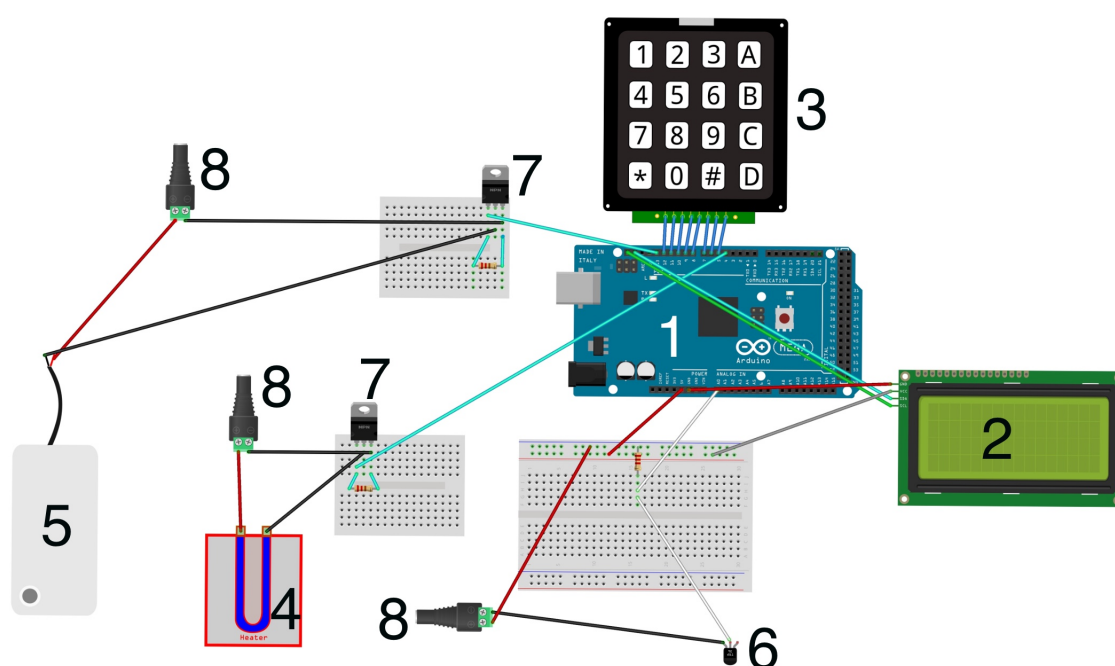


Abbildung 15: Schaltkreis mit Arduinoboard (1), Display (2), Touchpad (3), Heizelement (4), Pumpe (5), Temperatursensor (6), MOSFETs (7), Spannungsquellen (8).

Die Steuerungslogik des Heizelements wurde so programmiert, dass der Heizvorgang bei einer Temperatur von 78 °C stoppt. Sinkt die Temperatur unter 75 °C, beginnt das Heizelement automatisch wieder zu heizen. Diese Regelung sorgt da-

für, dass die Temperatur in einem definierten Bereich gehalten wird, der optimal für die Verdampfung von Ethanol ist. Da die Siedetemperatur von Ethanol bei 78,37 °C liegt, ermöglicht diese Einstellung die Erzeugung eines übersättigten Ethanoldampfs, der für den Betrieb der Kammer erforderlich ist.

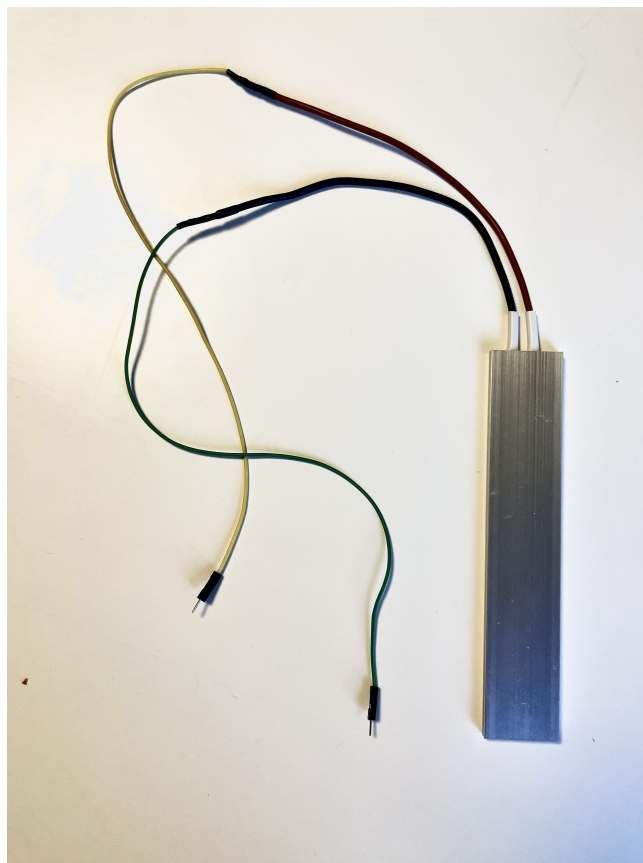


Abbildung 16: Heizelement

Die Kühlung der Bodenplatte findet über die Peltier-Elemente statt. Peltier-Elemente sind Halbleiterbauteile, die auf dem Peltier-Effekt basieren. Sie können Wärme von einer Seite des Elements zur anderen transportieren, wenn ein elektrischer Strom durch das Element fließt. Eine Seite wird kalt (absorbiert Wärme), und die andere Seite wird heiß (gibt Wärme ab). Jedes Element kann nur eine gewisse Temperaturdifferenz erzeugen. Ist diese Differenz erreicht und es wird weiterhin mehr Strom hinzugefügt, wärmt sich das ganze Element auf und überhitzt. Das bedeutet, dass die Wärme auf der warmen Seite des Peltiers abtransportiert werden muss. Dies geschieht über einen Heatsink, welcher mittels Ventilatoren (Abb. 18) gekühlt wird. In Abbildung 17 sind die Stromkreise für die Steuerung der Peltierelemente sichtbar. Dabei habe ich darauf geachtet, dass die Spannung 15 Volt beträgt und die Peltiers jeweils bei 4 Ampere betrieben werden können. Dies ermöglicht die tiefsten Temperaturen.

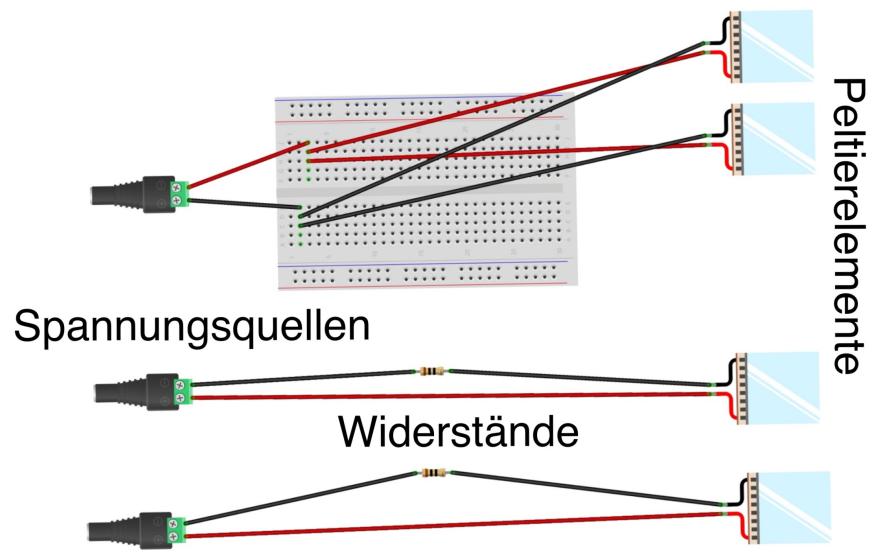


Abbildung 17: Stromkreise um die Peltierelemente anzuschliessen

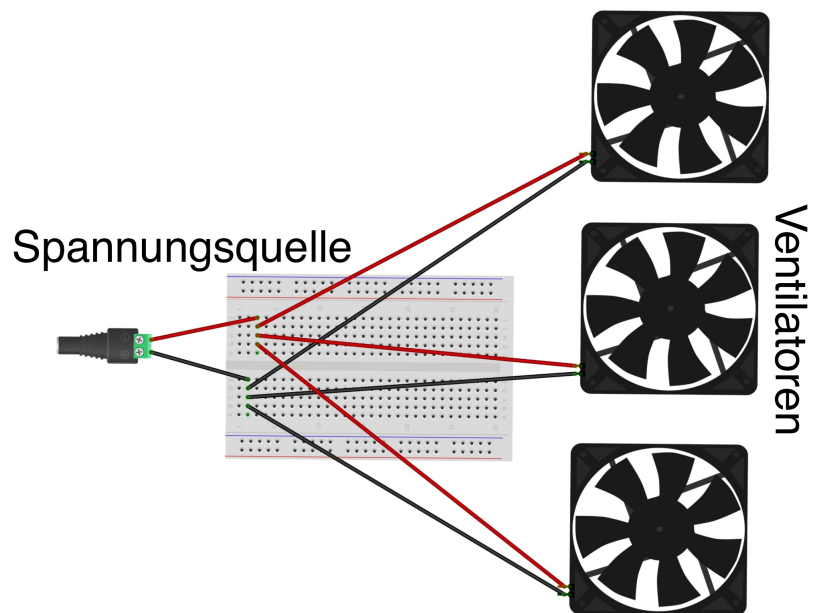


Abbildung 18: Stromkreise um die Ventilatoren anzuschliessen

4.2.2 Gehäuse

Die beschriebene Kammer hat eine Grundfläche von 30 cm x 30 cm und eine Höhe von 25 cm. Die für den Betrieb notwendigen Komponenten, wie die Verkabelung, die Pumpe und die Kühlung, sind ausserhalb der zur Kammer positioniert.

Das Gehäuse der Kammer wird durch ein Gerüst aus Winkelstangen gebildet, das die Wände des Quaders stabilisiert. Der Boden der Kammer besteht aus einer Aluminiumplatte, die aufgrund des hohen Wärmeleitkoeffizienten von Aluminium geeignet ist, um die Wärme effizient aus dem der Kammer mit Hilfe der Peltierelemente abzuführen. Eine der Seitenwände der Kammer ist aus Kunststoff gefertigt. Diese Wand ist nicht nur thermisch isolierend, sondern auch leicht zu bearbeiten, was das Bohren von Zugangslöchern für die Verkabelung (Barometer, Thermometer, Heizelement) und den Schlauch für die Ethanolzufuhr erleichtert. An dieser Kunststoffwand ist auch das Heizelement montiert. Die übrigen Wände der Kammer bestehen aus Glas, was die Beobachtung der Spuren ermöglicht. Alle Wände der Kammer sind in das Stangengerüst des Gehäuses eingefügt und mittels Fugen abgedichtet, um eine stabile und luftdichte Kammer zu erhalten. Die Ethanolpumpe ist am Stangengerüst der Kammer montiert. Die Steckplatten und das Arduinoboard sind an der Kunststoffwand befestigt, wodurch alle elektronischen Komponenten beieinander sind. Die Verkabelung wird durch ein Blech verdeckt, das dem Schutz der Elektronik dient. In dieses Blech wurde eine Öffnung geschnitten, um ein Display zu montieren. Darüber hinaus ist auch das Touchpad zur Steuerung der Pumpe an diesem Blech befestigt.

4.2.3 Fazit der ersten Kammer

Als ich die Kammer in Betrieb nahm, konnte ich keine Spuren sehen. Das Ethanol verdampfte und ich konnte Nebelschwaden in der ganzen Kammer beobachten. Diese bewegten sich stark und kühlten nicht genug ab, sodass sich kein übersättigtes Gas bildete. Die Kammer schien nicht zu funktionieren.

4.3 Zweite Prototypenserie

Da mein erster richtiger Versuch, eine kontinuierliche Nebelkammer zu bauen, gescheitert ist, habe ich nochmals einen Schritt zurück gemacht und von klein an neu begonnen. Das heisst, ich habe eine kleine Kammer nach den gleichen Prinzipien, wie der Prototyp, gebaut, welcher funktioniert hatte. Dabei entstanden drei neue Kammern, deren Deckel untereinander kompatibel sind (Abb. 19).

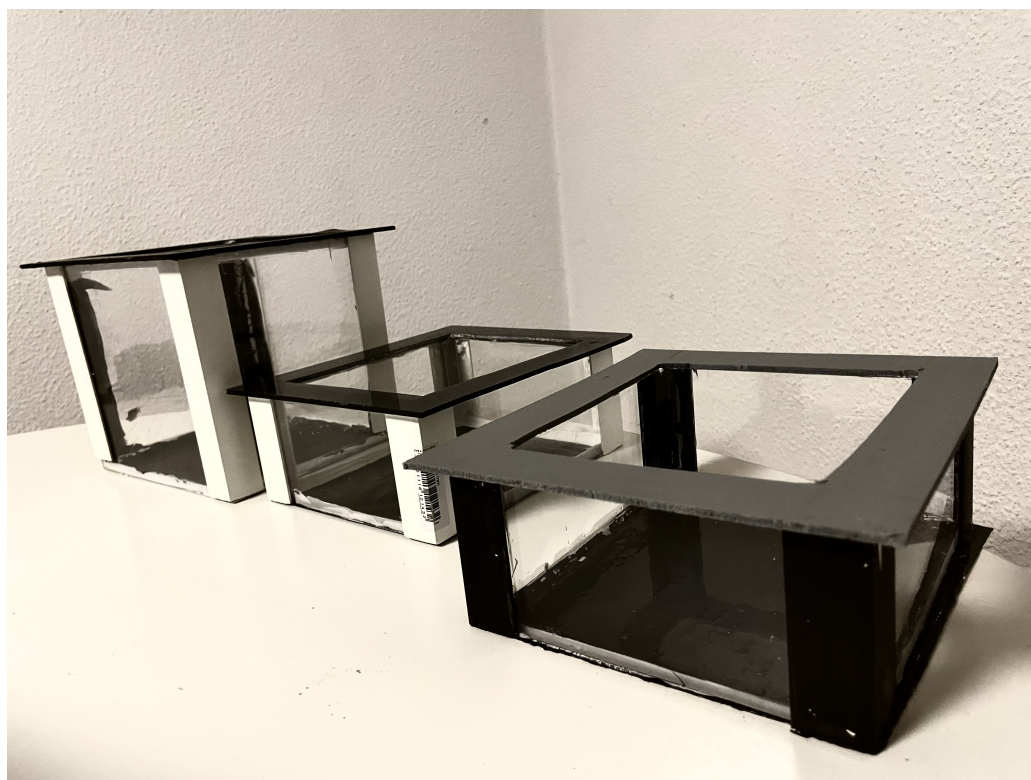


Abbildung 19: Kammern der zweiten Prototyp Reihe: links Prototyp 2.1, mitte 2.2, rechts 2.3.

4.3.1 Prototyp 2.1

Der Prototyp war kleiner als meine Kammer im ersten Versuch. Er hatte eine Höhe und Breite von 16 cm, Länge von 18cm und Plexiglaswände. Ein Aluminiumblech wurde als Boden verwendet. Der Deckel wurde aus einer Metallplatte gefertigt. Er konnte geöffnet werden. Ich habe einen Silikonring als Dichtung gegossen, so dass ich den Deckeln mittels Klammern öffnen und schliessen konnte. Der Prototyp funktionierte dann so, dass man ihn auf die Kühlflüssigkeit stellte und auf dem Deckel einen Topf mit kochendem Wasser platzierte. Dadurch konnte der benötigte Temperaturgradient erzeugt werden. Mit Magneten wurde ein Filz unterhalb des Deckels innerhalb der Kammer angebracht. Dieser wurde vor jedem Versuch in Ethanol getränkt.

In dieser Kammer waren sehr schwache Spuren zu erkennen. Sie war schlechter sichtbar als in meinem ersten funktionierenden Prototypen. Dies ist auf die Distanz zwischen der warmen und kalten Seite zurückzuführen. Diese war im Prototyp 1.3 deutlich kleiner.

4.3.2 Prototyp 2.2

Die Proportionen habe ich von Prototyp 2.1 beibehalten, ausser die Höhe. Diese habe ich auf 7 cm verringert. Den Boden bildete jetzt auch nicht mehr ein Aluminiumblech, sondern eine Aluminiumfolie. Diese ist dünner und hat eine bessere Leitfähigkeit. Das Deckelsystem behielt ich bei.

Die Spuren, welche ich mit dieser Kammer beobachten konnte, waren klar erkennbar. Sie funktionierte demnach sehr gut. Daraus entnahm ich, dass die Höhe der Kammer massgebend ist. Wäre die Distanz zwischen der kalten und der warmen Seite grösser so müsste auch die Temperaturunterschiede grösser sein um den gleichen Gradient zu erhalten.

In einem nächsten Schritt habe ich die Kühlung ausgetauscht. Anstelle der Kühlflüssigkeit stellte ich die Kammer auf die Peltier Elemente ($4 \cdot 4\text{cm}$). Als ich die Kammer so getestet habe, konnte ich keine Spuren mehr sehen. Dies lag daran, dass ich nicht auf der ganzen Bodenfläche Peltiers anbringen konnte. Ich habe die Kammer mit vier Peltiers gekühlt und zwischen den Peltiers gab es ein 2cm grossen Spalt. Die Aluminiumfolie konnte diesen nicht ausgleichen und so wurde es nur direkt über den Peltiers kalt und nicht gleichmässig über dem ganzen Boden.

4.3.3 Prototyp 2.3

Um das Problem des Prototypen 2.2 zu lösen, habe ich die gleiche Kammer nochmals gebaut aber mit einem Aluminiumblech als Boden (Abb. 14). Dieses ist dicker als die Aluminiumfolie und kann so auch mehr Wärme abtransportieren. Diese Kammer konnte ich dann mit Peltiers kühlen, so dass sich ein übersättigtes Gas bilden konnte und schöne Spuren sichtbar waren. In einem nächsten Schritt habe ich den Kochtopf durch ein Heizelement ausgetauscht. Die Elektronik des Peltier, so wie auch des Heizelements habe ich von meinem ersten Versuch, eine Kammer zu bauen, übernommen. So wurde auch hier das Heizelement mittels eines Temperatursensors reguliert. Diese Kammer hat für ein paar Tage sehr gut funktioniert, bis das Plexiglas begonnen hat, sich abzuschälen oder aufzulösen. Das Plexiglas wurde trübe und erschwerte die Sicht (Abb. 21).

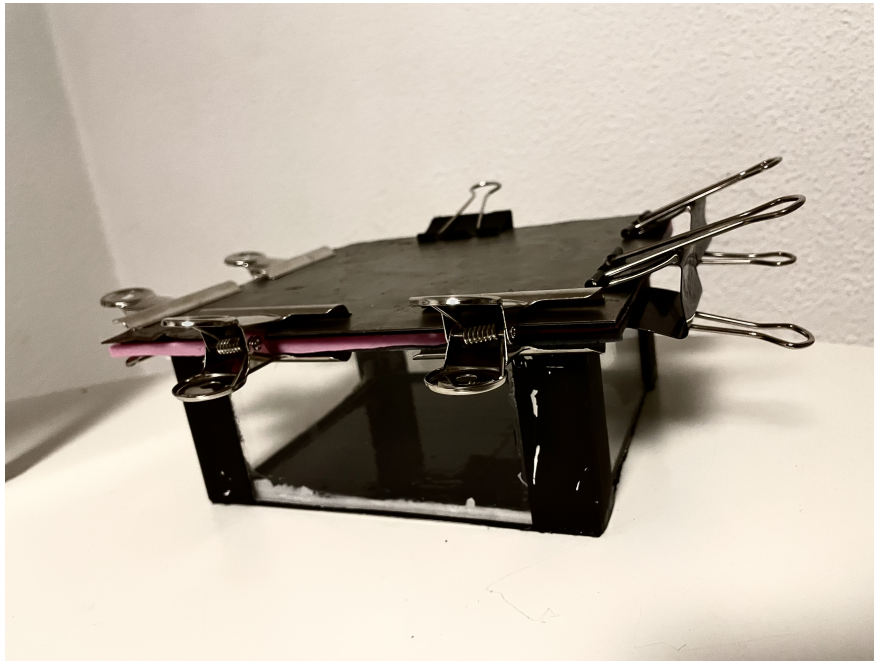


Abbildung 20: Prototyp 2.3

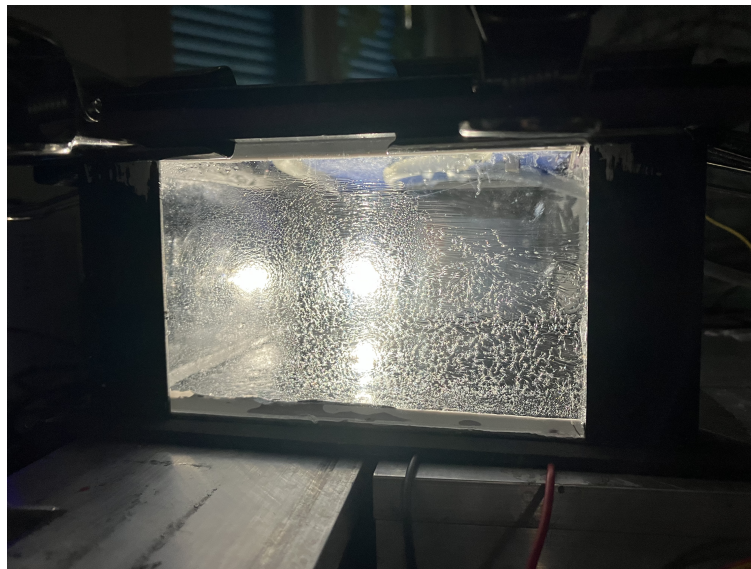


Abbildung 21: Bild des Prototypen 2.3, als sich das Plexiglas aufzulösen begann.

4.4 Die kontinuierliche Kammer

Für meine finale Version einer kontinuierlichen Nebelkammer habe ich eine Kammer mit den Massen $16 \cdot 18\text{cm}$ und einer Höhe von 7cm gebaut. Die Masse sind demnach sehr ähnlich wie beim Prototypen 2.3. Drei der Wände dieser Kammer bestehen aus Glas, eine weitere aus Kunststoff. Für eine Wand wurde Kunststoff gewählt, um da die Löcher für den Ethanol-Schlauch zu bohren. Die Kammer funktionierte mit der Peltierkühlung und dem Heizelement. Die Ethanolzufuhr erfolgt über einen Schlauch, der mittig durch einen Filz verläuft und mit kleinen Löchern versehen ist. So wird der Filz gleichmässig feucht gehalten. Die Elektronik habe ich beibehalten, wie bei meinem ersten Versuch. Lediglich die Peltierkühlung musste optimiert werden. Da die Peltier auf einer Seite warm werden, muss dort die Hitze effizient wegtransportiert werden. Dafür habe ich die Peltierelemente auf grossen Kühlkörpern montiert und auf deren Unterseite Ventilatoren angebracht.

4.4.1 Betrieb

Beim Betrieb der Kammer muss auf die Kühlung der Peltiers geachtet werden. So müssen die Ventilatoren als erstes eingeschaltet werden. Danach kann das Heizelement und die Peltiers eingeschalten werden. Fast instantan tritt ein Ethanol-Nebel auf. Dieser wird aus sich schnell bewegenden Ethanol-Tröpfchen gebildet. In diesem Nebel sind keine Spuren zu erkennen. Nach einiger Minuten setzt er dann aber wieder aus. Nach weiteren zehn bis 20 Minuten setzt der übersättigte Dampf ein und Spuren werden sichtbar. Die Kammer läuft dann stabil.

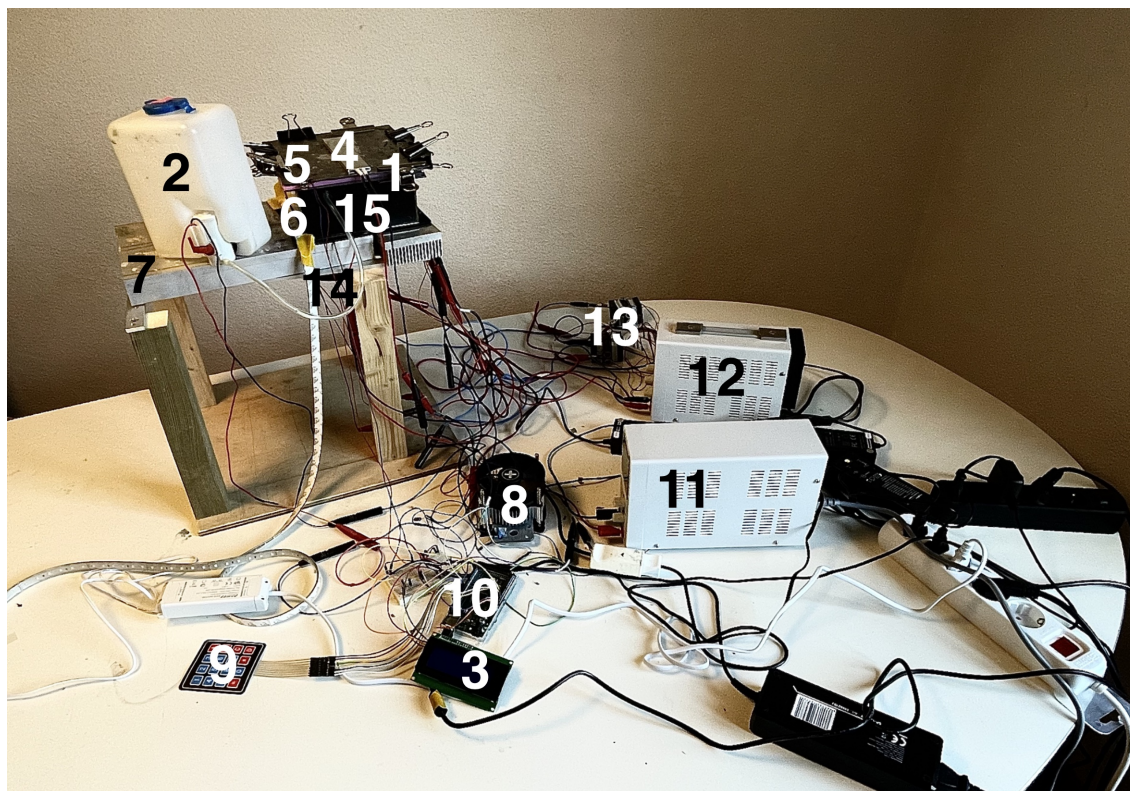


Abbildung 22: Übersicht der einzelnen Bauelementen meiner Nebelkammer

- | | |
|---|--|
| 1. Nebelkammer | 10. Arduino board |
| 2. Ethanol Pumpe | 11. Netzteil für zwei Peltiers |
| 3. Display mit Temperaturanzeige | 12. Netzteil für die Ventilatoren |
| 4. Heizelement | 13. Widerstände der Peltiers, gekühlt mit Ventilatoren |
| 5. Temperatursensor | 14. Ventilator unter den Heatsinks, für dessen Kühlung |
| 6. LED Beleuchtung | 15. Kammerwand aus Kunststoff mit Ethanol Zugang |
| 7. Heatsinks | |
| 8. MOSFET mit Ventiltorkühlung | |
| 9. Touchpad für die Steuerung der Pumpe | |

5 Messungen

Während dreier Wochen habe ich wiederholt Messungen mit der Nebelkammer zu unterschiedlichen Tageszeiten durchgeführt, um meine Hypothese einer Tageszeit abhängigen Strahlung zu untersuchen. Während dieser drei Wochen habe ich 144 Messungen gemacht.

5.1 Methode

Für die Messungen habe ich das Smartphone in einer bestimmten Position relativ zur Kammer platziert und die Spuren in der Kammer während zweier Minuten gefilmt. Anschliessend wurden die Videoaufnahmen ausgewertet und die Spuren gezählt. Zur Untersuchung der Abhängigkeit von der Tageszeit wurden Messungen zu verschiedenen Uhrzeiten über einen Zeitraum von 24 Stunden durchgeführt. Zu jedem Zeitfenster wurden fünf Messungen direkt hintereinander gemacht, allerdings musste ich 6 Messungen auf Grund schlechter Videoqualität weglassen. Die fünf Wiederholungen sollten die natürliche Schwankung der Radioaktivität und die unterschiedlichen Fokussierungen der Kamera ausgleichen. Das bedeutete, dass zu jeder Uhrzeit fünf zweiminütige Messungen gemacht wurden. Die Kammer wurde vor Beginn der Messungen auf die optimale Betriebstemperatur aufgeheizt, um die Sichtbarkeit des Nebels zu gewährleisten. Die Beleuchtung der Kammer erfolgte durch einen LED-Streifen, während der übrige Raum vollständig abgedunkelt wurde, um optimale Kontraste zu erzielen. Zusätzlich wurden der Barometerstand und die Wetterbedingungen dokumentiert. Die gemessenen Daten wurden in Excel erfasst und anschliessend mit RStudio [RSu] analysiert und graphisch dargestellt.

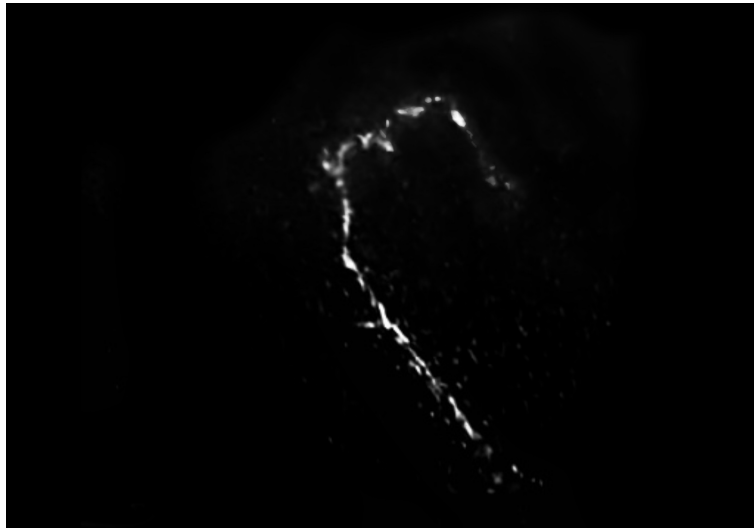


Abbildung 23: Bild einer Spur in meiner Nebelkammer.

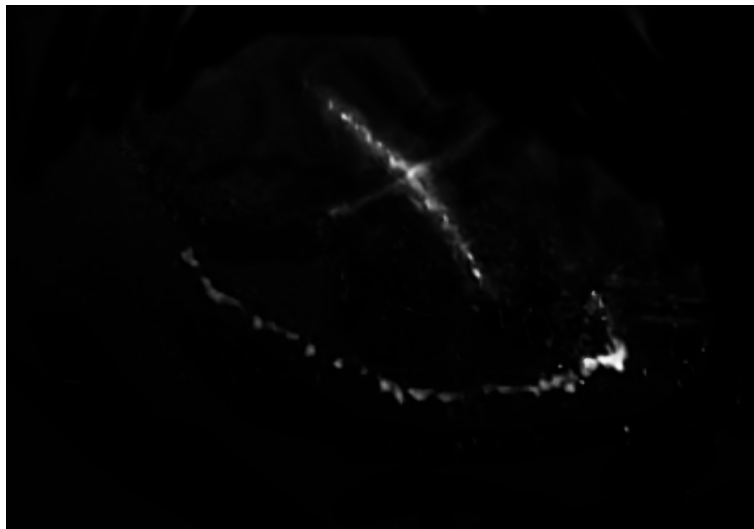


Abbildung 24: Bild zweier Spuren in meiner Nebelkammer.

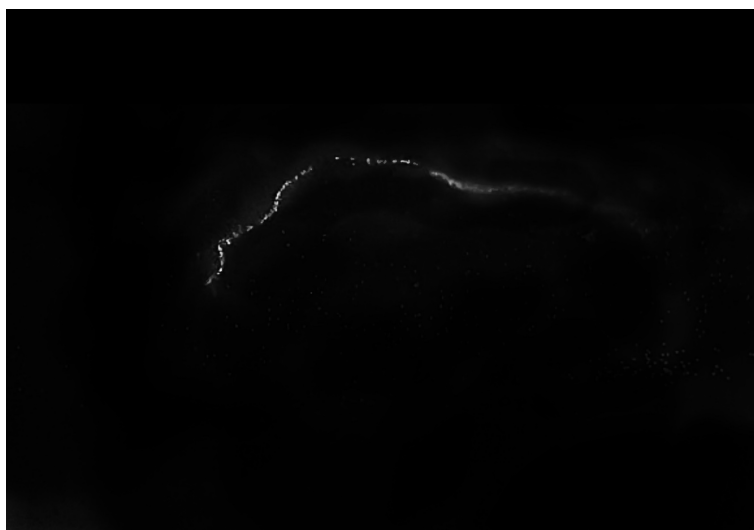


Abbildung 25: Bild einer Spur in meiner Nebelkammer.

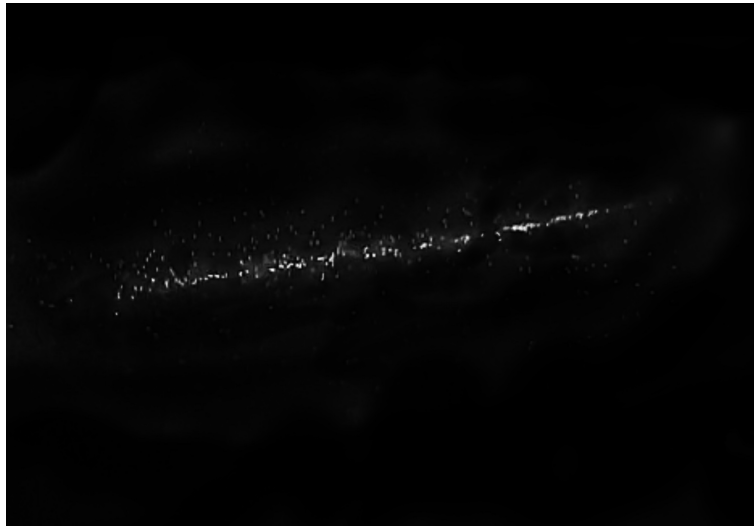


Abbildung 26: Bild einer Spur in meiner Nebelkammer.



Abbildung 27: Bild einer Spur in meiner Nebelkammer.

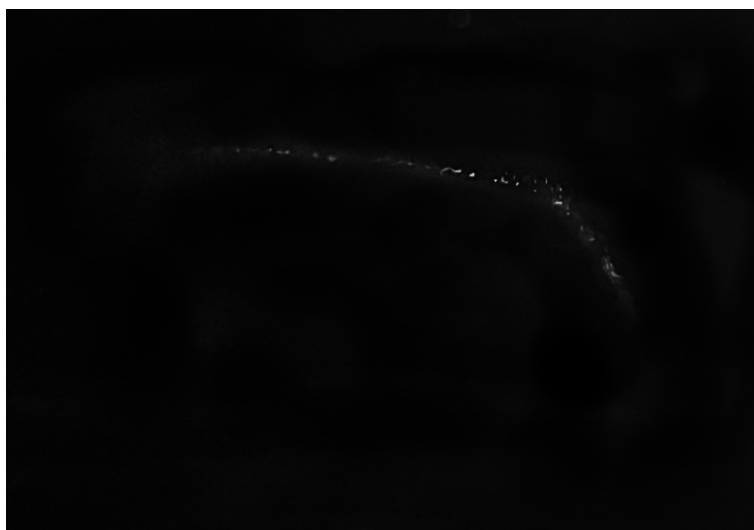


Abbildung 28: Bild einer Spur in meiner Nebelkammer.

6 Resultate

Der Mittelwert aller meiner Messungen betrug 58 Spuren in zwei Minuten. Die Standardabweichungen der fünf Messungen eines bestimmten Zeitpunktes lagen im Intervall von [1.6 - 13.3]. Auf Grund meiner Hypothese einer Tag- /Nachtabhängigkeit habe ich als Regressionsfunktion eine Cosinuskurve gewählt. Um den erwarteten 24-Stunden Rhythmus der Erdrotation erfassen zu können, wurde die Periode von 2π in 24 Stunden geteilt. Die Daten können durch die Cosinusfunktion in Formel 1 angenähert werden:

$$y = A \cdot \cos(2\pi t/24) + C \quad (1)$$

Wobei y der Anzahl Spuren entspricht, A die angenäherte Amplitude ist, t die Uhrzeit angibt und $C - A$ den konstanten Untergrund beschreibt. Die Anzahl Spuren zum Zeitpunkt t kann durch die Formel 2 approximiert werden mit $A = -9.8$ und $C = 58.3$:

$$y = -9.8 \cdot \cos(2\pi t/24) + 58.3 \quad (2)$$

Durch den T - Tests wurde bestimmt, dass der Parameter A sich signifikant von 0 unterscheidet. Der berechnete p-Wert für den Parameter A beträgt 0.0003, was deutlich unter den gängigen Signifikanzniveaus von $\alpha = 0.05$ liegt. Der geschätzte Unterschied der Anzahl Spuren zwischen Tag und Nacht beträgt $2 \cdot 9.8 = 19.6$ Spuren.

Die lineare Regression und die Messpunkte sind in Abbildung 29 dargestellt.

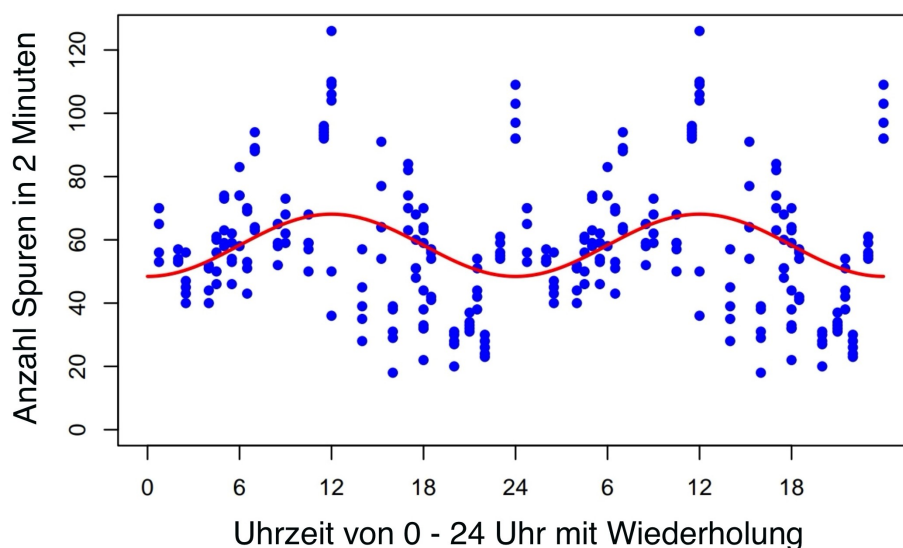


Abbildung 29: Darstellungen der Messungen, in zwei Intervallen von je 24 Stunden mit Regressionskurve.

Jeder Punkt in Abbildung 29 entspricht der Anzahl Spuren in einem zweiminütigen Video.

Um die Regression weiter zu beurteilen, habe ich die Residuen gegenüber meiner geschätzten Anzahl Spuren dargestellt, siehe Abbildung 30. Ein Residuum ist die Differenz zwischen dem tatsächlichen Wert der abhängigen Variable y und dem vorhergesagten Wert. In einem gut angepassten linearen Regressionsmodell sollten die Residuen (R) gleichmäßig um die Linie $R = 0$ verteilt sein, weiter sollte die Streuung der Residuen über den Bereich der geschätzten Werte (Fitted Values) konstant bleiben. In Abbildung 30 ist zu erkennen, dass das Modell keine systematischen Abweichungen aufweist und daher die Cosinuskurve die Tag-/Nachtabhängigkeit der Daten gut wiedergibt.

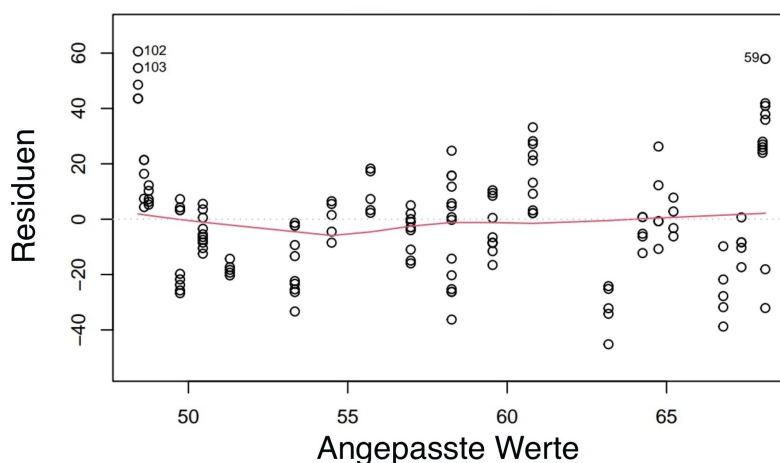


Abbildung 30: Residuen in Abhängigkeit der geschätzten Werte.

Einen Q-Q-Plot (Quantile-Quantile-Plot) der Residuen wurde verwendet um zu prüfen, ob die Residuen einer Normalverteilung folgen, was eine Annahme des statistischen Modells ist, siehe Abbildung 31. Auf der x-Achse werden die theoretischen Quantile basierend auf der Normalverteilung dargestellt. Auf der y-Achse werden dann die tatsächlichen Quantile der Residuen aus dem Modell aufgetragen. Folgen die Residuen nun einer Normalverteilung, ist dies im Graphen durch eine gerade Linie ersichtlich, welche durch die Punkte im Q-Q-Plot entsteht. Bei dieser Art von Graph kommen Abweichungen in den Extrembereichen öfters vor, da dort weniger Daten vorliegen. Die drei extremsten Werte in Abbildung 31 entsprechen drei Messungen, in welchen ungewöhnlich viele Spuren gezählt wurden.

In Abbildung 32 wurden die Messpunkte gemäss dem gemessenen Luftdruck farbcodiert. Die Luftdruckschwankungen zwischen 965 hPa und 980 hPa sind durch

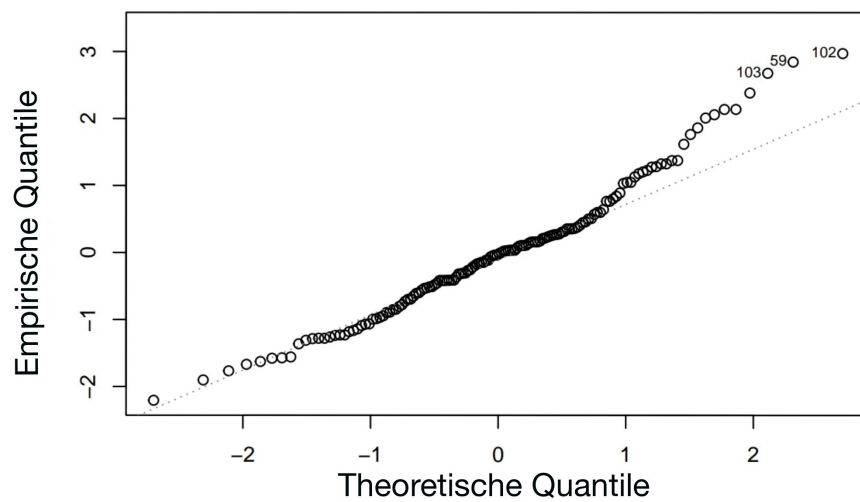


Abbildung 31: Geschätzte vs. theoretische Werte der Residuen

die angebrachte Farbskala zu erkennen.

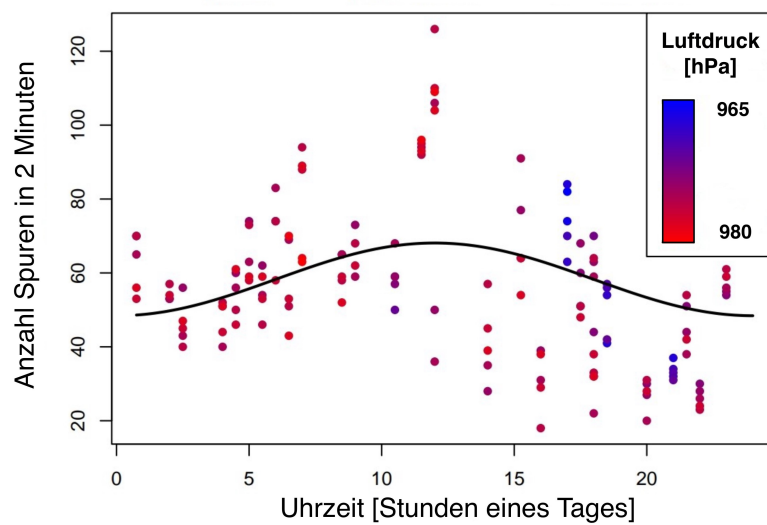


Abbildung 32: Anzahl der Spuren in Abhängigkeit der Tageszeit mit Regressionskurve und Farbverlauf für den Luftdruck.

7 Diskussion

Der Bau einer kontinuierlichen Nebelkammer wurde erfolgreich abgeschlossen, und es konnten Daten erhoben und analysiert werden. Die Ergebnisse meiner Messungen weisen eine signifikante Abhängigkeit von der Tageszeit auf. Dabei wurde die höchste Anzahl an Spuren jeweils zur Mittagszeit und die niedrigste um Mitternacht gezählt. Der Rückgang der gemessenen Spuren von Mittag bis Mitternacht betrug 29%. Die gemessenen Daten bestätigen die Hypothese einer Tag-/Nachtabhängigkeit. Dieses Verhalten wird durch die Cosinuskurve in Abbildung 29 veranschaulicht. Zudem ist anzumerken, dass der Luftdruck keine signifikante Rolle zu spielen scheint.

Ein Vergleich meiner Messungen mit der vorhandenen Literatur zeigt jedoch, dass die tageszeitliche Abhängigkeit nicht mit bekannten Phänomenen erklärbar ist. Da der Anteil kosmischer Teilchen von der Sonne lediglich 5% [Fri] beträgt, kann er den Unterschied von 28% in meinen Messungen nicht erklären. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass meine Messungen auch die terrestrische Hintergrundstrahlung beinhalten. Wie in [Chi05] beschrieben, treffen geladene kosmische Strahlen nahezu isotrop auf die Atmosphäre, was auf die Ablenkung durch galaktische Magnetfelder zurückzuführen ist. Nur neutrale Teilchen werden durch die Magnetfelder nicht abgelenkt und können auf ihren Ursprungsort verweisen.

Eine weitere Publikation [Mes60] berichtet, dass ein Tageszeit abhängiger Unterschied in der Neutronenstrahlung nachweisbar ist. Dieser Unterschied liegt jedoch bei weniger als 1% und ist somit nicht geeignet, die von mir gemessenen 28% zu erklären. Es ist ausserdem wichtig zu erwähnen, dass in dieser Publikation Neutronenstrahlung gemessen wurde, während eine Nebelkammer keine Neutronen detektieren kann.

Es gibt noch einen weiteren Faktor, welcher Tageszeit abhängig ist und zwar die Radon Aktivität [Por+94]. Radon aus dem Erdreich ist ein Edelgas, welches in Häuser eindringen kann und beim Zerfall Alphastrahlung erzeugt. Durch vermindertes Lüften und der Reduktion des atmosphärischen Druckes in der Nacht, steigt die Radonkonzentration nachts an. Dies verursacht einen Anstieg der Hintergrundstrahlung bei Nacht. Meine Messungen würden allerdings auf einen gegenteiligen Effekt hinweisen.

Durch meine Literaturrecherche konnte ich somit meine Messungen nicht erklären.

8 Fazit

Durch den Bau meiner Nebelkammer konnte ich zeigen, dass sich mit wenigen Bauteilen eine funktionierende Kammer konstruieren lässt, die kontinuierlich betrieben werden und für physikalische Messungen eingesetzt werden kann.

Der Bauprozess brachte einige unerwartete Herausforderungen mit sich. Insbesondere die Wärmeableitung der Peltier-Elementen stellte sich als schwierig heraus. Zudem zeigte sich, dass eine grosse Distanz zwischen der kalten und warmen Seite der Kammer den Betrieb erschwert. Nach einer grundlegenden Neukonstruktion konnte ich jedoch eine stabile und funktionierende Kammer realisieren. Dieser Prozess hat mir nicht nur technisches Wissen vermittelt, sondern mich auch Durchhaltevermögen und den Umgang mit Rückschlägen gelehrt.

Meine Messungen der Tag-/Nachtabhängigkeit der Strahlung zeigten Abweichungen zur bestehenden Literatur. Zukünftige Arbeiten könnten diese Abweichungen genauer untersuchen. Ausserdem könnte die Kammer durch ein Magnetfeld erweitert werden, um Positronen und Elektronen unterscheiden zu können.

Insgesamt bietet meine Kammer eine solide Grundlage für weiterführende Experimente und Untersuchungen.

9 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei meinen Betreuern Giorgio Lardi und Patric Müller für ihre fachliche Unterstützung und die wertvollen Ratschläge bedanken. Mein Dank gilt auch meinen Eltern, die mich in der praktischen Umsetzung unterstützt haben, sowie meinen Geschwistern für ihre vielfältige Hilfe. Nuria danke ich für die Hilfe beim Glasschneiden, Enea für seine Unterstützung beim Löten und Amaro für das Zusägen von Kunststoffplatten. Meinen Grosseltern danke ich für das stete Interesse an meiner Arbeit und das aufmerksame Korrekturlesen. Ich bin Eveline Hermansson dankbar für ihre Freundschaft und aufmunternden Worte.

Literatur

- [Ang12] A. De Angelis. *History of Cosmic Rays*. 2012. URL: <https://strahlenschutz.privatpraxis-lang.de/compton-effekt/>.
- [Bar97] V. Barkhordarian. “Power MOSFET basics”. In: 1997. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:18538641>.
- [CER] CERN. *Cosmic rays: particles from outer space*. Zugriff am: Mai 22, 2024. URL: <https://home.cern/science/physics/cosmic-rays-particles-outer-space>.
- [Chi05] A. Chilingarian. *Galactic and Solar Cosmic Rays*. 2005. URL: <https://cds.cern.ch/record/906750/files/p63.pdf>.
- [Ein05] A. Einstein. “Zur Elektrodynamik bewegter Körper”. In: *Annalen der Physik*. 17.10 (1905), S. 891–921.
- [Fey49] R. P. Feynman. “Space-Time Approach to Quantum Electrodynamics”. In: *Phys. Rev.* 76 (6 Sep. 1949), S. 769–789. DOI: 10.1103/PhysRev.76.769. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.76.769>.
- [Fri] M. Wulf Friedlander. *Cosmic Ray*. Zugriff am: November 30, 2024. URL: <https://www.britannica.com/science/cosmic-ray/Studying-cosmic-rays>.
- [Gäg95] H.W. Gäggeler. “Radioactivity in the atmosphere”. In: *Radiochimica Acta* 70.s1 (1995), S. 345–346.
- [Har52] J. v. Harlem. “Die Diffusions-Nebelkammer”. In: *Physikalische Blätter* 8.3 (1952), S. 139–140. DOI: <https://doi.org/10.1002/phbl.19520080307>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/phbl.19520080307>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/phbl.19520080307>.
- [Kuh12] M. Kuhar. *Selbstbau einer Nebelkammer: Teilchenspuren sichtbar machen*. 2012. URL: <https://cds.cern.ch/record/2807982/files/Cloud%20chamber%20instructions%20.pdf>.
- [Kum24] F. Kumbartzki. *Temperatur messen mit dem TMP36*. Zugriff am: Dezember 18, 2024. 2024. URL: <https://polluxlabs.net/arduino-tutorials/temperatur-messen-mit-dem-tmp36/>.
- [Lan24] J. Lang. *Compton-Effekt*. Zugriff am: November 1, 2024. 2024. URL: <https://strahlenschutz.privatpraxis-lang.de/compton-effekt/>.

- [Mar22a] C. Marchica. *Dorn/Bader, Physik, Sek 2, Gesamtband Schweiz*. Westermann Schweiz AG, 2022, S. 482. ISBN: 978-3-0359-0290-7.
- [Mar22b] C. Marchica. *Dorn/Bader, Physik, Sek 2, Gesamtband Schweiz*. Westermann Schweiz AG, 2022, S. 474. ISBN: 978-3-0359-0290-7.
- [Mes60] W. Messerschmidt. “Notizen: Zur täglichen Periode der Kosmischen Strahlung”. In: *Zeitschrift für Naturforschung A* 15 (1960), S. 734–736. URL: <https://doi.org/10.1515/zna-1960-0809>.
- [Por+94] J. Porstendorfer u. a. “Daily Variation of the Radon Concentration Indoors and Outdoors and the Influence of Meteorological Parameters”. In: *Health Physics* 67.3 (1994), S. 283–287.
- [Rap18] Raphael. *Was ist... die Nuklidkarte?* Zugriff am: November 16, 2024. 2018. URL: <https://wenig-originell.de/was-ist-die-nuklidkarte>.
- [RSu] RSudio. Zugriff am: November 12, 2024. URL: <https://posit.co/download/rstudio-desktop/>.
- [Sch11a] R. Schacht. *Ausarbeitung von Schülerexperimenten an der Nebelkammer*. 2011. URL: https://www.uni-goettingen.de/de/document/download/5227716ad892272ed61ea48ea8345a8d.pdf/Bachelorarbeit_Schacht_Robert.pdf.
- [Sch11b] R. Schacht. *Ausarbeitung von Schülerexperimenten an der Nebelkammer*. 2011. URL: https://www.uni-goettingen.de/de/document/download/5227716ad892272ed61ea48ea8345a8d.pdf/Bachelorarbeit_Schacht_Robert.pdf.
- [Sni24] R. Snieders. *Vierzeiliges I²C LCD Modul*. Zugriff am: Mai 22, 2024. 2024. URL: <https://funduino.de/anleitung-4x20-i%C2%B2c-lcd-modul>.
- [Wil97] C.T.R. Wilson. “Condensation of Water Vapour in the Presence of Dust-Free Air and Other Gases”. In: *Royal Society* 189 (1897), S. 265–307. URL: <https://royalsocietypublishing.org/doi/epdf/10.1098/rsta.1897.0011>.

A Anhang 1

A.1 Arduinocode

Auf den folgenden Seiten ist der Code abgedruckt, den ich geschrieben habe. Dafür habe ich die Quellen [Sni24] und [Kum24] benutzt.

```
#include <Time.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Keypad.h> // 4x4 keypad
#include <Adafruit_BMP280.h> //Für den Luftdruck

Adafruit_BMP280 bmp;

// Variablen initialisieren
int lastDisplayTime = 0;
int PWM_PIN_PUMPE = 13;
int PIN_HEIZUNG = 4;

//Keypad: 4x4-Tastenmatrix
const byte PAD_ROWS = 4; // Anzahl der Reihen
const byte PAD_COLS = 4; // Anzahl der Spalten
char hexaKeys[PAD_ROWS][PAD_COLS] = {
    {'1', '2', '3', 'A'},
    {'4', '5', '6', 'B'},
    {'7', '8', '9', 'C'},
    {'*', '0', '#', 'D'}
};

byte rowPins[PAD_ROWS] = {12, 11, 10, 9}; //Dieses Array speichert
die Arduino-Pins, die mit den Zeilen des Keypads verbunden sind.
byte colPins[PAD_COLS] = {8, 7, 6, 5}; //Dieses Array speichert
die Arduino-Pins, die mit den Spalten des Keypads verbunden sind.
time_t nowTime; //Variabel zur Speicherung der aktuellen Zeit
float temperature[3] = {0,0,0}; //temperature ist ein Array von
drei float-Werten, das initial wird mit 0 gefüllt.

// Setup-Blocks für die Steuerung des LCD-Displays und des Keypads
LiquidCrystal_I2C lcd(0x3F, 20, 4); //Hier wird das Display
benannt (Adresse/Zeichen pro Zeile/Anzahl Zeilen).
Keypad customKeypad = Keypad(makeKeymap(hexaKeys), rowPins,
colPins, PAD_ROWS, PAD_COLS); //Erstellt ein Keypad-Objekt mit dem
Namen customKeypad

int temperatureIntervall = 10; // speichert die Zeit in Sekunden,
in der die Temperatur aktualisiert werden soll.
float Heizung_MAX = 78; //legt die Höchsttemperatur in Grad
Celsius fest, bei der die Heizung abgeschaltet werden soll.
float Heizung_MIN = 75; //legt die Mindesttemperatur in Grad
Celsius fest, bei der die Heizung wieder eingeschaltet wird.
```



```

char Key; //speichert das Zeichen der zuletzt gedrückten Taste auf
dem Keypad.

void setup() {
    Serial.begin(9600);
    Serial.print("Init lcd");

    lcd.init(); //Im Setup wird der LCD gestartet
    lcd.backlight(); //Hintergrundbeleuchtung einschalten
    Serial.print("lcd done");

    pinMode(PWM_PIN_PUMPE, OUTPUT); //Setzt den Pin PWM_PIN_PUMPE als
Ausgangspin (OUTPUT).
    analogWrite(PWM_PIN_PUMPE, 0); //Schreibt 0 auf diesen Pin, um
die Pumpe auszuschalten.
    pinMode(PIN_HEIZUNG, OUTPUT); //Setzt den Pin PIN_HEIZUNG als
Ausgangspin.
    analogWrite(PIN_HEIZUNG, 0); //Schreibt 0 auf diesen Pin, um die
Heizung auszuschalten.

    Serial.print("Vor init");
    if (!bmp.begin(0x76)) {
        Serial.println(F("Could not find a valid BMP280 sensor,  check
wiring!"));
    }
    //Konfiguriert den BMP280-Sensor: Barometer
    Serial.print("Vor sampling");
    bmp.setSampling(Adafruit_BMP280::MODE_NORMAL,
                    Adafruit_BMP280::SAMPLING_X2,
                    Adafruit_BMP280::SAMPLING_X16,
                    Adafruit_BMP280::FILTER_X16,
                    Adafruit_BMP280::STANDBY_MS_500);
    Serial.print("Nach sampling");
}

uint8_t temperaturePin[3] = {A0,A1,A2}; //Definiert ein Array mit
den analogen Pins (A0, A1, A2), die für die Temperaturmessung
verwendet werden.

float readTemperature(int number) {
    int sensorValue = analogRead(temperaturePin[number]);
    float temp = sensorValue* 486.0 / 1024.0 - 273; //
sensorValue * 486.0 / 1024.0: Wandelt den analogen Wert in eine
Spannung um (bei 4.86 V Sensorreferenz).
    lcd.setCursor(0, number); //Text soll beim ersten Zeichen in
der ersten Reihe beginnen..
    lcd.print("Temperatur: "+String(temp,1)); //In der ersten
Zeile soll der Text „Test Zeile 1“ angezeigt werden

    return temp;
}

//Liest den Druckwert vom BMP280-Sensor aus.
float readPressure() {
    float pressure = bmp.readPressure()/100;

```

```

    lcd.setCursor(0,2);
    lcd.print("Luftdruck : "+String(pressure,1));
    Serial.print(pressure);
    return pressure;
}

void loop() {
    int currentTime = millis()/100; // Aktuelle Zeit in 100
    Millisekunden Intervallen seit Programmstart abrufen
    // Überprüfen, ob die Zeit seit der letzten Temperaturmessung
    größer als das definierte Intervall ist
    if (currentTime -temperatureIntervall > lastDisplayTime) {
        // Temperaturen von zwei verschiedenen Sensoren auslesen
        temperature[0] = readTemperature(0);
        temperature[1] = readTemperature(1);
        readPressure(); // Druckdaten des Barometers auslesen
        lastDisplayTime = currentTime; // Aktualisieren der letzten
        Zeit, zu der die Temperatur angezeigt wurde
    }

    Key = customKeypad.getKey();
    if (Key){
        if (Key == 'A'){
            // Wenn 'A' gedrückt wird, PWM-Wert der Pumpe auf 200 setzen
            (Pumpe einschalten)
            analogWrite(PWM_PIN_PUMPE, 200);
        }
        if (Key == 'B'){
            // Wenn 'B' gedrückt wird, PWM-Wert der Pumpe auf 0 setzen
            (Pumpe ausschalten)
            analogWrite(PWM_PIN_PUMPE, 0);
        }
    }

    // Überprüfen, ob der erste Temperaturwert den maximalen
    erlaubten Wert für die Heizung überschreitet
    if ( temperature [0] > Heizung_MAX ){
        // Wenn ja, Heizung ausschalten
        analogWrite(PIN_HEIZUNG, 0);
        // Cursorposition auf dem LCD setzen, um "AB" anzuzeigen, was
        bedeutet, dass die Heizung aus ist
        lcd.setCursor(18,0);
        lcd.print("AB");
    }

    // Überprüfen, ob der erste Temperaturwert unter den minimalen
    erlaubten Wert für die Heizung fällt
    if ( temperature [0] < Heizung_MIN ){
        // Wenn ja, Heizung einschalten
        analogWrite(PIN_HEIZUNG, 500);
        // Cursorposition auf dem LCD setzen, um "AN" anzuzeigen, was
        bedeutet, dass die Heizung an ist
        lcd.setCursor(18,0);
        lcd.print("AN");
    }
}

```

