

Exposé

Das Thema der nachfolgenden Besonderen Lernleistung ist die Diffusionsnebelkammer. Diese gehört zu den ältesten Teilchendetektoren zum Nachweis von Elementarteilchen und radioaktiver Strahlung und wird auch heute noch im Schulunterricht verwendet. Dabei wird aber auch häufig auf die billigere Version der Expansionsnebelkammer zurückgegriffen.

Das Ziel der Arbeit ist es deshalb, die Diffusionsnebelkammer genauer zu untersuchen und verschiedene Parameter im Aufbau zu verändern, damit diese für den Schulunterricht optimiert werden kann.

Die Diffusionsnebelkammer funktioniert über eine Temperaturdifferenz, die zwischen dem oberen und dem unteren Ende einer Plastikbox erzeugt wird. Der in der Plastikbox befindliche Regen aus Alkohol erzeugt dabei einen instabilen Nebel, in dem Teilchenspuren zu sehen sind. Diese können aus radioaktiver Strahlung und natürlicher kosmischer Strahlung stammen, aber auch aus radioaktiven Quellen. Die häufigsten beobachteten Spuren sind Alpha-Teilchen, Elektronen und Myonen, aber ebenso können die Spuren von Mesonen wie dem Pion oder dem Kaon oder Baryonen wie dem Proton verursacht werden. Anhand von Länge und Form der Spuren können diese begrenzt zugeordnet werden.

Im Verlauf der Arbeit wird nachgewiesen, dass die kostenintensive Kühlung mit Trockeneis auch durch Kühlpads und heißes Wasser ersetzt werden kann. Weiterhin wird nachgewiesen, dass als Alkohol nicht nur Isopropanol, sondern auch andere Alkanole und Mischungen wie Brennspiritus verwendet werden können. Die Untersuchung von Flüssigkeitsmengen ergibt, dass die Funktion nur bedingt von dieser abhängig ist. Hingegen fördern große Nebelkammern die gute Erkennbarkeit von Spuren.

Verschiedene radioaktive Präparate werden in die Nebelkammer eingesetzt und ihr Einfluss auf die Ergebnisse genau untersucht.

Der Bau der Nebelkammer und die Veränderung der Parameter beim Bau werden dokumentiert und die Ergebnisse zu verbesserten Bauanleitungen zusammengefasst.

Marie-Curie-Gymnasium Dresden

Leutewitzer Ring 141

01169 Dresden-Gorbitz

KOMPLEXE LEISTUNG

(BESONDERE LERNLEISTUNG)

Thema: Optimierung der Diffusionsnebelkammer zur Benutzung im Schulunterricht

Fach: Physik

Verfasser: Rowina Caspary

Kurs: 12E

Begleitler: Manolis John; Frank Lodel

Außerschulische Betreuer: Thomas Wester (TU Dresden); Sarah Aretz (CERN)

Abgabetermin: 20.12.2013

Vorwort

Bei einem Praktikum innerhalb des „Netzwerk Teilchenwelt“ in der zehnten Klasse habe ich zum ersten Mal die Physik der Elementarteilchen näher kennengelernt. Damals habe ich an einer Masterclass teilgenommen und damit die Möglichkeit erhalten, innerhalb der Angebote des „Netzwerk Teilchenwelt“ für Schüler aufzusteigen. Im Jahr 2012 bin ich dann für drei Tage nach Genf an den CERN gefahren und habe dort noch mehr über Kern- und Elementarteilchenphysik gelernt. Da mich das Thema faszinierte, beschloss ich, die Facharbeit zum Thema „Nebelkammer“ zu erstellen und dies in einer BELL zu vertiefen. Im Zuge der Arbeit bin ich schließlich 2013 ein zweites Mal für zwei Wochen an den CERN gefahren und habe dort selbstständig geforscht.

Die Nebelkammer ist ein sehr interessantes und beeindruckendes Experiment in der Teilchenphysik, besonders die Diffusionsnebelkammer. Dort können selbst Laien die Spuren von Kleinstteilchen problemlos sehen und sich dadurch von ihrer Existenz überzeugen. Es ist interessant, die Reaktionen von anderen Menschen zu sehen, die, selbst, wenn sie kein Interesse an Physik haben, interessiert in eine Nebelkammer schauen und vollkommen beeindruckt von dem sind, was sie darin sehen.

Dafür, dass sie mir geholfen haben, diese BELL umzusetzen und hunderte von Nebelkammern auf- und abzubauen, möchte ich folgenden Personen und Institutionen danken: Dem Netzwerk Teilchenwelt, das mir die Möglichkeit gegeben hat, mit der Elementarteilchenphysik in Kontakt zu treten und an den CERN zu fahren, sowie meinen vier Betreuern: Sarah Aretz am CERN, Thomas Wester am Institut für Kern- und Teilchenphysik der Technischen Universität Dresden und Manolis John und Frank Lodel am Marie-Curie-Gymnasium Dresden.

Ich hoffe, dass meine Arbeit dazu beiträgt, das Verständnis für die Elementarteilchenphysik in der Schule zu erweitern und vielen Schülern die Möglichkeit zu geben, Nebelkammern zu bauen um Teilchenspuren zu beobachten.

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Allgemeine Funktionsweise von Nebelkammern	3
2.1	Funktionsprinzip	3
2.2	Nachzuweisende Strahlung.....	4
3	Radioaktive und Kosmische Strahlung und ihre Spuren in der Nebelkammer.....	5
3.1	Das Standardmodell der Teilchenphysik.....	5
3.1.1	Bosonen	6
3.1.2	Fermionen.....	7
3.2	Zusammengesetzte Teilchen.....	9
3.2.1	Hadronen	9
3.2.2	Atome und Elemente	9
3.3	Natürliche Radioaktivität.....	10
3.4	Radioaktive Strahlung am Beispiel von Uran	12
3.5	Natürliche kosmische Strahlung am Beispiel des Myons und des Pions	13
3.6	Unterscheidung verschiedener Spuren in der Nebelkammer	13
4	Planung des Versuches.....	16
4.1	Zu untersuchende Parameter	16
4.1.1	Vergleichbare Aspekte	16
4.1.2	Untersuchung der Kühlung	16
4.1.3	Einsatz verschiedener Gase und Dämpfe	18
4.1.4	Untersuchung der Füllmengen der Flüssigkeit.....	19
4.1.5	Untersuchung des Kammervolumens.....	19
4.1.6	Einsatz radioaktiver Präparate.....	20
4.1.7	Einsatz von Hindernissen zur Unterscheidung der Spuren	21
4.2	Weitere Versuche	21
4.2.1	Allgemeine Vorzugsrichtungen von kosmischer Strahlung.....	21

4.2.2	Häufigkeit von kosmischer Strahlung	21
4.3	Genutzte Nebelkammern	22
4.4	Genutzte weitere Materialien.....	22
4.5	Vorgehen	23
5	Durchführung des Versuches	24
5.1	Allgemeine Erkenntnisse zum Bau.....	24
5.1.1	Aufbau der Nebelkammern	24
5.1.2	Beobachtungen	26
5.1.3	Fehlerquellen.....	27
5.2	Ergebnisse zur Untersuchung der Parameter.....	28
5.2.1	Untersuchung der Kühlung	28
5.2.2	Einsatz verschiedener Gase und Dämpfe	29
5.2.3	Untersuchung hinsichtlich der Füllmengen.....	30
5.2.4	Untersuchung von Kammervolumina	30
5.2.5	Einfluss radioaktiver Präparate	31
5.2.6	Unterscheidung der Spuren durch Hindernisse.....	32
5.3	Untersuchung kosmischer Strahlung	33
5.3.1	Untersuchung hinsichtlich der Häufung kosmischer Strahlung.....	33
5.3.2	Untersuchung hinsichtlich der Vorzugsrichtung von kosmischer Strahlung....	34
5.4	Schlussfolgerung	35
6	Mögliche Schüleraufgaben.....	36
6.1	Bauanleitung mit Trockeneis.....	36
6.2	Bauanleitung - Nebelkammer mit Kühlkompressen	40
7	Zusammenfassung.....	43
8	Anhang	45
9	Literaturverzeichnis.....	69
10	Selbstständigkeitserklärung.....	73

1 Einleitung

Die Nebelkammer ist einer der ältesten Detektoren zum Nachweis von Teilchen. 1911 gelang es C.T.R. Wilson erstmals mit einer einfachen Expansionsnebelkammer, radioaktive Strahlung nachzuweisen.¹ 1931 wurde in einer Nebelkammer das Positron entdeckt und 1937 das Myon. Mit dieser vergleichsweise einfachen Apparatur lassen sich Spuren von Folgeprodukten der Elementarteilchen nachweisen. Natürlich gibt es heutzutage weitaus präzisere Teilchendetektoren, die mit viel höherer Genauigkeit Teilchen nachweisen können. Ein Beispiel hierfür ist der ATLAS-Detektor am LHC am CERN in Genf, mit dem 2012 der Nachweis des Higgs-Teilchens gelungen ist.² Was die Nebelkammer nach wie vor interessant macht, ist ihre Einfachheit. Laut sächsischem Lehrplan im Leistungskurs Physik soll sie im Unterricht explizit gelehrt werden³. In der neunten Klasse, im Wahlpflichtbereich eins "Natürliche Radioaktivität"⁴ kann die Nebelkammer zur besseren Veranschaulichung genutzt werden.

Es gibt allgemein zwei Typen von Nebelkammern. Die von Wilson entwickelte Nebelkammer war eine Expansionsnebelkammer. Bei dieser wurde durch eine plötzliche Vergrößerung des Volumens eine Übersättigung der enthaltenen Flüssigkeit erzeugt. Bei der von Langsdorf entwickelten Diffusionsnebelkammer, die auf der Basis der Wilson'schen Nebelkammer entwickelt wurde, wird diese Übersättigung durch ein starkes Temperaturgefälle in der Nebelkammer verursacht.⁵ Der Vorteil ist dabei, dass sie "kontinuierlich für einfallende Teilchen sensitiv ist".⁶ Das heißt, dass sie mehrere Stunden in Betrieb sein kann, während bei der Expansionsnebelkammer der Übersättigungszustand nur für wenige Sekunden aufrechterhalten werden kann. Dafür sind in der Expansionskammer die Spuren größer.⁷

Diese Spuren entstehen überwiegend durch kosmische und radioaktive Strahlung, auf die in den nächsten Kapiteln genauer eingegangen wird.

Um gute Ergebnisse im Unterricht zu erzielen, empfiehlt es sich deshalb, den Schülern beide Nebelkammertypen vorzustellen. Dabei ergibt sich bei Diffusionsnebelkammern jedoch häufig das Problem, dass nicht vorhersehbar ist, wie viele Spuren zu sehen sein werden.

¹ Vgl. Bothe (1940), S.6

² Vgl. www.atlas.ch

³ Vgl. www.sachsen-macht-schule.de

⁴ www.sachsen-macht-schule.de

⁵ Vgl. Bothe (1940), S.15

⁶ Bothe (1940), S.15

⁷ Vgl. Allkofer (1971), S.168

Weiterhin stehen für die Demonstration im Schulunterricht meist die klassisch verwendeten Materialien Isopropanol und Trockeneis nicht zur Verfügung. Die relativ hohe Aufwand und die Kosten schrecken oft von der Durchführung von Experimenten mit einer Diffusionsnebelkammer im Schulunterricht ab. Ziel dieser komplexen Leistung ist es deshalb, die optimalen Bedingungen zum Bau einer Diffusionsnebelkammer zu finden, um die Erfolgsquote beim Experimentieren zu erhöhen und die Kosten zu senken.

2 Allgemeine Funktionsweise von Nebelkammern

2.1 Funktionsprinzip

Das Grundprinzip der von C.T.R. Wilson entwickelten Expansionskammer und der daraus von Langsdorf entwickelten Diffusionskammer ist das gleiche. In einem abgeschlossenen Raum wird Nebel in einem Gas-Dampf-Gemisch erzeugt, in dem die nachzuweisenden Teilchen sichtbare Reaktionen auslösen. Damit sich Dampf in der Kammer bildet, muss ein Zustand der Übersättigung geschaffen werden, welcher in beiden Kammer auf verschiedene Art und Weise herbeigeführt wird. In der Wilson'schen Kammer expandiert das Volumen der Kammer plötzlich, zum Beispiel durch das Herausziehen eines Stempels. Durch das größere Volumen entsteht ein Unterdruck und die Flüssigkeit wird zu Dampf. Bei einer Diffusionskammer lässt man einen Stoff von „einer warmen nach einer kalten Fläche diffundieren“⁸. Die in Abbildung 1 dargestellte Temperaturdifferenz bewirkt dabei eine dauerhafte Dampfbildung in der Mitte der Kammer. Das lässt sich dadurch erklären, dass die warme Luft am oberen Ende der Kammer wesentlich mehr Flüssigkeit aufnehmen kann, als die kalte weiter unten. Dabei ist die Temperaturdifferenz von rund 80 bis 100 Kelvin der wichtigste Faktor für die richtige Funktion. Es entsteht am unteren Ende der Kammer also ein Zustand der Übersättigung nach dem Herabsinken der Flüssigkeit.

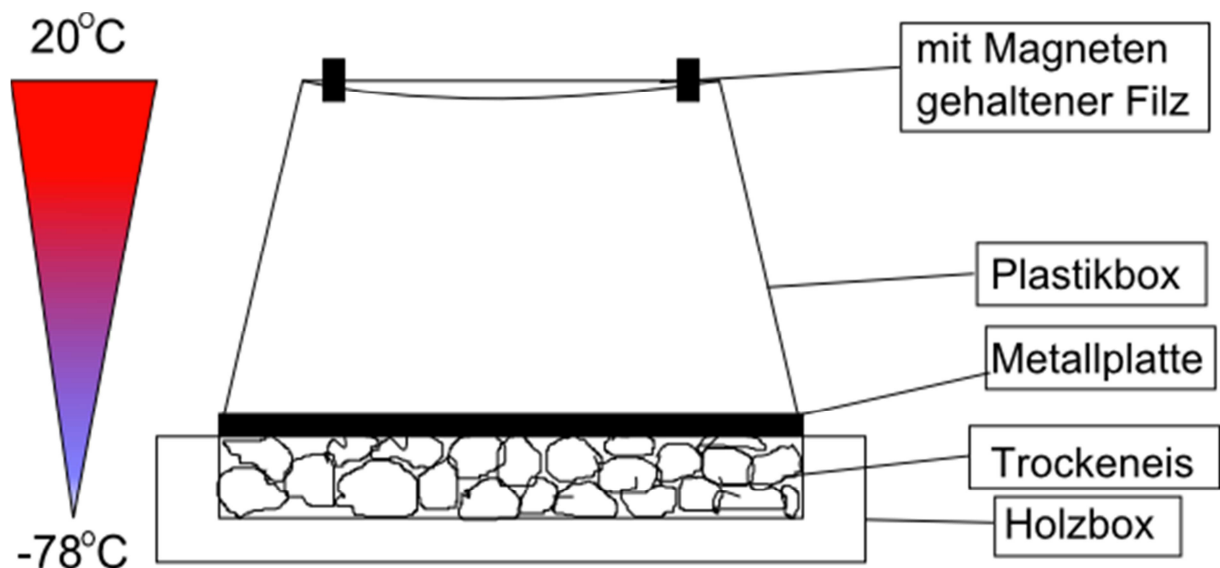


Abbildung 1 Temperaturdifferenz zwischen Boden und Decke der Kammer

⁸ Bothe (1940), S.15

Der durch die Übersättigung erzeugte Nebel in der Kammer ist instabil. Trifft jetzt ein geladenes Kleinstteilchen auf einen der Nebeltropfen, so entfernt er die Elektronen von den „Nebelatomen“ und lässt es zu einem „geladene[n] Kondensationskeim“⁹ werden. Dadurch erhöht sich die Anziehungskraft zwischen den Molekülen und sie werden flüssig. Ein fliegendes Teilchen ionisiert eine ganze Reihe solcher Atome. Diese bilden dann zusammen eine flüssige Spur, die lang und dick genug ist, um mit bloßem Auge erkennbar zu sein.

2.2 Nachzuweisende Strahlung

Die ersten Teilchen, deren Spuren mit einer Nebelkammer entdeckt wurden, waren Heliumkerne, die beim Alpha-Zerfall freigesetzt werden und Elektronen, die bei der Beta-Strahlung entstanden sind. Mit einer Nebelkammer wurden aber auch Neutronen, Pionen und Gamma-Strahlung nachgewiesen sowie das Positron und das Myon entdeckt. Die bei der Alpha-Strahlung freigesetzten zweifach positiv geladenen Heliumkerne sind dabei zusammen mit Baryonen wie Protonen oder Pionen die einzigen möglichen ionisierenden Teilchen, welche nicht selbst Elementarteilchen sind. Neutronen, welche ebenfalls keine Elementarteilchen sind, sind selbst nicht nachweisbar, weil sie elektrisch neutral sind. Im Folgenden wird ein Überblick über die Elementarteilchen gegeben, sowie die möglicherweise zu detektierende Strahlung und ihre Herkunft beschrieben.

⁹ Allkofer (1971), S. 157

3 Radioaktive und Kosmische Strahlung und ihre Spuren in der Nebelkammer

3.1 Das Standardmodell der Teilchenphysik

Die Idee, dass es kleinste, nicht mehr teilbare Teilchen gäbe, stammt schon aus dem fünften Jahrhundert vor Christus. Der sich daraus ergebende Begriff „Atom“, welcher von dem griechischen Wort „átomos – das Unteilbare“ kommt, wurde von Demokrit von Abdera, Thrakien (470 – 380v.Chr.) geprägt.¹⁰ Erst mehr als zweitausend Jahre später postulierte John Dalton (1766-1844)¹¹ deren Existenz tatsächlich. Er ging von einer Modellannahme aus, die aus der Erforschung der determinierten Anzahl von Elementen hervorging.¹² Diese Annahme konnte später zum Beispiel durch Rastertunnel-Mikroskope bestätigt werden. Nicht lange danach konnte auch die Vorstellung widerlegt werden, dass Atome tatsächlich unteilbar sind. In den letzten zweihundert Jahren wurden zahlreiche Teilchen entdeckt, die nach heutigem Wissen tatsächlich als Unteilbare gelten. Diese sind im Standardmodell der Teilchenphysik zusammengefasst.

Das Standardmodell ordnet die Teilchen nach verschiedenen Eigenschaften. Die erste Einordnung erfolgt dabei nach dem Spin.¹³ Sichtbare Materie setzt sich aus den Fermionen zusammen, die einen halbzahligen Spin haben. Bosonen sind für Wechselwirkungen zwischen ihnen zuständig. Diese haben einen ganzzahligen Spin.

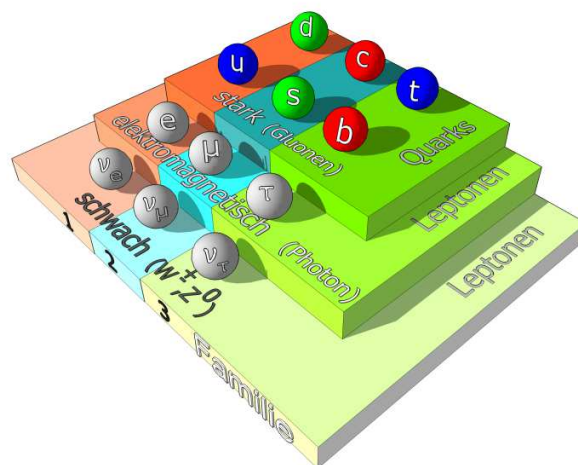


Abbildung 2: Das Standardmodell der Teilchenphysik. Die Schichten stellen die Wechselwirkungen dar, an denen die Fermionen teilnehmen. Quelle: <http://psi.physik.kit.edu/img/Teilchen.png>

¹⁰ Chapple (2011), S.4

¹¹ Chapple (2011), S.6

¹² http://lehrerfortbildung-bw.de/faecher/chemie/gym/fb2/modul2/info/61_dalton_atommodell_ab06.pdf

¹³ Vgl. Jekel (2011), S. 3

3.1.1 Bosonen

Das Standardmodell der Teilchenphysik beschreibt drei grundlegende Wechselwirkungen. Diese sind die elektromagnetische, die schwache und die starke Wechselwirkung.

Die elektromagnetische Wechselwirkung wirkt auf alle Teilchen, die eine elektrische Ladung haben. Das trifft auf alle Elementarteilchen außer auf Neutrinos zu. Das zuständige Boson wird Photon, Quant oder Lichtteilchen genannt. Es ist masselos und bewegt sich mit Lichtgeschwindigkeit. Das Photon sorgt für die Anziehung verschieden geladener Teilchen. Damit ist die elektromagnetische Wechselwirkung für den größten Teil der klassischen Physik zuständig.

Die schwache Wechselwirkung wirkt auf alle Elementarteilchen, da sie eine schwache Ladung haben. Ihre Austauschteilchen sind die W^+ , W^- und Z-Bosonen. Die schwache Wechselwirkung ist unter anderem Ursache für die aus Kernspaltung gewonnene Energie. Die elektromagnetische und die schwache Wechselwirkung können zu der elektroschwachen Wechselwirkung zusammengefasst werden.

Die starke Wechselwirkung wirkt nur auf Teilchen, die eine Farbladung haben, also Quarks. Das Gluon, das Austauschteilchen der starken Wechselwirkung, sorgt für den Austausch dieser Farbladungen unter den Quarks und ist für den Zusammenhalt von Hadronen zuständig. Die starke Wechselwirkung ist so stark, dass es noch nie gelungen ist, Quarks über einen längeren Zeitraum zu trennen. Dieser Zustand war nur kurz nach dem Urknall möglich. Im ALICE-Experiment am LHC wird versucht, diesen Zustand zu reproduzieren.

Die Gravitation, welche als vierte Wechselwirkung angesehen werden kann, wird meist im Standardmodell nicht betrachtet. Zwar wirkt sie auf alle Teilchen, ist aber nicht relevant, da sie unglaublich schwach im Vergleich zu den anderen Wechselwirkungen ist. Zum Beispiel ist die Coulomb-Kraft 2×10^{39} mal so stark wie die Gravitation¹⁴. Ihr Nachweis, wie auch der Nachweis des möglicherweise für sie zuständigen Gravitons, ist auf Elementarteilchenebene noch nicht gelungen.

Außer den W- und Z-Bosonen, dem Photon und dem Gluon gibt es noch das 2012 entdeckte Higgs-Boson. Dieses ist zuständig für die Masse der Teilchen.

Die wichtigsten Eigenschaften der Bosonen sind in Tabelle 1 verzeichnet.

¹⁴ http://iktp.tu-dresden.de/IKTP/pub/13/MK_masterclasses_Dresden_Lehrer13_neu.pdf

Tabelle 1: Übersicht über die wichtigsten Eigenschaften aller bekannten Elementarteilchen

¹⁵	Spin	elektrische Ladung	Ruhemasse (GeV/c ²)	Lebensdauer (s)
Up-Quark	1/2	+2/3	0,003	∞
Down-Quark	1/2	-1/3	0,006	100
Charm-Quark	1/2	+2/3	1,3	10 ⁻¹²
Strange-Quark	1/2	-1/3	0,1	5×10 ⁻⁸
Top-Quark	1/2	+2/3	175	5×10 ⁻²⁵
Bottom-Quark	1/2	-1/3	4,3	2×10 ⁻¹²
	1/2			
Elektron	1/2	-1	0,000511	∞
Elektron-Neutrino	1/2	0	<1×10 ⁻⁸	∞
Myon	1/2	-1	0,106	2,1994×10 ⁻⁶ s
Myon-Neutrino	1/2	0	<0,0002	∞
Tauon	1/2	-1	1,7771	2,90×10 ⁻¹³ s
Tauon-Neutrino	1/2	0	<0,02	∞
W⁺-Boson	1	+1	80,4	3×10 ⁻²⁵
W⁻-Boson	1	-1	80,4	3×10 ⁻²⁵
Z-Boson	1	0	91,187	3×10 ⁻²⁵
Photon	1	0	0	∞
Gluon	1	0	0	∞
Higgs¹⁶	0	0	125,5	2×10 ⁻²²

3.1.2 Fermionen

Die Fermionen werden in Leptonen und Quarks unterteilt. Diese werden über die Wechselwirkungen, an denen sie teilnehmen, oder die Ladungen, die sie haben, unterschieden.

Geladene Leptonen haben außer dem Spin und der schwachen Ladung noch die elektrische Ladung. Die geladenen Leptonen nehmen an der elektroschwachen Wechselwirkung teil, welche die elektromagnetische und die schwache Wechselwirkung zusammenfasst. Die ungeladenen Leptonen nehmen hingegen nur an der schwachen Wechselwirkung teil. Die

¹⁵ Spin, el. Ladung, Ruhemasse (außer Higgs): Barnett (2000), Umschlag innen

Halbwertszeit Leptonen: Chapple (2011), S. 16, 19, 20

Halbwertszeit Top-Quark: Quadt (2006), S. 848

Andere Halbwertszeiten: <http://kworkquark.desy.de/lexikon/index/1/index.html>

¹⁶ Vorläufig - Quelle:

http://www.teilchenwelt.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/Netzwerk_Teilchenwelt/Material_Lehrkraefte/Steckbriefe_lang.pdf; http://erlangen.physicsmasterclasses.org/sm_et/sm_et_07.html

Leptonen werden nach ihrer Ruhemasse in drei Familien unterteilt. In der ersten Familie befinden sich das einfach negativ geladene Elektron, welches eine Ruhemasse von $9,1 \cdot 10^{-31}$ Kilogramm hat, sowie das elektrisch neutrale Elektronneutrino, welches kaum nachweisbar ist und eine sehr geringe Masse hat, die noch nicht genau bestimmt werden konnte.

In der zweiten Familie befinden sich das Myon und das Myonneutrino. Das Myon hat dieselben Eigenschaften wie das Elektron, hat aber eine rund 206mal größere Ruhemasse¹⁷. Deshalb zerfällt es mit einer Lebensdauer von $2,197 \cdot 10^{-6}$ s in das Elektron. In der dritten Familie befinden sich Tauon und Tauonneutrino. Das Tauon hat dieselben Eigenschaften wie Myon und Elektron und hat eine Ruhemasse von rund $1,777 \text{ GeV}/c^2$. Das Tauon ist sehr kurzlebig, da es wie das Myon nach kurzer Zeit in ein leichteres Lepton derselben Ladung sowie sein Neutrino und das Antineutrino des Zerfallsproduktes zerfällt. Tauonen haben eine Lebensdauer von $2,91 \cdot 10^{-13}$ s.

Lebensdauern und Ruhemassen von Leptonen sind in Tabelle 1 verzeichnet.

Quarks haben außer dem Spin, der schwachen Ladung und der elektrischen Ladung noch die sogenannte Farbladung oder starke Ladung. Deshalb nehmen sie nicht nur an der elektromagnetischen, sondern auch an der starken Wechselwirkung teil. Auch sie werden in drei Familien unterteilt. In der ersten Familie befinden sich das Up- und das Down-Quark, in der zweiten Familie das Charm- und das Strange-Quark und in der dritten das Top- und das Bottom-Quark. Ladungen und Lebensdauern der verschiedenen Quarks sind in Tabelle 1 verzeichnet. Dabei sind die angegebenen Lebensdauern hauptsächlich theoretische Angaben, da die meisten Quarks in der Natur nicht im ungebundenen Zustand vorkommt und ihre durchschnittliche Lebensdauer daher von der jeweiligen Bindung abhängig ist. Eine Ausnahme stellt das Top-Quark dar, welches zu kurzlebig ist, um eine Bindung einzugehen. Wie die Leptonen zerfallen auch schwerere Quarks in leichtere, wobei zusätzlich andere Elementarteilchen entstehen können. Das einzige stabile Quark ist das Up-Quark. Quarks kommen normalerweise nicht alleine vor, da die starke Wechselwirkung sie dazu zwingt, Hadronen zu bilden. Auf diese wird im Abschnitt „Hadronen“ näher eingegangen.

Zu allen Fermionen existieren Antiteilchen, die in vielen Eigenschaften übereinstimmen, aber die genau entgegengesetzte elektrische Ladung haben. Stoßen ein Teilchen und sein Antiteilchen aufeinander, so wird ihre gesamte Masse in Energie umgewandelt.

¹⁷ Vgl. Weinberg (1984), S. 131

3.2 Zusammengesetzte Teilchen

3.2.1 Hadronen

Quarks kommen in der Natur nicht ungebunden vor. Sie bilden zusammengesetzte Hadronen. Es gibt zwei Arten von Hadronen. Ein Quark und ein Antiquark bilden zusammen Mesonen, die dann einen ganzzahligen Spin haben. Das Quark und das Antiquark sind immer so geladen, dass die Ladung von Mesonen 0; 1 oder -1 ist. Beispiele für Mesonen sind das π -Meson oder das Kaon.

Baryonen werden von drei Quarks gebildet und haben einen halbzahligen Spin. Die häufigsten und bekanntesten Baryonen sind das Proton und das Neutron. Das Proton wird von zwei Up- und einem Down-Quark gebildet und ist somit einfach positiv geladen, während das elektrisch neutrale Neutron aus zwei Down- und einem Up-Quark gebildet wird.

3.2.2 Atome und Elemente

Die sichtbare, stabile Materie besteht aus Atomen. Der Atomkern setzt sich aus Protonen und Neutronen zusammen. Die Elektronen befinden sich in der Atomhülle. Die Anzahl der Elektronen entspricht bei Atomen immer der Anzahl der Protonen, sodass sie elektrisch neutral sind. Ist dies nicht der Fall, so spricht man von Ionen.

Natürlich auf der Erde vorkommende Atome können 1 bis 92 Protonen haben. Um sie besser zu unterscheiden, wird jedem Atom eine Ordnungszahl zugeteilt, die dieser Protonenanzahl entspricht.

Wenn die Schrödinger-Gleichung auf die in Atomen gebundenen Elektronen angewandt wird, ergibt sich daraus ein Schalenmodell.¹⁸ Dieses sagt aus, dass sich die Elektronen in der Hülle auf so genannten „Schalen“ befinden, wobei im Normalzustand jedes Elektron einer bestimmten Schale zugeteilt ist. Die Elemente werden nach der Anzahl der Schalen, die in einem Atom besetzt sind, in Perioden unterteilt. Die Periode, in der ein Element steht, entspricht der Anzahl der Schalen, die bei diesem Element besetzt sind. Die einzige Ausnahme ist Palladium, bei dem die fünfte Schale nicht besetzt ist, obwohl es in der fünften Periode steht. Die Anzahl der Protonen bzw. Elektronen teilt die Elemente bestimmten Haupt- und Nebengruppen zu. So kann man die Elemente im Periodensystem der Elemente übersichtlich darstellen. Das Periodensystem der Elemente ist in Anhang 3 dargestellt.

¹⁸ Vgl. Belck-Neuhaus (2010, 2013), S.71

Der Kern eines Atoms enthält nicht nur Protonen, sondern auch Neutronen. Diese wiegen jeweils ungefähr 1 u. Dieses Atomgewicht von 1 u entspricht der Masse eines Wasserstoffatoms, wird aber als ein zwölftel der Masse eines Kohlenstoffatoms des Isotopes ^{12}C definiert, da sich diese leichter messen lässt. Die Masse eines Elementes kann mit demselben numerischen Wert auch in Gramm angegeben werden, wenn man sich auf ein Mol dieses Stoffes bezieht. Die Stoffmenge „ein Mol“ enthält eine festgelegte Zahl von Molekülen, bzw. Atomen eines Elementes, die die Avogadrosche Zahl¹⁹ genannt wird. Sie entspricht der Anzahl von Kohlenstoffatomen, welche genau 12 Gramm wiegen. Das sind etwa $6 \cdot 10^{23}$ Teilchen.²⁰

Die Anzahl der Neutronen beeinflusst zwar die Ruhemasse des Atoms, aber nicht das Element, dem es angehört. Deshalb werden Atome eines Elementes nach der Neutronenanzahl in Isotopen unterschieden. Die Isotope von Elementen können aus Nuklidkarten abgelesen werden.

Nicht alle Isotope eines Elementes sind stabil. Instabile Isotope zerfallen unter Aussendung von radioaktiver Strahlung.

3.3 Natürliche Radioaktivität

Es gibt drei Arten von radioaktiver Strahlung: Die Alpha, die Beta- und die Gamma-Strahlung, wobei sich Beta-Strahlung in zwei Arten unterteilen lässt.

Gamma-Strahlung entsteht, wenn ein Atomkern von einem angeregten Zustand in einen niedrigeren Zustand, meist den Grundzustand²¹ übergeht. Die freigewordene Energie wird in Form eines Photons abgestrahlt. Diese Gamma-Strahlung ist die am weitesten reichende der drei Strahlungsarten und kann sogar Blei durchdringen. Photonen sind masselos und bewegen sich im leeren Raum mit Lichtgeschwindigkeit. Sie lösen häufiger Elektronen aus, deren elektrische Ladung sie zu einem Kondensationskeim werden lässt.

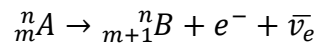
Beta⁻-Strahlung tritt bei Neutronen auf, die sich nicht in Verbindung mit Protonen befinden oder in Atomen, bei denen das Verhältnis von Neutronen zu Protonen zu groß ist. Das ist insbesondere bei schwereren Isotopen der Elemente der Fall. Bei der Beta⁻-Strahlung wandelt sich ein Neutron in ein Proton, Elektron und ein Antineutrino um, wobei das Elektron und das

¹⁹ Vgl. Weinberg (1984), S. 65

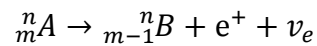
²⁰ Vgl. Weinberg (1984), S. 174

²¹ Vgl. Ludwig (1995), S.101

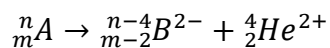
Antineutrino nach außen abgestrahlt werden. Das Element hat dann eine um eins höhere Ordnungszahl.



Beta⁺-Strahlung tritt seltener bei angeregten Protonen auf, welche sich unter Abstrahlung eines Positrons und eines Neutrinos in ein Neutron umwandeln. Das entstehende Element besitzt eine um eins niedrigere Ordnungszahl, die Massezahl bleibt aber unverändert.



Alpha-Strahlung tritt hauptsächlich bei Isotopen schwererer Elemente auf, wenn diese durch einen Mangel an Neutronen im Verhältnis zu der Protonenanzahl instabil sind oder einen Überschuss an Energie haben. Bei der Alpha-Strahlung wird vom radioaktiven Mutterkern ein Helium-Kern aus zwei Protonen und zwei Neutronen ausgesandt. Der zurückbleibende Tochterkern enthält zwei Protonen und zwei Neutronen weniger und ist damit meist stabiler als der Mutterkern.



Natürlich vorkommende radioaktive Elemente sind Technetium, Polonium, Astat, Radon, Francium, Radium, Actinium, Thorium, Protactinium und Uran.²² Dabei kommt Technetium allerdings sehr selten und in geringen Mengen vor. Alle schwereren Elemente sind ebenfalls radioaktiv, müssen aber künstlich erzeugt werden. Radioaktive Elemente der Alpha- und Beta-Strahlung haben meistens sehr schwere Kerne, was daran liegt, dass

„die innere Energie pro Kernteilchen bei den mittelschweren Kernen am geringsten ist, jedoch für leichtere und schwerere Kerne größer wird. [...] Gewöhnliche Isotope mittelschwerer Kerne besitzen keinen Überschuss an innerer Energie und sind deshalb nicht radioaktiv. Auch die gewöhnlichen Isotope leichter Kerne können nicht radioaktiv zerfallen, denn die möglichen Zerfallsprodukte müßten dann einen noch größeren Überschuss an innerer Energie haben. Aber schwere Kerne verfügen über einen größeren Überschuss an innerer Energie als die leichteren Kerne, in die sie zerfallen können. Daher kommt es hier zum Zerfall und es wird Energie frei.“²³

Viele Isotope leichter Elemente sind ebenfalls radioaktiv, allerdings sind sie selten, da sie nur eine sehr kurze Halbwertszeit haben.

Radioaktivität kommt natürlich auf der Erde vor. Häufig kommt zum Beispiel Radon in verschiedenen Gesteinen vor, sodass der Mensch täglich mit geringen Mengen von Radioaktivität in Berührung kommt. Schon die geringe Menge von Radioaktivität in der Luft

²² Vgl. Ludwig (1995), Umschlag innen

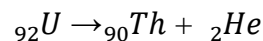
²³ Weinberg (1984), S. 111

kann zu Spuren in einer Nebelkammer führen, auch wenn diese durch eine natürliche Quelle – das heißt, radioaktives Gestein - verstärkt beobachtet und gedeutet werden können.

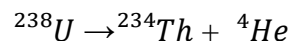
3.4 Radioaktive Strahlung am Beispiel von Uran

Uran ist das häufigste Element, bei dem alle Isotope radioaktiv sind. Die Isotope U-238 und U-235 des Urans sind dabei die aktivsten Alpha-Strahler. Da ein Uranatom immer 92 Protonen enthält, heißt das, dass ein 238 u schweres Uran-Isotop 146 Neutronen enthält, ein 235 u schweres Isotop 143 Neutronen. Aufgrund der stark variierenden Anzahl von Neutronen im Kern eines Uranatoms hat das Uran sehr viele Isotope, von denen diese beiden am häufigsten vorkommen. Bei der Alpha-Strahlung zerfallen sie zunächst zu Thorium, welches am Beta-Zerfall teilnimmt. Die Teilchen zerfallen weiter in Alpha- und Beta-Zerfall. Das Endprodukt ist stabiles Blei. Die verschiedenen Zerfallsketten für die beiden Uran-Isotope können in Anhang 2 abgelesen werden. Die Dauer des Zerfalls eines Isotops wird von der Halbwertszeit beschrieben. Die Halbwertszeit von ^{238}U beträgt beispielsweise 4,5 Milliarden Jahre, das heißt, nach 4,5 Milliarden Jahren ist die Hälfte des vorhandenen Urans zu Thorium zerfallen.

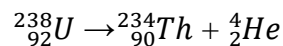
Uran zerfällt über Alpha-Strahlung zu Thorium:



Ein Urankern mit 92 Protonen zerfällt zu einem Thoriumkern mit 90 Protonen und einem Heliumkern mit 2 Protonen. Das im hochgestellten Index angegebene Atomgewicht berücksichtigt die Protonen und die Neutronen und reduziert sich also für Thorium um vier:



Ein Uran-Isotop 238 zerfällt also zu dem Thorium-Isotop 234 und dem Helium-Isotop 4. Das Uranatom hat somit eine Atommasse von 238, Thorium von 234 und Helium von 4.



Bei dem Zerfall ist das Nebenprodukt ein Heliumkern. Dieser kann in der Nebelkammer eine sichtbare Spur von Kondensationskeimen hinterlassen. Die Spur ist meistens sehr gerade und kurz, da ein Heliumkern häufig gegen Elektronen stößt und dadurch seine Energie verliert, sonst aber kaum abgelenkt wird.

3.5 Natürliche kosmische Strahlung am Beispiel des Myons und des Pions

Natürliche kosmische Strahlung oder kosmische Höhenstrahlung besteht aus Teilchen, die bei Kernzerfällen in Sternen und anderen selbst leuchtenden Himmelskörpern entstehen. Diese kollidieren häufig mit Atmosphäre-Teilchen der Erdatmosphäre. Dabei entstehen Teilchen, die sekundäre kosmische Strahlung genannt werden. In den Sternen finden ständig zahlreiche Kernreaktionen statt, bei denen neue Teilchen entstehen. Hauptsächlich entstehende Teilchen sind Hadronen wie Neutronen, Protonen und Mesonen. Ein Beispiel dafür ist das Pi-Meson oder Pion. Dieses entsteht, wenn ein Proton mit sehr hoher Energie auf „ein Proton, das in einem Target ruht“²⁴ trifft. In dem Fall zerfällt eines der Protonen in ein Neutron und ein Pion. Dabei ist die Annahme falsch, dass das Proton aus dem Neutron und dem Pion besteht. Vielmehr wurde seine gesamte Masse in Energie umgewandelt, die sich anschließend in Form des Neutrons und des Pions materialisiert hat. Es gibt drei Arten von Pionen: neutrale, negativ geladene und positiv geladene. Während die geladenen Pionen etwa 273-mal so schwer sind wie ein Elektron, wiegt das neutrale Pion etwa 264 Elektronenmassen. Pionen haben eine geringe Lebensdauer von $2,6 \cdot 10^{-8} \text{ s}$ bei geladenen und $8,52 \cdot 10^{-17} \text{ s}$ bei dem neutralen²⁵. Geladene Pionen zerfallen zu Myonen und neutrale zu Photonen. Bei der Umwandlung eines Pions in ein Myon bleibt ein Masseüberschuss, der auf ein ebenfalls entstehendes Neutrino und als kinetische Energie auf das Myon übertragen wird. Zerfällt ein neutrales Pion zu zwei Photonen, so wird die Masse komplett in Energie umgewandelt, da Photonen masselos sind. Im Gegensatz zu Myonen dringen Pionen eher selten bis zur Erdoberfläche durch, sie werden „in der Erdatmosphäre zum größten Teil absorbiert“²⁶.

3.6 Unterscheidung verschiedener Spuren in der Nebelkammer

Es gibt drei hauptsächliche Merkmale, anhand derer sich Spuren in einer einfachen Nebelkammer unterscheiden lassen. Diese sind die Form der Bahnen, die Länge der Bahnen und ihre Richtung.

Da nur geladene Teilchen ionisierend wirken können, lassen sich alle Teilchen in einem Magnetfeld ihrer Ladung zuordnen. Anhand der Lorentz-Regel lässt sich aus der

²⁴ Ford (1966), S. 164

²⁵ Particle Data Group (2012), S.23

²⁶ Bredthauer (1987), S.148

Drehrichtung der in Kreisbahnen oder Spiralen verlaufenden Spuren in einem Magnetfeld die elektrische Ladung der Teilchen identifizieren.

Leichter lassen sich die Spuren anhand von Form und Länge einordnen. Dabei hinterlassen schwere Teilchen wie Hadronen oder Ionen – das häufigste Beispiel hierfür ist das Alpha-Teilchen – Spuren, die bis einem Zentimeter dick und zwei bis drei Zentimeter lang werden können.



Abbildung 3: Ein schwereres Teilchen wie z.B. ein Alpha hinterlässt eine breite, kurze Spur
Myonen sind zwar schwerer als Elektronen, haben aber aufgrund ihrer Geschwindigkeit eine höhere Energie. Ihre Spuren sind gerade und können optimal durch die ganze Nebelkammer verlaufen.

Die Spuren von Elektronen können in Abhängigkeit von ihrer Energie variieren. Elektronen, die bei dem Zerfall eines Myons entstanden sind, haben meist eine hohe Energie und hinterlassen gerade bis leicht gekrümmte Bahnen von bis zu circa zwei Zentimeter Länge. Eine solche Spur ist in Abbildung 4 dargestellt.



Abbildung 4: Ein Elektron, das aus einem Myonen- oder Betazerfall entstanden ist, hinterlässt eine lange, dünne Spur

Elektronen, die hingegen von Photonen aus Gamma-Strahlung ausgelöst wurden, aber eine sehr niedrige Energie und lassen sich leicht ablenken. Ihre Spuren sind deutlich gekrümmt und Zickzackförmig, wie in Abbildung 5 zu sehen.



Abbildung 5: Ein von einem Photon ausgelöstes Elektron hinterlässt eine Zickzackförmige Spur

Die Spuren lassen sich also in einer ersten Näherung ungefähr einordnen. Da die Form der Spur aber auch stark von der Energie des Teilchens abhängt und nicht nur von seiner Ruhemasse, ist diese Einordnung oft nicht eindeutig.

In teureren Nebelkammern werden zur Unterscheidung der Teilchen verschiedene Platten in die Nebelkammer eingesetzt. Während Alpha-Kerne schon von einem Blatt Papier abgeschirmt werden können, werden Elektronen und Positronen, die bei der Beta-Strahlung entstehen, erst von dünnem Blech oder dickem Aluminium aufgehalten.²⁷ Weitere Unterscheidungen können durch sehr präzises Ausmessen und Vergleichen der Spuren vorgenommen werden. Dadurch lassen sich Rückschlüsse auf Gewicht, Ladung, Impuls und Art der Teilchen ziehen.

²⁷ Vgl. Ludwig (1995), S.104

4 Planung des Versuches

4.1 Zu untersuchende Parameter

4.1.1 Vergleichbare Aspekte

Um die optimalen Bedingungen des Experimentes zu finden, werden verschiedene Parameter beim Bau der Nebelkammer verändert, um bezüglich der Kosten, der Haltbarkeit, der Häufigkeit der Spuren und deren Unterscheidbarkeit zu vergleichen.

Die Hauptkosten fallen dabei für Trockeneis und Isopropanol an. Die übrigen Komponenten sind nicht nur verhältnismäßig billig, sondern auch wieder verwendbar. Da Trockeneis in den kleinen benötigten Mengen nicht lieferbar und aufgrund der kurzen Haltbarkeit kaum wieder verwendbar ist, stellt diese Komponente einen erheblichen Kostenanteil dar. Daher sollte im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden, ob Alternativen zum Trockeneis gefunden werden können. Auch Isopropanol ist relativ teuer und nicht wiederverwendbar, weshalb die Notwendigkeit der Verwendung überprüft werden soll.

Die Dauer bis zur Herstellung des instabilen Zustandes entspricht der Zeitdauer zwischen dem Aufsetzen der Plastikbox auf die Metallplatte und dem Erkennen der ersten Spuren.

Die Haltbarkeit der Nebelkammer wird durch den Zeitraum ausgedrückt, in dem Spuren erkennbar sind, ohne, dass Isopropanol nachgefüllt wird.

Um die Häufigkeit der Spuren zu messen, wird die Anzahl der innerhalb einer Minute erkennbaren Spuren aufgenommen.

Bei der Unterscheidbarkeit der Spuren geht es vor allem um die Länge und Deutlichkeit.

Die optimalen Bedingungen treten bei minimalen Kosten, einer minimalen Dauer bis zur Herstellung des instabilen Zustandes, einem maximalen Zeitraum der Haltbarkeit, einer minimalen Zeitspanne zwischen dem Erscheinen der Spuren und einer maximalen Unterscheidbarkeit der Spuren auf. Um festzustellen, unter welchen Ausgangsbedingungen sich diese Bedingungen optimieren, werden im Folgenden verschiedene Parameter beim Bau verändert.

4.1.2 Untersuchung der Kühlung

Die Kühlung der Kammer spielt eine wesentliche Rolle bei der Funktionsweise der Nebelkammer, da die Kälte auf dem Boden der Kammer für die Übersättigung der oben

wärmeren Luft führt. Dabei ist aber weniger die Kälte als vielmehr die Temperaturdifferenz zwischen dem oberen und dem unteren Ende der Nebelkammer wichtig.

Die Kühlung der Nebelkammer war immer der kostenintensivste Teil des Baus einer Diffusionsnebelkammer. Der Großteil heute gebauter Diffusionsnebelkammern wird mit Trockeneis gekühlt, in teureren Nebelkammern werden Peltier-Elemente eingesetzt. Diese haben den Vorteil, im Gegensatz zu Trockeneis wiederverwendbar zu sein. Sie sind allerdings auch wesentlich kostenintensiver. Eine Portion Trockeneis (meist 20 Kilogramm), das auf -78° Celsius kühlen kann, kostet rund 10 Euro. Bei Peltier-Elementen ist der Preis von ihrer Leistungsfähigkeit abhängig. Normale Peltier-Elemente erzeugen eine Differenz von rund 60 Kelvin, für einen größeren Bereich müssen mehrstufige Elemente verwendet werden. Diese kosten zwischen 80 und 100 Euro pro Stück, sodass der Preis nur für sehr häufige Verwendungen der Nebelkammer gerechtfertigt ist. Dazu können diese Elemente die Differenz auch hauptsächlich im positiven Bereich aufstellen und kommen im negativen meist nur bis -30°C und minimal bis -60°C .²⁸

Da die Kühlung schwer zu bewerkstelligen ist, wird als Alternative versucht, das obere Ende der Nebelkammer zu erhitzen. Die normalerweise erstellte Temperaturdifferenz zwischen dem -78° Celsius kalten Trockeneis und der Raumtemperatur beträgt etwa 100 Kelvin. Diese Differenz lässt sich ohne weiteres auch zwischen auf 80° Celsius erhitztem Wasser und auf -20° Celsius gekühlte Eiswürfel herstellen. Diese Variante wäre bei weitem billiger, da ein Wasserkocher und eine Tiefkühltruhe fast in jedem Haushalt zu finden sind. Die Methode hat aber auch Nachteile: Zum einen verdampft Isopropanol schon bei 78° Celsius und sollte möglichst nicht zu nahe an diesen Wert gebracht werden. Außerdem steigt bei einer Erhitzung über 50° Celsius die Zünd- und Explosionsgefahr.

Ein weiteres Problem ist, dass die Wärme des 80° Celsius heißen Wassers nur schwierig auf den Alkohol übertragen werden kann, da ein Behälter für das Wasser und das Plastik der Nebelkammer gut isolieren.

Eine Alternative wäre, den Alkohol im kochenden Wasserbad auf rund 75° Celsius zu bringen und einzufüllen. In dem Fall würde die Wärme aber rasch verschwinden, weshalb der obere Teil der Kammer weiterhin erwärmt werden müsste.

²⁸ <http://www.quick-cool-shop.de/peltierelemente-know-how/>

Dafür gibt es verschiedene Möglichkeiten, die aber alle nicht so leicht zu bewerkstelligen sind. Mit einer durchschnittlichen Infrarot-Lampe, einer Wärmflasche oder einer elektrischen Heizfolie könnte die Temperatur aufrechterhalten werden.

Wird der Alkohol erwärmt, könnte es ein Problem darstellen, dass die ebenfalls erwärmte Luft aufnahmefähiger als die normalerweise nur auf Raumtemperatur gebrachte ist. Dadurch besteht die Gefahr, dass nicht genügend Isopropanol in die Kammer gegeben werden kann, um die Luft im oberen Teil zu sättigen und im unteren zu übersättigen, oder dass zu viel Isopropanol aufgenommen wird.

Als Kühlung kommt außer Trockeneis noch Wassereis in Form von Eiswürfeln in Frage, die aber nicht lange halten und die Kiste durchfeuchten. Weiterhin können Kühlkompressen eingesetzt werden, die vorher in der Kühltruhe auf -20° Celsius abgekühlt wurden. Außerdem können verschiedene Kühlflüssigkeiten verwendet werden. Chloridfluormethan oder R22 ist ein Gas, das mit dem richtigen Druck auf -30° Celsius kühlen kann. Es sorgt allerdings auch für eine H-FCKW-Produktion, die die Ozonschicht der Erde zerstört, weshalb es bis 2020 ganz verboten sein wird.²⁹

Auch chemische endotherme Reaktionen können zur Kühlung verwendet werden. Sie kühlen aber nur temporär, da nach Ablauf der Reaktion der Umgebungsluft keine weitere Wärme entzogen wird. Die Kühlung würde nicht lange genug anhalten, um den Zustand der Übersättigung aufrecht zu erhalten.

Außerdem ist es möglich, einen flüssigen Stoff durch einen Unterdruck zu einer Änderung des Aggregatzustandes zu zwingen, bei der er Energie aufnehmen muss. Dieses Verfahren entspräche aber einer Expansionsnebelkammer, weshalb im Folgenden nicht näher darauf eingegangen werden soll.

4.1.3 Einsatz verschiedener Gase und Dämpfe

Die heute am häufigsten gebaute Nebelkammer verwendet Luft, welche mit Isopropanol übersättigt wird. Jedoch sind auch andere Gase und Dämpfe als Luft und Propanol möglich. Dazu wurden bei Expansionsnebelkammern schon Untersuchungen mit verschiedenen Gasen und Dämpfen durchgeführt. Eine entsprechende Übersicht dazu ist in Tabelle 2 in Anhang 1 gegeben. Die Sättigungsdampfdichte ist unter anderem auch von dem „Verhältnis der spezifischen Wärmen [des Dampfes] bei konstantem Druck und bei konstantem Volumen“³⁰

²⁹ Vgl. Schweizerische Eidgenossenschaft (1987), Artikel 2F Absatz 6; Anlage C Geregelte Stoffe

³⁰ Bothe (1940), S. 6

abhängig. Eine hohe Sättigungsdampfdichte ist wünschenswert, weil ein dichter Nebel zu mehr und auch deutlicher sichtbaren Teilchenspuren führt.

Da sich andere Gase nur äußerst schwierig und mit hohem Kostenaufwand besorgen und verwenden lassen und dazu noch ein Sicherheitsrisiko darstellen, wird die Kammer nur mit normaler Raumluft gefüllt.

Die Suche nach anderen Dämpfen beschränkt sich vor allem auf Alkanole, da die verwendete Flüssigkeit zwischen dem Temperaturbereich von -78° Celsius und $+50^{\circ}$ Celsius nicht den Aggregatzustand wechseln darf. Trotzdem wird probeweise auch Wasser verwendet. Die untersuchten Alkanole sind Propanol (C_3H_7OH), Ethanol (C_2H_5OH) und Methanol (CH_3OH). Das in den meisten Experimenten verwendete Alkanol ist Isopropanol.

Diese Alkanole werden alle in Reinform, das heißt, hundertprozentig, verwendet. Außerdem wird der Versuch mit Brennspritus durchgeführt, welcher einen Alkoholgehalt von 94 Prozent hat, während die restlichen sechs Prozent des Inhalts aus Wasser und Vergällungsstoffen bestehen.

Da die Bauanleitungen darauf hinweisen, dass der Versuch nur mit reinem Isopropylalkohol funktioniert³¹, ist es wahrscheinlich, dass beim Ersatz von Propanol durch Ethanol, Methanol oder Brennspritus weniger bis gar keine Spuren zu sehen sind.

4.1.4 Untersuchung der Füllmengen der Flüssigkeit

Abgesehen von der Flüssigkeit selber kann auch ihre Menge das Experiment beeinflussen, da bei einer zu geringen Menge die Übersättigung der Luft nicht erreicht werden kann. Es wird empfohlen, „soviel Alkohol bis der Filz gründlich durchtränkt ist“³² zu verwenden. Um gute Vergleiche zu haben, werden verschiedene Flüssigkeitsmengen von Methanol, Ethanol und Propanol verglichen. Dabei ist zu erwarten, dass eine höhere Flüssigkeitsmenge einen dichteren Nebel sowie eine längere Laufzeit zur Folge hat. Außerdem ist zu untersuchen, ob das Nachfüllen von Alkohol die Laufzeit relevant verlängert.

4.1.5 Untersuchung des Kammervolumens

Für die Größe der Nebelkammern sind keine einheitlichen Maße vorgegeben. Bei der Expansionsnebelkammer sind meist kleinere Kammern vorzufinden, da hier die nötige Kraft, um den Unterdruck zu schaffen, kleiner ist. Bei Diffusionsnebelkammern sind alle Größen

³¹ Vgl. Storr, Mick: Cloud Chamber Workshop

³² Rückeis (2011): Bau einer Nebelkammer

möglich. Für das Experiment werden mehrere Kammern verschiedener Volumina unter ähnlichen Ausgangsbedingungen untersucht. Dabei ist zu erwarten, dass größere Kammern länger brauchen, ehe sich der Zustand des instabilen Nebels hergestellt hat. Dafür sollte die größere Oberfläche für mehr Nebel und somit mehr Spuren sorgen, außerdem sollten längere Spuren sichtbar sein.

Die zu untersuchenden Nebelkammern haben Volumina von weniger als 1,5 Liter (Grundfläche: 15 cm^2), von 9 Liter (Grundfläche: 60 cm^2); von rund 11 Liter (Grundfläche: 60 cm^2) und von 17,5 Liter (Grundfläche: $87,5 \text{ cm}^2$). Während ein größeres Volumen eher für einen größeren Ausbreitungsraum des Nebels und damit hinderlich wirkt, sollte eine größere Grundfläche zu mehr Nebel und mehr Spuren führen, da sie die Effektivfläche darstellt, über der sich der Nebel befindet.

4.1.6 Einsatz radioaktiver Präparate

Verwendet man die Nebelkammer ohne radioaktive Quellen, so sind nur wenige Spuren zu sehen. Um mehr zielgerichtete Spuren zu erzeugen, lohnt sich der Einsatz von radioaktiven Quellen. Da radioaktives Gestein im 20. Jahrhundert noch häufig wegen der leuchtenden Farbe verwendet wurde, kann man aus dieser Zeit noch uranhaltige Gläser oder Uhren, deren Leuchtanzeigen radioaktiv sind, finden. Außerdem ist es möglich, beim Mineralienhändler uranhaltiges Gestein zu erwerben, wie zum Beispiel Pechblende oder Uranocircit. Diese Gesteine sind Uran-Sauerstoffverbindungen in verschiedenen Mengenverhältnissen. Da das Uran radioaktiv zerfällt, sind außerdem Spuren anderer radioaktiver Gesteine, wie zum Beispiel Radium oder Radon vorzufinden. Solche radioaktive Quellen sind vor allem als Alpha-Strahler einsetzbar.

Die üblichen Präparate sind Beta- oder Gammaquellen sowie uran- oder radiumhaltige Steine, die sich öfters in der Natur oder in Bergwerken finden (sogenannte Bodenproben) und deshalb bis zu einer gewissen Strahlung leicht zu beschaffen sind. Außerdem werden für das Experiment Versuche mit einem Thorium-Stab gemacht.

Uran selbst nimmt meist nicht an der Beta-Strahlung teil und auch leichtere radioaktive Elemente, welche bei der Alpha-Strahlung des Urans entstanden sind und deshalb in geringeren Mengen vorliegen, stoßen häufiger Alpha-Teilchen als Elektronen aus. Die zu detektierenden Spuren beim Einsatz von radioaktivem Gestein sind also meist die Spuren von Heliumkernen. Thorium nimmt an der Alpha- und an der Beta-Strahlung teil, weshalb Spuren beider Arten zu sehen sein werden.

4.1.7 Einsatz von Hindernissen zur Unterscheidung der Spuren

Wie in Absatz 3.6 schon erklärt, lassen sich die drei häufigsten Strahlungsarten Alpha-, Beta- und Gammastrahlung anhand des Durchmessers der Materialien unterscheiden, die sie durchdringen.

Nur Alpha-Strahlen werden von einem Blatt Papier aufgehalten. Deshalb soll versucht werden, mit verschiedenen Hindernissen in der Kammer die Teilchen näher zu identifizieren.

Weitreichende Ergebnisse sind in diesem Fall unwahrscheinlich, da es schwierig sein wird, auf beiden Seiten des Hindernisses Spuren zu erkennen, die auch noch dieses durchdringen oder davon aufgehalten werden. Außerdem sind Teilchen, die durch die Plexiglasscheibe der Kammer dringen, auch nicht von einem Blatt Papier aufhaltbar, weshalb dieser Versuch nur hinter einer radioaktiven Quelle in der Kammer Sinn macht.

Es ist aber möglich, dass mit dem richtigen Einsatz von radioaktiven Quellen einige Teilchen identifizierbar sind.

4.2 Weitere Versuche

4.2.1 Allgemeine Vorzugsrichtungen von kosmischer Strahlung

Kosmische Strahlung, die die Nebelkammer durchkreuzt, kann allgemein aus allen Richtungen kommen, auch wenn von unten kommende Strahlung meistens keine kosmische Strahlung ist. Trotzdem ist es möglich, dass die Teilchen eine Vorzugsrichtung haben, zum Beispiel aus Richtung der Sonne oder von einer bestimmten Himmelsrichtung, da sie von den Sonnenwinden oder vom Erdmagnetfeld abgelenkt werden.

Um festzustellen, ob eine solche Vorzugsrichtung existiert und wovon sie verursacht wird, werden Teilchen zu verschiedenen Zeiten über einen Zeitraum von jeweils einer viertel Stunde beobachtet und es werden soweit möglich Beobachtungen der Herkunftsrichtung notiert.

4.2.2 Häufigkeit von kosmischer Strahlung

Nebelkammern zeigen nicht immer gleich viele Spuren. Die Anzahl der zu beobachtenden Teilchen variiert von Zeit zu Zeit. Es ist möglich, dass diese Variation nicht nur von veränderten Aufbaubedingungen wie der Gleichmäßigkeit des Trockeneises, der Menge an

Isopropanol oder der Umgebungsluft liegt, sondern auch von Faktoren wie der Tageszeit oder der seit Aufbau der Nebelkammer vergangenen Zeit abhängig ist.

Nur in kleinen Nebelkammern sind so wenig Spuren zu sehen, dass sie sich über einen Zeitraum von wenigen Minuten zählen lassen. Deshalb werden mehrere kleine Nebelkammern zu verschiedenen Tageszeiten aufgebaut und dann über den Tag hinweg beobachtet.

Es ist zu vermuten, dass sich keine Regelmäßigkeiten feststellen lassen, da die Menge an kosmischer Strahlung innerhalb eines Tages nicht stark genug variiert.

4.3 Genutzte Nebelkammern

Für die Experimente stehen Nebelkammern von vier verschiedenen Größen zur Verfügung. Vom Netzwerk Teilchenwelt werden je 10 Nebelkammern der Größe 150×100×70-100 mm zu Verfügung gestellt, die im Folgenden auch als „die kleinen Nebelkammern“ bezeichnet werden. Weiterhin wird vom Netzwerk Teilchenwelt eine Nebelkammer mit den Maßen 150×200×300mm zur Verfügung gestellt. Sie wird im Folgenden als „große Nebelkammer“ bezeichnet. Die dritte Nebelkammer mit den Maßen 180×200×300mm wird vom CERN in Genf zur Verfügung gestellt und wird im Folgenden als „die CERN-Nebelkammer“ bezeichnet. Die vierte Nebelkammer wird im Verlauf der Untersuchungen selbst gebaut.

Die kleinen Nebelkammern und die CERN-Nebelkammer werden in einer innen mit Styropor ausgekleideten Holzbox verwendet, während die große Nebelkammer sich in einer schlichten Styroporbox befindet. Die Kammern besitzen jeweils eine schwarz eloxierte Metalplatte mit eingefräster Umlaufrinne. Der Filz wird in den Nebelkammern des Netzwerk Teilchenwelt mit Magneten befestigt und in der CERN-Nebelkammer mit Klammern.

4.4 Genutzte weitere Materialien

Für die verschiedenen Experimente stehen viele unterschiedliche Materialien zur Verfügung. Als Flüssigkeiten werden Methanol, Ethanol, Isopropanol, Brennspritus und Wasser verwendet. Zur Kühlung wird Trockeneis in Form von Blöcken, Platten und Pellets zur Verfügung gestellt, außerdem Kühlkompressen, die auf -18° Celsius abgekühlt werden können und gefrorenes Wassereis der Temperatur -20° Celsius.

Als Lichtquellen werden Lampen verschiedener Helligkeiten benutzt. Fotos und Videos werden durch gewöhnliche Kameras erstellt. Die Positionierung der Kamera in den meisten Experimenten und für die Fotos ist in Abbildung 6 zu sehen.

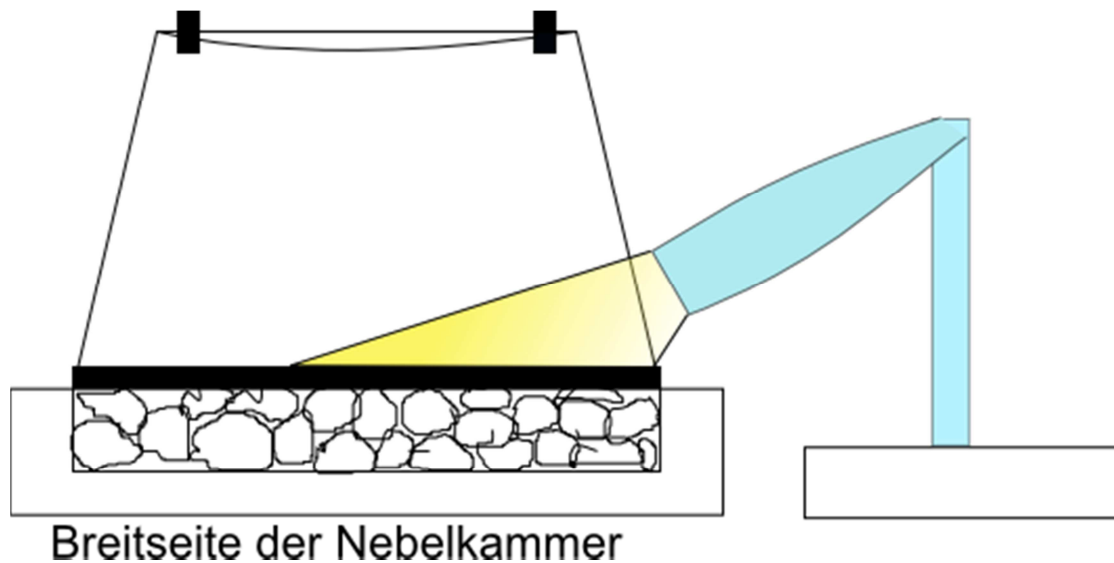


Abbildung 6: Aufbau der Kamera vor der Nebelkammer

4.5 Vorgehen

Zur Untersuchung der Nebelkammern wird eine Vielzahl von Versuchen durchgeführt. Zuerst werden die verschiedenen Nebelkammern mit der herkömmlichen Methode mit Trockeneis und Isopropanol aufgebaut, um allgemeine Erkenntnisse zum Bau zu gewinnen und eine eigene Anleitung zum Bau von Nebelkammern zu erstellen.

Außerdem wird eine eigene Nebelkammer aus selbst erstandenen Materialien gebaut und überprüft.

Die gebauten Nebelkammern werden in verschiedenen Experimenten über Zeiträume von einigen Stunden hinweg genauer untersucht. Anschließend werden verschiedene Experimente durchgeführt, um die Nebelkammern auf andere Arten aufzubauen.

Weiterhin werden Versuchsanordnungen entworfen, die leicht in der Schule wiederholt werden können, um Experimentieraufgaben für Schüler zu entwickeln. Diese werden probeweise durchgeführt und protokolliert.

5 Durchführung des Versuches

5.1 Allgemeine Erkenntnisse zum Bau

5.1.1 Aufbau der Nebelkammern

Die im Rahmen dieser Arbeit aufgebaute Nebelkammer besteht aus zwei Teilen. Die eigentliche Kammer wird durch eine durchsichtige, unten geöffnete Plastikbox dargestellt, die durch eine Metallplatte von der darunter liegenden Styroporbox getrennt wird. Die Plastikbox hat Maße von 250 x 350 x 200 Millimeter. An der Oberseite ist eine Halterung befestigt, in die sich Filz spannen lässt.

Wie in Abbildung 7 zu sehen, wird diese Plastikbox auf eine Metallplatte von 350 x 400 Millimeter gesetzt.

Diese bedeckt die Öffnung der innen hohlen Styroporbox, welche außen Maße von 400 x 350 x 100 Millimeter hat.



Abbildung 7: Die durchsichtige Plastikbox befindet sich auf der Metallplatte, welche die Styroporbox bedeckt.

Die für die Funktionsfähigkeit der Nebelkammer nötige Temperaturdifferenz sollte möglichst hoch sein. Beim Betrieb der Nebelkammer wird normalerweise eine Differenz von fast 100 Kelvin zwischen dem oberen Ende der Kammer, welches auf Raumtemperatur gehalten wird, und dem -78° Celsius kalten Trockeneis am unteren Ende hergestellt. Das Trockeneis wird in der Styroporbox untergebracht, die nach oben mit der Metallplatte verschlossen ist. Um eine gute Wärmeleitfähigkeit zu garantieren, liegt die Platte direkt auf dem Trockeneis auf.

Beim Auflegen der Metallplatte auf das Trockeneis kann ein Geräusch entstehen, das verschiedene Lautstärken haben kann. Das liegt daran, dass die sehr viel wärmere Metallplatte das Trockeneis zwingt, schnell zu sublimieren, bis sie abgekühlt ist. Das Kohlenstoffdioxid

geht in den gasförmigen Zustand über und dehnt sich dabei schnell aus. Dadurch wird die darauf liegende Metallplatte in Schwingungen versetzt, die, je nachdem wie leicht das Gas am Rand entweichen kann, zu leiseren oder lauterem Geräuschen führen.

Da Teilchenspuren auf einer metallischen Platte weniger gut zu erkennen sind als auf einer schwarzen, wurde die Platte mit schwarzem Papier belegt. Dessen schlechte Wärmeleitfähigkeit beeinflusste die Beobachtungen negativ.

Bei einer Wiederholung des Versuches gelang es jedoch, durch eine Durchfeuchtung des schwarzen Papiers mit Isopropanol die Nachteile auszugleichen. Es ist sowohl möglich, die Platte schwarz lackieren zu lassen, als auch schwarzes Papier darauf zu legen, wenn dieses durchfeuchtet wird. Dadurch wird die Wärme besser geleitet und durch die Feuchtigkeit ist der Nebel besser zu sehen, welcher über dem isolierenden, trockenen, schwarzen Papier fast unsichtbar war.

Die Plastikbox wurde auf die Metallplatte gesetzt, nachdem am oberen Ende Filz befestigt wurde. Dafür eignete sich am besten nicht zu dicker, aufnahmefähiger Filz. Dieser wurde mit Isopropanol getränkt. Das Isopropanol ist die später durch die Kammer diffundierende Flüssigkeit. Der Filz muss dicht getränkt werden, außerdem ist es empfehlenswert, etwas Alkohol auf dem Boden der Kammer zu verteilen, da der Nebel dann schneller zu sehen ist.

Damit sich das Isopropanol gleichmäßig verteilt, muss darauf geachtet werden, dass der Filz auch nach dem Einfüllen des Alkohols nicht durchhängt.

Nach dem Einfüllen des Isopropanols wird die Kammer luftdicht geschlossen, damit keine Luftströme den Nebel in der Kammer beeinflussen. Dazu werden Knete und verschiedene Stofftücher verwendet. Die schwarze Knete hat den Nachteil, durch die Kälte zu erstarren und danach leicht zu verrutschen. Eine andere Möglichkeit wäre, eine Umlaufrille von der Größe der Plastikbox in die Metallplatte zu fräsen, sofern diese dick genug ist.

Wenn die Plastikbox luftdicht auf der Metallplatte sitzt, ist die Nebelkammer einsatzbereit.

Um Spuren in der Kammer zu erkennen, wird der Raum verdunkelt. Die Spuren werden dann im Strahl einer starken Taschenlampe, welche auf den Boden der Kammer gerichtet wird, sichtbar. Dabei sind der Nebel und die Spuren darin am besten sichtbar, wenn man die Kammer von der Seite oder von gegenüber ausleuchtet.

Der Aufbau der vom Netzwerk Teilchenwelt und vom CERN zur Verfügung gestellten Nebelkammern unterscheidet sich nicht relevant von dem der selbst gebauten Nebelkammern. Unterschiede waren lediglich in den Beobachtungen zu erkennen.



Abbildung 9: CERN-Nebelkammer

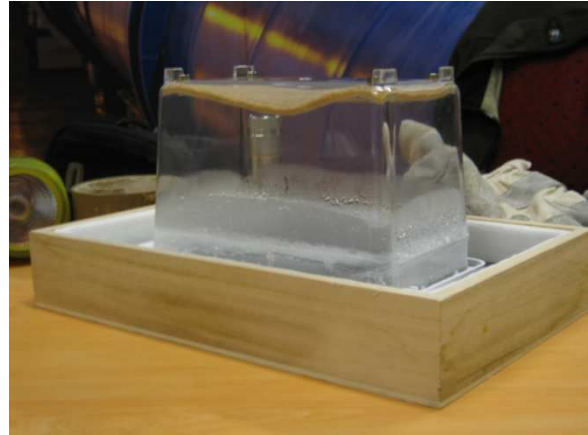


Abbildung 9: kleine Nebelkammer

5.1.2 Beobachtungen

In den Nebelkammern tritt schon wenige Minuten nach Schließen der Plastikbox erster Nebel auf. Ist dies nicht der Fall, so lässt sich meist ein Fehler an der Kühlung feststellen. Auf abweichende Beobachtungen wird im Punkt 5.1.3 näher eingegangen. In diesem feinen Tröpfchennebel sind meist 5 bis 10 Minuten nach Schließen der Kammer Spuren im Lichtkegel einer starken Taschenlampe zu erkennen, die verschiedene Formen und Längen haben können. Ohne die Verwendung einer radioaktiven Quelle sind die häufigsten Spuren kurze, dicke sowie leicht gekrümmte und seltener eine lange, gerade Spur, die bis zu zehn Zentimeter lang sein kann. Die Kammer läuft meistens, bis kein Trockeneis mehr vorhanden ist oder die Temperaturdifferenz aus einem anderen Grund nicht mehr hergestellt werden kann; ein Mangel an Alkohol war bei keinem der Experimente ein Problem. Legt man zusätzlich eine radioaktive Quelle in die Nebelkammer, so dauert es bis zu einer halben Stunde, bis sich die Temperatur der Probe der Temperatur der Kammer angepasst hat. Alternativ kann sich die Quelle auch vor der Kammer befinden. Auf den Einsatz radioaktiver Quellen wird näher im Punkt 5.2.5 eingegangen. Die davon ausgehenden Spuren sind dicker und meist zwei bis fünf Zentimeter lang.

Liegt die Metallplatte nicht mehr auf dem Trockeneis auf und kann die Temperaturdifferenz nicht mehr aufrechterhalten werden, dann wird der Nebel langsam weniger und fällt als

Niederschlag auf den Boden der Kammer. Nach dem Abbau der Kammer ist die Metallplatte feucht.

Hinsichtlich dieser Beobachtungen in der Kammer konnten keine Unterschiede zwischen den verschiedenen Kammern festgestellt werden. Auf Unterschiede bezüglich der Laufzeit, der Dauer bis zur Einstellung des instabilen Zustandes und der Häufigkeit von Teilchen wird im Punkt 5.2 weiter eingegangen.

5.1.3 Fehlerquellen

Entgegen der Vermutungen war die Fehlerquote beim Test der Nebelkammern zumindest mit Trockeneis nicht hoch und fast jeder Versuch gelang auf Anhieb. Trotzdem gibt es einige Dinge, die die Durchführung immer wieder behinderten oder die Ergebnisse verschlechterten.

Eine Fehlerquelle kann bei der Verteilung des Trockeneises liegen. Wird dieses unregelmäßig auf dem Boden der Kammer verteilt, dann steht diese schräg und der Nebel „driftet“, das heißt, er bewegt sich in Wellen von der einen Seite der Kammer zur anderen. Dadurch sind die Spuren deutlich schwieriger erkennbar. Dieser Fehler kann leicht dadurch behoben werden, dass das Eis regelmäßiger verteilt wird oder Stoffstücke oder ähnliches unter die niedriger liegende Seite geschoben werden.

Weitere Probleme können sich durch den Einsatz des Alkohols ergeben. Der Boden der Kammer vereist schnell, wodurch er fast weiß wird und der Nebel somit fast unsichtbar. Das lässt sich dadurch beheben, dass etwas Alkohol auf den Boden gegeben wird.

Aus demselben Grund sollte die Kammer auch so schnell wie möglich auf die Metallplatte gestellt werden, wenn diese sich abkühlt, weil die Luftfeuchtigkeit darauf sonst eine Eisschicht bildet.

Wird jedoch zu viel Alkohol auf den Boden gegeben, reflektiert er das einfallende Licht und macht den Nebel ebenfalls schlecht sichtbar. Das gleiche kann sich auch ergeben, wenn zu viel Alkohol in die Kammer gefüllt wird und dieser auf den Boden tropft.

Weiterhin wird davon abgeraten, Alkohol in die Rille der Platte zu füllen, was oft empfohlen wird, um die Kammer richtig zu verschließen. Das kann jedoch dazu führen, dass die eindringende Luft zu Blubbern führt, welches den Nebel immer wieder aus dem Gleichgewicht bringt.

Sollte sich kaum Nebel bilden, obwohl genügend Alkohol eingefüllt ist, ist zu überprüfen, ob die Kammer direkt auf dem Trockeneis aufliegt und noch genügend Trockeneis da ist, sodass die Metallplatte eine Temperatur von rund -70° Celsius hat. Eine schlechte Leitung zwischen der Kühlung und dem Boden der Kammer ist der häufigste Grund für schlechte oder fehlende Ergebnisse.

Für eine gute Beobachtung der Spuren ist die richtige Beleuchtung wichtig. Ist es zu hell, lässt sich nichts erkennen, aber eine gewisse Helligkeit fördert die Qualität von Filmaufnahmen.

Wird die Kammer mit Trockeneis betrieben, so beschlägt sie meist sehr schnell. Das wird dadurch beschleunigt, dass für eine Beobachtung ein naher Kontakt zur Kammer notwendig ist und die Atemluft an der Wand der Kammer kondensiert. Dieses Problem lässt sich leicht dadurch beheben, dass die Wand der Kammer dünn mit Flüssigseife eingerieben wird. Anschließend vereist sie nur noch, aber das Eis lässt sich schmelzen und dringt auch nicht so hoch, dass es die Sicht relevant einschränken würde.

5.2 Ergebnisse zur Untersuchung der Parameter

5.2.1 Untersuchung der Kühlung

Um das Trockeneis zu ersetzen wurden zahlreiche Experimente mit Kühlkompressen gemacht, die auf -40°C bis -10°C heruntergekühlt wurden. Weiterhin wurde der Alkohol im Filz auf 50°C bis 70°C erwärmt und mit einer Rotlichtlampe, einem Föhn, einer Wärmflasche oder Hitzefolie auf dieser Temperatur gehalten. Die genauen Versuche sind in Protokoll 1 zu finden.

Während die ersten Versuche zum Ersatz der Kühlung jedes Mal lediglich zur Bildung von Regen führte, der sich niederschlug, aber keinen instabilen Nebel bildete, konnten schließlich auch Erfolge nachgewiesen werden. Der Grund für die anfänglichen Misserfolge lag an der Tatsache, dass die Kühlung durch die Kühlkompressen nicht komplett an die Metallplatte weitergeleitet werden konnte. Das Problem wurde behoben, indem die Kühlkompressen auf die Platte gelegt wurden. Über einer blauen Kühlkomresse ist der Nebel zwar grundsätzlich schlechter zu sehen gewesen als über der schwarzen Platte, aber trotzdem konnten Spuren sichtbar gemacht werden, die meist sogar mehrere Zentimeter lang und deutlich zu erkennen waren.

In der kleinen Nebelkammer dauerte es etwa eine viertel Stunde, bis sich der instabile Zustand eingestellt hatte, während es in der selbst gebauten etwas über eine halbe Stunde brauchte. Das liegt daran, dass es im unteren Teil im Vergleich zu mit Trockeneis gekühlten Kammern wärmer ist und sich die Luft dort langsam aufwärmt, weshalb nicht sofort der genannte Regen zu Nebel wird, sondern ein großer Teil niederschlägt. Während die Spuren in der kleinen Kammer eine viertel Stunde lang zu sehen waren, hielt die große Kammer deutlich länger.

Somit ist es gelungen, das Trockeneis durch einfache Kühlkompressen zu ersetzen.

Bei den erfolgreichen Versuchen wurde der Alkohol (in den meisten Fällen Brennsprit) auf 60° Grad Celsius erwärmt und anschließend von einer Wärmflasche, die mit kochendem Wasser gefüllt und auf die Nebelkammer gelegt wurde, auf dieser Temperatur gehalten. Die Kühlkompressen hatten eine Temperatur von -18° Celsius und lag auf der Metallplatte.

Andere Versuche, das Trockeneis zu ersetzen, waren nicht erfolgreich.

Da die Temperatur von -18° Celsius aber auch für die Funktion möglich ist, wären weiterführende Versuche mit einfachen Peltier-Elementen möglich.

5.2.2 Einsatz verschiedener Gase und Dämpfe

Bei der Durchführung des Experiments mit verschiedenen Flüssigkeiten, die schließlich den Dampf erzeugten, waren die Ergebnisse nur teilweise wie erwartet.

Der Einsatz zu Wasser hatte lediglich das Erscheinen von Schnee anstatt von Nebel zu Folge, da die Schmelztemperatur von Wasser mit ungefähr 0° Celsius weit über den erzeugten -78° Celsius lag.

Überraschender waren die Ergebnisse beim Einsatz verschiedener anderer Alkanole, da sich die jeweiligen Nebelkammern in keinem der zu untersuchenden Aspekte außer den Kosten unterschieden. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Protokoll 2 und Protokoll 3 abzulesen. Das ist insbesondere deshalb überraschend, da der verwendete Spiritus nicht rein war und in den verwendeten Quellen angegeben wurde, dass das Experiment nur mit reinem Isopropanol gut funktionieren würde³³. Diese Aussage kann als widerlegt betrachtet werden. Da Spiritus als vergällter Alkohol sehr viel billiger ist als die übrigen Substanzen, kann dessen Verwendung anstatt von Isopropanol explizit empfohlen werden.

³³ Vgl. Storr, Mick: Cloud Chamber Workshop

Weiterhin wurde Frostschutzmittel eingesetzt, welches bis -50° Celsius flüssig bleibt und ebenfalls viele Alkanole enthält, allerdings den Gefrierpunkt schon höher hat und deshalb auch viele andere Stoffe enthält. Auch dieser Versuch gelang, aber trotzdem wird von der Benutzung von Frostschutzmittel abgeraten, da es bei der Verwendung von Trockeneis, welches unter -50° Celsius kühlt, leicht fest wird und eine dickflüssige Schicht auf dem Boden der Kammer bildet, welche sich schwer entfernen lässt und das Experiment negativ beeinflusst.

5.2.3 Untersuchung hinsichtlich der Füllmengen

Versuche ergaben, dass der entsprechende Filz ab einer Füllmenge von 50 ml in einer kleinen Nebelkammer im Durchschnitt begann, die Flüssigkeit wieder abzugeben. Daher wurden als Flüssigkeitsmengen je 25, 35 und 50 ml Ethanol und Isopropanol verwendet. Außerdem wurde der Filz zweimal überschwemmt. Dabei wurde einmal die überflüssige Flüssigkeitsmenge wieder abgegossen und einmal nicht. Zusätzlich wurden Experimente gemacht, bei denen vorher Alkohol auf den Boden der Kammer gegeben wurde. Die Ergebnisse der Experimente sind in Protokoll 2 und Protokoll 3 abzulesen.

Im Experiment ergab sich, dass etwas Alkohol auf dem Boden der Kammer dafür sorgt, dass diese nicht frühzeitig beschlägt und den Nebel fast unsichtbar macht. Zu viel Alkohol auf dem Boden, wie er auch entsteht, wenn der Filz überschwemmt und nicht entleert wird, sorgte dafür, dass sich die Kammer auf dem Boden spiegelte und der Nebel ebenfalls schwer sichtbar wurde.

Alle Kammern liefen, solange das eingefüllte Trockeneis reichte, weshalb schon eine geringe, von der Größe der Kammer abhängige, Flüssigkeitsmenge für Experimente reichen sollte. Je weniger Flüssigkeit die Kammern enthielten, desto schneller wurden die Spuren jedoch weniger und leicht undeutlicher. Deshalb ist es am empfehlenswertesten, den Filz ganz zu durchtränken und anschließend die überflüssige Menge abzugießen, um die Kapazität des Filzes voll auszunutzen. Außerdem sollte eine nicht zu große Menge Alkohol auf den Boden der Kammer gegeben werden, sodass dieser nicht beschlägt.

5.2.4 Untersuchung von Kammervolumina

Die Untersuchung von Kammern mit verschiedenen Volumina hat die Erwartungen weitestgehend bestätigt. Es hat sich herausgestellt, dass mit zunehmendem Volumen deutlich mehr Spuren zu sehen waren. Dabei war das Verhältnis der Zunahme von Spuren zur

Zunahme des Volumens erstaunlich, da bei den größeren Kammern deutlich mehr Spuren zu sehen waren und meistens auch mehr als erwartet. Es lässt sich keine Proportionalität zu Fläche oder Volumen feststellen. Zusammenfassend lässt sich hier sagen, dass der Einsatz größerer Nebelkammern gerade für kürzere Zeiträume von etwa einer Stunde lohnt, weil hier mehr Spuren zu sehen sind, auch wenn die Kammern weniger lange halten. Lediglich die Beleuchtung ist ein Problem. Für größere Kammern müssen an mehr oder an stärkere Lichtquellen eingesetzt werden. Entsprechende Versuche zu drei der vier verwendeten Nebelkammern sind in Protokoll 4 nachzulesen.

5.2.5 Einfluss radioaktiver Präparate

Die radioaktiven Präparate können sowohl in die Kammer gelegt werden als auch davor gestellt werden. Die Beobachtungen zu den Bodenproben sind in Protokoll 5 abzulesen. Wird die Bodenprobe vor die Kammer gelegt, so sind deutlich mehr Spuren im Inneren zu erkennen, allerdings wird die schwächere Alpha-Strahlung zum größten Teil schon durch die Plastikwand der Kammer abgehalten und es dringt weniger Strahlung in den Nebel ein. Wird das Präparat dagegen in die Kammer gelegt, ist zu beobachten, dass der Nebel aufgrund der höheren Wärme auf das Präparat zu driftet. Das kann dadurch vermieden werden, dass das Präparat vorher abgekühlt wird. Ansonsten kann es bis zu einer Stunde dauern, bis es die Temperatur der Metallplatte angenommen hat und der Nebel sich beruhigt hat.



Abbildung 10: Uranocircit (rechts im Bild) lässt dicke, kurze Spuren erscheinen, die von Alpha-Strahlung verursacht werden

Schon vorher sind Spuren zu sehen, die von der Quelle ausgehen. Es handelt sich meist um breite, gerade, zwei bis fünf Zentimeter lange Spuren, die mit hoher Wahrscheinlichkeit von Heliumkernen mit einer kurzen Reichweite stammen.

Solange der Nebel noch driftet, bewegen sich die Spuren auf die Quelle zu. Hat er sich beruhigt, kann man erkennen, dass sie von der Quelle strahlenförmig abgehen. Dabei ist deutlich sichtbar, dass es sich bei beiden Bodenproben um einen Alpha-Strahler handelt.

Wird ein Thorium-Stab benutzt, entstehen ebenfalls sehr viele Spuren um den Stab herum. Diese sind meistens dünn und im Durchschnitt bis zu fünf Zentimeter lang. Sie gehen in alle Richtungen ab. Außerdem sind auch häufig dickere, kürzere Spuren wie die von Alpha-Strahlung verursachten zu erkennen. Das erklärt sich dadurch, dass Th-230 und Th-232, die langlebigsten und daher häufigsten Thorium-Isotope, zu Ra-228 und Ra-230 zerfallen. Beide Isotope von Radium sind verhältnismäßig kurzlebig und zerfallen in Beta⁻-Strahlung. Auch die weiteren Produkte zerfallen wieder in Alpha- und Beta-Strahlung. Daher sind bei Thorium sowohl Alpha-, als auch Beta⁻-Zerfälle häufig zu beobachten.



Abbildung 11: Über dem Thorium-Stab entstehen dicke, dünne und spiralförmige Spuren

Die Verwendung radioaktiver Quellen in einer Nebelkammer liefert sehr interessante und aufschlussreiche Beobachtungen.

5.2.6 Unterscheidung der Spuren durch Hindernisse

Die Spuren in der Nebelkammer sind dank ihrer Breite, Länge und Form häufig schon grob einzuordnen. Das ist insbesondere dann der Fall, wenn man davon ausgeht, dass sie zum größten Teil von Heliumkernen, Myonen und Elektronen erzeugt werden. Trotzdem sollte der

Einsatz von Hindernissen getestet werden. Diese mussten in der Kammer stehen und dünn sein, außerdem einen recht dünnen Fuß haben, damit der Nebel auch direkt vor dem Hindernis noch sichtbar ist. Die verwendeten Hindernisse bestanden sowohl aus Pappe als auch aus Alufolie. Da Spuren, die von solch einem Hindernis aufgehalten werden, meist schon von der Wand der Kammer aufgehalten werden können, wurde zusätzlich in die Kammer eine radioaktive Quelle gelegt. Deren Spuren erreichten aber größtenteils das Hindernis nicht. Es schienen zwar weniger Spuren vor dem Hindernis als dahinter zu sein, aber es gab keine einzige Spur, von der sich eindeutig sagen ließ, dass sie von dem Hindernis aufgehalten oder hindurch gegangen wäre. Genauere Ergebnisse sind in Protokoll 6 zu finden.

Somit hat sich der Einsatz von Hindernissen in Nebelkammern zur Unterscheidung von Spuren als nicht sinnvoll erwiesen.

5.3 Untersuchung kosmischer Strahlung

5.3.1 Untersuchung hinsichtlich der Häufung kosmischer Strahlung

Zur Untersuchung hinsichtlich der Häufung von kosmischer Strahlung wurden die Spuren in mehreren Messreihen über jeweils eine Minute gezählt. Die verwendeten Nebelkammern wurden zu verschiedenen Tageszeiten aufgebaut. Anschließend wurden die Spuren in einem Abstand von ein bis zwei Stunden immer wieder gemessen.

Die in Abbildung 12 dargestellten Ergebnisse zeigten, dass durchaus manchmal sehr viel mehr Spuren zu sehen sind als sonst, auch wenn die meisten Zählungen zwischen 30 und 40 Spuren in der Minute lagen. Es ließen sich weder Abhängigkeiten von der Uhrzeit, noch von der Länge der Laufzeit feststellen.

Die anfangs beobachtete Verbesserung einer Kammer nach einiger Zeit ließ sich in späteren Experimenten nicht mehr bestätigen.

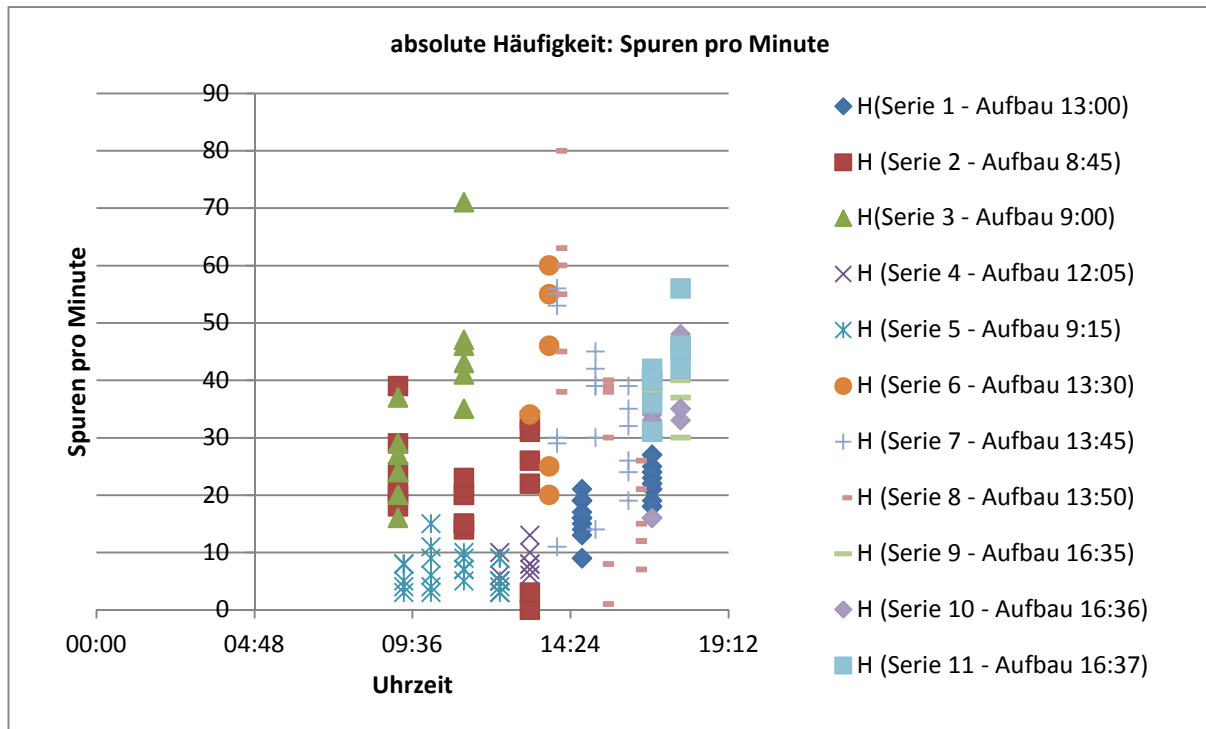


Abbildung 12: Absolute Häufigkeit der Spuren

Die Häufigkeit von Spuren in der Nebelkammer ist also unabhängig von äußeren Komponenten. Es ist jedoch möglich, dass der leicht unterschiedliche Bau von Kammern die unterschiedlichen Häufigkeiten verursacht. Die Ergebnisse der Messreihen sind in Protokoll 7 zu finden.

5.3.2 Untersuchung hinsichtlich der Vorzugsrichtung von kosmischer Strahlung

Auch die Vorzugsrichtung der Spuren lässt sich nur grob untersuchen. Dabei stellte sich heraus, dass die Beobachtung sehr schwer ist, da die Spuren so schnell entstehen, dass sich nicht feststellen lässt, aus welcher Richtung sie gekommen sind.

Die Beobachtungen zeigten, dass der kleine Teil der Spuren, deren Richtung festzustellen war, zu einem größeren Teil aus Richtung des nächsten Fensters stammt. Das ist insoweit zu erklären, dass die Wände mehr Teilchen aufhalten als dünne Fenster. Außerdem waren mehr Spuren in der Ebene zu sehen, was daran liegt, dass von oben und unten kommende Teilchen in der dünnen Nebelschicht nur wenige Teilchen ionisieren und somit eine kaum sichtbare Spur hinterlassen.

Eine allgemeine Vorzugsrichtung von Elementarteilchen und anderen Spuren in der Nebelkammer verursachenden Teilchen konnte nicht festgestellt werden, wobei der Grund darin vor allem in der schlechten Messtechnik liegt.

Nähere Beobachtungen sind in Protokoll 8 zu finden.

5.4 Schlussfolgerung

Im Verlauf der Experimente ist es gelungen, die Nebelkammern zu untersuchen und den ursprünglichen Aufbau zu verbessern. Das wichtigste Ergebnis ist dabei, dass der Ersatz von Isopropanol und Trockeneis als teuerste Bestandteile ersetzbar sind. Weiterhin gibt es viele mögliche Fehlerquellen, die die Arbeit der Kammer beeinflussen können.

Hingegen ist es nicht gelungen, Ursachen für die Schwankungen in der Funktion der Nebelkammer zu finden, die nicht aus solchen Fehlerquellen entstehen oder die Richtung oder Art der Teilchen genauer zu bestimmen.

Falls Trockeneis zur Verfügung steht, ist dessen Einsatz nach wie vor zu empfehlen, da es eine bessere Laufzeitdauer verursacht und leichter zu guten Ergebnissen führt. Es ist allerdings auch möglich, das Trockeneis durch Kühlkompressen zu ersetzen, die auf -18° Celsius herunter gekühlt werden müssen und über denen dann Spuren zu sehen sind. Schwarze Kühlkompressen sind dabei vorteilhaft.

6 Mögliche Schüleraufgaben

Die Beobachtung von Nebelkammern lässt keine Messaufgaben zu, bei denen Konstanten oder Werte nachgewiesen werden müssen, weil nur ein Bruchteil der durch die Kammer gehenden Teilchen tatsächlich zu sehen ist. Es ist aber möglich, die Kammer zu beobachten und dabei Spuren zu zählen. Der Einsatz von Hindernissen ist nicht empfehlenswert, da er lediglich die Sicht verschlechtert.

Beim Aufbau der Nebelkammer im Schulunterricht sollte das Experimentieren der Schüler also vor allem auf den Aufbau und die Funktionsweise gerichtet sein, sowie auf die Unterscheidung verschiedenen Formen und Längen, die dann verschiedenen Arten von Elementarteilchen zugeordnet werden können.

Im Folgenden sind Bauanleitungen für Nebelkammern mit oder ohne Trockeneis gegeben.

6.1 Bauanleitung mit Trockeneis

Vorüberlegung:

Die heutige Physik weiß, dass die Welt aus aller kleinsten, nicht mehr teilbaren Teilchen besteht, so genannten Elementarteilchen. Wir können diese Teilchen sogar benennen und ihnen Eigenschaften zuweisen. Aber es ist uns nicht möglich, sie zu sehen. Woher wissen wir also, dass sie existieren? Weil sie Spuren hinterlassen, die für uns sichtbar gemacht werden. Ein solcher Detektor, der Spuren von Elementar- und Kleinstteilchen sichtbar macht, ist die Nebelkammer.

Materialien:

- Alkohol (möglichst hochprozentig, z.B. Ethanol, Isopropanol, Brennspiritus)
- 1 Plasticaquarium/ Plastikbox; auf einer Seite geöffnet; Größe unerheblich; größere Boxen verbessern das Ergebnis
- Trockeneis für die Kühlung
- 1 Metallplatte; Länge u. Breite jeweils größer als Plastikbox, möglichst dünn; schwarz lackiert oder mit schwarzem Papier
- Holz- o. Styroporbox von ca. 5 Zentimeter Höhe; Länge u. Breite so, dass die Metallplatte hineinpasst
- dichter Filz (einige Millimeter dick), so groß, dass er innen in den Deckel der Plastikbox passt

- 8 starke Magneten, bei größeren Boxen mehr
- 1 bis 2 starke Lichtquellen
- Schutzhandschuhe und Schutzbrille
- Flüssigseife
- ggf. radioaktive Quelle

Hinweise zum Aufbau:

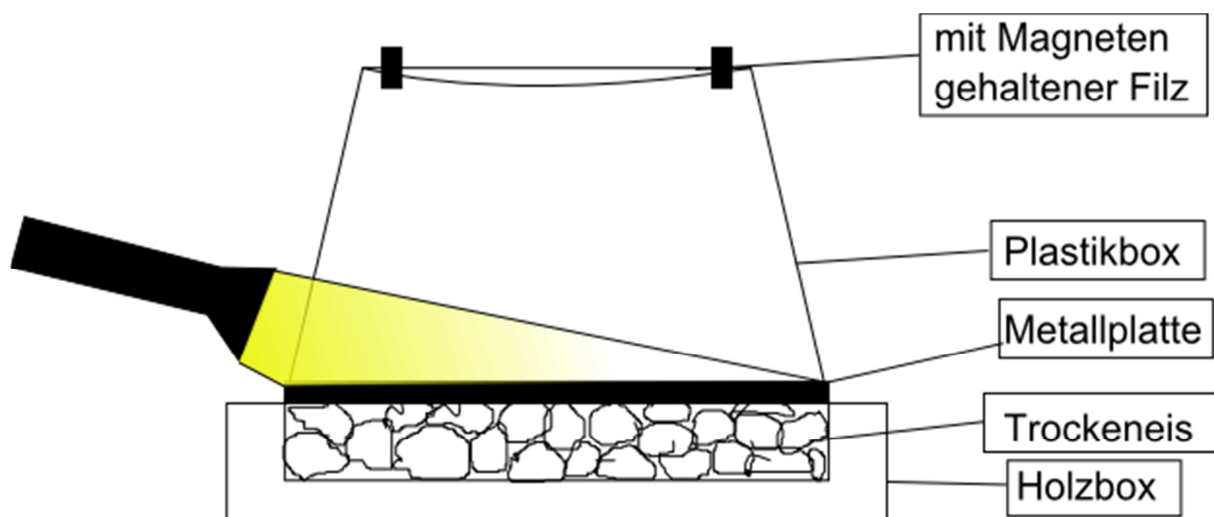
- Für diesen Aufbau wird Trockeneis verwendet. Dieses hat eine Temperatur von -78° Celsius. Eine Berührung mit bloßen Händen kann zu starken Verbrennungen führen. Gerät etwas in die Augen, kann man davon erblinden. Bei der Verwendung immer Schutzhandschuhe und Schutzbrille tragen!
- Der verwendete Alkohol ist hochkonzentriert und damit giftig! Niemals etwas davon trinken! Berührungen sind ungefährlich, einfach mit kaltem Wasser abspülen.

Aufbau:

1. Den Filz mithilfe der Magneten in der Oberseite der Plastikbox befestigen (alternativ zu den Magneten kann er auch angeschraubt oder festgebunden werden)
2. Holz- o. Styroporbox mit Trockeneis füllen
 - Achtung! Bei der Arbeit mit Trockeneis immer Schutzhandschuhe und Schutzbrille tragen!
 - Achtung! Die Fenster öffnen und frische Luft einlassen, da Trockeneis festes CO_2 ist und sublimiert!
 - Darauf achten, dass das Trockeneis gleichmäßig verteilt ist!
3. Die Metallplatte dicht auf das Trockeneis legen
 - Darauf achten, dass zwischen Metallplatte und Trockeneis keine Luft ist!
 - Das möglicherweise auftretende Geräusch wird von den Schwingungen des plötzlich sublimierenden Trockeneises erzeugt und stirbt ab, wenn die Platte abgekühlt ist.
4. Den Filz mit Alkohol tränken
 - Reichlich füllen, beim Kippen der Kammer sollte sich etwas davon in der Ecke sammeln.
5. Die Plastikbox kippen und überflüssigen Alkohol auf die Metallplatte oder das schwarze Papier gießen

- Bei zu viel Alkohol auf dem Boden spiegelt das Experiment zu sehr, wird aber schwarzes Papier verwendet, so muss dieses durchtränkt sein. Auf einer schwarzen Platte ist das nicht nötig.
6. Die Plastikbox auf die Metallplatte stellen
 7. Raum abdunkeln und die Lampen einschalten
 - Es muss nicht vollkommen dunkel sein
 8. Die Lampen leicht schräg neben die Nebelkammer halten, sodass der Boden erleuchtet ist und 5 bis 10 Minuten warten – was ist zu sehen?
 9. Bei Bedarf: Die radioaktive Quelle in oder vor die Kammer legen
 - Ist die Quelle warm, so strömt der Nebel zum Ausgleich auf die Kammer zu, bis die Quelle abgekühlt ist. In dem Fall etwas warten

Skizze:



Funktionsweise:

Der Alkohol im Filz tropft langsam heraus und sättigt dabei tröpfchenweise die warme Luft am oberen Ende. Dabei sinkt er wie Regen nach unten. Im unteren Teil der Nebelkammer ist es sehr viel kälter, weshalb die Luft dort übersättigt wird. Der Alkohol bleibt in Form von instabilem Nebel hängen und bildet eine wenige Zentimeter dicke Schicht über dem Kammerboden. Dringt jetzt ein geladenes Teilchen in die Kammer ein, so ionisiert es die Alkoholtröpfchen, die daraufhin flüssig werden und als Niederschlag zu Boden fallen. Dabei bilden sie eine deutlich sichtbare weiße Spur.

Was sollte zu sehen sein?

- verschiedene Spuren im Nebel stammen von verschiedenen Teilchen, die durch die Kammer fliegen – Beispiele für Teilchenspuren:



Abbildung 16: Ein Myon hinterlässt eine bis zu zehn Zentimeter lange, dünne Spur



Abbildung 16: Ein Elektron hinterlässt eine kürzere (ca. 1 – 5 Zentimeter) dünne Spur



Abbildung 16: Ein Alpha-Teilchen oder Heliumkern hinterlässt eine dicke, kurze Spur



Abbildung 16: Ein von einem Photon ausgelöstes niederenergetisches Elektron hinterlässt eine Zickzack-Spur, da es sich leicht ablenken lässt.

Woher kommen die Spuren?

Die Spuren können unterschiedliche Quellen haben. **Myonen** sowie **Pionen** und andere **Mesonen**, die oben nicht näher erklärt werden, da sie von den anderen Spuren mit den Augen nicht genauer unterschieden werden können, stammen aus sekundärer kosmischer Strahlung, also aus Teilchenzerfällen in unserer Atmosphäre. Mesonen sind dabei sehr selten, da sie nur eine sehr kurze Lebensdauer haben.

Alpha-Strahlung und **Elektronen der Beta-Strahlung** wie auch **Protonen** stammen aus radioaktiver Hintergrundstrahlung. Vieles strahlt, so weist der menschliche Körper zum Beispiel selbst immer eine geringe Menge an Radioaktivität auf. Auch Photonen-Elektronen können von radioaktiver Strahlung stammen, wenn sie zum Beispiel durch Gamma-Strahlung ausgelöst werden.

Wird eine radioaktive Quelle verwendet, so stammen die Spuren zum größten Teil von ihr. Dabei handelt es sich hauptsächlich um **Heliumkerne (Alpha-Teilchen)** und **Elektronen**.

6.2 Bauanleitung - Nebelkammer mit Kühlkompressen

Vorüberlegung:

Die heutige Physik weiß, dass die Welt aus aller kleinsten, nicht mehr teilbaren Teilchen besteht, so genannten Elementarteilchen. Wir können diese Teilchen sogar benennen und ihnen Eigenschaften zuweisen. Aber es ist uns nicht möglich, sie zu sehen. Woher wissen wir also, dass sie existieren? Weil sie Spuren hinterlassen, die für uns sichtbar gemacht werden. Ein solcher Detektor, der Spuren von Elementar- und Kleinstteilchen sichtbar macht, ist die Nebelkammer.

Materialien:

- Alkohol (möglichst hochprozentig, z.B. Ethanol, Isopropanol, Brennspiritus)
- 1 Plasticaquarium/ Plastikbox; auf einer Seite geöffnet; Größe unerheblich; größere Boxen verbessern das Ergebnis
- mehrere Kühlkompressen (sollen den Boden der Plastikbox bedecken), mind. auf -18° Celsius abkühlbar; optimale Farbe schwarz, sonst auch blau möglich
- eine große Holz-oder Styroporplatte; Länge und Breite größer als die Plastikbox; schwarz oder mit schwarzem Papier bedeckt
- dichter Filz (einige Millimeter dick), so groß, dass er innen in den Deckel der Plastikbox passt
- ein Wasserkocher oder eine andere Möglichkeit, mind. einen Liter Wasser zum Kochen zu bringen
- Wärmflaschen, die nebeneinander die Oberseite der Plastikbox abdecken
- ein bis zwei Liter Wasser
- ein Thermometer (Temperaturbereich möglichst von -20° Celsius bis 60° Celsius)
- ein Becherglas
- 8 starke Magneten, bei größeren Boxen mehr
- 1 bis 2 starke Lichtquellen
- Flüssigseife
- ggf. radioaktive Quelle
- ein Kühlfach, möglichst bis mind. -15° Celsius

Hinweise zum Aufbau:

- Der verwendete Alkohol ist hochkonzentriert und damit giftig! Niemals etwas davon trinken! Berührungen sind ungefährlich, einfach mit kaltem Wasser abspülen.
- Kochendes Wasser kann zu Verbrennungen führen. Vorsichtig arbeiten!
- Der Alkohol wird auf 60° Celsius erwärmt. Das kann gefährlich sein! Nur unter Aufsicht arbeiten und niemals in der Nähe einer offenen Flamme arbeiten! Der Alkohol kann sich sonst entzünden und explodieren!
- Der verdampfende Alkohol darf nicht eingeatmet werden

Aufbau:

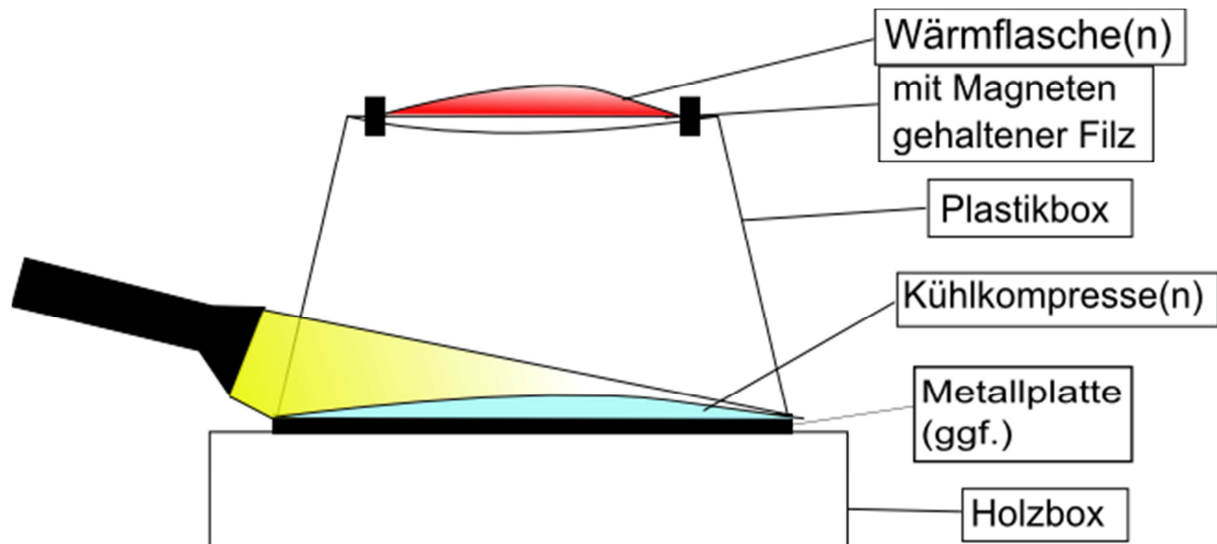
1. Die Kühlkompressen ins Kühlfach legen und möglichst tief abkühlen lassen
2. Den Filz mithilfe der Magneten im Deckel der Kammer befestigen, alternativ anschrauben oder mit Klammern anheften
 - Achtung! Der Filz muss straff gespannt sein und dicht an der Decke der Kammer aufliegen, sonst funktioniert das Experiment nicht!
3. Das Wasser zum Kochen bringen
4. Die Wärmflaschen füllen
5. Den Alkohol in ein Becherglas füllen und im Wasserbad! mithilfe des Thermometers auf 60° Celsius erwärmen
 - Achtung! Den verdampfenden Alkohol auf KEINEN FALL einatmen.
 - Achtung! NIEMALS in der Nähe einer offenen Flamme arbeiten.
 - Vorsicht! Das kochende Wasser kann zu Verbrennungen führen. Bei Kontakt sofort mit kaltem Wasser (oder den Kühlkompressen) kühlen.
6. Den Filz vorsichtig mit dem heißen Alkohol sättigen
7. Die Kühlkompressen auf die schwarze Holz- o. Metallplatte legen
8. Die Plastikbox über die Kühlkompressen stellen
9. Die Wärmflaschen auf die Kammer legen
10. Den Raum abdunkeln und die Lampen einschalten
11. Abwarten...bei großen Kammern kann es bis zu einer halben Stunde dauern, ehe die ersten Spuren sichtbar werden
12. Mit der Lampe den Boden der Kammer erleuchten und auf Spuren warten

13. ggf. die radioaktive Quelle vor oder neben die Kammer legen

- Wird die Plastikbox bewegt oder angehoben, hebt sich der instabile Zustand auf und es dauert wieder, bis Spuren zu sehen sind. Haben sich die Kühlkompressen aufgewärmt, funktioniert die Kammer nicht mehr.

14. Da sich die Kühlkompressen mit der Zeit erwärmen, funktioniert die Nebelkammer nur etwa eine viertel bis halbe Stunde, abhängig von der Anfangstemperatur.

Skizze:



Funktionsweise:

siehe 6.1

Was sollte zu sehen sein?

siehe 6.1

Woher kommen die Spuren?

siehe 6.1

7 Zusammenfassung

Das Ziel der Besonderen Lernleistung war es, den Teilchendetektor „Diffusions-Nebelkammer“ zu erforschen, zu optimieren und ihn für den Schulunterricht nutzbar zu machen.

Eine Diffusionsnebelkammer ist ein Teilchendetektor, bei dem über eine Temperaturdifferenz in einer durchsichtigen Plastikbox ein instabiler Nebel geschaffen wird, in dem geladene Elementar- und Kleinstteilchen Spuren hinterlassen. Diese Teilchen können sowohl aus radioaktiver Alpha- oder Beta-Strahlung stammen und damit Elektronen oder Heliumkerne sein, als auch sekundäre kosmische Strahlung, die bei Teilchenzerfällen aus primärer kosmischer Strahlung in unserer Atmosphäre entsteht. Zu diesen Teilchen gehören vor allem Elementarteilchen wie das Myon oder das Elektron, aber auch seltener Mesonen, die aus zwei Quarks bestehen, wie das Pion oder das Kaon, sowie Baryonen, wie das Proton oder das Neutron. Die neutral geladenen Teilchen hinterlassen dabei selber keine Spuren, können aber Elektronen auslösen, die ihrerseits Spuren hinterlassen.

Die Spuren lassen sich in der Nebelkammer anhand ihrer Länge, ihrer Breite und ihrer Form unterscheiden, sind aber meist nicht eindeutig zuordenbar, da sowohl die Größe der Teilchen als auch ihre Ruhemasse und ihre Energie eine Rolle spielen.

Der Aufbau einer Nebelkammer lässt sich variieren. Entscheidend dabei ist, dass Alkohol über eine gewisse Temperaturdifferenz diffundiert. Beim klassischen Aufbau wird dafür -78° Celsius kaltes Trockeneis eingesetzt. Es konnte gezeigt werden, dass die Nebelkammer auch mit einer Temperatur von -20° Celsius am Boden und 60° Celsius an der Decke funktioniert. In diesem Fall benötigt die Kammer mehr Zeit, um den instabilen Zustand herzustellen und der Betrieb ist nicht ganz so lange möglich. Die Kammer lässt sich mit verschiedenen Alkoholsorten betreiben. Der Alkohol muss dabei nicht rein sein. Es ist möglich, vergleichsweise preiswerten Brennspiritus anstelle des klassisch verwendeten Isopropanols zu verwenden.

Unterschiede in der Häufigkeit der Spuren, sind meistens zufällig, können aber auch vom Aufbau bedingt sein. Allgemein sind zwischen zwanzig und vierzig Spuren in der Minute in einer kleineren Kammer mit Maßen von rund $150 \times 200 \times 300$ mm zu erwarten, in größeren deutlich mehr.

Bei Bau der Kammer können verschiedene Fehlerquellen auftreten. Der häufigste beim Betrieb der Kammer ist, dass die erforderliche Temperaturdifferenz nicht richtig hergestellt wurde, weil der Filz nicht direkt am Deckel der Kammer anliegt und damit nicht ausreichend erwärmt wird oder weil die Metallplatte nicht direkt auf dem Trockeneis aufliegt.

Die Nebelkammer lässt sich mit der Verwendung von Trockeneis problemlos in der Schule einsetzen. Kostengünstiger ist jedoch der Einsatz von Kühlkompressen, wenn es möglich ist, diese auf -18° Celsius abzukühlen. Zu testen wäre noch die minimale Abkühlung der Kühlkompressen, die für den Betrieb der Nebelkammer notwendig ist.

8 Anhang

Anhang 1

34

Tabelle 2: Übersicht über die Eigenschaften einiger Gase und Dämpfe

16

Weitere Entwicklung der Nebelkammertechnik.

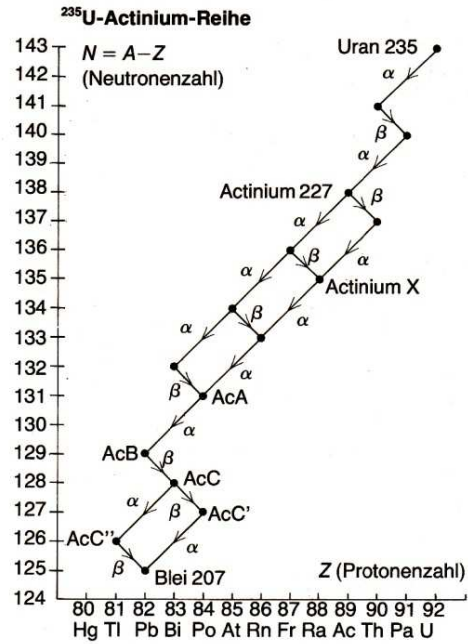
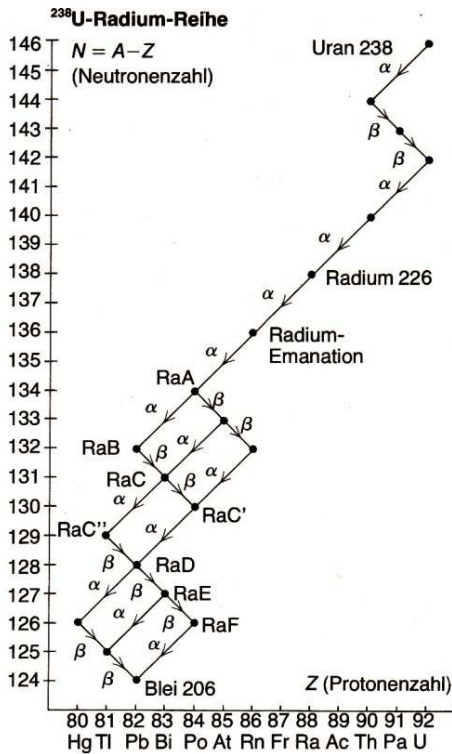
Tabelle 1. Eigenschaften einiger Gase und Dämpfe.

Gas bzw. Dampf	Formel	$\kappa = c_p/c_v$	Sättigungs- dampf- druck bei 20° C, mm Hg	Elek- tronen- zahl je Molekel	Mole- kulares Streu- vermögen vgl. mit Luft	Mole- kulares Brems- vermögen für α -Strahlen vgl. mit Luft	Literatur
Helium	He	1,659	—	2	0,22	0,18	
Neon	Ne	1,67	—	10	0,96	0,62	
Argon	A	1,67	—	18	1,70	0,97	
Krypton	Kr	1,67	—	36	3,35	1,46	
Xenon	Xe	1,67	—	54	5,00	1,88	
Wasserstoff	H ₂	1,408	—	2	0,18	0,20	
Deuterium	D ₂	1,4	—	2	0,18	0,20	
Stickstoff	N ₂	1,405	—	14	0,97	0,99	
Luft		1,401	—		1,00	1,00	
Sauerstoff	O ₂	1,400	—	16	1,10	1,07	
Methan	CH ₄	1,31	—	10	0,65	0,86	
Propan	C ₃ H ₈	1,15	—	26	1,10	2,18	
Azetylen	C ₂ H ₂	1,23	—	14	0,86	1,12	
Kohlendioxyd . . .	CO ₂	1,30	—	22	1,25	1,53	
Wasser	H ₂ O	1,27	17,5	10	0,80	0,74	
Methylalkohol . . .	CH ₄ O	1,703	96	18	1,01	1,4	
Äthylalkohol . . .	C ₂ H ₆ O	1,13	44	26	1,19	2,1	
Propylalkohol . . .	C ₃ H ₈ O	1,27	15,2	34	1,34	2,7	LOCHER (1936)
Bortrifluorid . . .	BF ₃	—	—	32	1,59	2,1	ROAF (1935)
Bortrichlorid . . .	BCl ₃	—	807	56	2,82	3,1	PHILIPP (1929)
Borsaures Methyl .	B(CH ₃ O) ₃	—	105	56	1,81	4,3	BOWER, BRETSCH: u. GILBERT (193)
Tetrafluor- kohlenstoff . . .	CF ₄	1,17	—	42	1,84	2,8	FEATHER (1933)
Tetrachlor- kohlenstoff . . .	CCl ₄	1,13	90	74	3,26	4,1	PHILIPP (1929)
Schwefelkohlenstoff	CS ₂	1,20	296	38	2,22	2,1	
Methyljodid	CH ₃ J	1,29	331	62	4,95	2,6	SIMONS u. ZUBER (1937)
Quecksilber- dimethyl	C ₂ H ₆ Hg	—	36,5 (bei 18,5°)	98	7,44	3,7	BARBER u. CHAMPION (193

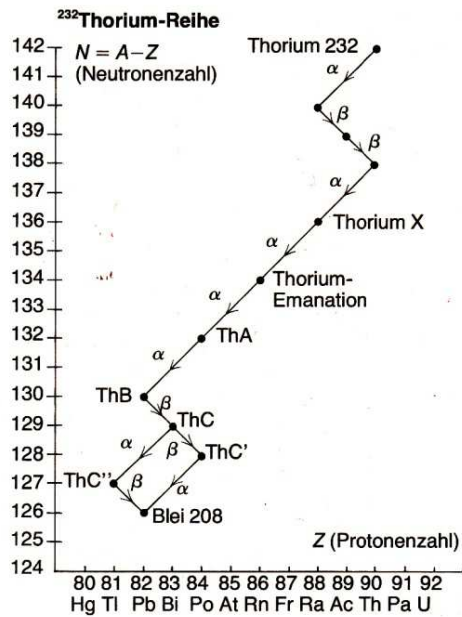
Mischungen von Alkohol mit Wasser erfordern ein kleineres Expansionsverhältnis als die beiden reinen Dämpfe. Das Minimum liegt etwa bei gleichen Teilen Alkohol und Wasser. An Methylalkohol + Wasser haben FROEMKE, BLOOMQUIST und ANDERSON (1933) ausführliche Messungen gemacht. Die meisten Wilsonkammeruntersuchungen werden heute mit Alkohol-Wassergemischen angestellt. Neben dem kleinen Expansionsverhältnis hat man noch den Vorteil, daß die entstehenden Tröpfchen größer sind und daher leichter photographiert werden können.

³⁴ Bothe (1940), S.16

Anhang 2: Die Zerfallsreihen von Uran



Die radioaktiven Hauptzerfallsreihen von Uran und Thorium zeigen, wie sich Kerne durch die drei sehr langlebigen radioaktiven Isotope Uran 238, Uran 235 und Thorium 232 durch Alpha- und Betazerfälle in andere Kerne umwandeln. Diese Kernumwandlungen sind hier in einem Koordinatensystem dargestellt, dessen waagerechte Achse die Ordnungszahl Z angibt und auf dessen senkrechter Achse die Differenz (N) zwischen Atomgewicht (A) und Ordnungszahl Z aufgetragen ist. Die Summe beider Zahlen ergibt das Atomgewicht des jeweiligen Elements. Man kann N hier ebenso als Anzahl der Neutronen lesen; auf der waagerechten Achse ist entsprechend die Anzahl der Protonen aufgetragen. Ein Alphazerfall ist durch einen Pfeil angedeutet, der von rechts oben nach links unten weist, also in Richtung sinkender Ordnungszahl und sinkender Neutronenzahl; ein Betazerfall entspricht einem halb so langen Pfeil von links oben nach rechts unten, also in Richtung wachsender Ordnungszahl. Einige Kerne sind mit den historischen Namen versehen, beispielsweise ist das historische Ra A Polonium 218, Th A entspricht Polonium 216 und Ac A Polonium 215. Die Zerfallswege der Kerne lassen eine Tendenz erkennen – die Kerne streben zum Tal der größten Stabilität, wo sie die geringste innere Energie haben.



Anhang 3: Periodensystem der Elemente

Gruppe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Periode	Ia	IIa	IIIB	IVb	Vb	VIb	VIIb	VIIIb			IB	IIb	IIIa	IVa	Va	VIa	VIIa	VIIIa	
1	1 H 1,01																	2 He 4,00	
2	3 Li 6,94	4 Be 9,01															8 O 15,99	9 F 18,00	10 Ne 20,18
3	11 Na 22,99	12 Mg 24,31															16 S 32,07	17 Cl 35,46	18 Ar 39,95
4	19 K 39,10	20 Ca 40,08	21 Sc 44,96	22 Ti 47,88	23 V 50,94	24 Cr 52,00	25 Mn 54,94	26 Fe 55,85	27 Co 58,93	28 Ni 58,70	29 Cu 63,55	30 Zn 65,39	31 Ga 69,72	32 Ge 72,61	33 As 74,92	34 Se 78,96	35 Br 79,90	36 Kr 83,80	
5	37 Rb 85,47	38 Sr 87,62	39 Y 88,91	40 Zr 91,22	41 Nb 92,91	42 Mo 95,94	43 Tc 98,91	44 Ru 101,07	45 Rh 102,91	46 Pd 106,42	47 Ag 107,87	48 Cd 112,41	49 In 114,82	50 Sn 118,71	51 Sb 121,75	52 Te 127,60	53 I 126,90	54 Xe 131,29	
6	55 Cs 132,91	56 Ba 137,33	57 La 138,91	72 Hf 178,49	73 Ta 180,95	74 W 183,85	75 Re 186,21	76 Os 190,20	77 Ir 192,22	78 Pt 195,08	79 Au 196,97	80 Hg 200,59	81 Tl 204,38	82 Pb 207,20	83 Bi 208,98	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)	
7	87 Fr (223)	88 Ra (226,03)	89 Ac (227)	104 Rf (261)	105 Ha (262)	106 Sg (263)	107 Ns (262)	108 Hs (265)	109 Mt (266)	110 Uun (266)	111 Uuu (266)	112 Uub (266)	113 Uu (268)	114 Uu (268)	115 Uu (268)	116 Uu (269)	117 Uu (269)	118 Uu (269)	
	Lanthanoide		*	58 Ce 140,12	59 Pr 140,91	60 Nd 144,24	61 Pm (146)	62 Sm 150,36	63 Eu 151,96	64 Gd 157,25	65 Tb 158,93	66 Dy 162,50	67 Ho 164,93	68 Er 167,26	69 Tm 168,93	70 Yb 173,04	71 Lu 174,97		
	Actinoide		**	90 Th 232,04	91 Pa 231,04	92 U 238,03	93 Np 237,05	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (254)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)	103 Lr (260)		

36

36

http://www2.chemie.uni-erlangen.de/projects/vsc/chemoinformatik/erlangen/struktur_rep/nomenklatur/elemente.html

Anhang 4: Protokolle

Protokoll 1

Untersuchungen zum Ersatz des Trockeneises

1. Datum: 30.09.2013

Versuch: Erwärmung mit kochendem Wasser

Materialien: 1 kleine Nebelkammer, Brennspritus, kochendes Wasser, Thermometer, Kühlkompressen, Trockeneis

Durchführung:

- Abkühlen der Kühlkompressen mit Trockeneis auf ca. -40° Celsius
- Erwärmen der Brennspritus mit kochendem Wasser auf 40° Celsius
- Aufbau der Nebelkammer

Beobachtung: keine Spuren

2. Datum: 30.09.2013

Versuch: Erwärmung mit kochendem Wasser; Aufrechterhaltung der Temperatur mit Hitzefolie

Materialien: 1 kleine Nebelkammer, Brennspritus, kochendes Wasser, Thermometer, Kühlkompressen, Trockeneis, Hitzefolie

Durchführung:

- Abkühlen der Kühlkompressen mit Trockeneis auf ca. -40° Celsius
- Erwärmen der Brennspritus mit kochendem Wasser auf 40° Celsius
- Aufrechterhaltung der Temperatur von 45° Celsius mit Hitzefolie
- Aufbau der Nebelkammer

Beobachtung: keine Spuren

3. Datum: 11.10.2013

Versuch: Erwärmung mit kochendem Wasser und Rotlichtlampe

Materialien: 1 kleine Nebelkammer, Kühlkompressen, Isopropanol, kochendes Wasser, Thermometer, Rotlichtlampe

Durchführung:

- Temperatur Kühlkompressen: -26° Celsius

- Erwärmung des Isopropanols im Wasserbad auf 70° Celsius
- Aufbau Nebelkammer
- Errichtung Rotlichtlampe darüber
- Aufrechthalten einer Temperatur der Nebelkammerdecke auf 65° Celsius

Beobachtung:

Bildung von Nebel oder dichtem Regen; keine Spuren

Wiederholung; Temperatur der Kühlkompressen auf –30° Celsius; keine Spuren

4. Datum: 14.10.2013

Versuch: Erwärmung mit kochendem Wasser und Rotlichtlampe durch Loch

Materialien: Kühlschrankschrankfach, Kühlkompressen, 1 kleine Nebelkammer, Isopropanol, kochendes Wasser, Thermometer, Rotlichtlampe

Durchführung: siehe oben; zusätzliches Loch in Nebelkammer soll Erwärmung von Isopropanol anstatt der Kammerdecke bewirken

Beobachtung: Isopropanol verdampft nach kurzer Zeit durch Loch

5. Datum: 14.10.2013

Versuch: Erwärmung mit kochendem Wasser und Rotlichtlampe – Wiederholung

Materialien: siehe 11.10.2013

Durchführung: siehe 11.10.2013

Aufbau: siehe 11.10.2013

Beobachtung: siehe 11.10.2013

6. Datum: 14.11.2013

Versuch: Erwärmung mit kochendem Wasser und Rotlichtlampe; Ersatz der Metallplatte durch schwarzes Papier

Materialien: Trockeneis; Kühlkompressen; 1 kleine Nebelkammer; kochendes Wasser; Thermometer; Rotlichtlampe; schwarzes mit Isopropanol durchfeuchtetes Papier

Durchführung:

- Abkühlen der Kühlkompressen mittels Trockeneis auf –40° Celsius
- Erwärmung Isopropanol auf 70° Celsius
- Aufrechterhaltung einer Temperatur von 65° Celsius mit Rotlichtlampe

Beobachtung: keine Spuren

7. Datum: 21.10.2013

Versuch: Erwärmung mit kochendem Wasser; Ersatz der Metallplatte durch schwarzes Papier; Ersatz Isopropanol durch Frostschutzmittel; Ersatz Trockeneis und Kühlkompressen durch Wassereis

Materialien: Frostschutzmittel, Wassereis, kochendes Wasser, 1 kleine Nebelkammer, mit Ethanol durchfeuchtete schwarze Pappe

Durchführung:

- Erwärmung Frostschutzmittel auf 50° Celsius
- Schwarze Pappe auf Wassereis (-5°Celsius)

Beobachtung: keine Spuren

8. Datum: 22.10.2013

Versuch: Erwärmung mit kochendem Wasser; Ersatz Isopropanol durch Frostschutzmittel; Ersatz Trockeneis und Kühlkompressen durch Wassereis

Materialien: Frostschutzmittel, Wassereis, kochendes Wasser, 1 kleine Nebelkammer,

Durchführung:

- Mischen von Frostschutzmittel und kochendem Wasser
- Aufbau Nebelkammer mit Mischung

Beobachtung: keine Spuren

9. Datum: 22.10.2013

Versuch: Erwärmung mit kochendem Wasser; Ersatz Isopropanol durch Frostschutzmittel + Wasser; Ersatz Trockeneis und Kühlkompressen durch Wassereis

Materialien: Frostschutzmittel, Wassereis, kochendes Wasser, 1 kleine Nebelkammer

Durchführung:

- Erwärmung Frostschutzmittel auf 35° Celsius

Beobachtung: keine Spuren

10. Datum: 24.10.2013

Versuch: Erwärmung mit kochendem Wasser; Kühlkompressen auf (abgekühlte Metallplatte)

Materialien: 1 kleine Nebelkammer; kochendes Wasser; Brennspritus; Kühlkompressen; Wärmflasche; Thermometer

Durchführung:

- Kühlkomresse (-18° Celsius) in Nebelkammer auf Metallplatte
- Erwärmung Brennspritus auf 60° Celsius
- Aufrechterhaltung der Temperatur mittels mit kochendem Wasser gefüllter Wärmflasche

Beobachtung:

- deutlich erkennbare Spuren über blauem Kühlkomresse
- mehrmals identifizierbare Elektronen und Myonen

11. Datum: 26.10.2013

Versuch: Erwärmung mit kochendem Wasser; Kühlkomresse auf (abgekühlte Metallplatte) - Wiederholung

Materialien: 1 kleine Nebelkammer; kochendes Wasser; Brennspritus; Kühlkompressen; Wärmflasche; Thermometer

Durchführung:

- Kühlkomresse (-18° Celsius) in Nebelkammer auf Metallplatte
- Erwärmung Brennspritus auf 60° Celsius
- Aufrechterhaltung der Temperatur mittels mit kochendem Wasser gefüllter Wärmflasche

Beobachtung:

- 13:20 Aufbau
- 13:22 dichter Regen
- 13:28 erste Spur
- --- immer deutlicher werdende Spuren
- 13:40 Funktion lässt nach
- 13:45 keine Spuren mehr erkennbar

Auswertung: Die Einstellungszeit der kleinen Nebelkammer mit einer Temperatur von -18° Celsius der Kühlkompressen und 60° Celsius heißem Brennspritus, der mit einer mit kochendem Wasser gefüllten Wärmflasche warm gehalten wird, beträgt ca. 10 Minuten, Spuren sind für ca. 20 Minuten sichtbar

12. Datum: 05.11.2013

Versuch: Erwärmung mit kochendem Wasser; Kühlkomresse auf (abgekühlte Metallplatte); selbst gebaute Nebelkammer

Materialien: selbst gebaute Nebelkammer; kochendes Wasser; Brennspritus; 5 Kühlkompressen; Wärmflasche; Thermometer

Durchführung:

- Erwärmung Brennspritus auf 60° Celsius
- Aufrechterhaltung Temperatur mittels Wärmflasche mit kochendem Wasser
- Kühlkompressen –17° Celsius
- 4 Kühlkompressen unter dünner Metallplatte; 1 darüber
- Wärmflasche auf Nebelkammer

Beobachtung:

- ständiger Regen
- keine Spuren
- Temperatur unterer Bereich ca. 0° Celsius

13. Datum: 17.11.2013

Versuch: Erwärmung mit kochendem Wasser; Kühlkomresse auf (abgekühlte Metallplatte); selbst gebaute Nebelkammer + kleine Nebelkammer

Materialien: selbst gebaute Nebelkammer; 1 Nebelkammer klein; kochendes Wasser; Brennspritus; 6 Kühlkompressen; 3 Wärmflaschen; Thermometer

Durchführung:

- Erwärmung Brennspritus auf 60° Celsius
- Aufrechterhaltung Temperatur mittels Wärmflaschen mit kochendem Wasser
- Kühlkompressen –17° Celsius
- Aufbau beider Nebelkammern
- Alle Kühlkompressen auf Metallplatte (selbst gebaute Nebelkammer 5; kleine Nebelkammer 1)

Beobachtung:

- 19:30 Aufbau
- 19:45 Spuren in kleiner Nebelkammer

- 20:00 keine Spuren in kleiner Nebelkammer
- 20:05 Spuren in selbst gebauter Nebelkammer → zwar kleiner, aber mehr
- 20:30 Abbruch Experiment

Auswertung: Mit dem vorher entwickelten Experimentablauf und den Kühlkompressen auf der Metallplatte funktioniert die kleine Nebelkammer nach etwa einer viertel Stunde nach dem Aufbau etwa eine viertel Stunde lang, die selbst gebaute Nebelkammer braucht etwa doppelt so lange, funktioniert aber länger.

14. Datum: 24.11.2013

Versuch: Erwärmung mit kochendem Wasser; Kühlkomresse auf (abgekühlte Metallplatte); selbst gebaute Nebelkammer + kleine Nebelkammer

Materialien: selbst gebaute Nebelkammer; kochendes Wasser; Brennspiritus; 4 Kühlkompressen; 2 Wärmflaschen; Thermometer

Durchführung:

- Erwärmung Brennspiritus auf 60° Celsius
- Aufrechterhaltung Temperatur mittels Wärmflaschen mit kochendem Wasser
- Kühlkompressen –17° Celsius
- Aufbau Nebelkammer
- Alle Kühlkompressen auf Metallplatte

Beobachtung: keine Spuren

Protokoll 2

Untersuchung hinsichtlich Alkoholsorte und Füllmenge

Datum: 19.08.2013

Materialien: 9 kleine Nebelkammern, Brennspiritus (95%), Isopropanol, Ethanol, radioaktive Quelle, Trockeneis

Vorbereitung: Zusammenbau der Nebelkammern; Füllung mit Flüssigkeiten

Beobachtung:

Flüssigkeit	Menge (ml)	Laufzeit	Beobachtung
Ethanol	25	mind. 3 Stunden	viele, dünne, kleine Spuren (+Quelle)
Ethanol	35	mind. 3 Stunden	viele, dünne, kleine Spuren (+Quelle)
Ethanol	50	mind. 3 Stunden	viele, dünne, kleine Spuren (+Quelle)
Isopropanol	25	2,5 Stunden, dann Trockeneis alle	viele, dünne, kleine Spuren (+Quelle)
Isopropanol	35	2,5 Stunden, dann Trockeneis alle	viele, dünne, kleine Spuren (+Quelle)
Isopropanol	50	mind. 3 Stunden	viele, dünne, kleine Spuren (+Quelle)
Isopropanol	40+Boden bedeckt	mind. 3 Stunden	viele, dünne, kleine Spuren (+Quelle)
Isopropanol	voll	mind. 3 Stunde	viele, dünne, kleine Spuren (+Quelle)
Brennspiritus	40	mind. 3 Stunden	viele, dünne, kleine Spuren (+Quelle)

Auswertung: Die Füllmenge der Flüssigkeit beeinflusst die Wirksamkeit der Kammer kaum, mehr Flüssigkeit scheint aber die Deutlichkeit der Spuren zu fördern. Dabei liegt die optimale und maximale Flüssigkeitsmenge bei dieser Kammer bei etwa 50 ml.

Auch die Art der Flüssigkeit spielt keine entscheidende Rolle. Die Spuren in der mit Brennspiritus gefüllten Nebelkammer tauchten lediglich leicht verspätet gegenüber der mit Ethanol bzw. Isopropanol gefüllten Kammern auf.

Um die Ergebnisse zu bestätigen, sollte das Experiment wiederholt werden.

Protokoll 3

Untersuchung hinsichtlich Alkoholsorte und Füllmenge

Datum: 02.09.2013

Materialien: 6 kleine Nebelkammern, Brennspritus (95%), Isopropanol, Ethanol, radioaktive Quelle, Trockeneis

Vorbereitung: Zusammenbau der Nebelkammern; Füllung mit Flüssigkeiten

Beobachtung: Laufzeit der Kammern: Abbruch nach 2,5 Stunden

Flüssigkeit	Menge (ml)	Beobachtung
Ethanol	25	Einige verschiedene Spuren; nach 2h Spiegel auf Boden wegen unregelmäßiger Flüssigkeitsverteilung
Ethanol	mehr als gesättigt	Einige verschiedene Spuren; Deutlich zu viel Alkohol auf Boden verursacht Spiegelwirkung
Isopropanol	25	einige verschiedene Spuren
Isopropanol	Mehr als gesättigt	einige verschiedene Spuren
Brennspritus	25	einige verschiedene Spuren
Brennspritus	Mehr als gesättigt	einige verschiedene Spuren

Bemerkungen: Die Spiegelwirkung verschlechtert die Sichtbarkeit der Spuren, da die Reflektion des Lichtes den Nebel unsichtbar macht. Unabhängig davon sind die Spuren in allen Kammern gleich gut zu sehen. Der Einsatz einer Quelle verstärkt ihre relative Häufigkeit.

Auswertung: Die Beobachtungen vom 19. August konnten größtenteils bestätigt werden. Für das Experiment kommt jede Alkoholsorte inklusive Brennspritus infrage. Bei der Flüssigkeitsmenge sollte nicht zu viel verwendet werden, da der Boden dann verspiegelt wird, der Alkohol sollte selbstständig nicht aus dem Filz fließen oder in großen Tropfen fallen. Für Nebelkammern dieser Größe sind etwas unter 50 ml ausreichend.

Protokoll 4

Untersuchung hinsichtlich des Kammervolumens

Datum: 02.09.2013; 04.09.2013; 09.09.2013

Materialien: Brennspritus, 1 Nebelkammer groß (TU), 1 Nebelkammer selbstgebaut, 1 Nebelkammer klein

Vorbereitung:

- mehrmaliges Verwenden der Kammern im Abstand von mind. 2 Tagen
- Füllung mit Brennspritus
- kleine Flüssigkeitsmengen auf Kammerboden

Beobachtung:

Zeitpunkt	Nebelkammer	Laufzeit	Beobachtung
02.09.13	klein	Abbruch nach 2,5 h	viele verschiedene, eher kürzere Spuren mit Quelle nach wenigen Minuten
02.09.13	TU	Abbruch nach 0,75 h	eher seltene Spuren, mit Quelle große Mengen kürzerer, undeutlicher, erst nach 15 min
04.09.13	selbst gebaut	Abbruch nach 30 min (Trockeneis alle)	da nicht direkt auf Trockeneis aufliegend zunächst kein Nebel, mit mehr Trockeneis viele lange Spuren auch ohne Quelle
04.09.13	TU	Abbruch nach 2h	nach wenigen Minuten viele große Spuren, mit Quelle viele kleinere
04.09.13	klein	Abbruch nach 2h	nach ca. 5 Minuten eher kleinere Spuren, mit Quelle deutlich mehr
09.09.13	selbst gebaut	40 min	gerade ohne Quelle bedeutend mehr Spuren als in anderen Experimenten, häufig 5 – 10 Spuren gleichzeitig, bilden dichtes Netz
09.09.13	TU	Abbruch nach 2h	häufigere Spuren als kleine Nebelkammer, seltener als selbst

			gebaute, undeutlicher, mit Quelle viele Spuren, aber undeutlicher, dünnes Netz
09.09.13	klein	Abbruch nach 2h	eher seltene kleine Spuren, mit Quelle mehr

Bemerkungen:

04.09.13:

- große Nebelkammern beschlagen weniger und langsamer
- schwarze Platte bei selbst gebauter Nebelkammer nicht vorhanden, Nebel anfangs nicht sichtbar
- selbst gebaute Nebelkammer liegt nicht lange genug auf Trockeneis auf

09.09.13

- Problem bei selbst gebauter Nebelkammer gelöst: dank Randerniedrigung Aufliegen auf Trockeneis gewährleistet
- Problem bei selbst gebauter Nebelkammer gelöst: bei vorheriger Durchnässung des schwarzen Papiers sofortige Sichtbarkeit des Nebels
- → Schwärzung der Metallplatte soll künftigen Problemen vorbeugen
- große Nebelkammern deutlich besser

Auswertung:

Die großen Nebelkammern haben sich bei den Experimenten besonders auf kurze Zeit als deutlich besser erwiesen, da sie viel mehr Spuren zeigen, auch wenn sie weniger lange funktionieren.

Der Ersatz der schwarzen Lackierung durch schwarzes Papier ist möglich, wird das schwarze Papier zuvor mit dem Alkanol durchnässt.

Protokoll 5

Untersuchung hinsichtlich der Verwendung radioaktiver Präparate

1. Datum: 21.10.2013

Materialien: 1 Nebelkammer klein, Trockeneis, Frostschutzmittel, Flüssigseife, radioaktive Quelle (Uranocircuit)

Vorbereitung:

- Start der kleinen Kammer 13:30

Beobachtung:

14:30 Hinzufügen der radioaktiven Quelle im Inneren der Kammer

Entstehung von dichtem Nebel, der auf die Quelle zuströmt

14:32 erste erkennbare Alphastrahlen strömen scheinbar auf die Quelle zu

14:34 Nebelblase um den Stein herum, am dichtesten an radioaktiver Stelle

14:36 Nebelblase behindert Sicht der Spuren

15:00 Nebelblase verschwunden, Nebel bewegt sich normal

Sehr viele Spuren an radioaktiver Stelle

Auswertung:

Die radioaktive Quelle hat eine höhere Temperatur als der Rest der Kammer, weshalb sich die Luft zum Ausgleich auf diese zubewegt. Das bewirkt eine Art „Blase“, die sich um die Quelle herum bildet, sowie eine Bewegung des Nebels, bis die Quelle abgekühlt ist. Anschließend sind sehr deutliche Spuren erkennbar, von denen die meisten Heliumkernen zuzuordnen sind.

2. Datum: 02.12.2013

Materialien: 1 Nebelkammer klein; Trockeneis; Thorium-Stab; Ethanol

Vorbereitung:

- Stab in der Mitte der aufgebauten kleinen Nebelkammer liegend

Beobachtung:

- Fast sofort beeindruckend viele unterschiedlich geformte Spuren
- Mehrere Millimeter dicke, bis 2 Zentimeter lange
- Dünne, bis 7 Zentimeter lange
- In alle Richtungen
- Viele Formen, auch spiralförmig

Auswertung:

Die etwa gleich verteilte Häufigkeit von Beta⁻-Strahlung und Alpha-Strahlung am Thorium-Stab konnte nachgewiesen werden. Die Strahlung ist sofort sehr gut erkennbar. Der Stab musste sich nicht erst an die Temperatur der Kammer anpassen.

Protokoll 6

Untersuchung hinsichtlich der Unterscheidung der Spuren mithilfe einer Trennwand

1. Datum: 28.10.2013

Materialien: 1 große Nebelkammer, Trockeneis, Ethanol, Alufolie, Uranocircuit

Vorbereitung:

- Aufbau Nebelkammer
- Aufbau eines Hindernisses aus zwei Schichten Alufolie
- Einlegen der radioaktiven Quelle vor dem Hindernis

Beobachtung:

- viele von der Quelle ausgehende Spuren
- häufig bis zu fünf Zentimeter entfernte Spuren
- hinter Hindernis seltener

Auswertung

Es waren keine Spuren sichtbar, die eindeutig durch das Hindernis hindurch gegangen sind oder davon gestoppt wurden. Das Hindernis hat keinen sichtbaren Beitrag zur Unterscheidung der Spuren geleistet.

2. Datum: 11.11.2013

Materialien: 1 kleine Nebelkammer, 50 ml. Ethanol, Trockeneis, Uranocircuit, Aluminiumfolie

Vorbereitung:

- Aufbau der Kammer
- Einfügen von Hindernis und Quelle wie am 28.10.2013

Beobachtung:

- Spuren nicht weitreichend genug → Hindernis wird nicht erreicht
- Beobachtung der Spuren in Richtung Hindernis schwer

Auswertung

Wie in dem Experiment am 28.10.2013 waren keine durch das Hindernis unterscheidbaren Spuren sichtbar.

Protokoll 7

Untersuchung zur Relativen Häufigkeit der Strahlung in der Nebelkammer ohne Einsatz von radioaktiven Quellen

Materialien: Trockeneis, 1 Nebelkammer klein (), Stoppuhr, Lampe (klein, weißes Licht), Isopropanol

Durchführung: Zählen der Spuren pro Minute zu verschiedenen Zeiten nach Beginn des Aufbaus; Nebelkammer voll ausgeleuchtet

Versuche:

1. Datum: 09.10.2013

Aufbau: 13:00

Start der Messung: 14:45

Ende der Messung: 15:45

Spuren pro 1 Minute	15	16	14	9	9	13	16	21	16	19	19	19	17
Relative Häufigkeit in $\frac{1}{s}$	0,25	0,27	0,23	0,15	0,15	0,22	0,27	0,35	0,27	0,32	0,32	0,32	0,28

Relative Häufigkeit: 0,26 $\frac{1}{s}$

Start der Messung: 16:53

Ende der Messung: 18:35

Spuren pro 1 Minute	23	21	18	25	24	21	27
Relative Häufigkeit in $\frac{1}{s}$	0,38	0,35	0,3	0,42	0,4	0,35	0,45
Spuren pro 1 Minute	24	22	19	18	16	22	27
Relative Häufigkeit in $\frac{1}{s}$	0,4	0,37	0,32	0,3	0,27	0,37	0,45

Relative Häufigkeit: 0,365 $\frac{1}{s}$

2. Datum: 10.10.2013

Aufbau: 8:45

Start der Messung: 9:10

Ende der Messung: 9:20

Spuren pro 1 Minute	39	24	29	21	18	20
Relative Häufigkeit in $\frac{1}{s}$	0,65	0,4	0,48	0,35	0,3	0,33

Relative Häufigkeit: $0,42 \frac{1}{s}$

Start der Messung: 11:10

Ende der Messung: 11:30

Spuren pro 1 Minute	23	14	15	20	15	20
Relative Häufigkeit in $\frac{1}{s}$	0,38	0,23	0,25	0,33	0,25	0,33

Relative Häufigkeit: $0,297 \frac{1}{s}$

Start der Messung: 13:10

Ende der Messung: 13:30

Spuren pro 1 Minute	0	3	22	33	26	31
Relative Häufigkeit in $\frac{1}{s}$	0	0,05	0,37	0,55	0,43	0,516

Relative Häufigkeit: $0,32 \frac{1}{s}$

3. Datum: 11.10.2013

Aufbau: 9:00

Start der Messung: 9:10

Ende der Messung: 9:25

Spuren pro 1 Minute	37	29	27	20	24	16
Relative Häufigkeit in $\frac{1}{s}$	0,617	0,483	0,45	0,33	0,4	0,25

Relative Häufigkeit: $0,425 \frac{1}{s}$

Start der Messung: 11:15

Ende der Messung: 11:30

Spuren pro 1 Minute	41	35	43	46	47	71
Relative Häufigkeit in $\frac{1}{s}$	0,68	0,58	0,7	0,76	0,78	1,18

Relative Häufigkeit: $0,789 \frac{1}{s}$

4. Datum: 15.10.2013

Aufbau: 12:05

Start der Messung: 12:15

Ende der Messung: 12:35

Spuren pro 1 Minute	5	3	6	5	3	10
Relative Häufigkeit in $\frac{1}{s}$	0,083	0,05	0,1	0,083	0,05	0,167

Relative Häufigkeit: 0,0888 $\frac{1}{s}$

Start der Messung: 13:10

Ende der Messung: 13:20

Spuren pro 1 Minute	13	10	8	8	6	7
Relative Häufigkeit in $\frac{1}{s}$	0,2	0,167	0,133	0,133	0,1	0,117

Relative Häufigkeit: 0,142 $\frac{1}{s}$

5. Datum: 16.10.2013

Aufbau: 09:15

Start der Messung: 9:20

Ende der Messung: 9:35

Spuren pro 1 Minute	8	3	5	8	4	8
Relative Häufigkeit in $\frac{1}{s}$	0,133	0,05	0,083	0,133	0,067	0,133

Relative Häufigkeit: 0,998 $\frac{1}{s}$

Start der Messung: 10:10

Ende der Messung: 10:25

Spuren pro 1 Minute	4	3	15	6	11	9
Relative Häufigkeit in $\frac{1}{s}$	0,067	0,05	0,25	0,1	0,183	0,15

Relative Häufigkeit: 0,133 $\frac{1}{s}$

Start der Messung: 11:10

Ende der Messung: 11:20

Spuren pro 1 Minute	5	7	7	10	9	7
Relative Häufigkeit in $\frac{1}{s}$	0,083	0,117	0,117	0,167	0,15	0,117

Relative Häufigkeit: 0,125 $\frac{1}{s}$

Start der Messung: 12:10

Ende der Messung: 12:20

Spuren pro 1 Minute	5	9	5	9	4	3
Relative Häufigkeit in $\frac{1}{s}$	0,083	0,15	0,083	0,15	0,067	0,05

Relative Häufigkeit: $0,097 \frac{1}{s}$

---Änderung des Ortes! Vorher: CERN; Danach: TU DRESDEN, IKTP---

6. Datum: 21.10.2013

Aufbau: 13:30

Start der Messung: 13:45

Ende der Messung: 14:00

Spuren pro 1 Minute	34	20	25	55	60	46
Relative Häufigkeit in $\frac{1}{s}$	0,567	0,33	0,417	0,917	1	0,767

Relative Häufigkeit: $0,666 \frac{1}{s}$

7. Datum: 28.10.2013

Aufbau: 13:45

Start der Messung: 14:00

Ende der Messung: 14:15

Spuren pro 1 Minute	11	30	29	53	55	56	Bemerkung: Kammer schräg bei erster Zählung
Relative Häufigkeit in $\frac{1}{s}$	0,183	0,5	0,483	0,883	0,917	0,933	

Relative Häufigkeit: $0,65 \frac{1}{s}$

Start der Messung: 15:10

Ende der Messung: 15:25

Spuren pro 1 Minute	14	39	39	30	45	42
Relative Häufigkeit in $\frac{1}{s}$	0,233	0,65	0,65	0,5	0,75	0,7

Relative Häufigkeit: $0,581 \frac{1}{s}$

Start der Messung: 16:10

Ende der Messung: 16:25

Spuren pro 1 Minute	26	24	19	39	35	32
Relative Häufigkeit in $\frac{1}{s}$	0,433	0,4	0,317	0,65	0,583	0,533

Relative Häufigkeit: $0,486 \frac{1}{s}$

8. Datum: 28.10.2013

Aufbau: 13:50

Start der Messung: 14:15

Ende der Messung: 14:30

Spuren pro 1 Minute	45	60	63	55	80	38
Relative Häufigkeit in $\frac{1}{s}$	0,75	1	1,05	0,917	1,33	0,633

Relative Häufigkeit: $0,947 \frac{1}{s}$

Start der Messung: 15:25

Ende der Messung: 15:40

Spuren pro 1 Minute	1	8	30	38	39	40	Bemerkung: Unreinheit des Bodens
Relative Häufigkeit in $\frac{1}{s}$	0,017	0,133	0,5	0,633	0,65	0,667	

Relative Häufigkeit: $0,433 \frac{1}{s}$

Start der Messung: 16:25

Ende der Messung: 16:40

Spuren pro 1 Minute	12	12	7	26	15	21
Relative Häufigkeit in $\frac{1}{s}$	0,2	0,2	0,117	0,433	0,25	0,35

Relative Häufigkeit: $0,258 \frac{1}{s}$

9. Datum: 11.11.2013

Aufbau: 16:35

Start der Messung: 16:50

Ende der Messung: 17:20

Spuren pro 1 Minute	38	30	32	30	38
Relative Häufigkeit in $\frac{1}{s}$	0,633	0,5	0,533	0,5	0,633

Relative Häufigkeit: $0,559 \frac{1}{s}$

Start der Messung: 17:45

Ende der Messung: 18:00

Spuren pro 1 Minute	40	47	37	30
Relative Häufigkeit in $\frac{1}{s}$	0,667	0,783	0,617	0,5

Relative Häufigkeit: 0,642 $\frac{1}{s}$

10. Datum: 11.11.2013

Aufbau: 16:36

Start der Messung: 16:50

Ende der Messung: 17:20

Spuren pro 1 Minute	31	34	32	16	33
Relative Häufigkeit in $\frac{1}{s}$	0,517	0,567	0,533	0,267	0,55

Relative Häufigkeit: 0,487 $\frac{1}{s}$

Start der Messung: 17:45

Ende der Messung: 18:00

Spuren pro 1 Minute	48	33	35	35
Relative Häufigkeit in $\frac{1}{s}$	0,8	0,55	0,583	0,583

Relative Häufigkeit: 0,629 $\frac{1}{s}$

11. Datum: 11.11.2013

Aufbau: 16:37

Start der Messung: 16:50

Ende der Messung: 17:20

Spuren pro 1 Minute	62	40	40	36	31
Relative Häufigkeit in $\frac{1}{s}$	1,033	0,667	0,667	0,6	0,516

Relative Häufigkeit: 0,697 $\frac{1}{s}$

Start der Messung: 17:45

Ende der Messung: 18:00

Spuren pro 1 Minute	45	42	56	46
Relative Häufigkeit in $\frac{1}{s}$	0,75	0,7	0,933	0,767

Relative Häufigkeit: 0,788 $\frac{1}{s}$

Auswertung: Es ist keine direkte Regelmäßigkeit in der Häufigkeit der Spuren erkennbar, weder in Abhängigkeit von der Laufzeit noch von der Aufbauzeit. Der Ort könnte einen Einfluss auf die Spuren haben, der jedoch nicht eindeutig nachgewiesen werden konnte. Im Durchschnitt sind pro Minute zwischen zwanzig und vierzig Spuren zu erwarten.

Protokoll 8

Untersuchung hinsichtlich der Vorzugsrichtung der Strahlung

Datum: 11.10.2013

Materialien: 1 große Nebelkammer (CERN), Kompass, Trockeneis, Isopropanol

Vorbereitung:

- Aufbau Nebelkammer
- Feststellung der Himmelsrichtung mittels Kompass

Beobachtung:

- Richtung nicht bestimmbar oder zu viele Spuren
- keine Vorzugsrichtung feststellbar

Auswertung

Das Experiment ist zur Bestimmung der Vorzugsrichtung nicht vertretbar, da alle Ergebnisse subjektiv und nicht eindeutig sind. Dazu ist es noch schwierig, überhaupt eine Richtung festzustellen.

Datum: 11.11.2013

Materialien: 1 kleine Nebelkammer, 50 ml. Ethanol, Trockeneis,

Vorbereitung:

- Aufbau der Kammer

Beobachtung:

- meisten Spuren scheinbar quer zur Beobachtungsrichtung (Nord nach Süd), d.h. aus Richtung Fenster
- Richtung nie eindeutig; häufig nur quer/senkrecht zuordenbar → Richtung nicht feststellbar
- einige aus Richtung Menschen
- viele gar nicht identifizierbar

Auswertung

Wie in dem Experiment am 11.10. waren keine eindeutigen Richtungen feststellbar, auch wenn scheinbar die meisten Spuren aus Richtung Fenster kommen. Es lohnt sich nicht, solche Experimente ohne gute Materialien durchzuführen, auch wenn es nicht schaden kann, nebenbei zu beobachten, ob doch Auffälligkeiten bei anderen Experimenten feststellbar sind.

9 Literaturverzeichnis

Allkofer, Otto C.: Teilchen-Detektoren. Thiemig-Taschenbücher 41. München 1971.

Backmund, Udo; Wilhelm, Thomas: Anleitung zum Selbstbau einer kontinuierlichen Diffusions-Nebelkammer. URL: http://www.thomas-wilhelm.net/veroeffentlichung/Backmund_Beitrag.pdf [Abrufdatum: 12.07. 2012].

Barnett, R. Michael; Mühry, Henry; Quinn, Helen R.: The Charm of Strange Quarks. Mysteries and revolutions of particle physics. New York 2000.

Berger, Christoph: Elementarteilchenphysik. Von den Grundlagen zu den modernen Experimenten. 2. Aufl. Berlin Heidelberg 2006.

Bjørken, B.J.; Glashow, S.L.: Elementary particles and SU (4). http://www.sciencedirect.com/science?_ob=PdfExcerptURL&_imagekey=1-s2.0-0031916364904330-main.pdf&_piikey=0031916364904330&_cdi=272686&_user=107896&_acct=C000008398&_version=1&_userid=107896&md5=a59402fcf6764bdf358246183409bdc8&ie=/excerpt.pdf [Abrufdatum: 18.10.2013].

Bleck-Neuhaus, Jörn: Elementare Teilchen. Von den Atomen über das Standard-Modell bis zum Higgs-Boson. 2. Aufl. Berlin Heidelberg 2010, 2013.

Bothe, Walther; Gentner, Wolfgang; Maier-Leibnitz, Heinz: Atlas typischer Nebelkammerbilder. Mit Einführung in die Wilsonsche Methode. Berlin 1940.

Bredthauer, Wilhelm [u.a.]: Impulse Physik. Oberstufe. Stuttgart 2007.

Bredthauer, Wilhelm [u.a.]: Atome Kerne Quanten. Stuttgart 1987.

Chapple, David: Particle Physics. Dark Matter and Dark Energy. Bury St Edmunds, Suffolk 2011.

Ebert, Bernd [u.a.]: Lehrbuch Physik Sekundarstufe 2. Thermodynamik Optik Kernphysik Relativitätstheorie. Berlin 1994.

F.A.Brockhaus (Hrsg.): Der neue Brockhaus. Lexikon und Wörterbuch in fünf Bänden und einem Atlas. Bd. 3 J – NEU. Aufl.6. Wiesbaden 1979.

Ford, Kenneth W.: Die Welt der Elementarteilchen. Heidelberger Taschenbücher. Heidelberg 1966.

Gläser, Manfred: Die Nebelkammer im experimentellen Unterricht. Praxis-Schriftenreihe: Abteilung Physik; 33. Köln 1976.

Gruppen, Claus: Teilchendetektoren. Mannheim; Leipzig; Wien; Zürich 1993.

Hoeschen, Christoph: Das reale Strahlenbild bei einer Röntgenthoraxaufnahme. PTB-Opt 67. Braunschweig 2002.

Jekel, Maiko: Ausarbeitung eines Gesamtexperimentierkonzeptes zur Kamiokanne. Bad Gandersheim 2011. URL: http://physik-begreifen-zeuthen.desy.de/sites2009/site_PhyBegZ/content/e2198/e2451/e6374/e6382/e113505/e113506/BachelorJekel_ger.pdf [Abrufdatum: 07.10.2013].

Katche, O.I.; Kazavčinskij, Jakov Z.; Wagenknecht, Monika (Übersetzerin): Eine Zustandsgleichung für Wasserdampf. in: Teploenergetika 5 (1958), Nr. 7, S. 26-30. Online-Ressource.

Knof, Hans: Massenspektrometrie von Kondensationskeimen in der Gasphase. Reprotext. Weinheim 1974.

Kobel, Michael: Masterclasses mit LHC-Daten: Auf Augenhöhe mit der aktuellen Forschung. Dresden 2013. URL: http://iktp.tu-dresden.de/IKTP/pub/13/MK_masterclasses_Dresden_lehrer13_neu.pdf [Abrufdatum: 10.12.2013].

Kuhn, Wilfried: Physik. Bd.3 Gesamtband. Braunschweig 1981.

Kuntze, Eugen; Morgenstern, Jürgen: Physik Grundkurs. Atomphysik. München 1990.

Ludwig, Margrit; Jupe, Klaus (Hrsg.): Spezielle Relativitätstheorie. Atomphysik. Frankfurt am Main 1995.

Matthes, Siegfried; Okrusch, Martin: Mineralogie. Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde. 7. Aufl. Heidelberg 2005.

Musiol, Gerhard; Reif, Roland; Seeliger, Dieter: Kern- und Elementarteilchenphysik. Berlin 1980.

Particle Data Group: Particle Physics Booklet. July 2012. Genf 2012.

Ong, René Ashwin: Measurement of the b hadron lifetime. Stanford, California 1987. <http://www.slac.stanford.edu/pubs/slacreports/reports14/slac-r-320a.pdf> [Abrufdatum: 08.10.2013].

Quadt, Arnulf: Top quark physics at hadron colliders. 2006. doi:10.1140/epjc/s2006-02631-6 http://download.springer.com/static/pdf/602/art%253A10.1140%252Fepjc%252Fs2006-02631-6.pdf?auth66=1381392583_b0b5c3a2c7873d46d0fc0d83989cddb3&ext=.pdf [Abrufdatum: 18.10.2013]

Rapp, Thomas: Experimente mit selbstgebauten Geigerzählern, Funken- und Nebelkammern. Grundlagen und Praxis der radioaktiven Messtechnik. Online-Ressource. Haar 2009.

Rückeis, Rachel; Wagner, Dora: Bau einer Nebelkammer. Eine Anleitung, Schritt für Schritt. Online-Ressource. Cern 2011.

Sächsisches Staatsministerium für Kultus und Sport (Hrsg.): Lehrplan Gymnasium. Physik. URL: http://195.37.90.111/apps/lehrplandb/downloads/lehrplaene/lp_gy_physik_2011.pdf [Abrufdatum: 03.11.2012].

Schuster, Christian: Bau einer kontinuierlichen Nebelkammer und Bestimmung der Energie von Alpha-Teilchen. (2006). URL: <http://jugendforsch.fiz-karlsruhe.de/cgi-bin/ih?ID=32241.1.0.3590562170&ACTION=filter&+PARAM=smsshowpdf+/data/ih3000/files/jufoinput/attachment/lj4sk1a.pdf> [Abrufdatum: 09.10.2013].

Schuster, Norbert: Mineralbestimmung durch einfache chemische und physikalische Methoden. München 2007.

Schweizerische Eidgenossenschaft: Montrealer Protokoll über Stoffe die zu einem Abbau der Ozonschicht führen. Montreal 1987. URL: <http://www.admind.ch/opc/de/classified-compilation/19870179/index.html#fn1> [Abrufdatum: 09.10.2013].

Stolz, Werner: Radioaktivität. Grundlagen-Messung-Anwendungen. 5. Aufl. Wiesbaden 2005.

Storr, Mick: Cloud Chamber Workshop.

URL: <http://teachers.web.cern.ch/teachers/document/cloud-final.pdf> [Abrufdatum: 11.07.2012].

Taha, Ali: Der Einfluss von Druck und Temperatur auf den Diffusionskoeffizienten von Dampf/Gas-Gemischen. Fortschritt-Berichte der VDI Zeitschriften Reihe 2 Nummer 34. Düsseldorf 1970.

Weibrecht, Rudolf: Das Geiger-Zählrohr und andere Strahlendetektoren. 2. Aufl. Leipzig 1962.

Weinberg, Steven: Teile des Unteilbaren. Entdeckungen im Atom. Spektrum der Wissenschaft Bd.2. Heidelberg 1984.

Homepage:

URL: <http://www.cloudchambers.com/> [Abrufdatum: 11.07.2012].

URL:

http://teachers.web.cern.ch/teachers/archiv/HST2005/bubble_chambers/BCwebsite/index.htm [Abrufdatum: 11.07.2012].

URL: <http://w4.lns.cornell.edu/~adf4/cloud.html> [Abrufdatum: 11.07.2012].

URL: http://www-outreach.phy.cam.ac.uk/camphy/cloudchamber/cloudchamber10_1.htm [Abrufdatum: 11.07.2012].

URL: <http://www.atlas.ch/> [Abrufdatum: 22.10.2012].

URL: <http://www.rapp-instruments.de/Radioaktivitaet/cloud-chambers/difussion/difussion.htm> [Abrufdatum: 02.11.2012].

URL: <http://erlangen.physicsmasterclasses.org/titelseite.html> [Abrufdatum: 20.01.2013].

URL: <http://www.meduniwien.ac.at/7tesla/> [Abrufdatum: 19.09.2013].

URL: http://www.uni-ulm.de/fileadmin/website_uni_ulm/nawi.inst.251/Didactics/quantenchemie/html/PSE-F.html [Abrufdatum: 07.10.2013].

URL: http://www2.chemie.uni-erlangen.de/projects/vsc/chemoinformatik/erlangen/struktur_rep/nomenklatur/elemente.html [Abrufdatum: 07.10.2013].

URL: <http://psi.physik.kit.edu/img/Teilchen.png> [Abrufdatum: 07.10.2013].

URL: <http://kworkquark.desy.de/lexikon/index/1/index.html> [Abrufdatum: 10.10.2013].

URL: <http://pdg.lbl.gov/> [Abrufdatum: 10.10.2013].

URL: http://www.digitalkamera.de/Kamera/Canon/PowerShot_A480.aspx [Abrufdatum: 10.10.2013].

URL: <http://www.quick-cool-shop.de/peltierelemente-know-how/> [Abrufdatum: 27.11.2013].

URL: <http://www.physi.uni-heidelberg.de/Einrichtungen/AP/anleitungen/Versuch221.pdf> [Abrufdatum: 04.12.2013].

URL: http://lehrerfortbildung-bw.de/faecher/chemie/gym/fb2/modul2/info/61_dalton_atommodell_ab06.pdf [Abrufdatum: 07.12.2013]

URL: http://www.ipkm.tu-bs.de/fileadmin/user_upload/documents/grundpraktikum/V08_Adiabatenkoeffizient.pdf [Abrufdatum: 07.12.2013]

10 Selbstständigkeitserklärung

Ich versichere hiermit, dass ich diese Arbeit selbstständig angefertigt, nur die angegebenen Hilfsmittel verwendet und alle Stellen, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Quellen entnommen sind, durch Angabe der Quellen als Übernahme kenntlich gemacht habe.

Ort, Datum

Unterschrift