

Schüler *Labor*

GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung

Station 8

Auswertung von Nebelkammerbildern

Inhalt

Inhalt.....	1
Auswertung von Nebelkammerbildern	2
Worum es geht	2
V.1. Der Experimentierplatz.....	2
V.2. Aufnahmen der Bilder	2
V.3. Die Halbwertszeitmessung.....	4
V.4. Die Anpassung der Exponentialfunktion	6
V.4.1. Die Methode der "verschwindenden Fehlersumme"	8
V.4.2. Die Methode der kleinsten Fehlerquadrate.....	8
V.5. Die Energiemessung.....	9
V.6. Die Kalibrierung der Längenskala (optional)	11
Hintergrundwissen:	12
H.1. Die Nebelkammer	12
H.2. Die Nebelkammer im Schülerlabor	14
H.3. Radioaktivität	16
H.4. Alpha- und Beta-Zerfall	16
H.5. Zerfallsreihen	17
H.6. Halbwertszeit	19
H.7. Die Reichweite von Alpha-Strahlung in Luft.....	20

Auswertung von Nebelkammerbildern

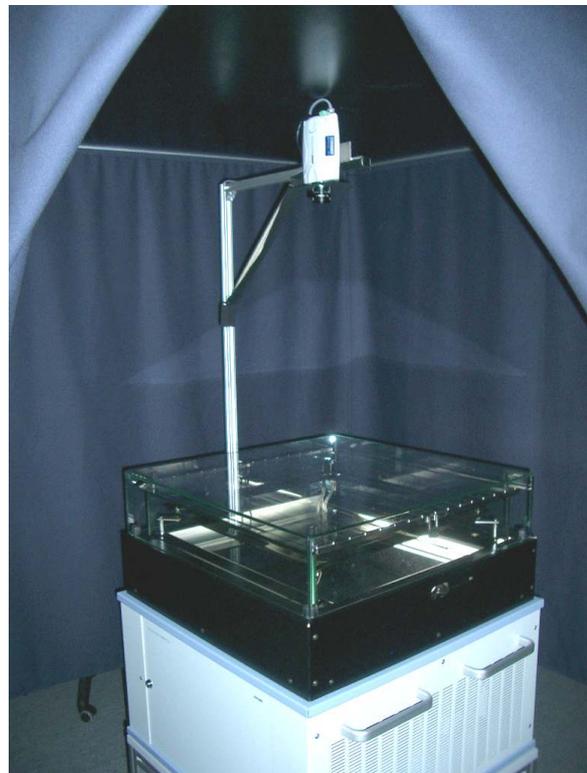
Worum es geht

In einer großen **Diffusions-Nebelkammer** können in jeder Sekunde zahlreiche **Spuren kosmischer und terrestrischer Strahlung** beobachtet werden, die normalerweise unsichtbar sind. Nach Einblasen einer geringen Menge von Radongas kann man die Spuren der beim **Zerfall von Radon** emittierten **α -Teilchen** beobachten und mit einer **Video-Kamera** aufzeichnen. Diese Bilder werden am Computer ausgewertet. So kann man die **Geschwindigkeit und die kinetische Energie der α -Teilchen** messen und die **Halbwertszeit von Radon** experimentell bestimmen.

V.1. Der Experimentierplatz

Die Nebelkammer des Schülerlabors befindet sich unter einem „Zelt“ aus dunklem Stoff, um das Umgebungslicht bei der Beobachtung der oft sehr schwachen Nebelspuren zu reduzieren. Direkt über der Nebelkammer ist eine Videokamera (Webcam) fest installiert, mit der die Bilder über das Intranet an den Arbeitsplatz-PC übertragen werden.

☞ Beobachten Sie die Nebelkammer über mehrere Minuten und zählen Sie, wie oft in der Minute die Spur eines α -Teilchen auftritt, ohne dass eine radioaktive Quelle in das Innere der Nebelkammer eingebracht wurde (sog. „Nullrate“).



V.2. Aufnahmen der Bilder

Für die Bildaufnahme der Nebelkammerspuren mit der fest installierten Überwachungskamera sind zwei Möglichkeiten vorgesehen:

☞ Wählen Sie in Ihrem Experimentordner das Icon „Nebelkammer“.



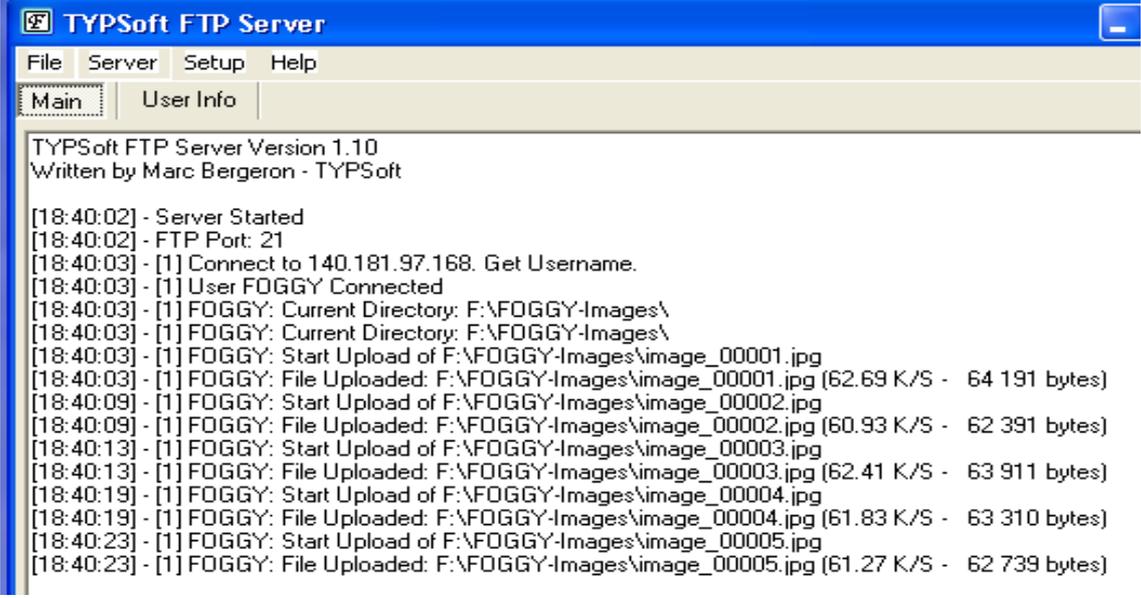
Damit können die Nebelkammerbilder mit einem üblichen Browser (z.B. dem Internet-Explorer) ständig auf dem Bildschirm angezeigt werden. Prüfen Sie, ob die Kamera scharfe Bilder liefert und ob die Objektivblende offen ist. Sollte die Seite nicht dargestellt werden, verständigen Sie bitte einen Betreuer, der einen Reset der Kamera durchführt.

☞ Für die Messung der Halbwertszeit müssen die Nebelkammerbilder in einem festen Zeittakt überwacht werden. Dies geschieht mit einem FTP-Serverprogramm, das durch Anklicken des Icons „TYPSoft FTP Server“ auf dem Desktop gestartet werden kann.



Nach dem Start öffnet sich das Serverfenster und man erkennt, dass die ersten Bilddateien empfangen und auf die Festplatte geschrieben werden.

Unter dem Menüpunkt SERVER kann das Serverprogramm gestartet und gestoppt werden.



```
TYPSoft FTP Server Version 1.10
Written by Marc Bergeron - TYPSoft

[18:40:02] - Server Started
[18:40:02] - FTP Port: 21
[18:40:03] - [1] Connect to 140.181.97.168. Get Username.
[18:40:03] - [1] User FOGGY Connected
[18:40:03] - [1] FOGGY: Current Directory: F:\FOGGY-Images\
[18:40:03] - [1] FOGGY: Current Directory: F:\FOGGY-Images\
[18:40:03] - [1] FOGGY: Start Upload of F:\FOGGY-Images\image_00001.jpg
[18:40:03] - [1] FOGGY: File Uploaded: F:\FOGGY-Images\image_00001.jpg (62.69 K/S - 64 191 bytes)
[18:40:09] - [1] FOGGY: Start Upload of F:\FOGGY-Images\image_00002.jpg
[18:40:09] - [1] FOGGY: File Uploaded: F:\FOGGY-Images\image_00002.jpg (60.93 K/S - 62 391 bytes)
[18:40:13] - [1] FOGGY: Start Upload of F:\FOGGY-Images\image_00003.jpg
[18:40:13] - [1] FOGGY: File Uploaded: F:\FOGGY-Images\image_00003.jpg (62.41 K/S - 63 911 bytes)
[18:40:19] - [1] FOGGY: Start Upload of F:\FOGGY-Images\image_00004.jpg
[18:40:19] - [1] FOGGY: File Uploaded: F:\FOGGY-Images\image_00004.jpg (61.83 K/S - 63 310 bytes)
[18:40:23] - [1] FOGGY: Start Upload of F:\FOGGY-Images\image_00005.jpg
[18:40:23] - [1] FOGGY: File Uploaded: F:\FOGGY-Images\image_00005.jpg (61.27 K/S - 62 739 bytes)
```

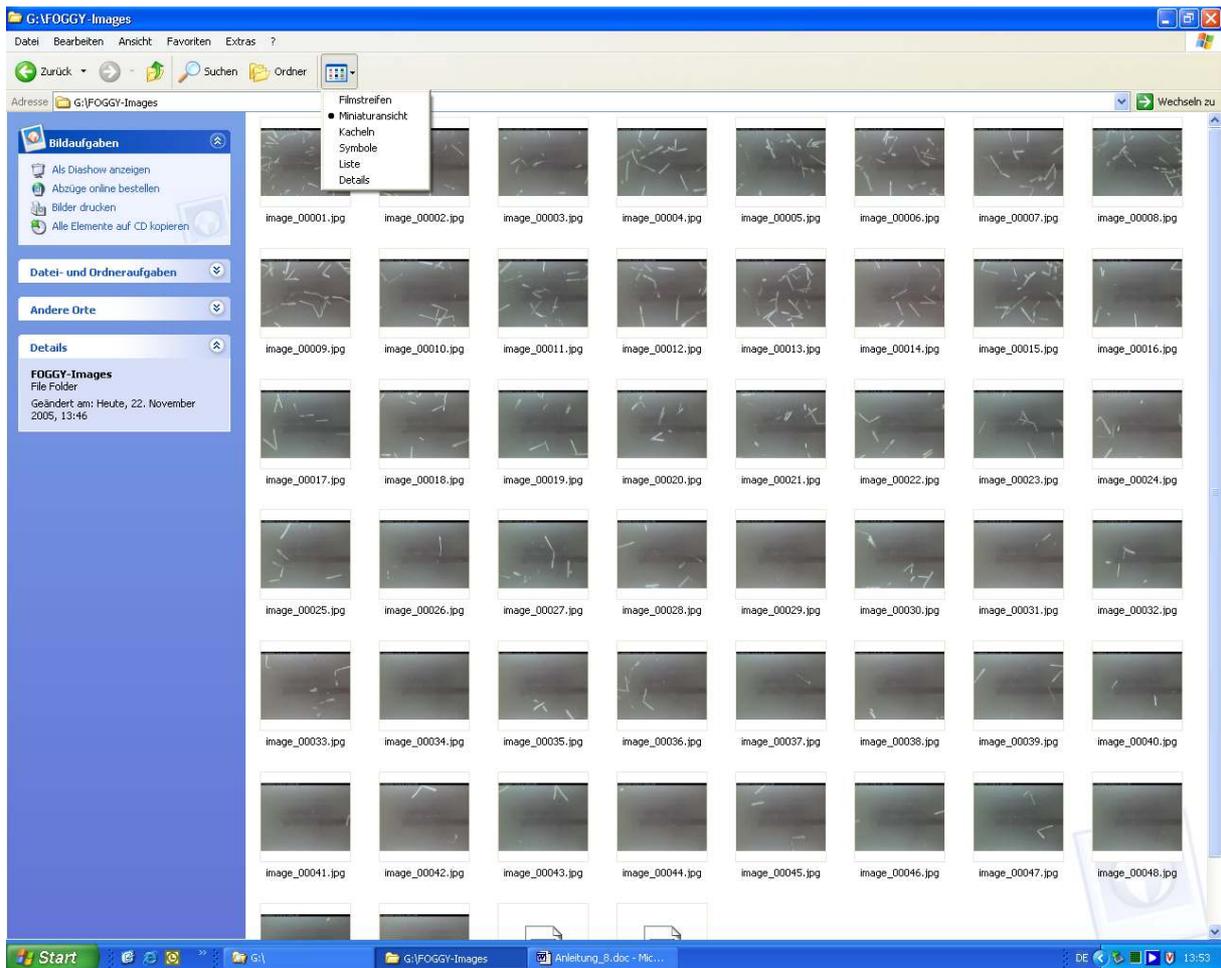
Nach dem Start nimmt die Kamera nun alle 5 Sekunden das aktuelle Nebelkammerbild auf und stellt es als JPEG-Bild unter einer festen IP-Adresse ins Netzwerk. Auf dem Arbeitsplatzrechner läuft nun der FTP-Server, der insgesamt 50 dieser Bilddateien auf die lokale Festplatte schreiben wird (**F:\FOGGY-Images\image_00001.jpg, ...**).

Nach der 50. Bilddatei wird die zuerst geschriebene Datei mit den neuen Bilddaten überschrieben. Auf diese Weise liegen immer die 50 zuletzt aufgenommenen Bilddateien auf der lokalen Festplatte vor und können mit üblichen Grafik-Tools weiter verarbeitet werden.

☞ Starten Sie den FTP-Server und nehmen Sie für eine **Nullratenbestimmung** eine vollständige Sequenz von 50 Bildern auf.

☞ Öffnen Sie mit dem Windows-Explorer den Ordner **User Data (F:)/FOGGY-Images/** und stellen Sie die dorthin gespeicherten Bilder mit dem Windows-Eplorer in Miniaturansicht dar (vgl. Abbildung auf der nächsten Seite).

☞ Lassen Sie sich alle Bilder als „Diashow“ darstellen (Navigation mit den Cursor-Tasten) und bestimmen Sie aus dieser Sequenz die mittlere Anzahl der Alphateilchen pro aufgenommenem Bild. Diese Nullrate sollte unter 0,5 Ereignissen pro Bild liegen. Wenn dies der Fall ist, kann bei den weiteren Messungen auf eine **Nullraten-Korrektur** verzichtet werden. Im anderen Fall muss die Nullrate von den Messwerten abgezogen werden (s.u.).



V.3. Die Halbwertszeitmessung

☞ Starten Sie das FTP-Serverprogramm und stoppen Sie die Bildaufnahme im Menüpunkt SERVER und lassen Sie das Menü geöffnet.

☞ Bitten Sie nun den Betreuer, etwas Radongas in die Nebelkammer einzuleiten.

☞ Warten Sie einen Moment, bis sich das Radongas in der Nebelkammer verteilt hat, und sich eine möglichst homogene räumliche Verteilung der Spuren eingestellt hat. Starten Sie dann den FTP-Server und nehmen Sie maximal 50 Bilder auf.

☞ Betrachten Sie die einzelnen Aufnahmen wie im vorherigen Abschnitt als „Diashow“. Typischerweise sehen Sie am Anfang sehr viele Spuren wie in der Abbildung.



☞ Interpretieren Sie diese Bilder vor dem Hintergrund Ihrer Kenntnisse über den Rn-220-Zerfall (vgl. Hintergrundwissen) und beantworten Sie folgende Fragen:

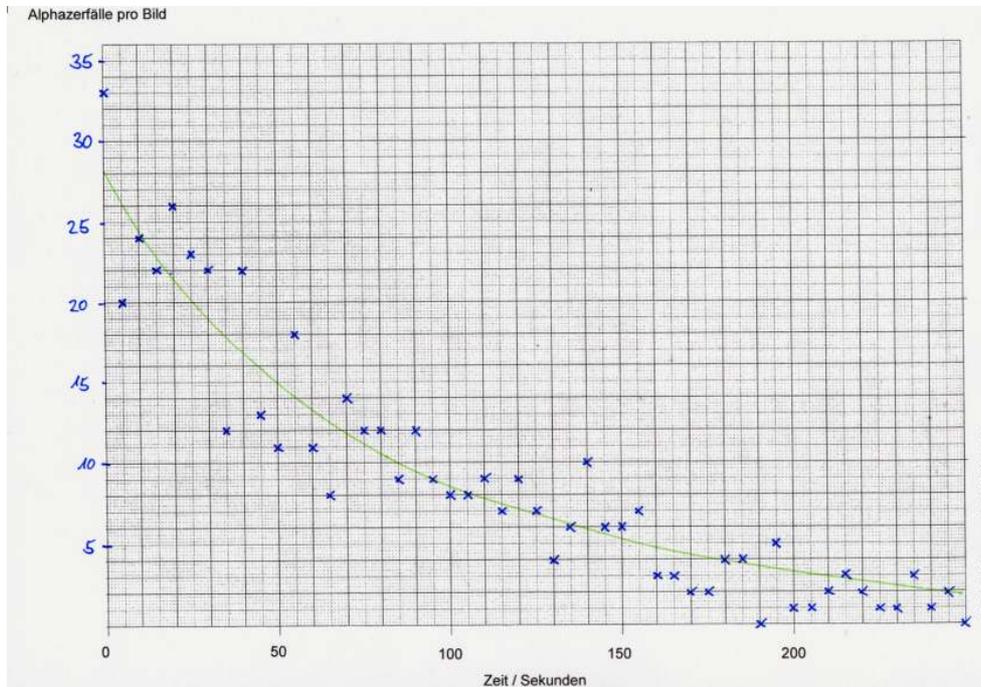
- Warum sind sehr oft „Gabelspuren“ zu sehen, d.h. zwei Spuren, die von annähernd demselben Raumpunkt auszugehen scheinen.
- Warum haben die Spuren unterschiedliche Längen?
- Warum gibt es aber offenbar auch manchmal Einzelspuren?
- Warum ist es sinnvoll, beim Abzählen der Radon-220-Zerfälle in einem Bild nach folgender **Zählregel** vorzugehen:
"Eine Doppelspur wird als ein Radon-220-Zerfall gezählt,
eine Einzelspur wird ebenfalls als ein Radon-Zerfall gezählt."

☞ Wählen Sie nun ein geeignetes Anfangsbild aus und zählen Sie unter Beachtung der Zählregel in diesem und allen unmittelbar darauf folgenden Bildern die Anzahl N aller Rn-Zerfälle. Ordnen Sie dem ersten Messwert $N(0)$ den Zeitpunkt „Null Sekunden“ zu. Die unmittelbar darauf folgenden Messwerte sind dann $N(5)$, $N(10)$ usw.

Tragen Sie Ihre die Werte in folgende Tabelle ein:

t / s	N(t)
0	...
5	...
...	...

☞ Korrigieren Sie diese Zahlen, wenn nötig, bezüglich der **Nullrate** (vgl. V.2.) und tragen Sie die Wertepaare auf mm-Papier in ein geeignetes Koordinatensystem ein (s.u.). Naturgemäß werden die eingetragenen Datenpunkte stark streuen:



☞ Zeichnen Sie per Hand und nur nach Augenmaß eine möglichst glatte Kurve so durch die Datenpunkte, dass diese im Mittel möglichst wenig von dieser Kurve abweichen.

☞ Bestimmen Sie aus dieser Kurve rein graphisch möglichst genau die Halbwertszeit von Radon-220!

V.4. Die Anpassung der Exponentialfunktion

Das im vorigen Abschnitt praktizierte „Glätten“ der Messwerte „von Hand“ liefert manchmal erstaunlich gute Ergebnisse, ist aber doch sehr willkürlich und unbefriedigend, hängt der Erfolg doch sehr vom Augenmaß und Geschick des Auswertenden ab.

In der Physik kommt es oft vor, dass man – wie in unserem Falle - viele fehlerbehaftete und statistische Schwankungen unterworfenen Messwerte in einem zweidimensionalen Diagramm eingetragen hat, und eine Kurve so durch die Datenpunkte legen möchte, dass sie möglichst gut zu den Messwerten passt. Man nennt diesen Vorgang „fitten“ (engl.: to fit, anpassen).

Die Kurve wird mit einer sog. **Fitfunktion** erzeugt. Die Fitfunktion ist ein mathematisches Modell, das die Messung erklären soll. Die Fitfunktion wird an die Messdaten angepasst, indem ihre Parameter berechnet werden. Wir machen uns dies im Folgenden an unseren Daten deutlich.

Aus der Theorie des radioaktiven Zerfalls wissen wir (vgl. Hintergrundwissen), dass die Zahl $A(t)$ der Rn-Zerfälle pro Aufnahme nach dem Zerfallsgesetz mit der Zeit t abnimmt:

$$A(t) = A_0 \cdot 2^{-\frac{t}{t_{1/2}}} \quad \text{bzw.} \quad A(t) = A_0 \cdot e^{-t\lambda}$$

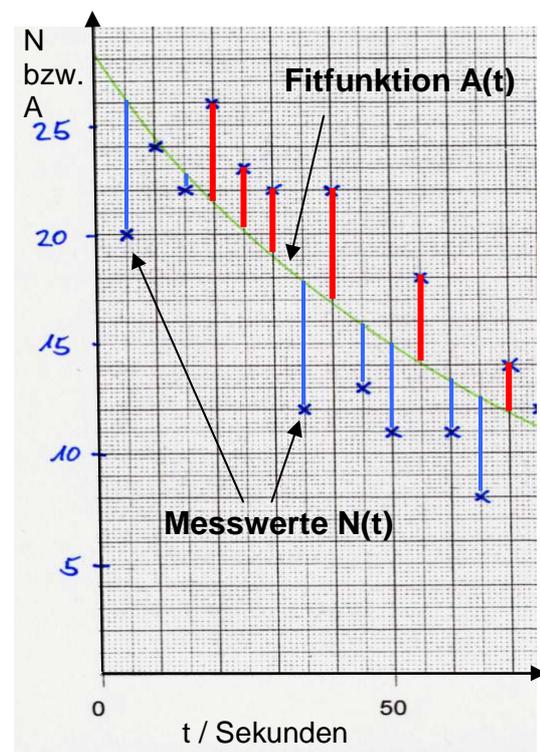
A_0 ist hierbei die Anzahl der Rn-Zerfälle in der zum Zeitpunkt $t=0$ gemachten Aufnahme,
 $t_{1/2}$ ist die Halbwertszeit,
 e ist die Eulersche Zahl ($e = 2,718281\dots$) und
 λ ist die mit der Halbwertszeit verknüpfte sogenannte Zerfallskonstante.

Die Kenntnis des Zerfallsgesetzes liefert uns also die obige Exponentialfunktion als Fitfunktion $A(t)$ und es ist nun unsere Aufgabe, die **beiden Parameter A_0 und $t_{1/2}$ bzw. λ** in dieser Fitfunktion so zu bestimmen, dass die Messwerte $N(t)$ durch die Funktion $A(t)$ optimal beschrieben („approximiert“) werden. Zu betonen ist hierbei, dass es im allgemeinen wesentlich mehr Datenpunkte gibt als Parameter.

Zunächst ist es nicht klar, wie man die Güte verschiedener Approximationen beurteilen soll. Betrachten wir die Messfehler noch einmal in dem nebenstehenden Ausschnitt unserer Auswertung. Die positiven Abweichungen von der Fitfunktion als rote, die negativen Abweichungen als blaue Balken dargestellt.

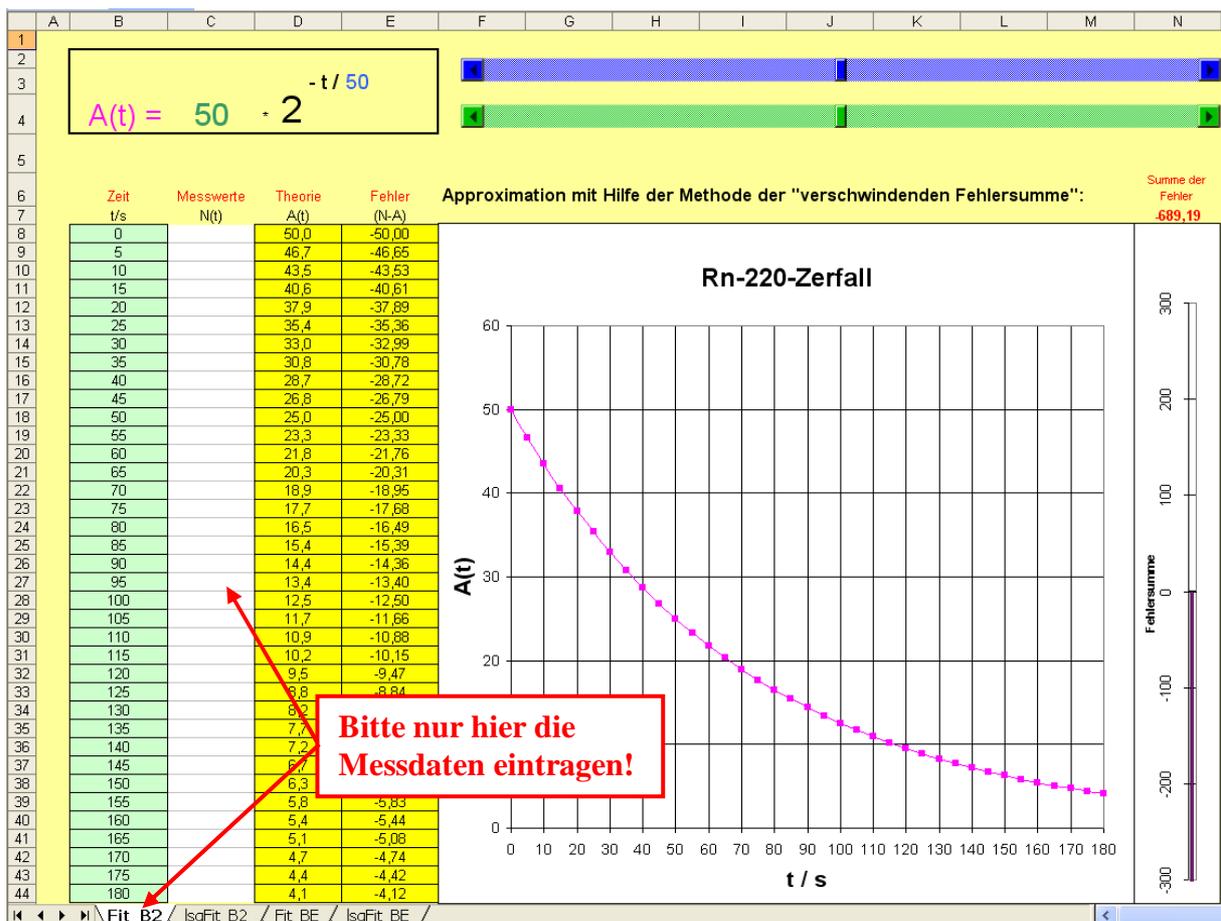
Es erscheint zunächst einmal unmittelbar einleuchtend, dass die im Bild grün eingezeichnete Fitfunktion die Daten dann besonders gut beschreibt, wenn sich diese Abweichungen gegenseitig aufheben, d.h. wenn die Summe aller Fehler möglichst gering ist.

Wir wollen im Folgenden untersuchen, wie man die optimale Fitfunktion mathematisch herleiten kann.



- ☞ Starten Sie zunächst das Programm EXCEL vom Desktop aus und stellen Sie im Menü **EXTRAS / MAKROS / SICHERHEIT** die **Makrosicherheit auf "mittel"** ein.
- ☞ Öffnen Sie anschließend die EXCEL-Arbeitsmappe „**Zerfallsgesetz_Fit**“ aus Ihrem Experiment-Ordner und erlauben Sie beim Nachfrage ausdrücklich die Verwendung von Makros.
- ☞ Tragen Sie anschließend Ihre Messwerte in die weiße Spalte N(t) des ersten Arbeitsblattes der Mappe mit dem Namen **Fit_B2** ein.

Alle anderen Zellen dürfen nicht verändert werden!



- ☞ Bevor Sie nun mit dem Fitten beginnen, sollten Sie sich mit der Bedienung des Arbeitsblatts vertraut machen: Über dem Diagramm gibt es zwei Schieberegler. Der obere (blaue) dient zur Auswahl des Wertes von $t_{1/2}$, mit dem unteren (grünen) kann der Wert von A_0 verändert werden. Die Fitfunktion A(t) mit den jeweils eingestellten Parameterwerten wird in dem umrandeten Kasten links neben den Schiebereglern angezeigt und in dem Koordinatensystem als Graph dargestellt.

V.4.1. Die Methode der "verschwindenden Fehlersumme"

Diese Methode wird mit den EXCEL-Arbeitsblättern **Fit_B2** (zur Basis 2) bzw. **Fit_BE** (zur Basis e) erläutert. Bitte beachten Sie, dass die **Messwerte nur einmal in dem Blatt Fit_B2 eingegeben werden** (von dort werden sie automatisch in alle weiteren Rechenblätter kopiert).

Mit diesen beiden Werten wird nun der Wert der Fitfunktion $A(t)$ für alle t -Werte berechnet und in der Spalte D ausgegeben. Gleichzeitig werden diese Werte als magentafarbene Punkte im Diagramm dargestellt. In der Nachbarspalte E wird aus den Messwerten $N(t)$ und der Theorie $A(t)$ der "Fehler" $N-A$ berechnet.

 Probieren Sie, die Parameterwerte mit Hilfe der Schieberegler so zu einzustellen, dass die Fehlersumme möglichst klein wird. Diese wird in der Zelle N7 berechnet, und im rechten Teil des Diagramms als Balken angezeigt.

 Versuchen Sie, mit dieser Methode die Halbwertszeit $t_{1/2}$ eindeutig zu bestimmen!

 Woran liegt es, dass diese Methode kein eindeutiges Ergebnis für $t_{1/2}$ liefert?

V.4.2. Die Methode der kleinsten Fehlerquadrate

Die Mathematiker Gauß und Legendre hatten die Idee, weitere Annahmen über die Messfehler zu machen. Sie sollten, wie wir soeben gesehen haben, im Durchschnitt Null sein. In der Sprache der Stochastik kommen noch folgende Bedingungen hinzu: Jeder Messfehler soll die gleiche Varianz haben und von jedem anderen Messfehler stochastisch unabhängig sein. Damit verlangt man, dass in den Messfehlern keinerlei systematische Information mehr steckt. Sie sollen also rein zufällig um Null schwanken. Außerdem sollten die Messfehler normalverteilt sein, was zum einen wahrscheinlichkeitstheoretische Vorteile hat und zum anderen garantiert, dass „Ausreißer“ so gut wie ausgeschlossen sind.

Das Kriterium zur Bestimmung der Güte der Approximation muss dieses alles berücksichtigen und so gewählt werden, dass große Abweichungen der Modellfunktion von den Daten viel stärker "bestraft" werden als kleine. Alle diese Überlegungen führen letztendlich zu folgendem Verfahren:

Methode der kleinsten Fehlerquadrate (least square method):

Es werden diejenigen Parameter ausgewählt, bei denen die Summe der Quadrate der Abweichungen zwischen der Modellkurve und Daten (kurz auch Summe der Fehlerquadrate) minimal wird im Vergleich zu anderen Wahlen der Parameter.

 Wählen Sie das Rechenblatt **IsqFit_B2** (Basis 2) bzw. **IsqFit_BE** (Basis e) aus und optimieren Sie nun die Fitfunktion noch einmal nach der Methode der kleinsten Quadrate. Zeigen Sie durch systematisches abwechselndes Verändern der beiden Parameter, dass es bei dieser Methode nur eine eindeutig bestimmte Fitfunktion gibt, bei der die Summe der Fehlerquadrate minimal ist und bestimmen Sie so die Halbwertszeit $t_{1/2}$! (Wenn Sie mit dem Zerfallsgesetz zur Basis e gearbeitet haben, müssen Sie die Halbwertszeit $t_{1/2}$ noch aus der Zerfallskonstante λ berechnen).

 Ermitteln Sie aus der Isotopentafel den Literaturwert für die Halbwertszeit von Rn-220 und vergleichen Sie diese mit dem von Ihnen gemessenen Wert. Um wie viel Prozent weicht Ihr Wert vom Literaturwert ab?

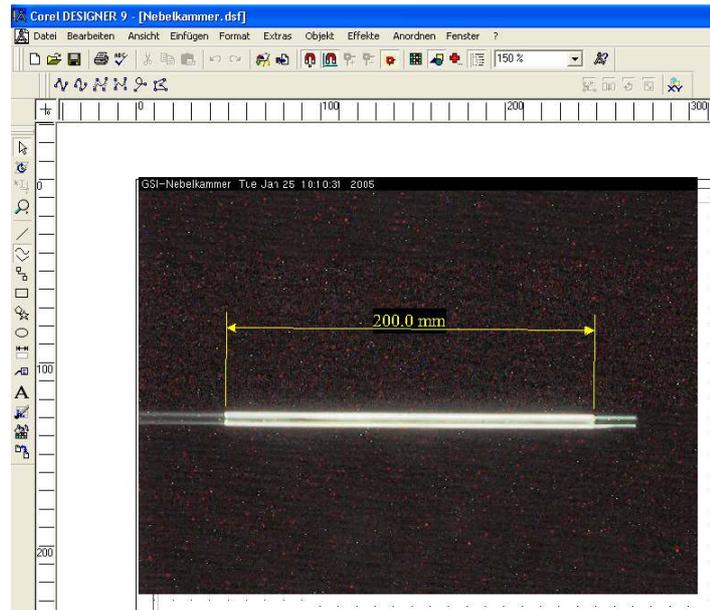
V.5. Die Energiemessung

Mit den in V.3. aufgenommenen Bildern soll nun die Geschwindigkeit und die kinetische Energie der Alphateilchen bestimmt werden.

☞ Die Auswertung geschieht mit Hilfe des Grafik-Tools „Corel DESIGNER 9“. Starten Sie dieses Programm vom Ihrem Experimentordner aus.



☞ Öffnen Sie zunächst in Ihrem Experimentordner die Datei „Nebelkammer.dsf“. Damit wird die Längeneichung für die Kamera geladen. Diese wurde in einer vorangegangenen Messung mit einem Kalibrierstab mit cm-Markierung bestimmt, der in die Kammer eingeführt wurde

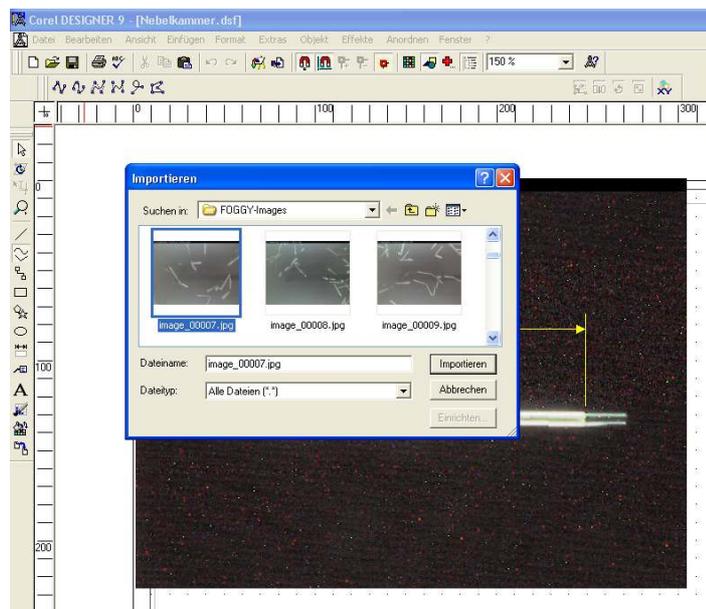


☞ Wählen Sie mit „Datei – importieren“ geeignete Nebelkammerbilder zur Bearbeitung aus.

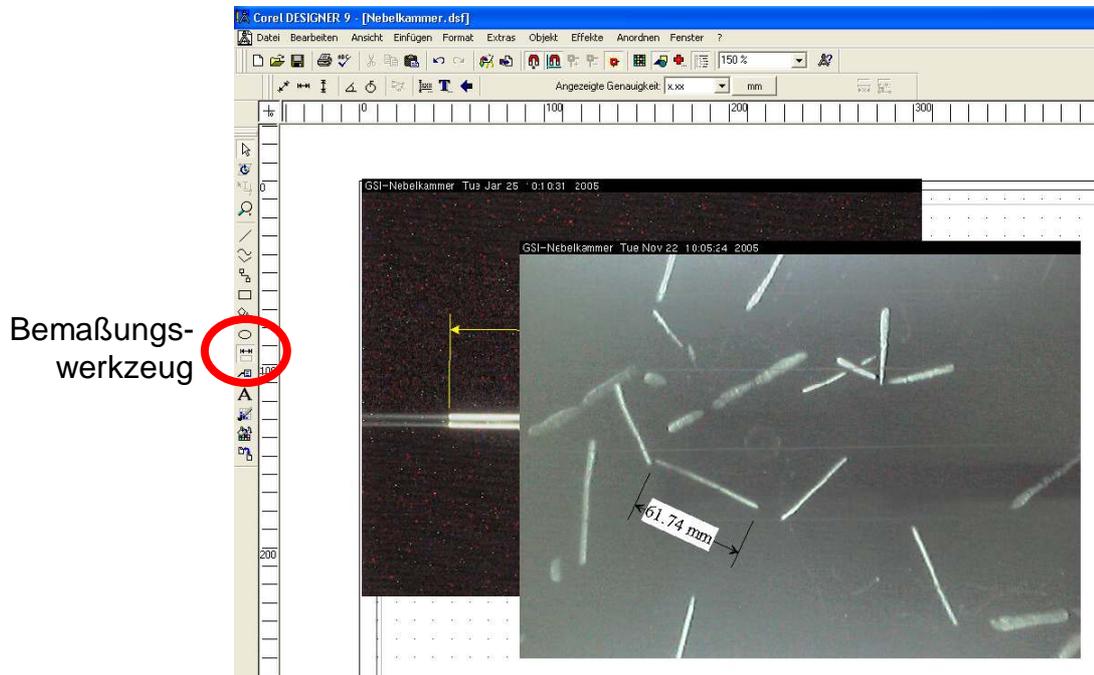
Die Nebelkammerbilder findet man in der Datei

User Data (F:)/Foggy-Images/

Zur besseren Übersicht kann man sich in dem Dateiauswahlfenster die Bilddateien wieder in der Miniaturansicht anzeigen lassen.



☞ Suchen Sie nun in den Bildern unter den typischen Teilchenspuren die längsten aus und ermitteln Sie mit Hilfe des Bemaßungswerkzeuges die Länge d dieser Spuren in cm. Werten Sie dazu 10-20 Teilchenspuren aus mehreren Bildern aus.



☞ Berechnen Sie aus der maximalen Spurlänge d die Geschwindigkeit v_α der α -Teilchen mit Hilfe des Reichweitengesetzes von Geiger:

$$d = c_g \cdot v_\alpha^3$$

Diese Gleichung gilt in Luft unter Normalbedingungen. d steht für die Reichweite der α -Teilchen (in Metern), v für deren Geschwindigkeit (in Meter/Sekunde). Die Konstante c wurde von Geiger empirisch bestimmt:

$$c_g = 9,67 \cdot 10^{-24} \text{ s}^3/\text{m}^2$$

☞ Wie viel Prozent der Lichtgeschwindigkeit beträgt die Geschwindigkeit der α -Teilchen?

Die Geschwindigkeit hängt über die Masse m_α des α -Teilchens mit dessen kinetischer Energie zusammen (vgl. Hintergrundwissen):

$$W_\alpha = \frac{1}{2} m_\alpha v_\alpha^2$$

Setzt man die kinetische Energie in der Einheit „MeV“ (Megaelektronenvolt, eine in der Kernphysik übliche Energieeinheit) ein, so erhält das Reichweitengesetz die Form (Umformung zur Übung empfohlen!):

$$W_\alpha = 3 \sqrt{\left(\frac{d}{3,21 \cdot 10^{-3} \text{ m}} \right)^2} \text{ MeV}$$

☞ Berechnen Sie die kinetische Energie der α -Teilchen und vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit den Angaben in der Nuklidkarte.

V.6. Die Kalibrierung der Längenskala (optional)

(Entfällt, wenn die Längeneichung erfolgreich geladen wurde)

-  Zur Messung der Spurlängen von α -Teilchen müssen die Längenskalen des Grafiktools geeicht werden. Dazu wird ein Kunststoffstab mit aufgedruckter mm-Skala durch die Schleuse in die Nebelkammer eingeführt, mit der Kamera aufgenommen und in das Grafiktool importiert. Das Nebelkammerbild sollte wie hier im Beispiel mit etwa 200%iger Vergrößerung dargestellt werden. Man erkennt den Kunststoffstab mit dem hell aufleuchtenden Millimeterpapierstreifen, der genau 20 cm lang ist.
-  Zunächst misst man mit dem Bemaßungs-Werkzeug (Werkzeugleiste links) die Länge des hellen Papierstreifens in den Einheiten des Programms und bestimmt anhand der bekannten Länge den Umrechnungsfaktor.
-  Diese Zahl wird unter „Datei – Skalierung einrichten ...“ folgendermaßen eingetragen:
1. „Metrisch“ anwählen und „weiter“
 2. Basiseinheit: „cm“ anwählen
 3. Eine Basiseinheit entspricht „2,79“ eintragen und „weiter“
 4. „Aktuelle Zeichnung“ und „Diese Einstellungen gelten für alle zukünftigen Einstellungen“ anwählen
 5. Fertig stellen

Wenn der Umrechnungsfaktor bestimmt und eingetragen wurde, kann mit dem Ausmessen der Spurlängen der α -Teilchen in V.5. begonnen werden.

Hintergrundwissen:

H.1. Die Nebelkammer

Bevor wir uns der Nebelkammer im Schülerlabor zuwenden werfen wir einmal einen Blick an den Himmel. Das Bild zeigt den Himmel über Frankfurt an einem kühlen Herbstmorgen nach Sonnenaufgang. Man erkennt deutlich zahlreichen Kondensstreifen. Das sind die typischen weißen, schmalen Eiswolkenstreifen, die sich als Folge der Flugzeugabgase hochfliegender Jets bilden können. Diese Flugzeugabgase bestehen zu einem Großteil aus Wasserdampf, aber auch aus anderen, festen Verbrennungsprodukten. Diese anderen, festen Aerosole dienen für den Wasserdampf als Kondensationkerne. In Verbindung mit der raschen Ausdehnung und der damit verbundenen Abkühlung setzt praktisch spontane Sublimation ein, d.h. es bilden sich sehr rasch Eiskristalle. Daher setzen die Kondensstreifen auch bereits wenige Meter hinter den Jets an. Wie langlebig die einmal entstandenen Kondensstreifen letztlich sind, hängt von



dem generellen Feuchtegehalt der Schicht ab, in welcher sie entstehen. Vor allem bei Annäherung einer Warmfront, wenn also in der Höhe feuchte Luftmassen "advehiert" werden, sind sie besonders langlebig und diffundieren zu großen, dünnen Bändern, letztlich also zu künstlichen Cirrus und Cirrostratuswolken. Auf dem Bild sieht man solche Kondensstreifen unterschiedlichen Alters: schmal und scharf begrenzt die frischen, unmittelbar erzeugten Spuren, breiter und verwaschener die „alten“ Spuren, die schon vor einiger Zeit erzeugt wurden.

Charles Thomson Reges Wilson (1869-1959) war ein brillanter britischer Physiker, der sich seit seiner Jugend für die Phänomene des Wetters begeisterte. Vor allem untersuchte er die Mechanismen, die dazu führten, dass sich unzählige Wassertropfen zu Wolken versammelten. Um das Verhalten von den Wassertropfen unter Laborbedingungen studieren zu können, machte er sich daran, eine Kammer zu konstruieren, in der sich unter genau vorgegebenen Bedingungen feinste Wassertropfen bilden konnten, die die Kammer in Form von Nebel erfüllten. Daher benannte man diese Kammer im Deutschen auch als Nebelkammer (englisch Cloud chamber = Wolkenkammer). Hätte Wilson seine Nebelkammer nur dafür verwendet, seine Tropfen zu untersuchen, so hätte wahrscheinlich niemals jemand von dieser epochalen Erfindung erfahren.

Wilson's Nebelkammer ist zunächst ein zylindrisches Gefäß, das mit einer Mischung aus Gas und Wasserdampf gefüllt ist, wobei sich der Dampf noch im Gleichgewicht mit der Flüssigkeitsphase befindet. Die Nebelkammer ist mit einem Kolben versehen, der es ermöglicht, ihr Volumen sehr schnell zu vergrößern. Dabei dehnt sich das Gas im Inneren der Kammer entsprechend dem vergrößerten Volumen aus und kühlt dabei ab, weil es bei diesem schnellen Vorgang keine Zeit findet, von seiner Umgebung Wärme aufzunehmen.

Durch diese plötzliche Abkühlung ist der Wasserdampf in der Nebelkammer übersättigt und würde sich als Nebel niederschlagen, könnte er Kondensationskeime wie Staub oder ähnliches finden. Wilson aber versuchte eben das zu verhindern, indem er hochreine Luft verwendete, in der solche Verunreinigungen nicht zu finden waren. Mit dieser hochreinen Luft meinte Wilson, davon ausgehen zu können, dass es keine Niederschläge geben würde. Es geschah aber zu seinem zunächst höchstem Erstaunen, dass sich dann doch stets feine Nebelschleier bildeten. Sooft er seine Versuche auch ausführte, immer wieder erhielt er auf zunächst unerklärliche Art und Weise tropfenartige Niederschläge, und zwar meist entlang haarfeiner Linien, die sich durch seine Nebelkammer zogen.

Sein scharfer Verstand und seine Vorbildung ermöglichten ihm den Schluss, dass es sich bei den Kondensationskeimen, die den Niederschlag ermöglichten, um geladene Atome handeln könnte, möglicherweise um die Ionen, die für die Restleitfähigkeit der Atmosphäre verantwortlich waren.

Im selben Jahr, in dem Wilson seine Nebelkammerversuche anstellte (1895), wurde die Röntgenstrahlung entdeckt. Thomson und McClelland entdeckten schnell, dass die Röntgenstrahlung geeignet war, die Leitfähigkeit der Luft dramatisch zu erhöhen, indem sie die Atome der Luft ionisierte und so Ladungsträger zur Verfügung stellte. Wilson überprüfte diese Eigenschaft der Röntgenstrahlung mit seiner Nebelkammer und stellte sofort einen sehr starken Zuwachs an regenartigem Niederschlag fest, wenn die Nebelkammer der Röntgenstrahlung ausgesetzt war.

Als Thomson und Rutherford 1906 zeigen konnten, dass die Leitfähigkeit von Gasen tatsächlich auf eine Ionisation der Gase zurückzuführen war, blieb kein Zweifel mehr daran, dass Wilsons Nebelkammer es ermöglichte, Gasionen als Kondensationskeime sichtbar zu machen, photographisch festzuhalten und dann nach Belieben zu studieren.

Dringen schnelle Teilchen bzw. Strahlung in das Kammervolumen ein, dann können sie auf ihrem Weg durch die Kammer Gasmoleküle ionisieren. Entlang dieser Ionenbahnen entstehen dann Wassertropfen, die eine Nebelspur entlang der Teilchenbahn bilden. Beleuchtet man das Innere der Nebelkammer, dann wird das Licht an der Nebelspur gestreut, wodurch die Spur hell vor dem dunklen Hintergrund aufleuchtet und photographiert werden kann. Diese Nebelspur in der Nebelkammer entsteht ganz ähnlich wie die Kondensstreifen bei Flugzeugen.

Nachdem Wilson seine Nebelkammer weiter verbessert hatte, war er 1911 der erste Mensch, der die Teilchenbahn von Alphateilchen und von Elektronen mit eigenen Augen sah.

Mit der Nebelkammer wurden über Jahre hinweg viele der wichtigsten Experimente der Kern- und Teilchenphysik ausgeführt.

H.2. Die Nebelkammer im Schülerlabor

Die Nebelkammer besteht aus einem Kammersockel und der eigentlichen Beobachtungskammer. Der Kammersockel enthält ein Kühlaggregat, Stromversorgung, Alkoholtank- und Alkoholpumpe sowie eine Zeitschaltuhr.

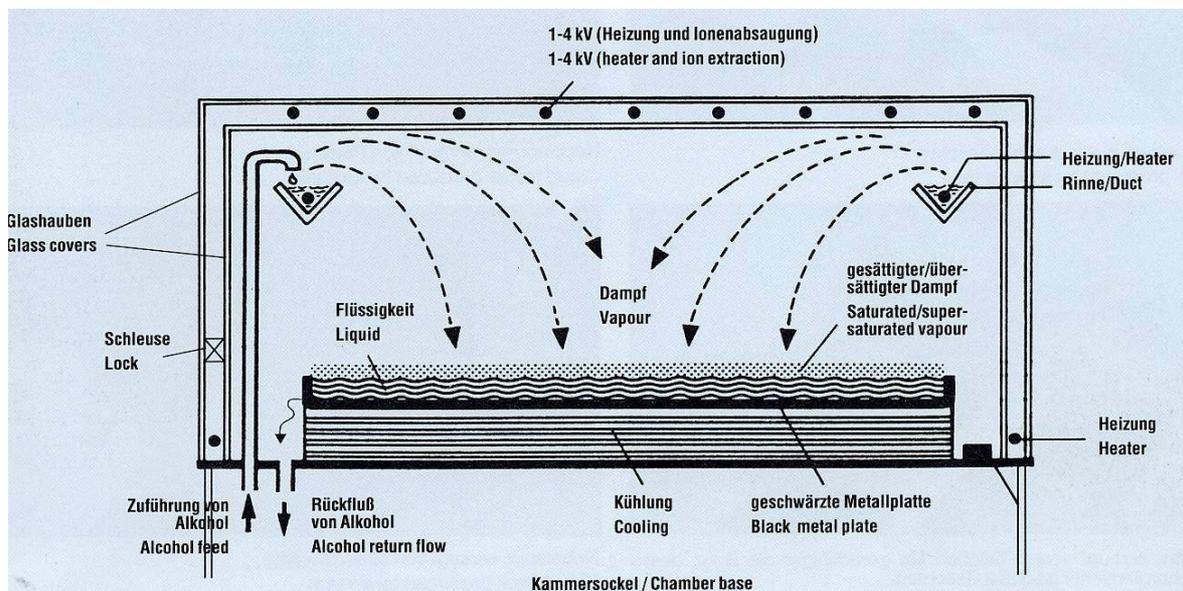
Den Boden der Beobachtungskammer bildet eine massive, geschwärmte Metallplatte mit einer Fläche von 45 cm x 45 cm, die durch das Kälteaggregat gleichmäßig über die gesamte Fläche gekühlt wird (etwa -30°C).

Die Deckfläche und Seitenwände der Beobachtungskammer bestehen aus zwei übereinandergestülpten Glashauben. Zwischen den beiden oberen Glasscheiben befinden sich dünne Heizdrähte, die diesen Bereich der Kammer erwärmen und ein Beschlagen verhindern. Dieses Gitter dient gleichzeitig als Hochspannungsgitter zur Ionenabsaugung.

Im oberen Teil unter der Glashaube befindet sich eine umlaufende, elektrisch beheizte Rinne, in die aus einem Vorratsbehälter tropfenweise Isopropylalkohol gepumpt wird.

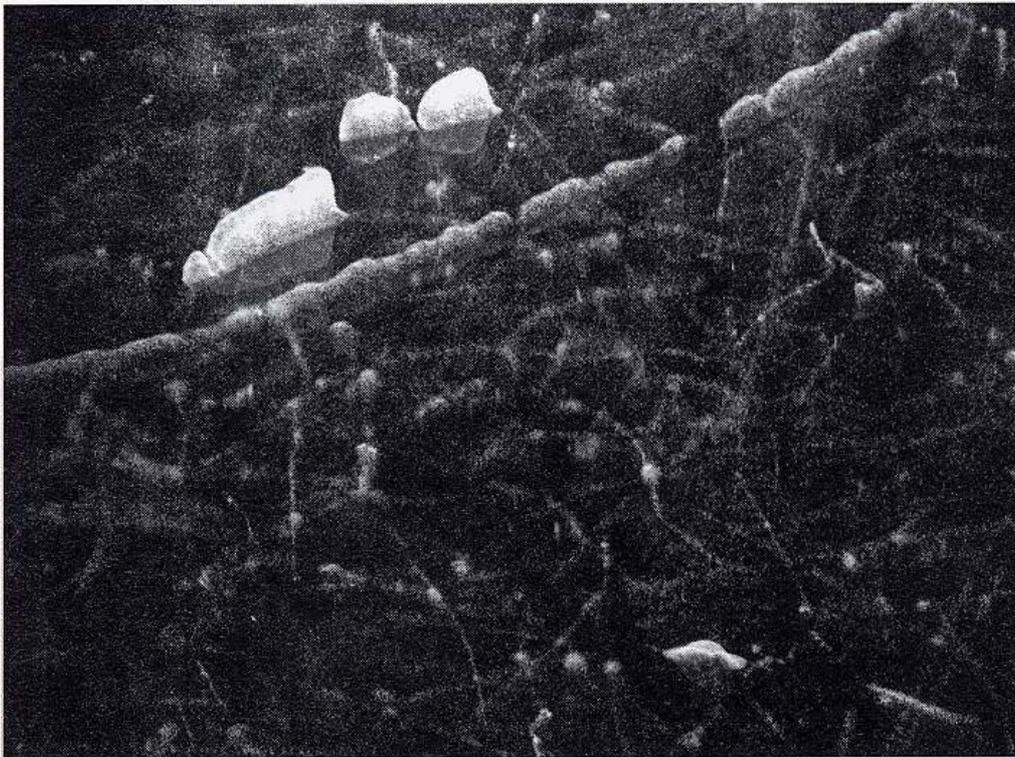


Die Abbildung unten zeigt einen Schnitt durch die Nebelkammer, an dem man sich die Wirkungsweise leicht klarmacht: Der Alkohol verdampft und diffundiert vom oberen, warmen Bereich der Kammer zum kalten Kammerboden. Dort kondensiert der Alkoholdampf und fließt in den Vorratsbehälter zurück.



Oberhalb der dünnen, den Boden bedeckenden Flüssigkeitsschicht bildet sich eine Zone aus übersättigtem Alkoholdampf. In diesem Bereich, und nur hier, erzeugen geladene Materieteilchen, die aus dem Innenraum oder von außen kommen, längs ihrer Flugbahn Ionen. Bei der Ionisation trennt das einfliegende Teilchen Elektronen von den Gasmolekülen der übersättigten Dampfschicht ab, wodurch positive Ionen erzeugt werden.

Die herausgeschlagenen Elektronen lagern sich an anderen Gasmolekülen an und bilden dadurch negative Ionen.

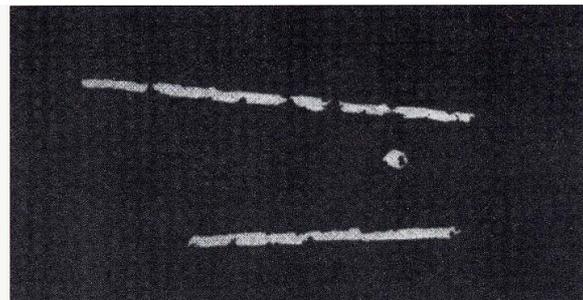


An sie setzen sich bevorzugt Isopropylalkoholtröpfchen und ergeben die für den Beobachter sichtbare Nebelspur. Von der Länge und der Beschaffenheit der Teilchenspur kann auf das ionisierende Teilchen rückgeschlossen werden.

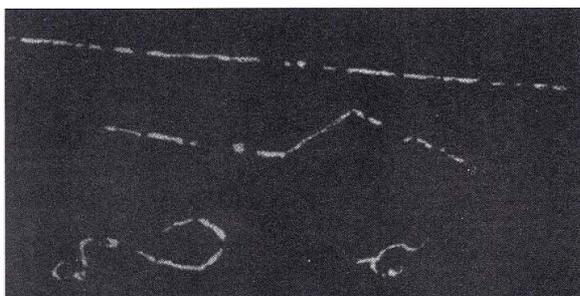
Hier einige Beispiele für typische Nebelkammerspuren:



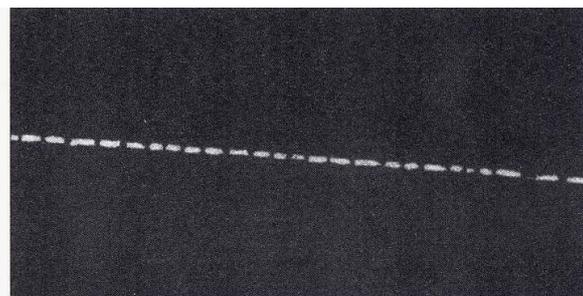
Nebelspur, erzeugt von einem α -Teilchen



Nebelspur eines Protons



Nebelspuren von β -Teilchen
(je geradliniger die Spur, desto schneller und energiereicher ist das β -Teilchen)



Nebelspur eines Myons

H.3. Radioaktivität

Antoine-Henri Becquerel (1852-1908) entdeckte Ende des vorigen Jahrhunderts, dass Verbindungen des Urans spontan, also ohne äußeren Einfluss, unsichtbare Strahlen aussenden. Auch bei Radium und anderen Elementen kann man diese Strahlung nachweisen. Die Strahlen können unter anderem:

- Materie durchdringen
- Fotoplatten schwärzen
- Fluoreszenz hervorrufen
- Gase ionisieren, d.h. elektrisch leitend machen.

Man spricht deshalb von ionisierter Strahlung. Von besonderer Bedeutung sind α -, β - oder γ -Strahlung.

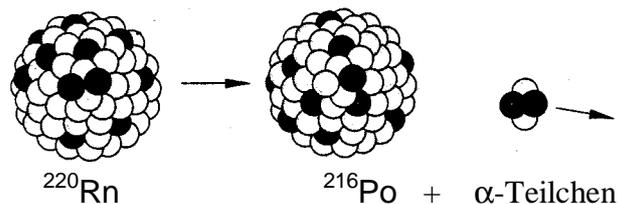
Die Atomkerne dieser Elemente – man nennt sie **Radionuklide** - sind **nicht stabil**. Sie zerfallen, um in einen stabileren Zustand überzugehen, d.h. sie wandeln sich ohne äußere Einwirkung in Kerne anderer oft wiederum radioaktiver Nuklide um. Erst am Ende einer solchen Zerfallsreihe steht dann ein stabiles Element.

Dabei wird Energie in Form von Teilchen (α - oder β -Strahlung) oder elektromagnetischen Wellen (γ -Strahlung) abgegeben. Diese Eigenschaft heißt **Radioaktivität**.

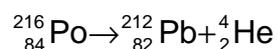
H.4. Alpha- und Beta-Zerfall

α -Teilchen sind Heliumkerne, bestehen also aus 2 Protonen und 2 Neutronen. Durch Aussenden eines He-Kerns wird die Massenzahl des Restkerns 4 und die Kernladungszahl um 2 erniedrigt. Dies lässt sich in Form einer Reaktionsgleichung feststellen. Da keine Nukleonen verloren gehen können, muss bei einer solchen Gleichung die Bilanz immer stimmen: Die Summe aller Massen- bzw. Kernladungszahlen auf der linken Seite der Reaktionsgleichung muss gleich der Summe aller Massen- bzw. Kernladungszahlen auf der rechten Seite sein.

Betrachten wir zum Beispiel den Zerfall von Radon-Gas in unserem Experiment. Durch Aussenden von α -Strahlung wird aus einem Radon-Kern ein Kern des Elementes mit dem Namen „Polonium“:



Dieses neue Nuklid ist nun seinerseits wieder radioaktiv und wird nach kurzer Zeit erneut ein α -Teilchen emittieren und sich so in das Nuklid $^{212}_{82}\text{Pb}$ (Blei) umwandeln:

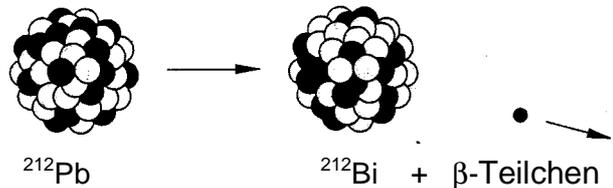
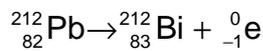


Man ahnt es schon: Auch dieses Bleiisotop ist radioaktiv. Im Gegensatz zu seinem Mutternuklid ist es aber ein sog. β -Strahler.

β -Teilchen sind Elektronen, die mit großer Geschwindigkeit aus dem Kern emittiert werden. Wie ist das möglich, wo doch ein Atomkern nur aus Protonen und Neutronen besteht?

Ein Neutron kann sich unter bestimmten Umständen in ein Proton und ein Elektron umwandeln. Das Elektron kann nicht im Kern verbleiben, sondern wird aus ihm herausgeschleudert. Zurück bleibt ein Kern mit gleicher Massenzahl, aber einer um 1 größeren Ordnungszahl, da ja ein Proton dazugekommen ist.

In unserem Beispiel:



Bi steht für das chemische Element „Wismut“. In diesem Fall wird aus einem Kern des Bleinuklids ${}^{212}\text{Pb}$ ein β -Teilchen emittiert. Es muss also ein Element entstehen mit einem Proton mehr, aber einem Neutron weniger, also mit $Z=83$. Es ist das Element Wismut. In der Reaktionsgleichung wird dem Elektron die Massenzahl 0 und die Kernladungszahl -1 zugeordnet, da es ja eine negative Ladung trägt.

H.5. Zerfallsreihen

α - und β -Zerfall kann man sich gut an einer **Nuklidkarte** klarmachen, von der hier nur ein Ausschnitt gezeigt werden kann (eine vollständige Nuklidkarte hängt im Praktikum). In einer solchen Karte werden alle Nuklide mit ihren Ordnungszahlen, Massenzahlen, Zerfallsarten, Halbwertszeiten, Zerfallsenergien u.ä. dargestellt. Dabei ist die **Ordnungszahl Z** in der Senkrechten und die **Neutronenzahl N** in der Waagerechten aufgetragen. Nuklide bzw. **Isotope** eines chemischen Elements liegen dabei jeweils in einer Waagerechten: sie besitzen alle die gleiche Anzahl von Protonen Z und verhalten sich bezüglich ihrer chemischen Eigenschaften gleich. Im „normalen“ periodischen System der chemischen Elemente stehen sie gewissermaßen alle am gleichen Platz mit der Ordnungszahl Z , woraus sich auch die Bezeichnung „**Isotop**“ (griech.: „am gleichen Platz“) herleitet.

Isotone nennt man die Nuklide, die jeweils auf einer Senkrechten liegen und daher die **gleiche Neutronenzahl N** besitzen. **Isobare** liegen auf einer Geraden von links oben nach rechts unten und haben die **gleiche Nukleonenzahl A=Z+N**.

Die Farben und Kurzbezeichnungen in der Nuklidkarte haben folgende Bedeutung:

		Neutronenzahl N →													
		133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146
Protonenzahl Z →	92	U 238,0289	U 226 0,2s	U 227 1,1 min	U 228 9,1 min	U 229 58 min	U 230 20,8 d	U 231 4,2 d	U 232 68,9 a	U 233 1,592 · 10 ⁵ a	U 234 0,0055	U 235 0,7200	U 236 2,342 · 10 ⁷ a	U 237 6,75 d	U 238 99,2745
	91	Pa 224 0,95 s	Pa 225 1,8 s	Pa 226 1,8 min	Pa 227 38,3 min	Pa 228 22 h	Pa 229 1,50 d	Pa 230 17,4 d	Pa 231 3,276 · 10 ⁴ a	Pa 232 1,31 d	Pa 233 27,0 d	Pa 234 1,17 min	Pa 235 24,2 min	Pa 236 9,1 min	Pa 237 8,7 min
	90	Th 223 0,66 s	Th 224 1,04 s	Th 225 8,72 min	Th 226 31 min	Th 227 18,72 d	Th 228 1,913 a	Th 229 7880 a	Th 230 7,54 · 10 ⁴ a	Th 231 25,5 h	Th 232 100	Th 233 22,3 min	Th 234 24,10 d	Th 235 7,1 min	Th 236 37,5 min
	89	Ac 222 5,0 s	Ac 223 2,10 min	Ac 224 2,9 h	Ac 225 10,0 d	Ac 226 29 h	Ac 227 21,773 a	Ac 228 6,13 h	Ac 229 62,7 min	Ac 230 122 s	Ac 231 7,5 min				
	88	Ra 221 28 s	Ra 222 38 s	Ra 223 11,43 d	Ra 224 3,66 d	Ra 225 14,8 d	Ra 226 1600 a	Ra 227 42,2 min	Ra 228 5,75 a	Ra 229 4,0 min	Ra 230 93 min				
	87	Fr 220 27,4 s	Fr 221 4,9 min	Fr 222 14,2 min	Fr 223 3,3 min	Fr 224 3,0 min	Fr 225 4,0 min	Fr 226 48 s	Fr 227 2,47 min	Fr 228 39 s	Fr 229 50,2 s				
	86	Rn 219 3,96 s	Rn 220 55,6 s	Rn 221 25 min	Rn 222 3,825 d	Rn 223 23,2 min	Rn 224 1,78 h	Rn 225 4,5 min	Rn 226 7,4 min						
		At 218	At 219												

H.6. Halbwertszeit

In einer radioaktiven Quelle befinden sich sehr viele Atome des gleichen Isotops. Der Zerfall eines einzelnen Atomkerns darin ist ein zufälliges Ereignis, die Zahl der Zerfälle N pro Zeiteinheit t nennt man die **Aktivität A** der Quelle: $A = \frac{N}{t}$

Die Einheit ist **1 Becquerel = 1 Zerfall / 1 Sekunde**.

Nun können wir nicht vorhersagen, welcher Kern im nächsten Moment zerfallen wird. Wir können noch nicht einmal die genaue Anzahl der Kerne angeben, die in der nächsten Sekunde zerfallen wird. Dennoch gibt es für jedes Nuklid eine charakteristische Zeit, nach der **bei einer sehr großen Anzahl von Atomkernen** genau die Hälfte zerfallen sein wird. Diese Zeit heißt **Halbwertszeit $t_{1/2}$** . Da nach $t_{1/2}$ nur noch die Hälfte der ursprünglich vorhandenen Atomkerne des Mutternuklids vorhanden sind, ist natürlich auch die von diesem Nuklid ausgehende Aktivität auf die Hälfte abgesunken.

Wartet man anschließend noch einmal die Zeit $t_{1/2}$ ab, so halbiert sich die Aktivität noch einmal auf $\frac{1}{4}$ der Anfangsaktivität und so weiter.

Dieses Verhalten wird mathematisch durch eine Exponentialfunktion beschrieben:

$$A(n) = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n = A_0 \cdot 2^{-n}$$

bzw.:

$$(*) \quad N(n) = N_0 \cdot 2^{-n}$$

Dabei ist A_0 die ursprüngliche Aktivität bzw. N_0 die Zahl der ursprünglich vorhandenen Kerne und **n die Zahl der vergangenen Halbwertszeiten**.

Eine beliebige Zeitspanne t kann man natürlich als Vielfaches der Halbwertszeit ausdrücken:

$$t = n \cdot t_{1/2}$$

$$A(t) = A_0 \cdot 2^{-\frac{t}{t_{1/2}}}$$

und erhält damit aus (*) das **Zerfallsgesetz**:

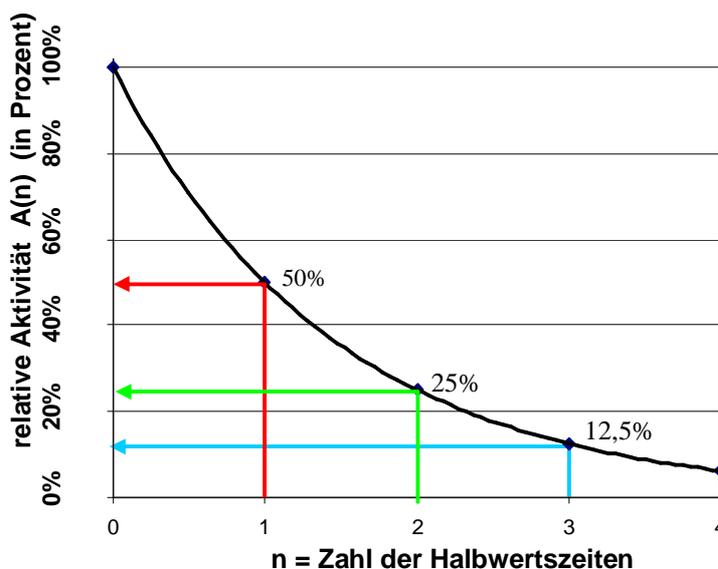
In der Physik ist es üblich, statt der Zahl 2 in dieser Exponentialfunktion als Basis die **Eulersche Zahl $e=2,718281...$** zu verwenden:

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

Die dabei auftretende **Zerfallskonstanten λ** ist ebenfalls mit der Halbwertszeit $t_{1/2}$ verknüpft:

$$\lambda \cdot t_{1/2} = \ln(2).$$

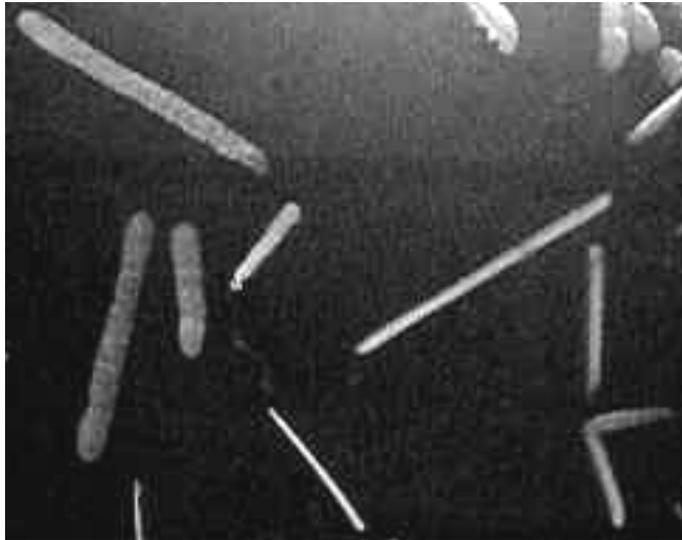
Das neu entstandene Tochternuklid ist meist wieder radioaktiv, nun mit seiner neuen spezifischen Aktivität und Halbwertszeit. In einer solchen Quelle existieren also oft neben dem Mutternuklid auch Tochternuklide mehrerer aufeinanderfolgender Generationen.



H.7. Die Reichweite von Alpha-Strahlung in Luft

Nach dem Verlassen des Kerns kann das α -Teilchen mit den Atomen der Umgebung in Wechselwirkung treten. Dabei können bei starker Wechselwirkung Kernreaktionen oder Streuung und bei schwacher Wechselwirkung Ionisierung und Anregung auftreten.

Starke Wechselwirkungen von α -Teilchen mit ihrer Umgebung sind besonders in leichten Gasen selten. In dem vorliegenden Versuch dient Luft als "Absorbermaterial". Daher sind hier die Bahnen der α -Teilchen nahezu geradlinig, wie man dies auch in der Nebelkammer beobachten kann (Abbildung). Längs dieser Bahnen treten vorwiegend Ionisierungen und Anregungen von Luftmolekülen auf.

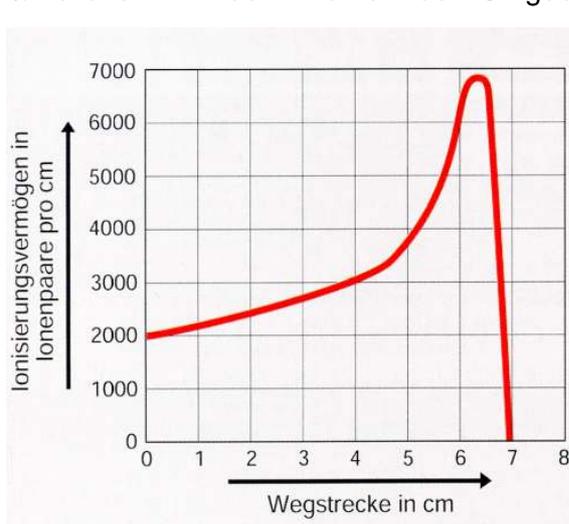


Bei jeder Anregung oder Ionisierung

gibt das α -Teilchen Energie ab. Die Anzahl der Ionenpaare, die das α -Teilchen auf seiner Bahn auf einer bestimmten Weglänge erzeugt, nennt man „**Ionisierungsvermögen**“ (als Ionenpaar bezeichnet man dabei das einfach positiv geladene Atom und sein herausgeschlagenes Elektron, das ein Alphateilchen auf seinem Weg erzeugt hat).

Das Ionisationsvermögen wird gemessen in „erzeugte Ionenpaare (IP) pro cm“. Es ist wegen ihrer Größe bei α -Teilchen im Vergleich zu anderen Elementarteilchen (β -Teilchen, Protonen, Mesonen usw.) sehr groß, und damit auch der Energieverlust auf einer bestimmten Wegstrecke. Das Diagramm zeigt das Ionisierungsvermögen von α -Teilchen als Funktion der zurückgelegten Wegstrecke in Luft unter Normalbedingungen.

Man erkennt, dass das Ionisierungsvermögen am Anfang des Weges noch vergleichsweise gering ist (2000 Ionenpaare/cm) und zu langen Wegstrecken hin zunimmt. Dies liegt daran, dass bei der hohen Anfangsgeschwindigkeit die Wahrscheinlichkeit der Wechselwirkung der α -Teilchen mit den Atomen der Umgebung zunächst noch gering ist. Nach längeren



Wegstrecken hat ihre Geschwindigkeit dann so weit abgenommen, dass die Dauer der Wechselwirkungszeit zunimmt und das Ionisationsvermögen ansteigt.

Bei α -Teilchen erreicht das Ionisationsvermögen etwa 4 mm vor dem Reichweitenende ein Maximum, um danach steil auf Null abzufallen. Dieser für α -Strahlung typische Verlauf heißt BRAGG-Kurve.

Man erkennt dieses besondere Abbremsverhalten auch sehr gut an der „Keulenform“ der Nebelspuren der α -Teilchen (siehe Bild oben).

Die Entfernung, bei der nun die gesamte Anfangsenergie der α -Teilchen aufgebraucht ist, heißt **Reichweite** d . Wegen des hohen

Ionisationsvermögens ist sie bei α -Teilchen wesentlich geringer (in Luft nur wenige Zentimeter) als z.B. für β -Teilchen (etwa 1 Meter in Luft).

Da beim Zerfall eines Nuklids alle α -Teilchen mit der gleichen Geschwindigkeit v vom Mutterkern emittiert werden, haben sie auch alle die gleiche Reichweite d .

Zwischen d und v besteht ein empirischer Zusammenhang, den H. Geiger gefunden hat (sog. „Reichweitengesetz“, gültig in Luft unter Normalbedingungen):

$$d = k_G \cdot v^3 \quad \text{mit} \quad k_G = 9,67 \cdot 10^{-24} \frac{\text{s}^3}{\text{m}^2}$$

Die in dieser Gleichung auftretende Geschwindigkeit v hängt über die Masse m_α der α -Teilchen mit deren kinetischer Energie $W = \frac{1}{2} m_\alpha v^2$ zusammen. Daraus erhält man die kinetische Energie in der Einheit „MeV“:

$$W_{\text{kin}} = k_G^* \cdot d^{\frac{2}{3}} \quad \text{mit} \quad k_G^* = 45,7 \text{MeV} \cdot \text{m}^{\frac{3}{2}}$$

Aufgaben:

1) Leiten Sie die letzte Gleichung aus dem Reichweitengesetz her. Verwenden Sie dazu:

$$m_\alpha = 6,645 \cdot 10^{-27} \text{kg} \quad \text{sowie}$$

$$1 \text{MeV} = 10^6 \text{eV} = 10^6 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{CV} = 1,602 \cdot 10^{-13} \text{J}$$

2) Berechnen Sie die Reichweite und die Geschwindigkeit von α -Teilchen mit einer Energie von 5 MeV.