

---

## **6.4 Stabile und instabile Kerne; Alpha-, Beta-, Gamma-Strahlung; Nachweis hochenergetischer Strahlung mit Ionisationskammer, Zählrohr und Nebelkammer; Verschiebungssätze, Zerfallsreihen**

### **Historisches**

Die Geschichte der Kernphysik begann mit der Entdeckung der natürlichen Radioaktivität.

Keine drei Jahre nach der Entdeckung der Röntgenstrahlung fand Henri Antoine Becquerel (frz. Physiker, 1852 - 1908, NP 1903), dass Uransalze eine unsichtbare Strahlung aussenden, die die Eigenschaft hat, dass sie durch ein schwarzes, lichtundurchlässiges Papier hindurch eine fotografische Platte schwärzen kann. Außerdem ionisieren sie die Luft und entladen einen Kondensator. Auf Becquerel geht auch der Name Radioaktivität für diese Erscheinung zurück.

Versuch: Bringt man ein radioaktives Präparat in die Nähe eines aufgeladenen Elektroskops, so entlädt sich dieses rasch.

Erklärung: Offenbar ionisiert das radioaktive Präparat die Luft, und die Ionen gelangen zum Teil auf die jeweils entgegengesetzt geladenen Platten.

1908 entdeckten Marie und Pierre Curie (Marie, 1867 - 1934, NP 1903 und 1911, Pierre, 1859 - 1906, NP 1903), dass das natürliche Thorium eine ähnliche Ausstrahlung zeigte wie das Uran, und fanden schließlich, dass das unter dem Namen Pechblende bekannte Uranmineral eine wesentlich höhere Aktivität zeigte als nach dem reinen Urananteil zu vermuten war. Das Mineral musste also noch andere radioaktive Stoffe als das Uran enthalten. In langwierigen Versuchen gelang es, die radioaktiven Elemente zu isolieren; die dabei gefundenen Elemente wurden Polonium und Radium genannt. Die aufgetretenen Schwierigkeiten mögen durch einige Zahlen verdeutlicht werden: In einer Tonne Joachimstaler Pechblende waren nur ca. 0,2 g Radium enthalten; zudem entstand beim Zerfall des Radium ein radioaktives Gas (Radon), das seinerseits beim Zerfall weitere radioaktive Stoffe erzeugte, die sich überall im Laboratorium niederschlugen. Schließlich konnten 0,1 g Radium innerhalb von 4 Jahren (!) isoliert werden.

Bei der sofort einsetzenden weltweiten Untersuchung dieser Phänomene ergaben sich folgende zunächst merkwürdige Eigenschaften:

1. Die Aussendung radioaktiver Strahlen kann durch äußere Einwirkungen weder verstärkt noch verringert werden (Unabhängigkeit von Druck- und Temperaturänderungen). Daraus schloss man, dass es sich hierbei nicht um chemische Vorgänge handelte.

- 
2. Ein radioaktives Präparat ist immer etwas wärmer als die Umgebung und gibt daher ständig Wärme ab. Ein Radiumpräparat der Masse 1 g gibt z. B. stündlich die Wärmemenge  $Q = 575 \text{ J}$  ab.
  3. Radioaktive Strahlung zeigt kein einheitliches Verhalten. Mit geeigneten Nachweisgeräten, deren Aufbau und Funktionsweise weiter unten besprochen wird, lässt sich zeigen, dass starke Magnetfelder die radioaktive Strahlung teilweise ablenken können.

Genauere Untersuchungen ergaben folgendes:

1. Bei den sog.  $\alpha$ -Teilchen handelt es sich um Heliumkerne. Sie besitzen zwei positive Elementarladungen und haben die Massenzahl 4.
2. Bei den Betateilchen handelt es sich um schnell bewegte Elektronen. Sie besitzen eine negative Elementarladung und haben eine sehr kleine Ruhemasse.
3. Die Gammastrahlen sind elektromagnetische Wellenstrahlen. Sie transportieren keine elektrische Ladung und werden deshalb im Magnetfeld nicht abgelenkt.

### Verschiebungssätze

Ein Atomkern, der derartige Teilchen emittiert, muss sich selbst verändern. Kernvorgänge werden ähnlich wie chemische Reaktionen in Form von Gleichungen geschrieben; dabei schreibt man links unter den Kern die Kernladungszahl  $Z$ , links über den Kern die Massenzahl  $A$ .

Vorgänge bei einem Alpha-Zerfall:

Beispiel:  ${}_{88}^{226}\text{Ra} \rightarrow {}_{86}^{222}\text{Rn} + {}_2^4\text{He} + W$ ; allgemein:  ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4}Y + {}_2^4\text{He} + W$ .

Beim Alpha-Zerfall verringert sich die Massenzahl  $A$  um 4 und die Kernladungszahl  $Z$  um 2. Der Tochterkern wandert im Periodensystem um zwei Stellen nach links.

Vorgänge bei einem Beta-Zerfall:

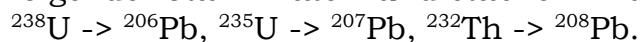
Beispiel:  ${}_{82}^{214}\text{Pb} \rightarrow {}_{83}^{214}\text{Bi} + {}_{-1}^0e + W$ ; allgemein:  ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z+1}^AY + {}_{-1}^0e + W$ .

Beim Beta-Zerfall wird ein Elektron emittiert, nachdem sich ein Neutron in ein Proton und ein Elektron umgewandelt hat. Der Tochterkern wandert im Periodensystem um eine Stelle nach rechts.

Die Gammastrahlung tritt nicht isoliert auf, sondern ist eine bei  $\alpha$ - und  $\beta$ -Prozessen häufige Begleiterscheinung; sie bringt also keine Kernumwandlung im eben geschilderten Sinn mit sich.

Häufig sind die bei radioaktiven Prozessen entstehenden Tochterkerne ihrerseits wieder radioaktiv. Es lassen sich daher zu den in der Natur vorkommenden radioaktiven Elementen komplette "Ahnentafeln" erstellen, die man

"natürliche Zerfallsreihen" nennt. Man kennt heute insgesamt 4 Zerfallsreihen, von denen eine aus dem künstlich hergestellten Neptunium (erst 1935 entdeckt) hervorgeht. Die drei schon länger bekannten Familien haben folgende "Stammväter" und stabilen Endprodukte:



Welchen radioaktiven "Ahnherrn" ein natürlich radioaktives Element besitzt, lässt sich so überlegen: Die Massenzahl  $A$  ändert sich bei einem Alphazerfall um 4, bei einem Betazerfall überhaupt nicht. Die Massenzahlen der Tochterelemente aus den natürlichen Zerfallsreihen unterscheiden sich daher von ihren "Urvätern" um Vielfache von 4; sie lassen sich wie diese in der Form  $A = 4 \cdot n + x$  ( $n \in \mathbb{N}$ )

darstellen.

Für die Massenzahlen der Elemente aus den natürlichen Zerfallsreihen gilt dann:

Reihe	Ausgangskern	Darstellung der Massenzahl
Uran-Radium	U 238	$A = 4 \cdot n + 2$
Uran-Actinium	U 235	$A = 4 \cdot n - 1$
Thorium	Th 232	$A = 4 \cdot n$
Neptunium	Pu 241	$A = 4 \cdot n + 1$

### **Nachweis hochenergetischer Strahlung durch ihre Ionisationswirkung**

Radioaktive Strahlung kann im allgemeinen nicht direkt beobachtet werden. Man macht sich daher ihre Wechselwirkung mit Materie zunutze und verstärkt diese, um sie dann einem Anzeigegerät zuzuführen. Wechselwirkungen in diesem Sinne sind Ionisation der Luft, Schwärzung photographischer Platten und Szintillationen (Lichtblitze, die von entsprechend präparierten Oberflächen beim Beschuss mit Teilchen ausgesandt werden).

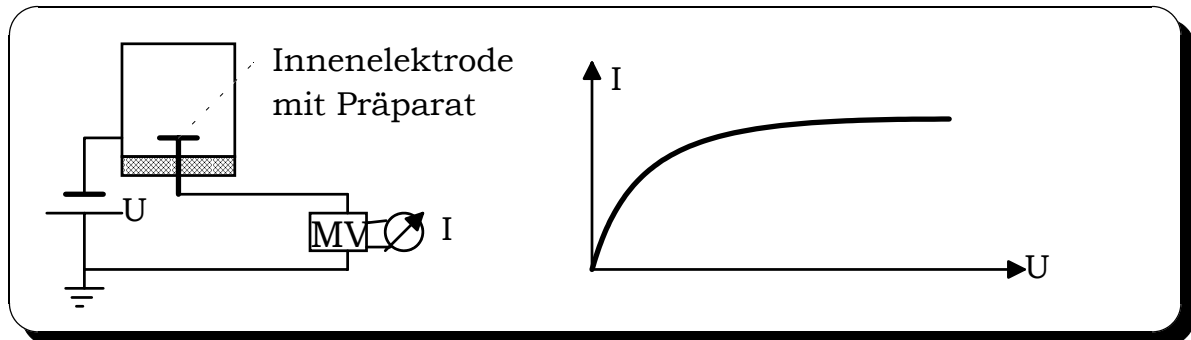
Die nachfolgend besprochenen Nachweisgeräte für hochenergetische Strahlen beruhen auf der Ionisationswirkung derartiger Strahlung und bedingen dadurch ihren Aufbau.

#### a) Die Ionisationskammer:

In einer luftgefüllten Kammer befinden sich zwei gegeneinander isolierte Elektroden, die mit den Polen einer Gleichspannungsquelle verbunden werden. Einfallende Strahlen ionisieren teilweise das Füllgas, und die entstandenen Ionen wandern zur jeweils entgegengesetzt geladenen Elektrode. Dadurch wird im äußeren Stromkreis eine Stromstoß bewirkt, der an einem in den Stromkreis geschalteten Widerstand auch als Spannungsstoß nachgewiesen werden kann. Der Ionisationsstrom hat in Abhängigkeit von der angelegten Spannung den oben skizzierten Verlauf. Die Sättigungsstromstärke ist dann erreicht, wenn praktisch alle entstandenen

Ionen vor einer möglichen Rekombination die entsprechenden Elektroden erreichen.

Skizze:



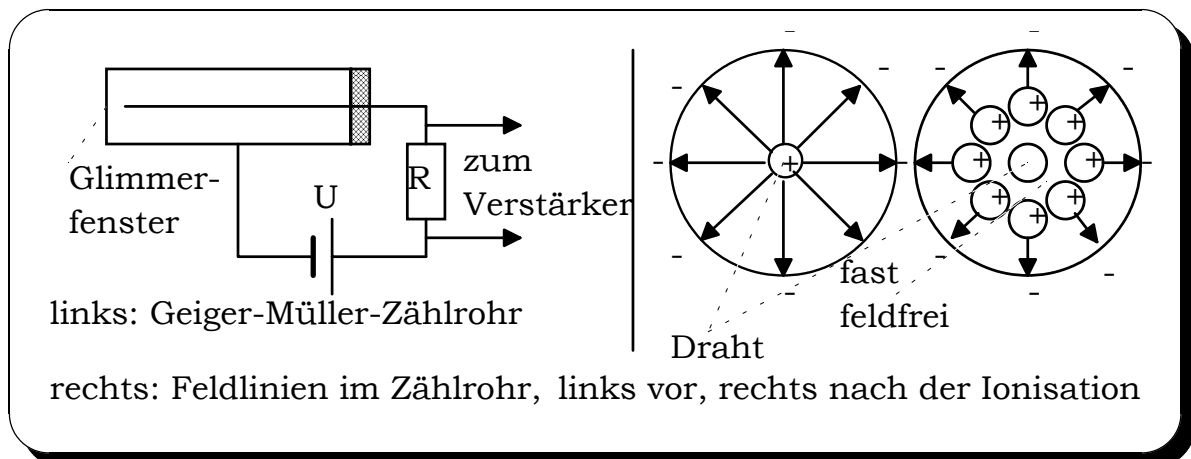
Anmerkungen:

1. Art und Druck des Füllgases, Elektrodenform und Spannung beeinflussen (neben der Intensität der einfallenden Strahlung) den Ionisationsstrom.
2. Mit zunehmender Spannung steigt nicht nur die durchschnittliche Geschwindigkeit der Ionen, sondern es sinkt auch die Wahrscheinlichkeit für eine Rekombination der Ionen vor dem Auftreffen auf die Elektroden. Daher ist auf das Anlegen einer geeigneten Spannung zu achten, damit der Ionisationsstrom nicht mehr von der angelegten Spannung, sondern letztendlich nur von der Zahl der einfallenden Teilchen abhängt. Art und Energie der ionisierenden Teilchen oder Quanten bestimmen dann praktisch allein die Größe der auftretenden Strom- bzw. Spannungsstöße.

b) Das Geiger-Müller-Zählrohr:

Das Geiger-Müller-Zählrohr (H. Geiger (1882 - 1945), W. Müller (geb. 1902)) ist im Prinzip eine besonders empfindliche Ionisationskammer, die auf einer Art innerer Verstärkung schwacher primärer Ionisationsprozesse beruht.

Prinzipskizze:

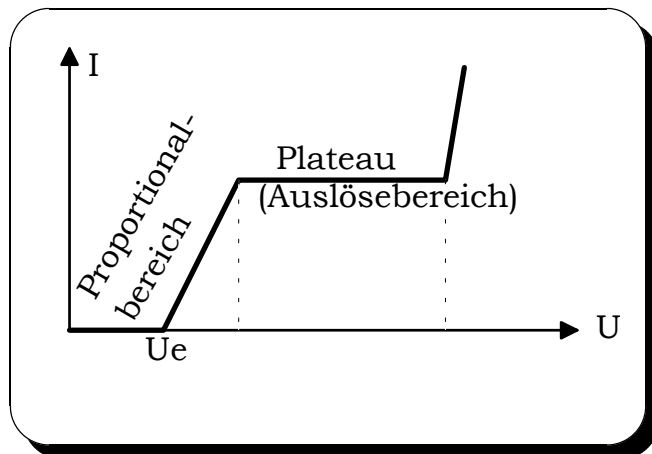


Das Zählrohr besteht aus einem gasgefüllten Rohr ( $p = 100 \text{ hPa}$ ), in dessen Achse ein Draht als Anode (Spannung gegen das Gehäuse etwa 500 Volt) gespannt ist. Durch das extrem dünne Einlassfenster können schnelle geladene Teilchen ins Innere gelangen und dort Gasatome ionisieren. Es kommt zu einer lawinenartig anwachsenden Gasentladung. Die Elektronen wandern wegen ihrer kleinen Masse schnell zum Draht und neutralisieren ihn kurzzeitig, während die trägen positiven Ionen eine positive Raumladung um den Draht bilden, die in etwa  $10^{-4} \text{ s}$  zur negativ geladenen Zählrohrwand wandert. Das Gebiet unmittelbar um den Draht wird dadurch kurzzeitig feldfrei, so dass das Zählrohr während dieser Zeit auf keine weiteren einfallenden Teilchen ansprechen kann (Totzeit des Zählrohrs). Der Stromstoß erzeugt an einem Vorwiderstand einen Spannungsstoß, der über einen Verstärker zur Registrierung der einfallenden Teilchen dient. Die einmal in Gang gekommene Entladung wird bei vielen Zählrohren durch im Rohr befindliche Alkoholdämpfe oder Halogengase wieder gelöscht: Die mehratomigen Dampfmoleküle übernehmen die Energie der Ionen und spalten sich; dabei wird so viel Energie verbraucht, dass keine weiteren Elektronen freigesetzt werden können.

Die Kennlinie eines Zählrohrs:

Ein Zählrohr wird mit einer regelbaren Spannungsquelle verbunden; vor dem Zählrohrfenster wird ein radioaktives Präparat aufgestellt. Dann wird die Zählrohrspannung kontinuierlich gesteigert.

Ergebnis:



Anmerkungen:

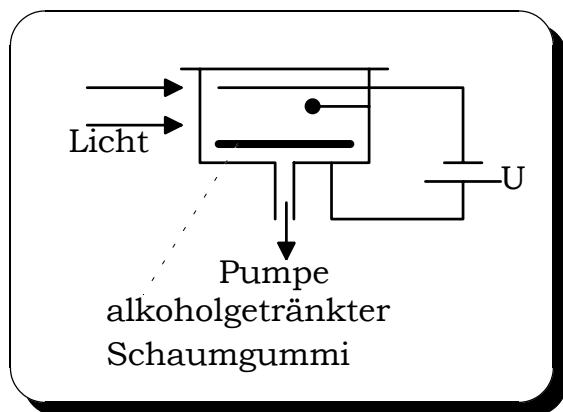
1. Unterhalb der Einsatzspannung  $U_e$  spricht der Zähler auf einfallende Teilchen nicht an; in einem schmalen Spannungsbereich darüber nimmt die Zählrate linear mit der Spannung zu (Proportionalbereich).
2. Oberhalb davon ist die Zählrate in einem größeren Bereich von der Zählrohrspannung unabhängig (Plateau, Auslösebereich des Zählers); die Zählrate hängt hier praktisch nur von der Zahl der einfallenden Teilchen ab. Der Zähler unterscheidet in diesem Bereich auch nicht mehr die einfallenden Teilchen hinsichtlich ihres Ionisationsvermögens, ihrer Art oder ihrer Energie.

- 
3. Weiteres Steigern der Spannung führt zu spontanen, nicht mehr durch einfallende Strahlung bewirkten Entladungen: der Zähler ist dann nicht mehr brauchbar.

c) Die Nebelkammern:

Mit dem nachfolgend besprochenen Gerät können die Bahnen radioaktiver Strahlung sichtbar gemacht werden. Die Nebelkammern machen sich ebenfalls die ionisierende Wirkung der radioaktiven Strahlen zunutze. Zum Verständnis der Wirkungsweise sind aber noch folgende physikalischen Grundtatsachen zu beachten: Wird ein mit Wasserdampf gesättigter Raum abgekühlt, so wird der Dampf übersättigt. Nebelbildung tritt aber nur ein, wenn Staubpartikel o. ä. als Kondensationskeime vorhanden sind. C. Wilson (1869 - 1959) konnte zeigen, dass auch Gasionen bei bestimmten Bedingungen als Kondensationskeime wirken können.

Die folgende Abbildung zeigt den schematischen Aufbau einer Nebelkammer:



Versuchsdurchführung und Ergebnis: Vergrößert man durch Ziehen an der Verdünnungspumpe das Volumen, so tritt wegen der adiabatischen Expansion eine Übersättigung des Dampfes ein. Man kann die Bahnen der radioaktiven Teilchen sehen.

Erklärung: Vom Präparat ausgeschleuderte Teilchen ionisieren durch Stoß Luftmoleküle. Wie bei den Kondensstreifen von Flugzeugen lagern sich in der Nebelkammer Wassermoleküle an die Ionen an. Bei seitlicher Beleuchtung werden bis zu 7 cm lange Spuren sichtbar. Damit nur die Ionen sichtbar sind, die während der schnellen Expansion entstehen, legt man eine Spannung (ca. 1,5 kV) zwischen Boden und Deckel. Die vor der Expansion gebildeten Ionen werden so durch das elektrische Feld abgezogen; wäre dies nicht der Fall, so würden sie einen diffusen Nebel bilden, der die ganze Kammer füllt.

Anmerkungen:

1. Neben den Expansionsnebelkammern sind insbesondere die kontinuierlichen Kammern von Bedeutung für die Dauerbeobachtung; in ihnen wird die Übersättigung des Dampfes durch ein starkes Temperaturgefälle mit Hilfe von Trockeneis erzeugt.

2.  $\alpha$ -Strahlen erzeugen kurze, dicke Spuren einheitlicher Länge, die auf einheitliche Energie der emittierten Teilchen hindeutet.
3.  $\beta$ -Strahlung hinterlässt lange, dünne perlchnurartige Tröpfchenspuren.
4.  $\gamma$ -Strahlen können wegen fehlender Ionsationsfähigkeit in der Nebelkammer direkt nicht nachgewiesen werden. Ein Nachweis ist nur durch später zu besprechende Sekundäreffekte möglich!

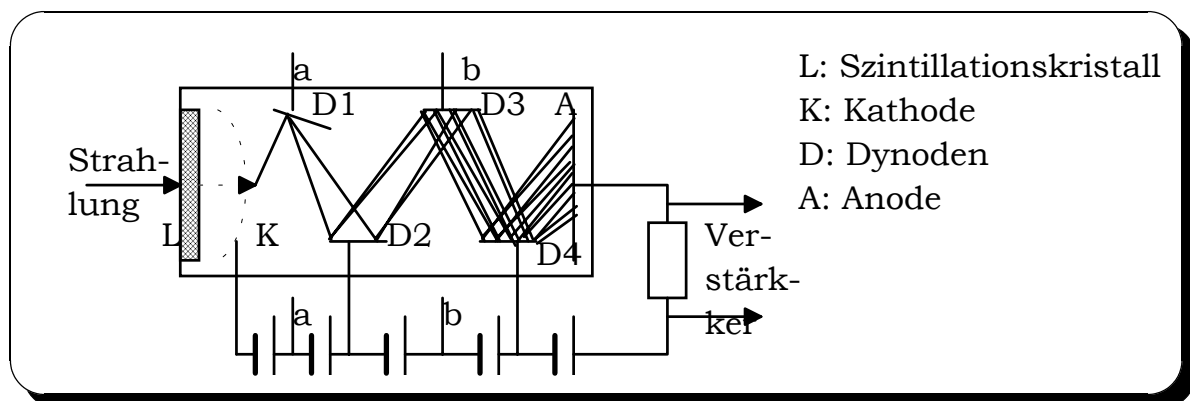
d) Der Szintillationszähler:

Die Teilchen der radioaktiven Strahlung verursachen beim Auftreffen auf geeignete Substanzen, z. B. Zinksulfid, Leuchterscheinungen; diese rühren daher, dass die ausgesandten Teilchen auf kürzestem Weg absorbiert werden. Die auf kleinstem Bereich frei werdende Energie genügt vollauf, um ein ZnS-Molekül so anzuregen, dass es einen Lichtblitz aussendet, den man im Dunkeln mit einer Lupe sehen kann. Mit dem Szintillationszähler können allerdings keine von Elektronen herrührenden Szintillationen beobachtet werden, da diese unterhalb der Wahrnehmungsfähigkeit des menschlichen Auges liegen.

Der Szintillationszähler ist der älteste Zähler. Er geriet allerdings fast wieder in Vergessenheit, da die Empfindlichkeit des Auges bei Ermüdung schnell abfällt und daher länger andauernde Experimente nicht durchgeführt bzw. ausgewertet werden können.

Die Szintillationsmethode wird in jüngster Zeit in einer neuen, objektiven Form wieder aufgegriffen: Die entstehenden Lichtblitze werden mit einem sog. Fotomultiplier (Sekundärelektronenvervielfacher) registriert.

Prinzipiskizze:



Dabei handelt es sich um ein Vakuumphotoelement, in dem neben einer empfindlichen Fotokathode mehrere zusätzliche Elektroden untergebracht sind. Die von einem Lichtblitz freigesetzten Fotoelektronen werden auf die erste zusätzliche Kathode beschleunigt und setzen dort neue Elektronen frei, die zur zweiten zusätzlichen Kathode fließen usw. Auf diese Weise erhält man schon im Innern des Vervielfachers eine etwa  $10^7$ -fache Verstärkung. Diese Szintillationszähler sind sehr empfindlich und können sogar

---

einzelne Elektronen registrieren. Außerdem besitzen sie eine erheblich kleinere Totzeit als die Geiger-Müller-Zählrohre.

### **Grundversuche zur Trennung und Identifizierung der Strahlenarten**

Bereits weiter oben wurden wesentliche Versuchsergebnisse vorweggenommen. Nun sollen nach Kenntnis der Funktionsweise der wichtigsten Nachweisgeräte einige Grundversuche vorgestellt und durchgeführt werden.

Versuch: Bringt man ein Radiumpräparat vor ein geeignetes Zählrohr, so zeigt sich, dass ein Teil der vom Präparat ausgehenden Strahlung bereits von einem Blatt Papier vollständig absorbiert wird; man nennt diese Strahlung  $\alpha$ -Strahlung. Ein weiterer Teil wird von dünnen Bleiplatten absorbiert; diese Strahlen heißen  $\beta$ -Strahlen. Strahlen, die auch erhebliche Bleischichten noch durchdringen können, heißen  $\gamma$ -Strahlen.

Genauere Erkenntnisse über die Natur und die Eigenschaften der einzelnen Strahlenarten liefert ihr Verhalten in elektrischen und magnetischen Feldern.

Versuch: Ein Mischpräparat steht vor einem geeigneten Zählrohr. Bringt man dazwischen einen starken Magneten, so lässt sich die Ablenkung der  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlen in verschiedene Richtungen und die Nichtablenkbarkeit eines Teils der Strahlung ( $\gamma$ -Strahlen) demonstrieren.

Zur Bestimmung der Geschwindigkeiten (und damit der Energien) und der spezifischen Ladungen der einzelnen radioaktiven Teilchen eignen sich bereits bekannte Verfahren:

Lässt man geladene Teilchen in einen sog. Wienfilter (gekreuzte elektrische und magnetische Felder) fliegen, so werden sie nicht abgelenkt, wenn sich elektrische Feldkraft und Lorentzkraft gerade aufheben:

$$F_e = F_L \Rightarrow q \cdot E = q \cdot v \cdot B \Rightarrow v = \frac{E}{B}.$$

Die spezifische Ladung eines Teilchens kann man durch die Ablenkung in einem homogenen Magnetfeld berechnen, in das das Teilchen senkrecht eintaucht. Dann gilt nämlich:

$$F_{\text{Zentrifugal}} = F_{\text{Zentripetal}} \Rightarrow q \cdot v \cdot B = m \cdot \frac{v^2}{r} \Rightarrow \frac{q}{m} = \frac{v}{r \cdot B}.$$

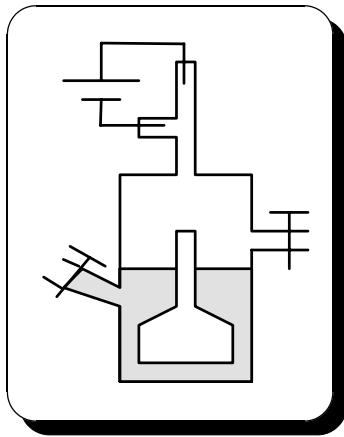
Die vermutete Identität von  $\alpha$ -Teilchen und Heliumkernen wurde von Rutherford 1909 experimentell nachgewiesen: Eine größere Menge des radioaktiven Gases Radon wurde in ein Glasrohr von so geringer Wanddicke eingeleitet, dass die Alphateilchen hindurch dringen konnten. Dieses Rohr war von einem weiteren Rohr umgeben, das mit einem Entladungsrohr mit eingeschmolzenen Elektroden verbunden war. Das dicke umhüllende Rohr wurde evakuiert. Die emittierten Alphateilchen drangen durch das dünnere



---

Rohr, fingen Elektronen ein und wurden zu neutralen Atomen. Das sich ansammelnde Gas wurde durch Anheben eines Quecksilbermeniskus komprimiert und in die Kapillare gepresst. Zwei Tage nach Beginn des Versuchs konnten Rutherford und Roys bei einer Entladung die gelbe Heliumlinie nachweisen und nach sechs Tagen bereits das ganze Heliumspektrum. Eine Kontrolluntersuchung, bei der Helium in das innere Gefäß gefüllt worden war, bestätigte, dass neutrale Heliumatome nicht durch die Wand diffundieren konnten. Das spektroskopisch nachgewiesene Helium musste also von der  $\alpha$ -Strahlung des Radon stammen!

Versuchsskizze:



Die  $\gamma$ -Strahlung ist eine elektromagnetische Strahlung, die im Vakuum von elektrischen und magnetischen Feldern nicht beeinflusst wird.

Die Wellenlänge energiereicherer  $\gamma$ -Strahlung kann wie die von Röntgenstrahlen mit Raumgitterinterferenzen bestimmt werden. Bei energiereicheren  $\gamma$ -Strahlen schließt man aus der kinetischen Energie des ausgelösten Photoelektrons auf die Energie des auslösenden  $\gamma$ -Photons nach der Einsteinschen Beziehung; dabei kann die Ablösearbeit gegenüber der Photonenenergie vernachlässigt werden. Die kinetische Energie eines Photoelektrons kann wiederum durch Ablenkung im Magnetfeld bestimmt werden.

Zusammenfassung:

1.  $\alpha$ -Teilchen, die von radioaktiven Nukliden ausgesandt werden, haben diskrete Energien in der Größenordnung MeV. Die spezifische Ladung von  $\alpha$ -Teilchen ist genau so groß wie die von  $\text{He}^{2+}$ -Ionen. Da zudem die Ladung der  $\alpha$ -Teilchen  $q = 2 \cdot e$  ist, handelt es sich um Heliumkerne.
2. Die  $\beta$ -Teilchen eines  $\beta$ -Strahlers besitzen ein kontinuierliches Energiespektrum mit einer Maximalenergie  $E_{\text{max}}$ . Die Geschwindigkeit der  $\beta$ -Teilchen (schneller Elektronen) kann nahezu Lichtgeschwindigkeit erreichen.
3. Das  $\gamma$ -Spektrum radioaktiver Nuklide ist diskret mit sehr scharfen Linien. Es wird mit Szintillationszählern ausgemessen.