

Bau einer kontinuierlichen Nebelkammer und Einsatz im Demonstrationsversuch

Diplomarbeit

am Institut für Radioökologie und Strahlenschutz Hannover

im Studiengang Energie- und Umwelttechnik
der Hochschule Zittau/Görlitz

vorgelegt von: **Antonia Beyrich**, geb. am 07.06.1989 in Pirna

Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. T. Schönmuth

Betreuer: Prof. Dr. rer. nat. C. Walther

Abgabedatum: **20.06.2013**

Aufgabenstellung für die Diplomarbeit

Name: Antonia Beyrich, MEK 08
Studiengang: Energie- und Umwelttechnik
Studienrichtung: Kernenergie und Strahlentechnik
Thema: Bau einer kontinuierlichen Nebelkammer und Einsatz im Demonstrationsversuch

Zielstellung:

Es soll eine Diffusions-Nebelkammer zur Visualisierung radioaktiver Zerfälle konstruiert werden. Diese soll im Vorlesungsbetrieb, bei Praktikumsdemonstrationen und Strahlenschutzkursen zum Einsatz kommen. Hierfür werden didaktische Konzepte erarbeitet.

Folgende Teilaufgaben sind zu lösen:

- Planung und Konstruktion einer Großraum Diffusions-Nebelkammer;
- Umsetzung und Bau der Nebelkammer inkl. Dokumentation;
- Ausarbeitung der didaktischen Nutzung bei Strahlenschutzkursen und studentischen Praktika.

Betreuer: Herr Prof. Dr. rer. nat. C. Walther, IRS Hannover
Gutachter: Herr Prof. Dr. rer. nat. T. Schönmath, Hochschule Zittau/Görlitz
Ausgehändigt am: 20.10.2012
Einzureichen bis: 20.04.2013
Registrier-Nr.: F-M/64/12

H.-J. Kretschmar

Prof. Dr.-Ing. habil. H.-J. Kretschmar
D e k a n

Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich zum Abschluss meines Studiums und beim Erstellen dieser Diplomarbeit noch einmal besonders unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Clemens Walther, der mir dieses vielseitige Thema als Abschlussarbeit zur Verfügung gestellt hat sowie Herrn Prof. Thomas Schönmath, der bereitwillig die Betreuung übernommen hat.

Diese Arbeit ist nur in Zusammenarbeit mit der Werkstatt des IRS möglich gewesen und somit möchte ich mich ganz herzlich für alle aufregenden Kleinst- und Größtarbeiten und konstruktiven Gesprächen bei Michael Senft und Frank Koepke bedanken. Ebenso wichtig für das Gelingen war die Hilfe von Ralf Groffmann und Rudi Sachse mit ihren Ideen und den vielen vielen Handgriffen. Speziell für die Skizzen zur Elektrik bedanke ich mich bei Rudi nochmal ausdrücklich.

Für den Anschluss des Kälteaggregates und seiner Elektrik gilt mein Dank Dirk Elsner und Olaf Viktorin.

Des Weiteren gilt mein Dank natürlich auch meinen Eltern sowie Jonas für die tolle Unterstützung, vorallem in den letzten nervenaufreibenden Wochen.

Unerwähnt möchte ich auch meine Kommilitonen, insbesondere Philipp, Martin, Markus und Thomas, nicht lassen, die oft für mich da waren.

Kurzreferat

Die Nebelkammer gilt als eine der anschaulichsten Versuchsgeräte im Bereich der Kernphysik und dient dabei zur Visualisierung von ionisierender Strahlung. Am *Institut für Radioökologie und Strahlenschutz (IRS)* der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover war bisher so ein Gerät noch nicht vorhanden. Da das IRS für die Ausbildung der Studenten der Universität Hannover im Bereich des Strahlenschutzes und der Radioökologie zuständig ist, sowie Strahlenschutzkurse durchführt, lässt sich eine Nebelkammer in diesem Anwendungsbereich sehr gut als Demonstrationsobjekt einbinden. In dieser Diplomarbeit ist sowohl der Bau einer eigenen Nebelkammer beschrieben sowie die Möglichkeiten der Anwendung im Demonstrationsversuch erörtert.

Schlagwörter

Nebelkammer; Kühlplatte; ionisierende Strahlung

Abstract

The cloud chamber is one of the clearest demonstration devices in nuclear physics. It visualizes ionizing radiation. The *Institute of Radioecology and Radiation Protection* is in charge of the education of the students from the Leibniz University Hanover in the range of radioecology and radiation protection as well as the procedure of radiation protection courses. There the cloud chamber would take its implementation as demonstration device. This diploma thesis describes the construction of an own cloud chamber and the opportunity in use as a demonstration device.

key words

cloud chamber; cooling plate; ionizing radiation

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	XI
Abkürzungsverzeichnis	XI
Symbolverzeichnis	XI
Abbildungsverzeichnis	XIII
1. Einführung	1
1.1. Motivation und Zielsetzung	1
2. Theoretische Grundlagen	2
2.1. Ionisierende Strahlung und Radioaktivität	2
2.2. Aufbau und Funktionsweise einer Nebelkammer	7
2.2.1. Expansionsnebelkammer	7
2.2.2. Diffusionsnebelkammer	9
3. Vorbereitung des Baus	11
3.1. Grundlegender Aufbau	11
3.2. Auswahl des Kühlaggregates	12
3.3. Anforderungen an die Kühlplatte	13
3.4. Elektrische Versorgung	14
3.5. Beleuchtung	16
4. Dokumentation des Baus	17
4.1. Bau des Gehäuses	17
4.2. Verdampferbau	18
4.3. Aufnahme der Kühlplatte, Verdampfersystem und Auffangwanne	19
4.4. Heizdrähte an der inneren Glashaube	20
4.5. Beleuchtungsschienen	21
4.6. Endmontage	22
5. Einsatzmöglichkeiten im Demonstrationsversuch	24
5.1. Vorbereitung und Hintergrundwissen für durchzuführende Versuche	24
5.2. Mögliche Versuche	26
6. Zusammenfassung und Ausblick	29
Literaturverzeichnis	30
A. natürliche Zerfallsreihen	i

B. Details zur Elektrischen Versorgung	ii
C. Bilder der Nebelkammer	v
D. Zeichnungen	ix
Eidesstaatliche Erklärung	xv

Nomenklatur

Abkürzungsverzeichnis

Abk.	Erklärung
IRS	Institut für Radioökologie und Strahlenschutz
PE	Polyethylen
StrSchV	Strahlenschutzverordnung

Symbolverzeichnis

Symbol	Erklärung	Einheit
A	Aktivität	Bq
a	Konstante zur Berechnung der Sättigungsdampfdruck	
B	magnetische Flussdichte	T
c	Lichtgeschwindigkeit	m/s
c_P	Isobare Wärmekapazität	kJ/kgK
c_V	Isochore Wärmekapazität	kJ/kgK
E_{kin}	kinetische Energie	J, MeV
F_L	Lorentzkraft	kgm/s ²
F_Z	Zentripetalkraft	kgm/s ²
γ	Lorentzfaktor	
I	Stromstärke	A
κ	Isentropenexponent	
Λ	Verdampfungswärme	kJ
λ	Zerfallskonstante	
m	Kernmasse	kg, MeV/ c^2
P	elektrische Leistung	W
p_S	Sättigungsdampfdruck	bar, MPa
p	Druck	bar, MPa
q_e	Elementarladung	C
R	spezifische Gaskonstante	kJ/kgK
r	Radius	m
d	Reichweite	m
T	Temperatur	K
$T_{1/2}$	Halbwertszeit	s
τ	mittlere Lebensdauer	s

U	Spannung	V
V	Volumen	m ³
ν	spezifisches Volumen	m ³ /kg
v_α	Geschwindigkeit des α -Teilchens	m/s
v_e	Geschwindigkeit des Elektrons	m/s

Abbildungsverzeichnis

2.1.	Kaskadenschauer eines primären kosmischen Teilchens	3
2.2.	mögliche Spuren in der Nebelkammer	4
2.3.	Reichweite von α -Teilchen	5
2.4.	p-V-Diagramm für adiabate Expansion	8
2.5.	Skizze einer Expansionsnebelkammer	9
2.6.	Prinzipschema Diffusionsnebelkammer	10
3.1.	Skizze der Nebelkammer	12
3.2.	Kreisprozess einer Kältemaschine	13
3.3.	Skizze des Blockschemas der Stromversorgung und Entwurf des Bedienfeldes	15
3.4.	Schaltmodul im Bau	15
3.5.	LED-Streifen	16
4.1.	Gehäuse	17
4.2.	Verdampferrohrschlange	18
4.3.	Schnitt durch ein PE-Profil	20
4.4.	Glashaube mit Heizdrähten	21
4.5.	Halterschienen mit LED-Leiste	21
4.6.	Nebelkammer mit kompletten Anschlüssen	23
5.1.	Ablenkung eines β -Teilchens	26
A.1.	Schema der Uran-Radium-Zerfallsreihe	i
A.2.	Schema der Uran-Actinium-Zerfallsreihe	i
A.3.	Schema der Thorium-Zerfallsreihe	i
B.1.	Leistungsdiagramme der Ringheizung	ii
B.2.	Leistungsdiagramme der Haubenheizung	ii
B.3.	Blockschaltbild	iii
B.4.	Steuergerät und Anordnung der Heizdrähte	iv
C.1.	Kälteaggregat im Gehäuse	v
C.2.	eingebautes Steuermodul	vi
C.3.	äußere Hülle der Nebelkammer	vi
C.4.	Rinnenhalter	vii
C.5.	Halter und Anschluss für die Hochspannung und Haubenheizung	vii
C.6.	Verdampferinne und Glashauben	viii

1. Einführung

1.1. Motivation und Zielsetzung

Der menschliche Körper verfügt über sehr gute Sensoren z. B. für Helligkeit, Temperatur und Gerüche. Radioaktivität kann er jedoch mit keinem seiner Sinne wahrnehmen. Somit bedarf es technischer Hilfsmittel die, nicht mit den menschlichen Sinnen erkennbare, Radioaktivität zu erkennen und ihre Omnipräsenz, insbesondere aber auch ihren natürlichen Ursprung, zu demonstrieren. Im Rahmen von Ausbildung und Lehre, aber auch bei der Information interessierter Öffentlichkeit, sind hier vielfältige Ansätze gefragt.

Mit technischen Geräten, wie z. B. Geiger Müller Zählrohren, lässt sich ionisierende Strahlung zwar nachweisen, jedoch nicht sichtbar machen. Mit einer Nebelkammer hingegen ist es tatsächlich möglich die Teilchenstrahlung, zumindest ihre Wegbahn, zu visualisieren. Sie bedient sich dabei eines verhältnismäßig einfachen Prinzips, was der Anschaulichkeit zuträglich ist und gilt deshalb als hervorragendes Demonstrationsobjekt.

Die Nebelkammer ist somit ein Detektor für ionisierende Strahlung, der nicht nur Geräusche (wie z. B. das Geiger-Müller-Zählrohr) oder stehende Bilder (wie z. B. ein Film-dosimeter) erzeugt, sondern in Echtzeit und -raum bewegte Phänomene darstellt. Somit kann auch für ein breites Publikum Physik in ihrer kleinsten Form durch einfache bildliche Darstellung näher gebracht werden.

Ein sehr gutes Hilfsmittel ist die praktische Veranschaulichung der Strahlung, wenn z. B. die kernphysikalische Theorie der Radioaktivität während einer Vorlesung oder bei Fortbildungsveranstaltungen vermittelt werden soll. Das Institut für Radioökologie und Strahlenschutz (IRS), an dem die vorliegende Arbeit entstanden ist, ist damit beauftragt, die Studenten der Leibniz Universität Hannover unter anderem auch in den Grundlagen der Strahlenphysik auszubilden. Eine Nebelkammer würde deshalb die experimentelle Ausstattung des IRS gut ergänzen.

Das Angebot an kommerziell hergestellten Experimentier-Nebelkammern ist jedoch sehr klein. Ausserdem sollte eine Nebelkammer in Tischgröße angeschafft werden, damit auch einem größeren Publikum der ungehinderte Blick in das Innere der Nebelkammer gewährleistet werden kann. Diese gewünschte Größe macht eine Sonderanfertigung notwendig. Aus dieser Überlegung entstand der Entschluss, eine Nebelkammer in Eigenregie zu bauen, nicht zuletzt, um die Anschaffungskosten möglichst niedrig zu halten.

2. Theoretische Grundlagen

2.1. Ionisierende Strahlung und Radioaktivität

Als Strahlung wird der, nicht an Medien gebundene, Energie- und Massentransport bezeichnet. Dabei werden zwei Strahlungsarten unterschieden: Photonenstrahlung und Korpuskularstrahlung. Bei der Photonenstrahlung handelt es sich um den ausschließlichen Transport von elektromagnetischer Energie. Wenn gleichzeitig auch von einem Materietransport ausgegangen wird, heißt die Strahlung Korpuskularstrahlung. Dabei kann es sich um geladene und ungeladene Teilchen (Elektronen, Protonen, Positronen, Neutronen, Pionen, Myonen) sowie komplexere Gebilde (Atome, Moleküle) oder Ionen handeln. Die Strahlungsarten werden dabei noch nach ihrer Möglichkeit, Elektronen aus einer Atomhülle zu lösen, in ionisierende und nicht ionisierende Strahlung eingeteilt [Kri12, S.17].

Radioaktivität hat seine Ursache in Übergängen oder Transformationen von Kernen von einem energetisch höheren in einen niedrigeren Zustand. Bei diesem Übergang kommt es zum Emittieren ionisierender Strahlung in Form von z. B. Helium-Kernen (α -Strahlung), Elektronen, Positronen (β -Strahlung), oder Photonen (γ -Strahlung). Dabei wird zwischen natürlicher, ohne vorherige Einwirkung, und künstlicher Radioaktivität, bei vorangegangener Kernreaktion oder Kernspaltung, unterschieden [Kri12, S.91].

Ionisierende Strahlung, die in einer Nebelkammer sichtbar ist, kann drei verschiedene Ursachen haben:

- kosmische Strahlung
- natürliche Radioaktivität im Kammervolumen (aus Umgebung stammend)
- Strahlung eines eingebrachten Präparates

Bei der kosmischen Strahlung lassen sich meist nur die sekundär entstandenen Teilchen auf der Erde nachweisen. Bei dem Eintreffen der primären Hochenergieteilchen (zumeist Protonen) auf die Erdatmosphäre kommt es zu Wechselwirkungen mit den Luftmolekülen, wobei die Sekundärteilchen entstehen. Dies macht Abbildung 2.1 deutlich. Dabei kommt es wiederum zur Entstehung von Zerfallsprodukten, die dann konkret beobachtet werden können. In der Nebelkammer sind hauptsächlich Myonen und Elektronen sowie vereinzelt Positronen kosmischen Ursprungs zu sehen, da nur geladene Teilchen sichtbare Bahnen erzeugen. Gammastrahlung sowie Neutronen sind nur durch weiteren Zerfall und Erzeugung geladener Teilchen sichtbar [Hei06].

Bei der Beobachtung der kosmischen Strahlung ist es auch interessant zu wissen, wie gut die periodischen und nichtperiodischen Schwankungen der Strahlung und die Einflüsse der

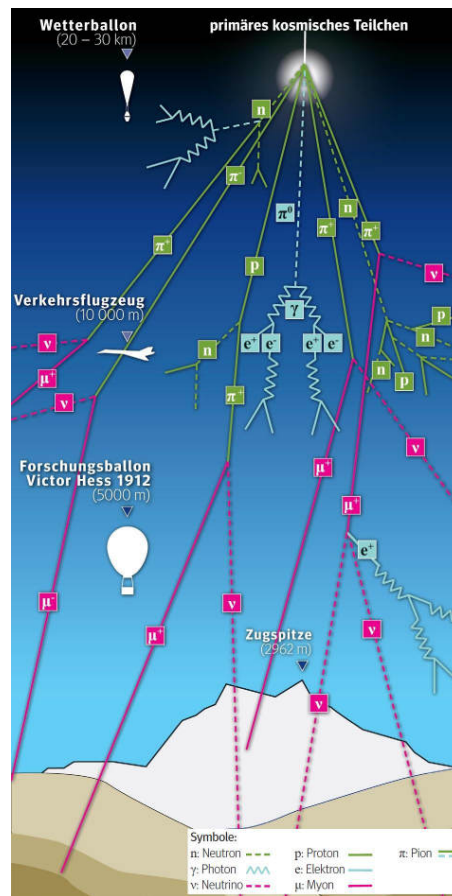


Abbildung 2.1.: Kaskadenschauer eines primären kosmischen Teilchens [KK12]

Sonnenaktivität erkennbar sind. Bei dem Eintreten einer Sonneneruption (auch »Solar Flare« genannt) kommt es zu erhöhtem Materieausstoß, welcher große Teilchenstürme hervorruft. Dieser wiederum hält die hochenergetische kosmische Strahlung von der Erde fern¹. Dann ist eine geringere Anzahl an entstehenden Nebelspuren bemerkbar. Diese Flares treten bei normaler Sonnenaktivität ca. 5 bis 10 mal pro Jahr mit einer Dauer von ca. 10 bis 90 min auf.

Die natürliche Radioaktivität der Kammer hat ihren Ursprung hauptsächlich in der Radonkonzentration der Umgebungsluft. Dabei kommt es zum α -Zerfall unter anderem bei der Umwandlung von ^{222}Rn zu ^{218}Po und in der weiteren Zerfallsreihe auch zum β -Zerfall z. B. bei der Umwandlung von ^{214}Pb zu ^{214}Bi . Die natürlichen Zerfallsreihen sind in Anhang A abgebildet.

Bei der Einführung von einem radioaktiven Präparat, z. B. einem Stück Uranerz oder einem thoriumhaltigen Glühstrumpf, lassen sich die sichtbar werdenden Bahnen konkret zuordnen, da die ablaufenden Zerfallsprozesse bekannt sind. Weitere Beobachtungsmöglichkeiten, z. B. der Nachweis von Spaltprodukten (erstmalig 1939 durch Otto Frisch), mit verschiedenen Präparaten und deren Zerfallsprozesse sind in Kapitel 5 aufgeführt.

¹dieses Phänomen wird nach seinem Entdecker »Forbush-Effekt« genannt

Folgend sind die am häufigsten in der Nebelkammer sichtbaren Spuren sowie deren Entstehung etwas näher beschrieben. In den Abbildungen 2.2 sind die Spuren dieser Teilchen dargestellt, wie sie im Idealfall aussehen. Je nach Intensität sind die Phänomene weniger ausgeprägt und ihre Ursache nicht immer eindeutig bestimmbar.

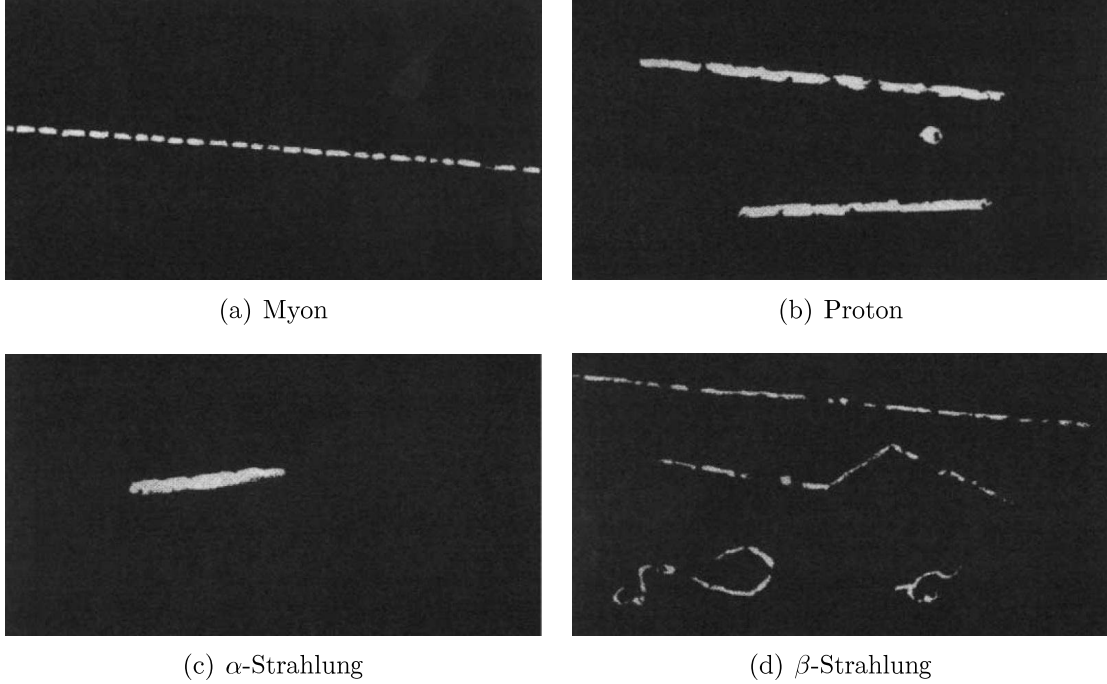


Abbildung 2.2.: mögliche Spuren in der Nebelkammer [PHY]

Myon

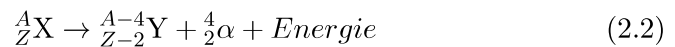
Das Myon ist ein negativ geladenes Teilchen kosmischen Ursprungs, was in etwa das 200-fache der Masse eines Elektrons ($m_\mu = 105,7 \text{ MeV}$) besitzt und eine mittlere Lebensdauer von $\tau_\mu = 2,197 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ (also eine Halbwertszeit von $T_{1/2\mu} = 1,523 \text{ }\mu\text{s}$) hat [Sta10, S.316]. Spuren dieser Teilchen sind in der Nebelkammer ununterbrochen sichtbar, da sie den größten Anteil der sekundären kosmischen Strahlung ausmachen. Sie entstehen durch den Zerfall der kurzlebigen Pionen. Da sie sich mit relativistischer Geschwindigkeit bewegen und die Halbwertszeit bewegter Myonen um ein Vielfaches höher ist gegenüber ruhenden, bilden sie sehr feine, geradlinige Bahnen aus, wie in Abbildung 2.2(a) dargestellt ist. Auch der Myonenzerfall lässt sich in der Nebelkammer manchmal erkennen. Dabei zerfällt das Myon in ein sichtbares Elektron und zwei nicht sichtbare Neutrinos so, dass scheinbar ein Knick in der Nebelbahn erzeugt wird. Der Zerfall folgt der Gleichung [Sta10, S.146]:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad (2.1)$$

α-Strahlung

Bei dem α-Zerfall wird aus einem schweren Kern ein Teilchen aus 2 Protonen und 2 Neutronen emittiert. Dieser doppelt positiv geladene ${}^4_2\text{He}$ -Kern

wird α -Teilchen genannt. Die Zerfallsgleichung lautet dabei:



Die Spur dieses schweren und dadurch relativ langsamen Teilchens mit hohem Ionisierungsvermögen ist in der Nebelkammer als recht breite Bahn deutlich zu erkennen (siehe Abbildung 2.2(c)). Als Ionisierungsvermögen wird die Anzahl der erzeugten Ionenpaare² genannt. Bei einem α -Teilchen ist diese Anzahl aufgrund seiner Größe und starken Wechselwirkung sehr groß, und damit auch der Energieverlust auf einer bestimmten Wegstrecke größer. Die dadurch geringe Reichweite des α -Teilchens begrenzt die Nebelbahnen auf nur wenige Zentimeter Länge. Den Verlauf des differentiellen Energieverlustes bzw. der erzeugten Ionenpaare pro Wegstrecke gibt die sogenannte BRAGG-Kurve in Abbildung 2.3 wieder. Der Verlauf lässt sich damit erklären, dass die α -Teilchen bei ihrem Auftreffen eine sehr hohe Energie und somit eine hohe Anfangsgeschwindigkeit besitzen und es noch nicht vermehrt zu bremsenden Wechselwirkungen kommt. Doch bei geringerer Geschwindigkeit wird auch die Anzahl der Wechselwirkungen vergrößert, welche auf ein Maximum zulaufen und dann steil auf Null absinken. Die dadurch entstehende »Keulenform« der Nebelbahnen lassen sich nur mit einer hochauflösenden Kamera aufnehmen.[GSI09]

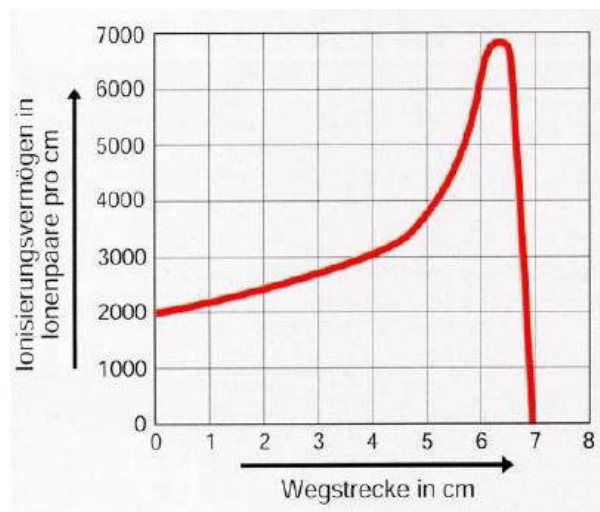


Abbildung 2.3.: Reichweite von α -Teilchen [GSI09]

Proton

Das Proton lässt sich vom α -Teilchen in der Nebelkammer durch seine etwas dünnere, aber längere Bahn unterscheiden. Je nach Einfallswinkel, kann die Länge einer Nebelspur variieren. Trifft z. B. das Proton senkrecht auf die Beobachtungsfläche, kann es auch nur einen von oben gesehenen

²erzeugte positiv geladene Atome und das herausgeschlagene Elektron

Nebelpunkt erzeugen, wie es in Abbildung 2.2(b) dargestellt ist. In der Nebelkammer sind die sogenannten Sekundärprotonen nachweisbar. Diese Protonen entstehen durch Wechselwirkung der primären kosmischen Teilchen mit der Erdatmosphäre.

β -Strahlung Bei dem β -Zerfall erfolgt die Emission eines Elektrons oder Positrons aus dem Atomkern. Diese Teilchen entstehen als Ladungsemission nach der Umwandlung von Nukleonen ineinander. Um der Energieerhaltung genüge zu tun, entsteht dabei noch ein Elektronneutrino bzw. Anti-Elektronneutrino. Der Zerfall läuft dann nach den Gleichungen 2.3 ab, wobei die emittierten Ladungsteilchen als Betateilchen bezeichnet werden, um eine Differenzierung zu den Hüllenelektronen zu erhalten [Kri12, S.102]:

$${}_0^1\text{n} \rightarrow {}_1^1\text{p} + \beta^- + \bar{\nu}_e + \text{Energie} \quad (2.3a)$$

$${}_1^1\text{p} \rightarrow {}_0^1\text{n} + \beta^+ + \nu_e + \text{Energie} \quad (2.3b)$$

Die so entstandenen β -Teilchen haben im Gegensatz zu den monoenergetischen α -Teilchen eine Energieverteilung und somit sehr unterschiedliche Geschwindigkeiten. Sehr schnelle Elektronen erzeugen durch ihr geringeres Ionisationsvermögen eher schwache geradlinige Bahn in der Nebelkammer. Langsame Teilchen hingegen sind durch stärkere Bahnen mit zufälligen Richtungsänderungen, durch die erhöhte Vielfachstreuung an den Atomhüllen des übersättigten Dampfes, erkennbar. Dies ist sehr gut in Abbildung 2.2(d) zu erkennen. Positronen können in der Nebelkammer nur schwer von Elektronen unterschieden werden. Am geeignetesten ist dabei die Zuhilfenahme eines starken elektrischen oder magnetischen Feldes [Hei06].

Neutronen und γ -Strahlung lassen sich nicht direkt in der Nebelkammer nachweisen. γ -Strahlung in der Kammer löst aber Photonen oder Comptonelektronen aus. Dabei entstehen kurze und gekrümmt Nebelspuren, die sich über die ganze Beobachtungsfläche ausbreiten. Schnelle Neutronen lassen sich über ihre Rückstoßreaktionen nachweisen. Bei dem Auftreffen von Neutronen auf z. B. ein Wasserstoffatom, wird von diesem ein schnelles Proton emittiert. Dieses ist dann durch seine hohe Ionisationsfähigkeit leicht nachzuweisen³ [Rap13].

³Genau so wurden 1931 von Irène Joliot-Curie und ihrem Ehemann Frédéric Joliot-Curie die Existenz der Rückstoß-Protonen in einer Nebelkammer nachgewiesen, was die Grundlage zum Nachweis der Neutronen von Sir James Chadwick bildete [Ins12].

2.2. Aufbau und Funktionsweise einer Nebelkammer

Die Nebelkammer ordnet sich bei den Detektoren für Teilchenstrahlung in der Kategorie Spurendetektor ein. In so einem Spurendetektor ist es das Ziel, die Ionisation der Elektronenhülle von Atomen oder Molekülen durch die Strahlung so auszunutzen, dass die ionisierten Teilchen über optische Signale gemessen werden können [Dem10, S.96]. Die Entstehung dieser optischen Signale beruht auf der Thermodynamik der Gasgemische. Dabei liegt im Inneren der Kammer ein gesättigtes Gas-Dampfgemisch vor, welches durch Abkühlung in ein lokal vorkommendes übersättigtes Gemisch gebracht wird. Trotz der niedrigen Temperatur können dadurch keine weiteren Dampfmoleküle mehr kondensieren und es bildet sich, durch das Vorhandensein von Kondensationskeimen, ein feiner Nebel. Diese Keime sind kleine Staubteilchen und andere Aerosole, welche in der Luft vorhanden sind. Als solche Kondensationskerne können aber auch geladene Ionen dienen, welche durch den Einfall von ionisierender Strahlung entstanden sind. Durch einfallendes Licht in das Kammerinnere können nun die, durch Streuung des Lichts an den kondensierten Tröpfchen sichtbaren, Bahnen der Strahlung beobachtet werden. Dabei ist es wichtig, dass die Tröpfchengröße der an den Ionen gebildeten Kondensationstropfen gegenüber dem Nebel, der durch die Staubteilchen gebildet wurde, deutlich hervorgehoben ist. Um jegliche störende Ionen, die ausserhalb der sensitiven Nebelschicht, vorhanden sind, zu unterbinden, ist das Anlegen eines elektrischen Feldes sehr hilfreich. Dabei werden unter Zuhilfenahme einer Hochspannung von einigen Tausend Volt die freien Ionen im Kammerinneren entfernt. Die Auswirkung dieses sogenannten Ionenabsorbers konnte auch bei den ersten Experimenten zur Einstellung der Betriebsparameter der, im Rahmen dieser Arbeit selbstgebauten, Nebelkammer erfolgreich nachgewiesen werden.

Hauptsächlich werden zwei Arten von Nebelkammern unterschieden: die Expansions- und die Diffusionsnebelkammern. Der Unterschied der beiden Kammern besteht in der Art der Erzeugung des übersättigten Dampfes.

2.2.1. Expansionsnebelkammer

Bei der Expansionsnebelkammer wird das gesättigte Gas-Dampf-Gemisch durch adiabate Expansion und die damit verbundene Abkühlung in den Zustand von übersättigtem Dampf gebracht, der dann an den durch die Strahlung ionisierten Teilchen kondensiert.

Durch die Expansion, also die Vergrößerung des Kammervolumens V von V_1 auf $V_2 = V_1 + \Delta V$, sinkt die Temperatur von T_1 auf T_2 , dabei gelten näherungsweise die adiabaten Zustandsgleichungen idealer Gase für Temperatur T und Druck p (berechnet mit den

spezifischen Volumina ν) wie folgt [KK09, S.115]⁴:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{\nu_1}{\nu_2}\right)^\kappa; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{\nu_1}{\nu_2}\right)^{\kappa-1}; \quad \kappa = \frac{c_P}{c_V} = \text{const.} \quad (2.4)$$

Nach der Expansion wird der Sättigungsdampfdruck p_S in der Kammer kleiner als der Umgebungsdruck p_2 , was im p-V-Diagramm der adiabaten Expansion (siehe Abbildung 2.4) veranschaulicht ist. Deshalb erfolgt die Kondensation des übersättigten Dampfes. Dabei gilt für den Sättigungsdampfdruck die Gleichung [Dem10, S.104]:

$$p_S(T_2) = a \cdot e^{-\Lambda/RT_2} \quad (2.5)$$

mit a = Konstante, Λ = Verdampfungswärme, R = spezifische Gaskonstante.

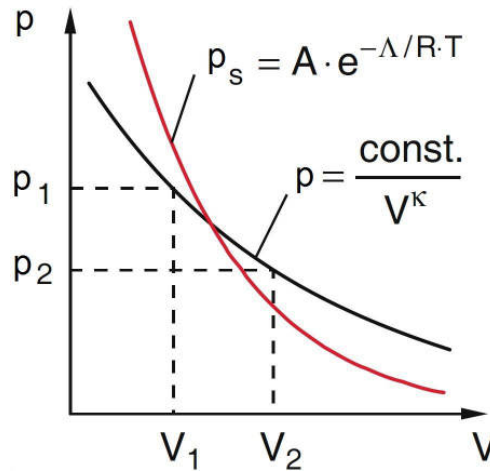


Abbildung 2.4.: p-V-Diagramm für adiabate Expansion (nach [Dem10, S.104])

Der prinzipielle Aufbau einer Nebelkammer mit Glaswänden und beweglichem Kolben zur Expansion des Kammervolumens ist in Abbildung 2.5 dargestellt.

Zu beachten ist jedoch, dass die Tröpfchenbildung und somit die Beobachtung nur so lange ermöglicht wird, wie sich die Temperatur innerhalb der Kammer nur wenig ändert. Aufgrund von Wärmeübergangsprozessen an der Kammerwand steigt die Temperatur nach ca. einer Sekunde soweit an, dass Spuren danach nicht mehr sichtbar sind. Für längere Beobachtungszeiträume ist somit ausschließlich eine kontinuierliche laufende Diffusionsnebelkammer geeignet.

⁴berechnet mit isobarer c_P und isochorer c_V Wärmekapazität idealer Gase; bei Luft ist $\kappa=1,4$ mit guter Näherung [KK09, S.39]

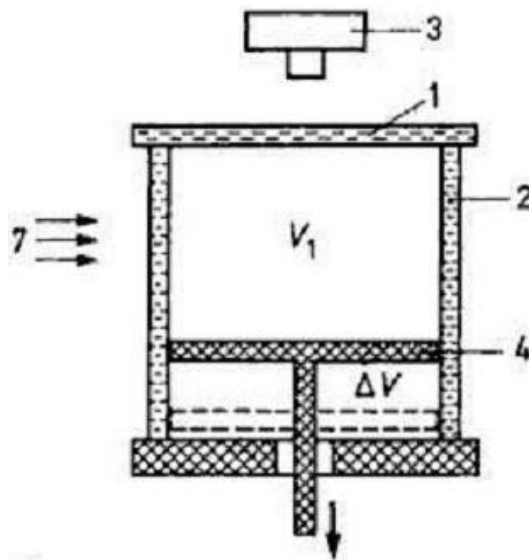


Abbildung 2.5.: Skizze einer Expansionsnebelkammer 1 Glasplatte, 2 Glaszylinder, 3 Fotoapparat, 4 beweglicher Kolben, 7 Lichteinfall (nach [MRRS95])

2.2.2. Diffusionsnebelkammer

Bei der Diffusionsnebelkammer wird der Zustand der Tröpfchenbildung dadurch gewährleistet, dass eine ständig gekühlte Fläche einem kontinuierlich beheizten Dampfreservoir gegenüber steht. Die Kühlung der Beobachtungsfläche kann je nach Größe der Kammer z. B. über eine Trockeneiskühlung, eine elektrische Kühlung oder ein Kälteaggregat erfolgen. Der Dampf muss nun auch dauerhaft dem Inneren der Kammer zugeführt werden. Dies kann in einfachen Versionen über einen, in der Verdampferflüssigkeit getränkten, Filz oder über eine umlaufende Verdampferferrinne realisiert werden. Bei dem Dampflieferant handelt es sich zumeist um einen Alkohol, üblicherweise wird Methanol, Ethanol oder 2-Propanol eingesetzt. Diese Alkohole haben den Vorteil von günstigen Schmelz- und Siedetemperaturen: Ein sehr niedriger Schmelzpunkt (von ca. $-88\text{ }^{\circ}\text{C}$) ermöglicht es, die Flüssigkeit auf tiefe Temperaturen herabzukühlen, ohne dass sie gefriert; eine ebenfalls niedrige Siedetemperatur (von ca. $82\text{ }^{\circ}\text{C}$) gewährleistet die Dampfbildung schon bei geringer Energiezufuhr.

Die Abbildung 2.6 zeigt schematisch den Schnitt durch so eine Diffusionsnebelkammer. Im unteren Bereich kühlt die Kühlflüssigkeit gleichmäßig den Kammerboden. Der Flüssigkeit der Verdampfungsquelle wird über eine separat einstellbare Drahtheizung Energie zugeführt bis sie verdampft. Die Heizung im oberen Bereich soll das Temperaturgefälle aufrechterhalten sowie eine Kondensation an der oberen Kammerwandung verhindern. Die Entfernung freier Ionen erfolgt über die Drahtelektroden. Durch die seitliche Beleuchtung sind dann die Nebelspuren sichtbar.

In folgenden Kapiteln zur Erklärung des Baus der eigenen Nebelkammer wird die Drahtheizung auf der Glashaube Haubenheizung genannt. An dieser Drahtheizung liegt gleichzeitig

auch die Hochspannung zum Entfernen der Ionen an. Des Weiteren gibt es noch eine zweite Heizung, die in der Höhe der sensitiven Nebelschicht um die Glashaube herum gelegt ist, um auch dort Kondensation zu vermeiden. Diese Heizung wird in Folgendem Ringheizung genannt.

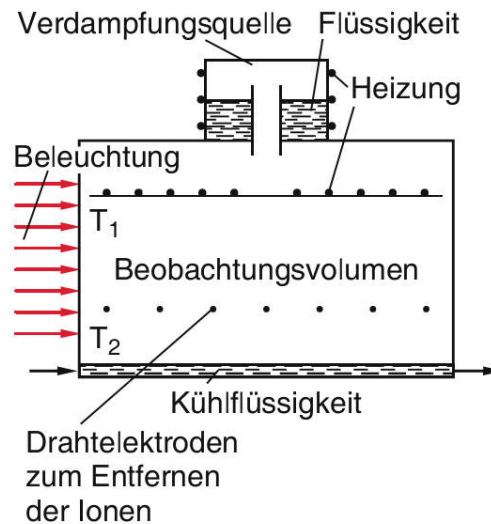


Abbildung 2.6.: Prinzipschema einer Diffusionsnebelkammer (nach [Dem10, S.105])

Der größte Vorteil so einer Kammer ist die Möglichkeit der langen Betriebszeit, was sie vor allem als Demonstrationsobjekt vor größerem Publikum und während einer länger dauernden Veranstaltung so interessant macht, weshalb im Rahmen dieser Arbeit diese Art von Kammer gebaut wurde.

3. Vorbereitung des Baus

3.1. Grundlegender Aufbau

Zu den Recherchen, wie der Aufbau einer kleinen und recht einfachen Nebelkammer im Detail zu erfolgen hat, gibt es zahlreiche Hinweise im Internet sowie Arbeiten von Studenten und Schülern. Ein wichtiger Punkt war zu ermitteln, inwieweit die Bestandteile einfach auf die gewünschte Größe skaliert werden können. Der begrenzende Faktor bei der Größe war, dass die Nebelkammer im Gesamtaußenmaß durch eine Standardtür passen soll. Somit ergab sich also eine maximale Außenabmessung des Kammergehäuses von 900 mm⁵. Um eine größtmögliche Beobachtungsfläche zu gewährleisten wurde dafür eine Abmessung von 750x750 mm² gewählt. Die benötigten Hauptbestandteile ergeben sich wie folgt:

- Montagebauteile
 - Gehäuse aus Metallprofilen mit Rollen und demontierbaren Seitenwänden sowie einem Zwischenboden
 - Kühlplatte⁶
 - Verdampfersystem bestehend aus Verdampferrohrschlange und Wärmeübertragerwanne
 - Auffangwanne für den Alkohol
 - (Alkohol-)Verdampferinne mit Halterung
 - Polyethylen (PE)-Rahmen zur Aufnahme von Kühlplatte, Verdampfersystem und Auffangwanne
 - innere und äußere Glashaube
- elektrische Bauteile
 - Kälteaggregat
 - Pumpe zur Alkoholförderung
 - Temperaturregler
 - Drähte für Hochspannung und Heizungen
 - Trafo
 - Hochspannungstrafo
 - Beleuchtung

⁵wenn nicht anders angegeben, sind alle Maßangaben in mm

⁶nachfolgend auch Beobachtungsplatte/-fläche genannt

Sehr viele Kleinbauteile, wie Halterungen oder Verbindungselemente wurden individuell erstellt. Während des Baus gab es immer wieder Situationen, wo Bauteile angepasst werden mussten, aber an den Grundkomponenten hat sich nichts geändert. In den folgenden zwei Kapiteln sind die wichtigsten Komponenten näher erläutert. Die Abbildung 3.1 zeigt eine Skizze der kompletten Nebelkammer zur besseren Verdeutlichung der oben aufgelisteten Bauteile.

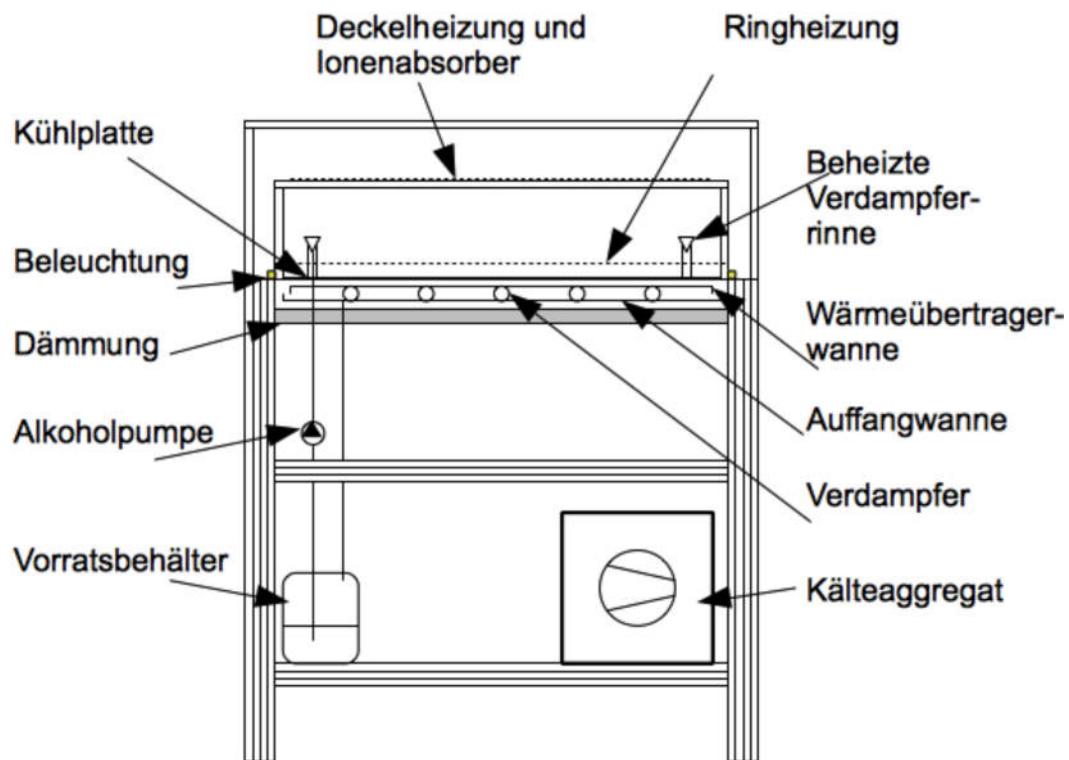


Abbildung 3.1.: Skizze der Nebelkammer

3.2. Auswahl des Kühlaggregates

Bei der gewünschten Größe der Nebelkammer und der nötigen tiefen Temperatur gibt es keine Alternative zu einem luftgekühlten Kompressionskälteaggregat. In folgendem Abschnitt wird kurz die Funktionsweise eines Kälteaggregates beschrieben. Der Prozess in einer Kältemaschine verläuft in einem abgeschlossenen Kreislauf. In Abbildung 3.2 ist dieser Kreislauf schematisch dargestellt⁷. Das Arbeitsfluid in dem Kreislauf wird als Kältemittel bezeichnet und durchläuft folgende Zustände:

- Von Zustand ① zu ② wird der Kältemitteldampf von Verdampfer- auf Kondensatordruck verdichtet

⁷Der Kreislauf einer Kältemaschine und einer Wärmepumpe ist derselbe, nur die Umgebungsräume, welchen Energien entzogen bzw. zugeführt werden, sind gegensätzlich

- Von Zustand ② zu ③ im Kondensator (in der Ausführung als Lüfter) kühlt sich das Kältemittel ab und kondensiert unter Wärmeabgabe an die Umgebungsluft
- Von Zustand ③ zu ④ entspannt sich das flüssige Kältemittel im Drosselventil (auch Expansionsventil genannt) wieder auf Verdampfdruck
- Von Zustand ④ zu ① verdampft das Kältemittel unter Wärmezufuhr aus dem Inneren der Nebelkammer

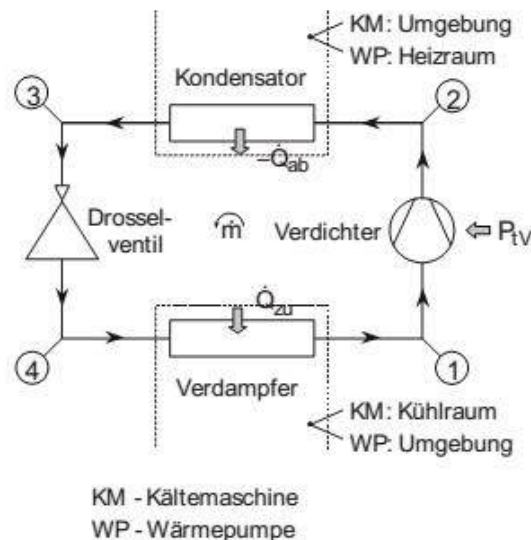


Abbildung 3.2.: Kreisprozess einer Kältemaschine [KK09, S.143]

Dieser sogenannte CLAUSIUS-RANKINE-Linksprozess ermöglicht es, bei vergleichsweise geringer zugeführter elektrischer Leistung über den Verdichter einem anderen Medium eine höhere Leistung zu entziehen oder zuzuführen. Wird die entzogene Leistung am Verdampfer genutzt, wirkt der Kreisprozess als Kältemaschine. Die Wärmeabgabe am Kondensator wird z. B. in Wärmepumpen genutzt. Im vorliegenden Fall der Nebelkammer gibt das Kammerinnere seine Wärme an den Verdampfer des Kälteaggregates ab und wird dadurch gekühlt. Die Thermodynamik des Kältemittels ist dabei so abgestimmt, dass es bei günstigen Temperaturen verdampft und kondensiert. Für die Nebelkammer wurde ein Aggregat mit einer Kälteleistung von 2,3 kW ausgewählt. Anhaltspunkt bildete dabei eine kommerzielle Experimentiernebelkammer mit einer etwa viertel so großen Beobachtungsfläche. Eine etwaige Überdimensionierung wird dabei in Kauf genommen, da die zu erwartenden Wärmeverluste schwer abzuschätzen waren. Das bereits im Gehäuse montierte und verlötete Kälteaggregat ist im Anhang C.1 abgebildet.

3.3. Anforderungen an die Kühlplatte

Die Kühlplatte hat die Aufgabe, einen möglichst guten Wärmeübergang von der Nebelschicht an den Verdampfer zu gewährleisten. Außerdem muss die Oberfläche chemisch

beständig gegenüber dem auf ihr stehenden Alkoholfilm sein. Des Weiteren ist auch zu beachten, dass die Platte am besten eine gleichmäßig matt schwarze Oberfläche besitzt, damit zum einen der Kontrast zu dem Alkoholnebel gewährleistet ist, zum anderen die Reflektion von einfallendem Licht so gering wie möglich bleibt, damit sich die Kondensationsspuren deutlich hervorheben.

Aufgrund seiner hohen Wärmeleitfähigkeit von 384 W/mK (bei 20°C , nach [FHK⁺92]) wäre Kupfer oder eine seiner Legierungen (wie z.B. Messing) am besten als Kühlplatte geeignet. Jedoch ist zum einen das Schwärzen von Kupfer ein technisch schwieriges Verfahren und zum anderen konnten keine Aussagen über die Alkoholbeständigkeit der Verfahren zum Färben gefunden werden [DKI10]. Eine gleichmäßige Färbung entsteht am besten in einem großen Bad mit der jeweiligen Schwarzbeize/ Schwarzbrenne, was wiederum ein Gefäß und die große Menge an Färbemittel notwendig macht. Auch weil Kupfer ein kostenintensiver Werkstoff ist, wurde deshalb nach Alternativen gesucht. Aluminium weist dabei, bezogen auf seine Wärmeleitfähigkeit von 204 W/mK (bei 20°C , nach [FHK⁺92]), die nächstbesten Eigenschaften auf. Mit dem Eloxal-Verfahren, was bei Aluminium sehr häufig bei höchsten Anforderungen eingesetzt wird, lässt sich eine sehr gut alkoholbeständige, matt schwarze Oberfläche erzeugen. Das Eloxieren ist ein Verfahren, welches eine Schutzschicht mittels anodischer Oxidation auf dem Aluminium erzeugt. Dabei entsteht eine harte, korrosionsbeständige, mit dem Aluminium fest verbundene Oxidschicht aus Al_2O_3 [Ost07], die eine, den Ansprüchen genügende, Oberfläche bildet.

Die Kühlplatte wurde aus Aluminiumblech mit einer Stärke von 1 mm gefertigt. Bei dickerem Blech ist sowohl der Wärmeübergang als auch die Anpassungsfähigkeit an etwaige Unebenheiten des selbstgefertigten Verdampfersystems schlechter. Falls das dünne Blech tatsächlich durch thermische Beanspruchung Schaden nehmen sollte, bliebe immer noch die Möglichkeit des unkomplizierten Austauschs.

3.4. Elektrische Versorgung

Die Bauteile, welche eine elektrische Versorgung benötigen sind bereits in Kapitel 3.1 aufgelistet. Im folgenden Absatz soll die Auslegung der Stromversorgung sowie der Entwurf der Steuerung und des Bedienfelds beschrieben werden. Dabei wurde die in Abbildung 3.3 zugrundeliegende Skizze der Schaltung sowie des Schaltmoduls realisiert.

Die Regelgröße für die Nebelkammer ist die Temperatur der Kühlplatte. Diese sollte für eine dauerhaft gute Sichtbarkeit der Spuren ca. -30°C betragen. Um das Sichtfeld für die Beobachtung nicht einzuschränken, wurde der Temperatursensor an der Unterseite der Wärmeübertragerwanne angebracht. Da dort eine andere Temperatur gemessen wird, musste während der ersten Versuchsprobeläufe des Kälteaggregats mit einem externen Temperaturfühler abgeglichen werden, bei welcher Temperatur an der Wärmeübertragerwanne

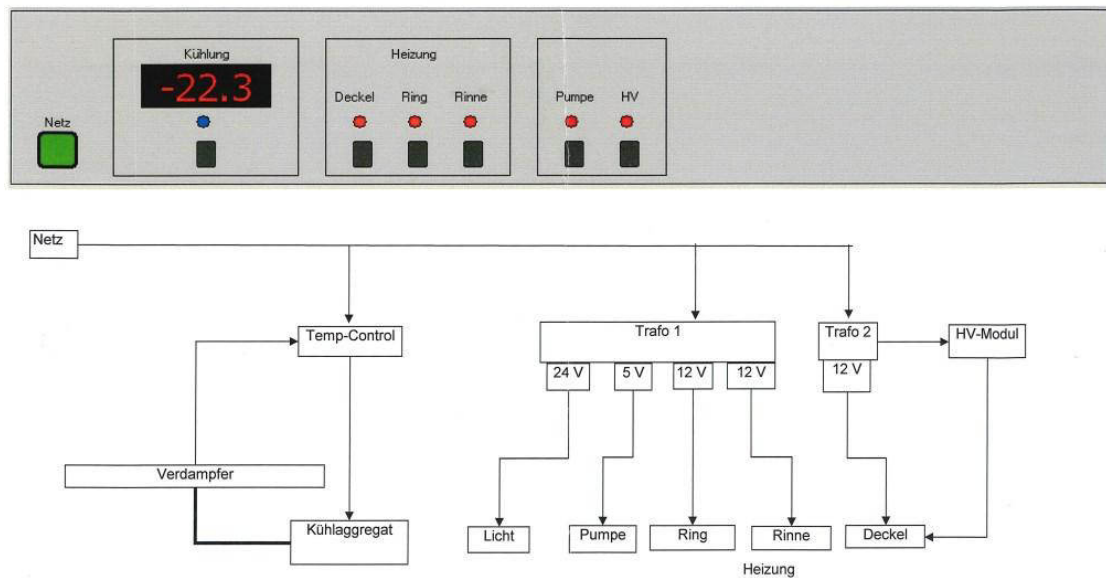


Abbildung 3.3.: Skizze des Blockschemas der Stromversorgung und Entwurf des Bedienfeldes

die gewünschte Temperatur an der Kühlplatte erreicht ist. So wurde ein Temperaturbereich von $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ am Temperatursensor (im Bild: Temp-Control) ermittelt, bei dem über die Steuerung das Kühlaggregat angeschaltet werden soll. Die Steuerung des Kühlkreislauks (Kompressor, Expansionsventil etc.) übernimmt das Kälteaggregat selbstständig.

Die Energieversorgung der Kleinabnehmer wird über zwei Trafos realisiert. Von dem ersten Trafo kommt die Versorgung für das Licht, die Alkoholpumpe, umlaufende Heizung der inneren Glaswand (im Bild: Ring) und die Heizung der Verdampferrinne (im Bild: Rinne). Die Hochspannung für den Ionenabsorber am Glasdeckel sowie die gleichzeitig aufgelegte Spannung zur Haubenheizung (im Bild: Deckel) werden vom zweiten Trafo versorgt. Abbildung 3.4 zeigt das, sich gerade im Bau befindliche, Schaltmodul für die dazugehörige Steuerung.

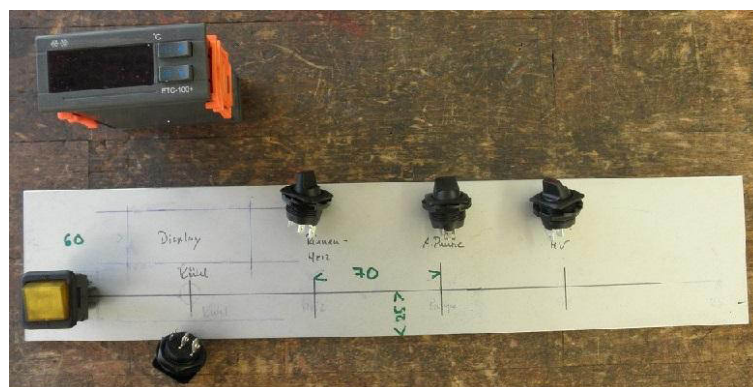


Abbildung 3.4.: Schaltmodul im Bau

Die Abbildungen B.3 und B.4 im Anhang zeigen im Detail das Blockschaltbild der Nebelkammer sowie die Anordnung der Heizdrähte in und im den Beobachtungsraum. Das Foto C.2 bildet das eingebaute Steuermodul ab.

Die Beheizung der inneren Glashaube ist für die Verhinderung der Kondensation des Alkoholdampfes wichtig, um einen ungehinderten Blick in das Innere zu gewährleisten. Deshalb wurden im Vorfeld die Kennlinien der Drahtheizungen an der inneren Glashaube aufgenommen, um deren Temperaturentwicklung und Leistungsaufnahme beim Betrieb abschätzen zu können. Bei der vorgesehenen Betriebsspannung von 12 V wurde eine Temperatur von ca. 65 °C erreicht, was ausreichend erschien und im Betrieb der Nebelkammer auch war. Die beiden Heizdrähte haben dann eine Leistungsaufnahme von 85 W bei der Ringheizung und 60 W Haubenheizung. Im Anhang B sind die dabei aufgenommenen Messwerte dargestellt.

3.5. Beleuchtung

Die Beleuchtung der Nebelkammer muss auf der Höhe der sensitiven Nebelschicht angebracht werden. Dabei ist es wichtig, eine mögliche Reflexion an anderen Bauteilen sowie den direkten Blick in das Licht zu verhindern bzw. abzuschirmen. Für die Beleuchtung wurden LED-Schienen mit SMD⁸ LEDs (siehe Abbildung 3.5) der Farbe kaltweiß (4500 K) mit einem Lichtstrom von 19,6 lm/Einheit⁹ ausgewählt. Für die Beleuchtung wurden pro Seite acht Einheiten verbaut. Die Schienen werden an allen vier Seiten um die Beobachtungsfläche benötigt, um eine gleichmäßige Ausleuchtung zu erhalten. Die LEDs besitzen eine Leistung von 3 W bei 24 V.



Abbildung 3.5.: LED-Streifen

⁸engl.: surface-mounted device, zu deutsch: oberflächenmontiertes Bauelement

⁹eine Einheit ist bei dem ausgewählten Produkt 90 mm lang und besitzt sechs LEDs

4. Dokumentation des Baus

Der Bau der Nebelkammer sowie die Fertigung der einzelnen Bestandteile erfolgten zum größten Teil in der hauseigenen Werkstatt des IRS. Nur vereinzelt wurden Aufträge wie z. B. das Eloxieren der Kühlplatte oder das Verlöten und Befüllen des Kälteaggregates an externe Spezialisten verteilt.

4.1. Bau des Gehäuses

Als Grundgerüst für das Gehäuse wurde ein Aluminium-Profilsystem mit Schraubenverbindungen verwendet. Vorteilhaft an diesem System ist das vielfältige Angebot an passendem Zubehör wie justierbare Heberollen und Verbindungsmaterial für die Einzelmontage von Seitenwänden und der abschließenden Glashaube. Zusätzlich bietet eine zerlegbare Konstruktion Vorteile bei der Endmontage, Wartung und eventuell späteren Überarbeitung des Eigenbaus.

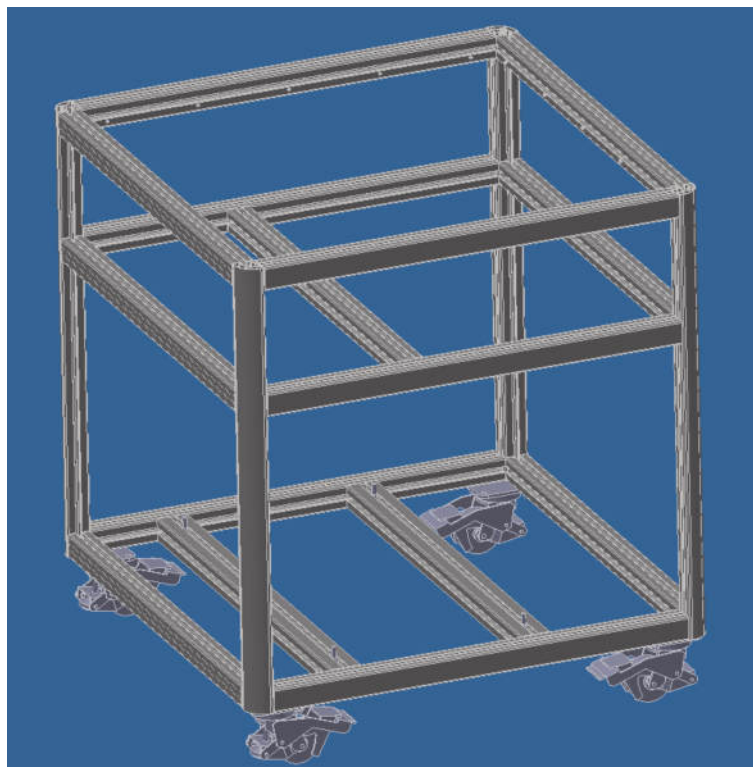


Abbildung 4.1.: Gehäuse

In Abbildung 4.1 ist das Gehäuse dargestellt¹⁰. Die Heberollen sind einzeln höhenverstellbar, sodass Unebenheiten im Untergrund ausgeglichen werden können, damit die Nebelschicht auf der Beobachtungsfläche gleichmäßig verteilt ist.

In dem Gestell wurde eine untere Ebene realisiert, auf der das Kälteaggregat steht und eine Zwischenebene hält Platz für das Schaltmodul und die Elektrik bereit. Die oberste Ebene schließt mit der Beobachtungsfläche ab und die äußere Glashaube wird in die Nuten der oberen Querprofile eingesetzt.

4.2. Verdampferbau

Da die Verdampfergröße genau an die Größe der Beobachtungsfläche (Größe der Kühlplatte) angepasst sein muss, war es nötig, einen eigenen Verdampfer zu bauen, da in genau dieser Größe keine käuflichen Angebote zur Verfügung standen. Mittels Kaltumformung wurde dieser aus einem Stück Kupferrohr mit den Abmaßen 12 x 1 mm gefertigt. Die Gesamtrohrlänge für die Mäanderanordnung beträgt ca. 8150 mm. Damit hat der Verdampfer ein Volumen von ca. 640 cm³.

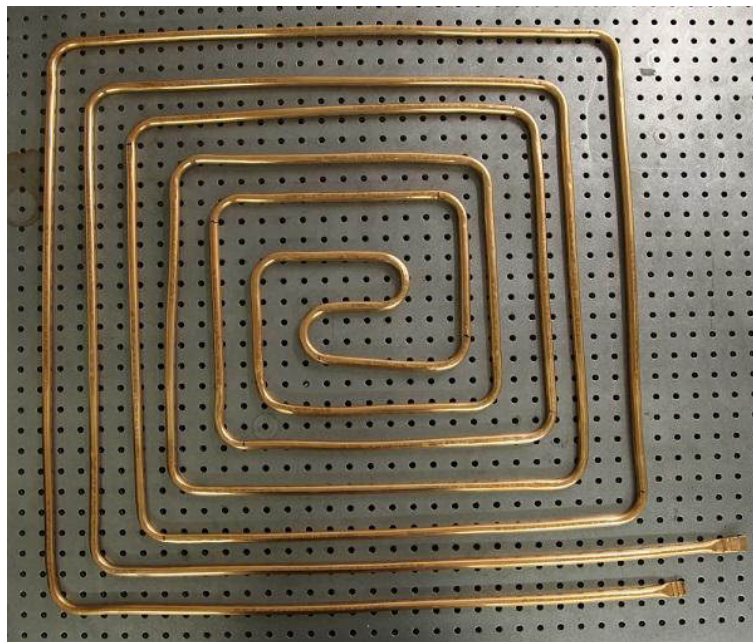


Abbildung 4.2.: Verdampferrohrschlange

Der Verdampfer muss an die Kühlplatte angebracht werden. Da aber die Kühlplatte so gerade wie nur möglich ausgeführt sein muss, damit auf ihr keine Alkoholpfützen und Stellen unterschiedlicher Temperaturen herrschen, ist ein Wärmeübertrager nötig. Dieser

¹⁰Die Abbildung ist ein Export der Software *Autodesk Inventor Professional 2010*, mit der einzelne Bauteile vorerst erstellt wurden.

Wärmeübertrager hat somit die Funktion, den Verdampfer von unten aufzunehmen und die Kühlplatte darüber zu halten.

Das Anlöten der gebogenen Kupferspirale an die Wärmeübertragerwanne aus Messing erwies sich als problematisch. Durch den punktuellen Hitzeeintrag beim Aufbringen des Lots hat sich die Messingwanne verzogen und Aufwölbungen traten auf. Diese konnten für ein befriedigendes Ergebnis nur durch Nachbearbeitung mithilfe einer Kantbank und damit aufgebrachten großen Druck auf beiden Seiten des Verdampfersystems ausgeglichen werden. Als Verbindungsmaterial zur Kühlplatte wurde eine 2-Komponenten-Wärmeleitpaste gewählt. Mithilfe dieser ausgesuchten Epoxid-Vergussmasse konnten nun zusätzlich die kleinen Dellen aufgefüllt werden und so ein guter Wärmeübergang gewährleistet werden. Auch die Wahl des dünneren, und somit flexibleren, Aluminiumblechs für die Kühlplatte erwies sich beim Zusammenbringen der Bauteile von Vorteil.

4.3. Aufnahme der Kühlplatte, Verdampfersystem und Auffangwanne

Um das gesamte Wärmeübertragungssystem inklusive der sich darunter befindlichen Auffangwanne für den kondensierten Alkohol zu befestigen, wurde ein PE-Rahmen verwendet. Dieser dient als Halterung bzw. Auflage für die genannten Komponenten inklusive der Aufnahme der inneren Glashaube und der Halterung für die Verdampferinne. Der Kunststoff-Rahmen selbst liegt passend in den obersten Querprofilen des Gehäuses auf horizontal in das Gehäuse montierte Schrauben. Die dafür benötigten Gewindebohrungen sind in Abbildung 4.1 zu erkennen. Das Material für den Rahmen wurde als Platte mit einer Bestellgröße von 1 m² geliefert. Dies konnte so nicht im Ganzen zu einem Rahmen verarbeitet werden, da dafür die Werkzeugmaschinen der Werkstatt des IRS nicht ausgelegt sind. Somit wurde auf die Variante, den Rahmen aus vier an den Ecken auf Gehrung gesägten Einzelprofilen zu fertigen, zurückgegriffen. Diese Profile wurden im Gehäuse dann noch mit einer Silikondichtung zusammengefügt. In Abbildung 4.3 ist die Schnittzeichnung von so einem Rahmen-Profil mit den angrenzenden Bauteilen dargestellt¹¹. Die Nut auf der Oberseite des Rahmens dient zur Aufnahme der inneren Glashaube. In diese Nut ist als Dichtung noch ein Silikonschlauch eingefügt auf der die Haube steht. In die Nut auf der Unterseite wird die gekantete und an den Ecken verlötete Alkoholauffangwanne¹² eingefügt. Auf dem inneren Absatz liegt von oben die Wärmeübertragerwanne auf und durch die Bohrungen fließt der Alkohol in die Auffangwanne ab.

In den Ecken des Rahmens sind die Halterungen für die Verdampferinne angebracht. Diese sind so ausgeführt, dass in den Ecken der Rinne mit einem angelöteten Zwischenstück ein

¹¹Im Anhang D ist eine Detailskizze des PE-Profils abgebildet.

¹²Im Anhang D skizziert mit Durchführungen für den Alkoholzu- und abfluss sowie für die Verdampferrohrleitungen

Rundstab montiert ist, der auf ein dreieckiges PE-Stück geschraubt wird. Dieses wird dann wiederum auf die Ecken des Rahmens geschraubt. Der Rinnenhalter ist in einem Detailfoto im Anhang C.4 abgebildet.

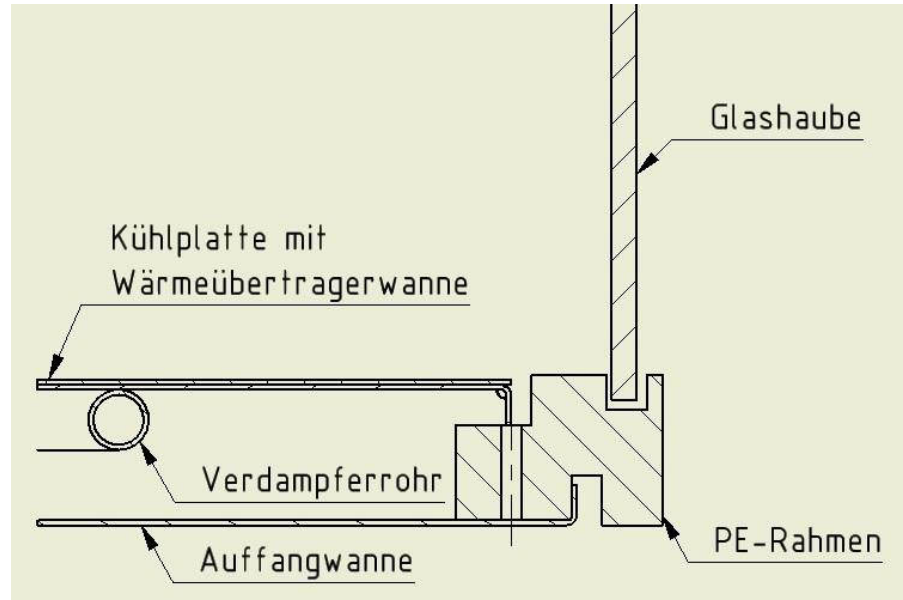


Abbildung 4.3.: Schnitt durch ein PE-Profil

4.4. Heizdrähte an der inneren Glashaube

Für die Bespannung der inneren Glashaube mit den Heizdrähten wurden zum einen für die Ringheizung ein doppelt gewickelter Konstantandraht der Stärke 0,5 mm und für die Haubenheizung ein Widerstandsdraht der Stärke 0,2 mm benutzt. Die Abstandshalter, in Abbildung 4.4 unten mittig zu sehen, werden als Aufnahme für die umlaufende Ringheizung benötigt und sind aus PE gefertigt. Da bei diesem Draht davon auszugehen ist, dass er sich aufgrund des Wärmeeintrages ausdehnt, wurde als Verbindungselement eine Feder eingespannt (dies ist auch in Abbildung 4.4 hinter den Kabeln zur Versorgung der Haubenheizung zu sehen). Für die Halterung der Haubenheizung wurde ein U-Profil aus Aluminium mit Gewindebohrungen versehen und der Draht dann zwischen die Schrauben und das Profil geklemmt. Die Halterung wurde mit einer 0,5 mm dicken durchsichtigen Plastikleiste über den extra dafür überstehenden Deckel der inneren Glashaube geklemmt. Diese Halterung ist im Detailfoto im Anhang C.5 abgebildet und im Anhang D gezeichnet. Bei dem Spannen des Drahtes war äußerste Vorsicht geboten, da der Draht recht schnell reißt, aber eine gewisse Spannung vorhanden sein muss, damit er dann bei der Wärmeausdehnung nicht durchhängt.



Abbildung 4.4.: Glashaube mit Heizdrähten

4.5. Beleuchtungsschienen

Um die Anforderungen aus Kapitel 3.5 zu realisieren, wurden für die Aufnahme der LED-Leisten Schienen aus dem sogenannten HPL-Werkstoff¹³ gefertigt. Aus diesem Material bestehen auch die Seitenwände der Kammer. Dieser Werkstoff hat den Vorteil, dass er sehr robust und kratzfest ist und sich zudem leicht säubern lässt, was ihn besonders als äußere Hülle der Kammer geeignet macht. Diese 2-teiligen Blendschienen sind so gefertigt, dass die LED-Leisten von ihnen oben und unten aufgenommen werden und durch die etwa 1 cm vorstehenden Schienen das Licht zur Nebelschicht gebündelt wird. Abbildung 4.5 verdeutlicht diesen Sachverhalt. So ist auch die Lichtquelle vor direktem Blickkontakt geschützt, was ein Blenden vermeidet. Um zusätzlich Reflexionen zu vermeiden, sind die der Lichtquelle zugewandten Seiten des Blendschutzes mit schwarzem Textilband beklebt.

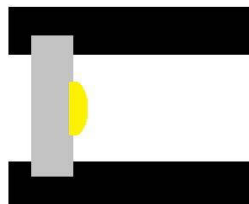


Abbildung 4.5.: Halterschienen mit LED-Leiste

¹³engl. High Pressure Laminate: Verbundwerkstoff in Plattenform aus mehreren Lagen Papier und Harz

4.6. Endmontage

Um so geringe Wärmeverluste wie möglich zu erhalten, ist eine gute Isolierung wichtig. Deshalb wurde sowohl unter der Alkoholauffangwanne eine Schicht selbstklebendes 20 mm starkes Isoliermaterial angebracht als auch die kalten Rohrleitungen des Kühlsystems (vom Verdampfer zum Verdichter) isoliert.

Wie schon zuvor erwähnt, sind die Außenwände der Kammer aus dem äußerst robusten HPL-Material gefertigt. Bei der Ausführung dieser Verkleidung war darauf zu achten, dass die Demontage der Verkleidungsplatten relativ leicht erfolgen kann, um bei Wartungsarbeiten oder Reparaturen einen möglichst geringen Aufwand zu haben. Folgende Variante wurde umgesetzt: In die bestehenden Nuten der Gehäuseprofile wurden jeweils eine etwa 50 mm überstehende Leiste eingesetzt (in der Art eines Passpartout). Die Verkleidungsplatten wurden passend auf die Größe zwischen den Gehäuseprofilen gesägt. Dann wurden auf die Passepartout-Rahmen und passend auf die Platten haftstarkes Klettband angebracht und sie so miteinander verbunden. Im Anhang C in Abbildung C.3 ist über dem Lüftungsgitter das Passpartout mit den Klettunkten zu erkennen und an der Seite die eingesetzten Platten.

Wie auf dem Bild C.1 zu sehen, ist die eine Seite der Nebelkammer mit einer 2-flügeligen Tür ausgestattet, die mit einem Stangenschloss verriegelt werden kann. Dies verhindert unbefugtes Handhaben der Steuerung der Nebelkammer, aber immernoch schnellen Zugriff zum An- und Ausschalten durch eine befugte Person mit Schlüssel.

Für die Fertigung der Glashauben wurde eine Glaserei beauftragt. Dabei dienten die in Anhang D angefertigten Skizzen als Grundlage. Zur Montage der äußeren Haube auf dem Gehäuse kommen vom Hersteller der Gehäuseprofile passende Einfassprofile für die Nuten zum Einsatz. Die eingesetzte Glashaube ist in Abbildung C.6 zu sehen.



Abbildung 4.6.: Nebelkammer mit kompletten Anschlüssen

5. Einsatzmöglichkeiten im Demonstrationsversuch

Die Erfindung der (Expansions-)Nebelkammer von Charles Thomas Rees Wilson 1911 war ein Meilenstein in der Anfang des 20. Jahrhunderts noch recht jungen Kernforschung. Mit Hilfe der Nebelkammer untersuchte z. B. Lise Meitner 1926 die Reichweite der α -Strahlung und 1937 wurde dadurch die Entdeckung des Myons durch C. Anderson und S. Neddermeyer ermöglicht [KK12]. Heutzutage wird die Kammer nur noch als Demonstrationsobjekt mit »historischem Wert« gesehen. Dennoch gilt sie weithin als uneingeschränkt bestes Versuchsgerät der experimentellen Kernphysik, vor allem wenn bedacht wird, dass es einprägsamer ist, wenn etwas selber gesehen und ausprobiert wird, was sie für die Ausbildung besonders attraktiv macht.

5.1. Vorbereitung und Hintergrundwissen für durchzuführende Versuche

Faszinierend ist schon allein nur die kosmische Strahlung im einfachen Demonstrationsversuch nachzuweisen. Dabei kann bereits eine qualitative Auswertung über die beobachteten Nebelspuren und deren mögliche Herkunft erstellt werden. Sehr eindrucksvoll zum Experimentieren ist sicher wenn die Phänomene, die in der Nebelkammer sichtbar sind, auch genau zuordnen sind. Aufgrund der Vielfältigkeit der Spuren ist dies leider nicht immer möglich. Eine Fehlerquelle dabei ist z. B. der Fakt, dass die eintretende ionisierende Strahlung nicht immer genau horizontal zur sensitiven Nebelschicht in die Kammer tritt. Dabei können also Bahnen von scheinbar sehr unterschiedlicher Länge auftreten, die eigentlich die gleiche Ursache haben. Um mit der Nebelkammer experimentieren zu können ist es also sinnvoll, radioaktive Präparate einzubringen, von denen die ablaufenden Zerfallsprozesse generell bekannt sind.

Da es sich bei vorliegender Kammer um ein Demonstrationsobjekt handelt, was außerhalb eines Überwachungsbereiches aufgestellt werden soll, ist es nötig Präparate zu finden, die unter der Freigrenze der Strahlenschutzverordnung (StrSchV) liegen. Im folgenden Abschnitt sind Vorschläge zu gut interpretierbaren Präparaten beschrieben, die sich für die Anwendung bei Demonstrationsversuche eignen.

Bei den ersten Versuchen mit der Nebelkammer wurde schnell eine Möglichkeit gefunden, das radioaktive Gas eines emanierenden thoriumhaltigen Glühstrumpfs in das Innere

der Kammer zu bringen: Dafür wurde der Glühstrumpf in eine handelsübliche Labor-Spritzflasche gegeben. Nach Bedarf kann so das, von dem Glühstrumpf ausgehende, radioaktive Gas durch eine Öffnung in die Kammer gepumpt werden¹⁴. Die Thorium-Zerfallsreihe ist im Anhang in Abbildung A.3 abgebildet. Ursächlich für die Nebelspuren in der Kammer aus dem Glühstrumpf ist das Element Radon. Mit Blick auf die Zerfallsreihe wird deutlich, dass die Nuklide ^{220}Rn und ^{216}Po durch ihre kurze Halbwertszeit in schneller Abfolge hintereinander zerfallen. Dieses Phänomen zeigt sich in der Nebelkammer oft als fast gleichzeitig V-förmig von einem Punkt abgehende α -Spuren. Mit diesen recht einfach zu erkennenden Spuren des Radongases lassen sich sehr gut die einzelnen Zerfälle zählen und ausmessen, was sich in Versuchen zur Halbwertszeit- und Reichweitenbestimmung nutzen lässt.

Ein weiteres mögliches Präparat ist ein Stück Natururan. In der natürlichen Zerfallsreihe des Uran befinden sich vorwiegend α - und β -Strahler, die wie schon bereits beschrieben, erkannt werden können. Bei dem Einbringen von Natururan besteht aber auch die Möglichkeit, die Spontanspaltung zu beobachten. Eine erste Erklärung der Kernspaltung wurde von Otto Robert Frisch in Zusammenarbeit mit Lise Meitner 1939 publiziert [BWW08, S.15]. Später wurde es von Frisch auch experimentell bestätigt, indem er in einer Ionisationskammer eine Uranprobe mit abgebremsten Neutronen bestrahlte und über eine Messapparatur nur ionisierende Teilchen sehr hoher Energien ($>20\text{ MeV}$) maß, aufgrund derer er auf Spaltprodukte schloss¹⁵. Das Isotop ^{238}U hat mit seinem größten Anteil am natürlichen Uran von ca. 99% auch die höchste Häufigkeit einer Spontanspaltung von $5,45 \cdot 10^{-5}\%$. Bei der Menge von 1 g Natururan kann es alle 100 s zu einer Spontanspaltung kommen. Mögliche Spaltungen sind:



Ein weiteres interessantes Präparat ist auch ein reiner β -Strahler. Die bisher erklärten Proben unterlagen immer α - und β -Zerfall und da die α -Spuren viel deutlicher in der Nebelkammer sind, geraten die β -Spuren dabei eher in den Hintergrund. Auch hierbei ist es wieder wichtig unter der Freigrenze der StrSchV zu bleiben. Ein geeigneter β -Strahler ist natürliches Kalium in dem das radioaktive Isotop ^{40}K zu 0,012% enthalten ist. Bei diesem Isotop erfolgt zu 90% ein β^- -Zerfall nach der Gleichung 5.2 und zu 10% ein β^+ -Zerfall.



¹⁴In einer Weiterentwicklung wurde bereits eine elektrisch betriebene Pumpe eingesetzt, die stoßweise oder kontinuierlich laufend das Gas in die Kammer einbringt

¹⁵Die Entdeckung der spontanen Spaltung von Uran erfolgte ein Jahr später 1940 von G.N.Flerov und K.A.Petrzhak in dem bereits von Frisch angewandten Versuchsaufbau

Wenn nun ein magnetisches Feld um die Kammer gelegt wird¹⁶, können die unterschiedlich geladenen Teilchen auseinandergehalten werden. Abbildung 5.1 zeigt so eine Ablenkung eines β -Teilchens. Der Radius der Ablenkung ist abhängig von der Energie des Teilchens und der Stärke des Feldes. Also lässt sich im Umkehrschluss anhand dieser Ablenkungskurve auf die Anfangsenergie schließen.



Abbildung 5.1.: Ablenkung eines β -Teilchens [Cha13]

Um die beschriebenen Spuren erkennen und genau auswerten zu können, ist es unumgänglich eine Kamera fest zu installieren. Die Kamera sollte dabei in der Lage sein, fortlaufende Videos und Bilder mit einer festgelegten Zeitspanne aufzunehmen. Alternativ kann auch das aufgenommene Video mittels einer Computersoftware wieder in Einzelbilder extrahiert werden. Anhand dieser Bilder können dann reproduzierbare Auswertungen durchgeführt werden, die bei der Beobachtung mit bloßem Auge sonst gar nicht möglich sind.

5.2. Mögliche Versuche

Auswertung der Nebelspuren hinsichtlich ihrer Ursache: In einer ersten Kennenlernphase mit der Nebelkammer ist es sicher hilfreich, erst einmal alle möglichen Spuren zu beobachten und zu beschreiben sowie deren Herkunft zu erklären. Diese »Versuchsphase« kann also als Einstieg in das Thema der Radioaktivität genutzt werden. (Die Ursachen und Entstehungen der Nebelspuren sind im Verlaufe dieser Arbeit bereits erläutert wurden.)

Halbwertszeitmessung: Die Nebelkammer kann auch zur quantitativen Auswertung von α -Spuren genutzt werden. Dazu wird etwas Radongas (aus dem Glühstrumpf) in die Kammer geblasen. Danach sollten auf den, in einem bestimmten Zeitintervall aufgenommenen, Fotos des Kammerinneren die sichtbaren α -Zerfälle gezählt werden. Dies kann z. B. bei einem Zeitabstand von 5 s auf 50 hintereinander aufgenommenen

¹⁶senkrecht zur Beobachtungsfläche, damit nach der Lorentzkraft die Elektronen horizontal zur Beobachtungsfläche abgelenkt werden

Bildern geschehen. So wird die Anzahl der Zerfälle in einer Zeitspanne von 250 s dokumentiert. Diese Messwerte können nun in einem Diagramm abgebildet werden. Mit dem bekannten Zerfallsgesetz der Aktivität A

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-t\lambda} \quad (5.3)$$

und der Berechnung der Zerfallskonstanten λ aus

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \quad (5.4)$$

lässt sich dann im Diagramm eine Funktion approximieren und der Wert für die Halbwertszeit bestimmen.

Reichweitenbestimmung: Bei der Reichweitenbestimmung wird die Strecke gemessen, welche die Strahlungsteilchen zurücklegen. Dazu ist es ebenfalls notwendig, von dem Inneren der Kammer Bilder zu machen. Des Weiteren wird ein passendes Grafikprogramm (z. B. das frei erhältliche Programm GIMP) benötigt, in welchem die Möglichkeit besteht Längen auszumessen. Zudem muss im Vorfeld eine Längenskalierung durchgeführt werden indem in die Nebelkammer eine Skala mit mm-Einteilung eingeführt und fotografiert wird. Diese Skala mit bekannter Länge wird dann in dem Grafikprogramm ausgemessen und ein Umrechnungsfaktor ermittelt. Wenn in dem Programm für die Skala von 100 mm eine Pixelwert von 3500 Pixel gemessen wurde, ergibt sich der Umrechnungsfaktor zu $\frac{1}{35}$. Die Länge der Nebelbahnen sollte für ca 20 der längsten Spuren ausgemessen werden, um den statistischen Fehler so klein wie möglich zu halten.

Anschließend an die Ermittlung der Reichweite d lässt sich die Geschwindigkeit v_α ermitteln, mit Hilfe derer die Anfangsenergie der α -Teilchen ausgerechnet werden kann. Dabei kann als gute Näherung das empirische nichtrelativistische Reichweitengesetz von Geiger benutzt werden:

$$d = k \cdot v_\alpha^3 \quad (5.5)$$

mit der empirisch ermittelten Konstante $k=9,67 \cdot 10^{-24} \text{ s}^3/\text{m}^2$ (unter Normbedingungen in Luft). Die kinetischen Energie E_{kin} lässt sich dann mit folgender Gleichung bestimmen:

$$E_{kin} = \frac{m_\alpha}{2} \cdot v_\alpha^2 \quad (5.6)$$

Dieser berechnete Wert sollte dann unter einer Fehlerabschätzung mit der Energie aus der Nuklidkarte verglichen werden.

Bestimmung der Energie von β -Teilchen: Wie schon erwähnt, ist für dieses Experiment ein reiner β -Strahler und ein angelegtes Magnetfeld bekannter Stärke senkrecht zur Beobachtungsfläche nötig. In den aufgenommenen Bildern wird der Radius der Teilchenbahnen mittels einer Grafiksoftware gemessen. Mit den bekannten Größen der Elementarladung q_e , der magnetischen Flussdichte B und des Radius r und unter Verwendung der Gleichung der Lorentzkraft F_L und der Zentripetalkraft F_Z

$$F_L = q_e \cdot v_e \cdot B \quad (5.7)$$

$$F_Z = \frac{m_e \cdot v_e^2}{r} \quad (5.8)$$

lässt sich die Geschwindigkeit und dadurch die kinetische Energie (nach Gl. 5.6) des β -Teilchens bestimmen.

Ein zweiter Berechnungsansatz wäre die relativistische Energie-Impuls-Beziehung mit Benutzung der Größen Impuls p und Lichtgeschwindigkeit c :

$$E^2 - (\vec{p}c)^2 = (mc^2)^2 \quad (5.9)$$

aus der sich die kinetische Energie wie folgt berechnen lässt

$$E_{kin} = (\gamma - 1) \cdot mc^2 \quad (5.10)$$

mit dem Lorentzfaktor γ

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (\frac{v_e}{c})^2}} \quad (5.11)$$

Um die so ermittelten Rechenergebnisse zu veranschaulichen, lässt sich das Energiespektrum als Abhängigkeit vom Radius in einem Diagramm darstellen. Wegen der Energieverteilung der β -Elektronen ist es günstig dafür mindestens 100 Messwerte aufzunehmen. Dabei sollte auch ein Vergleich mit den unterschiedlich berechneten Werten der Energien sowie den Werten der Karlsruher Nuklidkarte erfolgen.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Diffusionsnebelkammern sind eine der wenigen Versuchsapparate, die radioaktive Strahlung tatsächlich sichtbar machen können. Mit ihrem verhältnismäßig einfachen Wirkprinzip eignen sie sich deshalb besonders für die Lehre im Bereich der Kern- und Strahlenphysik. Diese Arbeit dokumentiert den Entwurf und den Bau einer Diffusionsnebelkammer für das Institut für Radioökologie und Strahlenschutz der Leibniz Universität Hannover, wo sie für Vorlesungen und Praktika sowie Strahlenschutzlehrgänge eingesetzt werden soll.

Um den Anforderungen des IRS zu genügen, wurde die Kammer in Eigenregie aus Einzelteilen und fertigen Baugruppen aufgebaut, besonders die Größe des Beobachtungsfeldes von $750 \times 750 \text{ mm}^2$ ist eine Besonderheit. Nebelkammern genau dieser Größe sind käuflich nicht zu erwerben. Aufgrund ihres sehr kurzen Beobachtungszeitraums schied eine Expansionsnebelkammer von vornherein aus. Um eine gewisse Mobilität zu gewährleisten, ist die Kammer auf feststellbaren Rollen gelagert und von allen Seiten auch für größere Gruppen zugänglich. Die ersten Testversuche mit der selbstgebauten Nebelkammer konnten erfolgreich durchgeführt werden.

Weiterhin wurden mögliche Experimente mit dem Gerät erörtert. Die Beobachtung von Proben, deren Zerfallsprozesse bekannt und in der Kammer gut bestimmbar sind, werden empfohlen. So eignen sich z. B. thoriumhaltige Glühstrümpfe, Natururan und Kalium. Für öffentliche Vorführungen muss dabei darauf geachtet werden, dass die Proben unterhalb der Freigrenze der StrSchV liegen, da sonst ein Experimentieren nur mit höheren Sicherheitsvorkehrungen möglich ist.

Um die Nebelkammer dann im vollen Umfang nutzen zu können, muss noch eine Kamera fest montiert werden und in die Glashauben müssen noch Durchführungen geschnitten werden um eine Probenschleuse für größere Präparate zu bekommen.

Die Materialkosten der Nebelkammer beliefen sich auf ca. 8.000 €. Eine gleichwertige Nebelkammer von einem Hersteller für Experimentierausrüstung hätte 80.000 € gekostet. Auch bei Einberechnung der Personalkosten konnte so für diese Sonderanfertigung mehrere 10.000 € gespart werden. Die bessere technische Kenntnis über das selbstgebaute Gerät kann sich im Fall eines Defekts zusätzlich bezahlt machen.

Literaturverzeichnis

- [BWW08] BETHGE, Klaus ; WALTER, Gertrud ; WIEDEMANN, Bernhard: *Kernphysik*. 3.Auflage. Berlin Heidelberg : Springer, 2008 (Springer-Lehrbuch). – ISBN 978-3-5407-4566-2
- [Cha13] *Exploring radioactivity with a homemade Cloud Chamber*. <http://chambrebrouillard.wifeo.com/beta.php>. Version: 2013. – letzter Abruf: 11.06.2013
- [Dem10] DEMTRÖDER, Wolfgang: *Experimentalphysik 4: Kern-, Teilchen- und Astrophysik*. 3.Auflage. Berlin Heidelberg : Springer, 2010 (Springer-Lehrbuch Bd. 4). – ISBN 978-3-6420-1598-4
- [DKI10] DKI DEUTSCHES KUPFERINSTITUT: *Chemische Färbung von Kupfer und Kupferlegierungen*. Düsseldorf, 2010
- [FHK⁺92] FISCHER, Ulrich ; HEINZLER, Max ; KILGUS, Roland ; NÄHER, Friedrich ; PAETZOLD, Heinz ; RÖHRER, Werner ; SCHILLING, Karl: *Tabellenbuch Metall*. 38. Auflage. Nourney, Vollmer : Verlag Europa-Lehrmittel, 1992 (Europa-Fachbuchreihe). – ISBN 3-8085-1108-7
- [GSI09] GSI HELMHOLTZZENTRUM FÜR SCHWERIONENFORSCHUNG: *Auswertung von Nebelkammerbildern*. Schüler Labor: Station 8. 2009 <http://www-alt.gsi.de/documents/DOC-2005-Nov-177-1.pdf>. – Abruf: 04.10.2012
- [Hei06] HEIDE, Markus: *Bau und Optimierung einer Diffusionsnebelkammer*. Schriftliche Hausarbeit. Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 2006
- [Ins12] INSTITUT FÜR KERNCHEMIE: *Institut für Kernchemie: Vorträge*. <http://www.kernchemie.uni-mainz.de/strassmann08.html>. Version: 2012. – letzter Abruf: 09.06.2013
- [KK09] KRETZSCHMAR, Hans J. ; KRAFT, Ingo: *Kleine Formelsammlung Technische Thermodynamik*. 3. Auflage. München : Carl-Hanser-Verlag, 2009. – ISBN 978-3-446-41781-6
- [KK12] KUHAR, Manuela ; KUGER, Fabian ; KOBEL, Michael (Hrsg.) ; TREFZGER, Thomas (Hrsg.): *Selbstbau einer Nebelkammer - Teilchenspuren sichtbar machen*. TU Dresden : Projekt Netzwerk Teilchenwerk, 2012
- [Kri12] KRIEGER, Hanno: *Grundlagen der Strahlungsphysik und des Strahlenschutzes*. 4.Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2012 (SpringerLink : Bücher). – ISBN 978-3-8348-1815-7

- [MRRS95] MUSIOL, Gerhard ; RANFT, J. ; REIF, R. ; SEELIGER, D.: *Kern- und Elementarteilchenphysik*. 2. Auflage. Frankfurt am Main : Verlag Harri Deutsch, 1995. – ISBN 3–8171–1404–4
- [Ost07] OSTERMANN, Friedrich: *Anwendungstechnologie Aluminium*. 2. Auflage. Berlin Heidelberg : Springer, 2007 (VDI-Buch). – ISBN 978–3–540–71196–4
- [PHY] PHYWE SYSTEME GMBH UND CO. KG: *Machen Sie natürliche Umgebungsstrahlung dauernd sichtbar*. Produktinformation 75.41/.42
- [Rap13] RAPP, Thomas: *Rapp Instruments - Physikalische, chemische und elektronische Experimente*. <http://www.rapp-instruments.de/Radioaktivitaet/Neutronen/Detektor/detector.htm>. Version: 2013. – letzter Abruf: 11.06.2013
- [Sta10] STANEV, Todor: *High Energy Cosmic Rays*. Chichester, UK : Praxis Publishing Ltd, 2010 (Springer Praxis Books). – ISBN 978–3–5408–5147–9
- [Wal12] WALTHER, Clemens: *Kernphysikalische und kernchemische Grundlagen des Strahlenschutzes und der Radioökologie - Radioactive Decay*. Leibniz Universität Hannover, 2012. – Vorlesungsskript

A. natürliche Zerfallsreihen

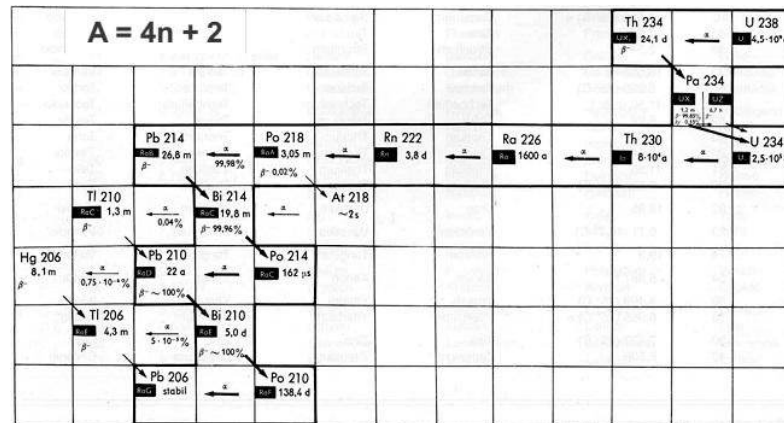


Abbildung A.1.: Schema der Uran-Radium-Zerfallsreihe [Wal12]

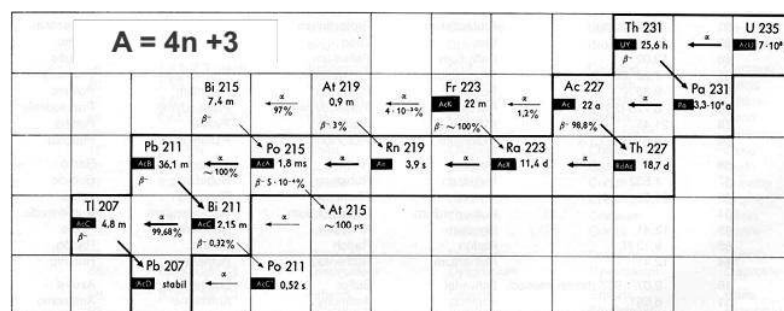


Abbildung A.2.: Schema der Uran-Actinium-Zerfallsreihe [Wal12]

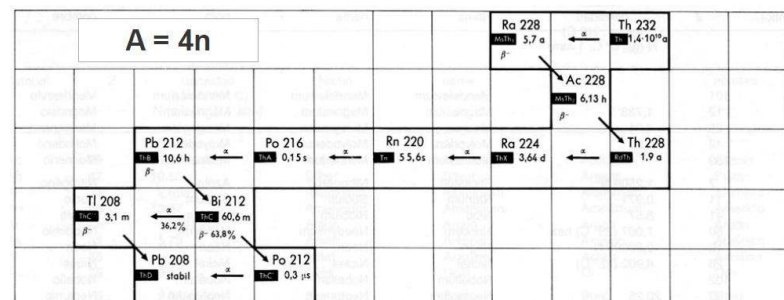
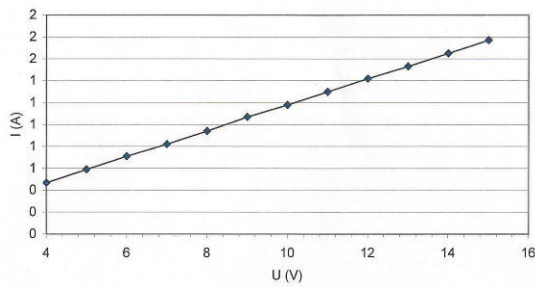
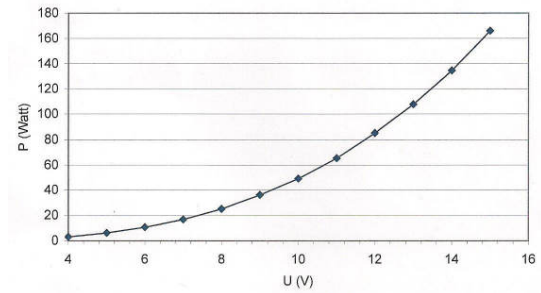


Abbildung A.3.: Schema der Thorium-Zerfallsreihe [Wal12]

B. Details zur Elektrischen Versorgung

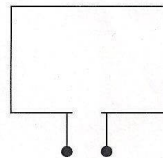


(a) U - I -Diagramm



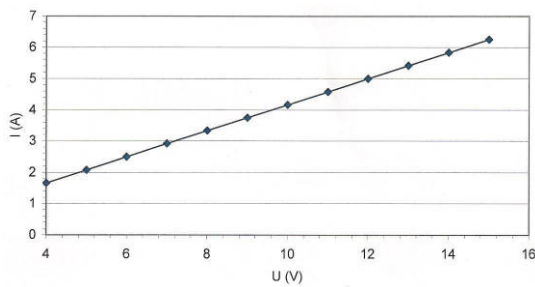
(b) U - P -Diagramm

2 x 0,5 mm x 3,20 m

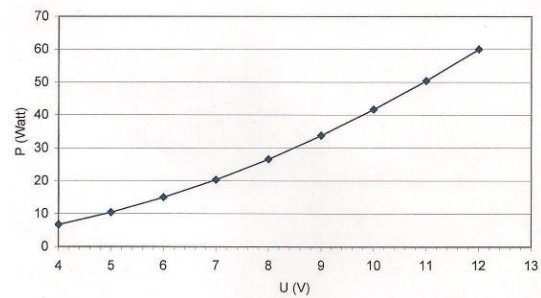


(c) Schaltplan

Abbildung B.1.: Leistungdiagramme der Ringheizung

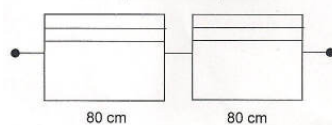


(a) U - I -Diagramm



(b) U - P -Diagramm

12 x 0,2 mm 12 x 0,2 mm



(c) Schaltplan

Abbildung B.2.: Leistungdiagramme der Haubenheizung

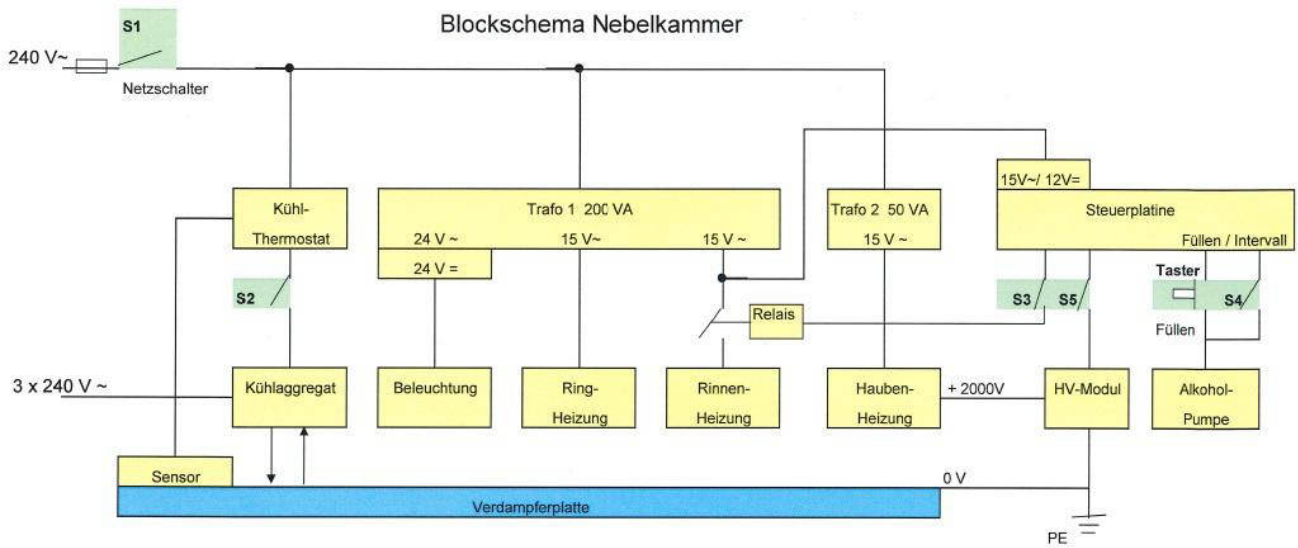
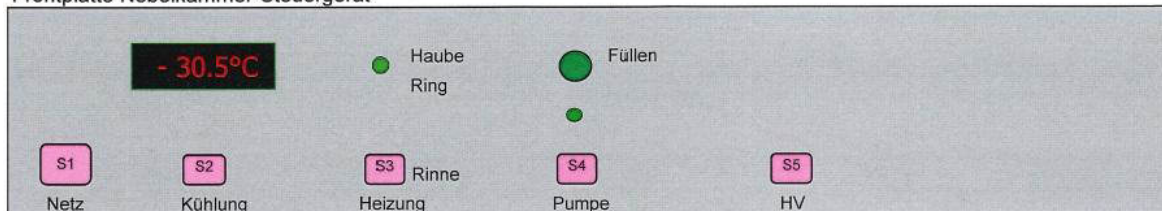
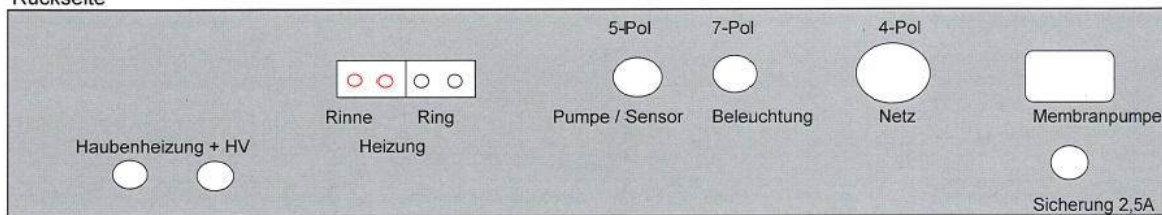


Abbildung B.3.: Blockschaltbild

Frontplatte Nebelkammer-Steuergerät



Rückseite



Anordnung der Heizdrähte

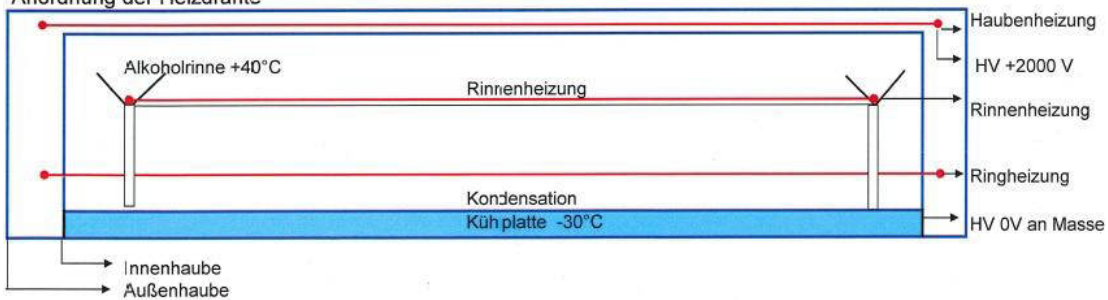


Abbildung B.4.: Steuergerät und Anordnung der Heizdrähte

C. Bilder der Nebelkammer



Abbildung C.1.: Kälteaggregat im Gehäuse



Abbildung C.2.: eingebautes Steuermodul



Abbildung C.3.: äußere Hülle der Nebelkammer



Abbildung C.4.: Rinnenhalter

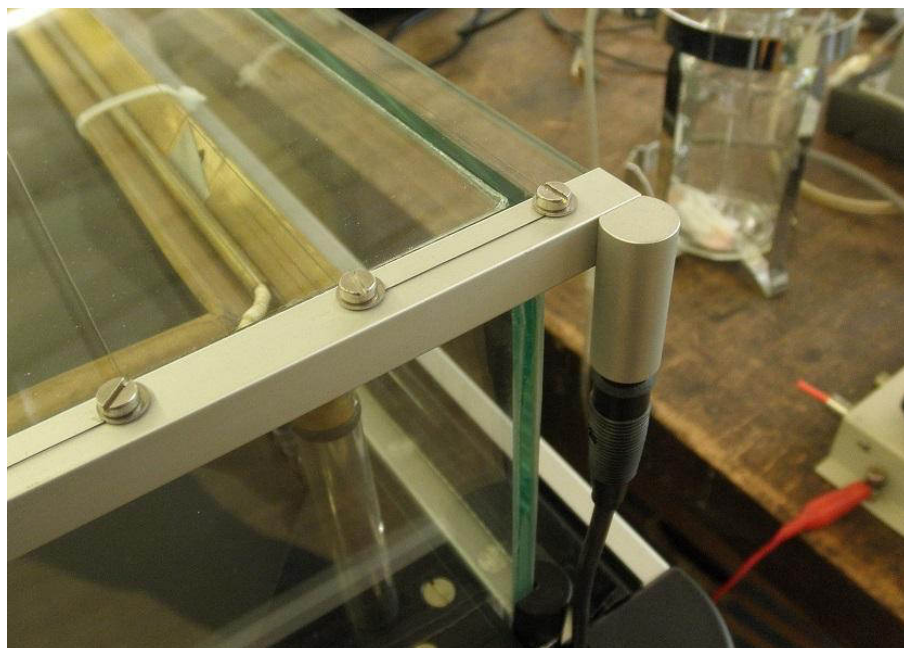


Abbildung C.5.: Halter und Anschluss für die Hochspannung und Haubenheizung

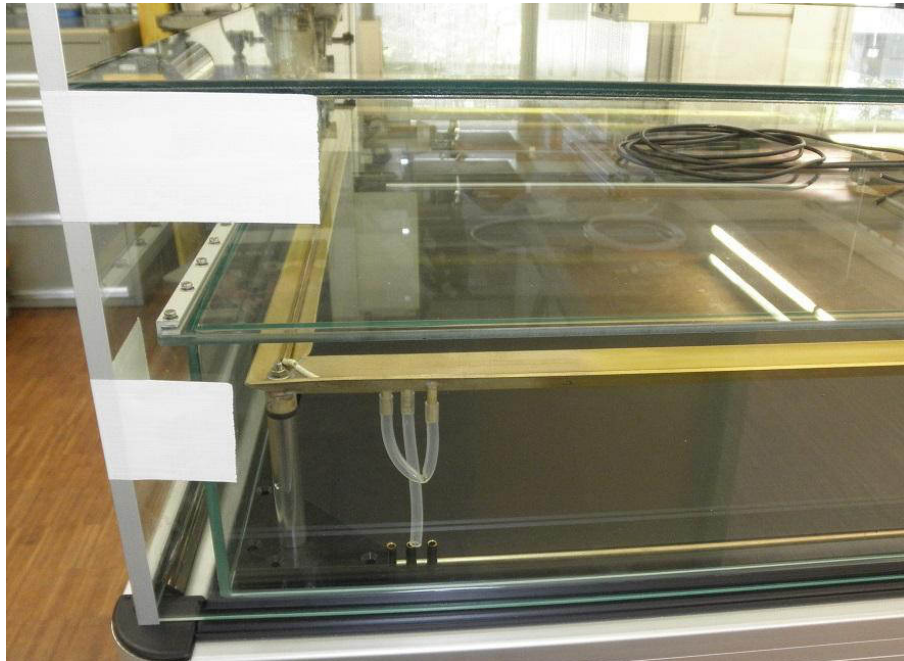
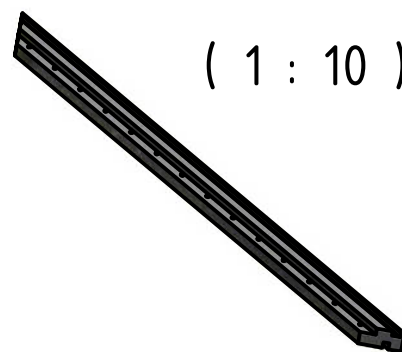
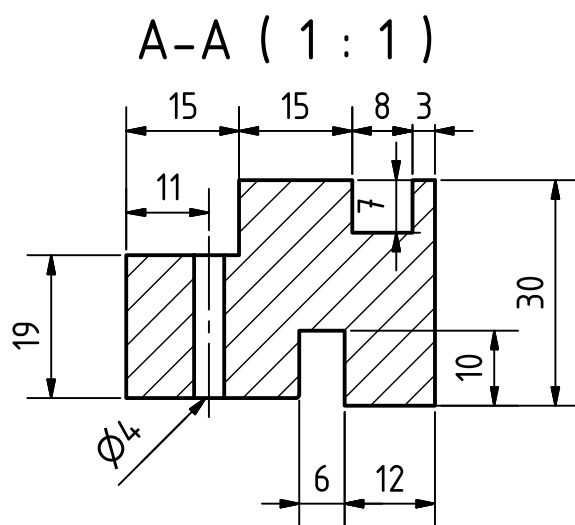
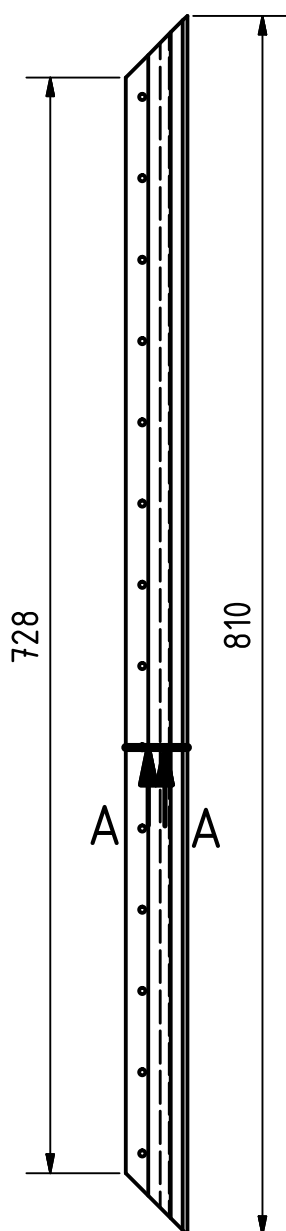
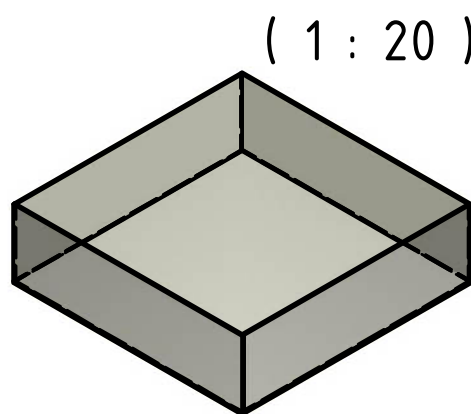
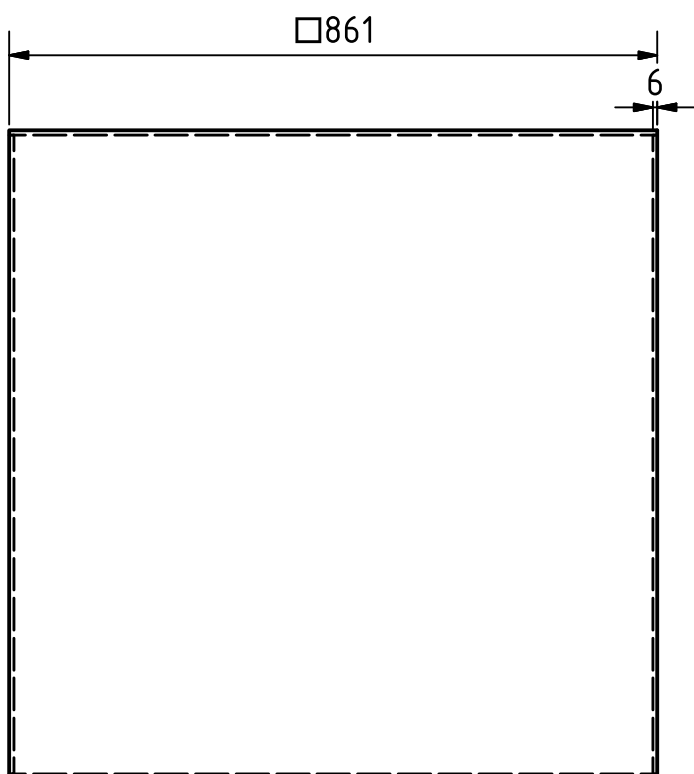


Abbildung C.6.: Verdampferrinne und Glashauben

D. Zeichnungen



						Maßstab 1:5			
					Datum	Name	PE-Rahmen-Profil		
				Gezeichnet	14.03.2013	Beyrich			
				Kontrolliert					
				Norm					
									1
									A4
Status	Änderungen	Datum	Name				Nebelkammer		

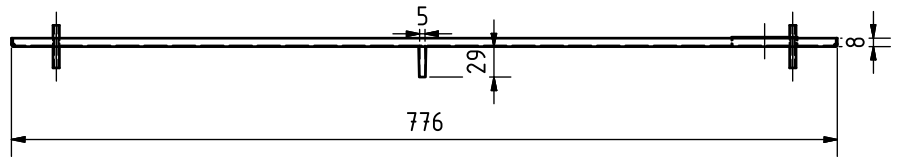


(1 : 20)

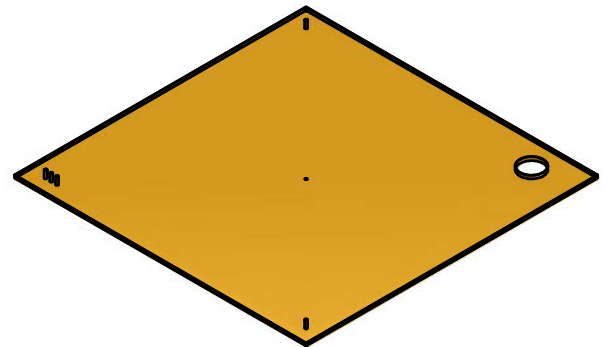
						Maßstab 1:10			
						VSG t=6			
					Datum	Name		äußere Glashaube	
				Gezeichnet	12.02.2013	Beyrich			
				Kontrolliert					
				Norm					
									1
									A4
Status	Änderungen	Datum	Name			Nebelkammer			



(1 : 5)



(1 : 10)



								Messing t=1			
					Datum	Name		Auffangwanne			
				Gezeichnet	09.04.2013	Beyrich					
				Kontrolliert							
				Norm							
											1
											A4
Status	Änderungen	Datum	Name					Nebekammer			

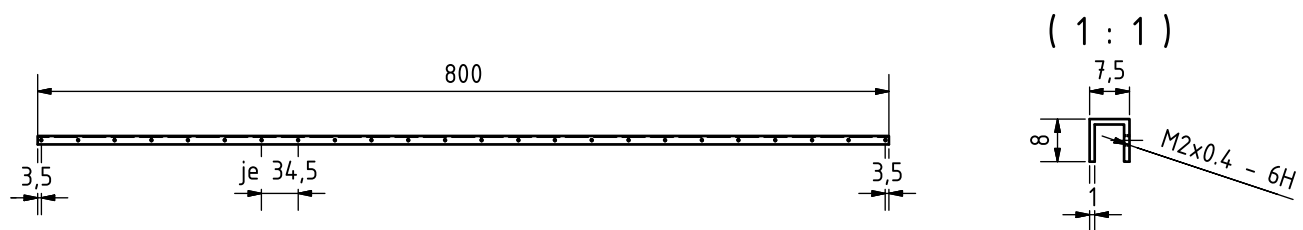
VON EINEM AUTODESK-SCHULUNGSPRODUKT ERSTELLT

VON EINEM AUTODESK-SCHULUNGSPRODUKT ERSTELLT

VON EINEM AUTODESK-SCHULUNGSPRODUKT ERSTELLT

VON EINEM AUTODESK-SCHULUNGSPRODUKT ERSTELLT

VON EINEM AUTODESK-SCHULUNGSPRODUKT ERSTELLT



				Maßstab 1:5	
				Aluminium t=1	
				Datum	Name
			Gezeichnet	18.04.2013	Beyrich
			Kontrolliert		
			Norm		
				HV-Halterprofil	
				1	
				A4	
Status	Änderungen	Datum	Name	Nebelkammer	

VON EINEM AUTODESK-SCHULUNGSPRODUKT ERSTELLT

Eidesstaatliche Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich meine Diplomarbeit mit dem Thema

Bau einer kontinuierlichen Nebelkammer und Einsatz im Demonstrationsversuch

selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Hannover, den 24. Juni 2013

ANTONIA BEYRICH

