

Praktikum „Radioaktivität und Dosimetrie“

Radioaktiver Zerfall

1. Aufgabenstellung

Bestimmen Sie die Halbwertszeit und die Zerfallskonstante von Radon 220.

2. Theoretische Grundlagen

Stichworte zur Vorbereitung:

Radioaktivität, α -, β -, γ -Strahlung, Zerfallsgesetz, Halbwertszeit, Lebensdauer, Eigenschaften von α -Teilchen (Energie, Absorption in Materie, Reichweite), Ionisationskammer, Zerfallsreihen, radioaktives Gleichgewicht

Literatur:

- | | |
|-----------------------|---|
| J. Becker, H.-J. Jodl | Physikalisches Praktikum für Naturwissenschaftler und Ingenieure, Kap. V 36,
VDI - Verlag 1991 |
| W. Walcher | Praktikum der Physik, Kap. 6.4.,
Teubner Verlag 1989 |
| W. Stolz | Radioaktivität
B. G. Teubner Verlagsgesellschaft |
| H. Lindner | Grundriss der Atom- und Kernphysik, Kap. 8,
Fachbuchverlag Leipzig 1988 |
| E. W. Schpolski | Atomphysik Bd.II, Kap. 21,
Verlag der Wissenschaften 1983 |

Die Radioaktivität ist eine Eigenschaft einer Reihe von Nukliden, die sich spontan also ohne äußere Einwirkung- in eine andere Kernart umwandeln. Bei diesen Kernumwandlungen wird Energie frei, und es entstehen ionisierende Strahlen.

Für die spontane Umwandlung von Radionukliden ist typisch, dass die Anzahl der im Zeitintervall $d\tau$ zerfallenden Kerne dN proportional zur Zahl N der jeweils vorhandenen Kerne ist

$$- dN = \lambda N d\tau \quad . \quad (1)$$

Der Proportionalitätsfaktor λ ist eine für die zerfallende Nuklidart charakteristische Größe und wird als Zerfallskonstante des betreffenden Nuklides bezeichnet. In diesem Zeitgesetz kommt der Sachverhalt zum Ausdruck, dass es sich bei den Kernumwandlungen um statistische Prozesse handelt. Bei diesen Zerfallereignissen ist es nicht möglich, eine Aussage über die Lebensdauer eines bestimmten Atomkerns zu machen, sondern nur darüber, wie viele von einer vorgegebenen Anzahl von Kernen im Mittel während einer bestimmten Zeit zerfallen.

Die Zahl der Zerfälle pro Zeiteinheit (Zerfallsrate) wird auch als Aktivität A bezeichnet

$$- \frac{dN}{d\tau} = A(\tau) = \lambda N(\tau) \quad . \quad (2)$$

Durch Umstellen von Gl. (1) und anschließende Integration erhält man das Zerfallsgesetz

$$N = N_0 e^{-\lambda\tau} \quad , \quad (3)$$

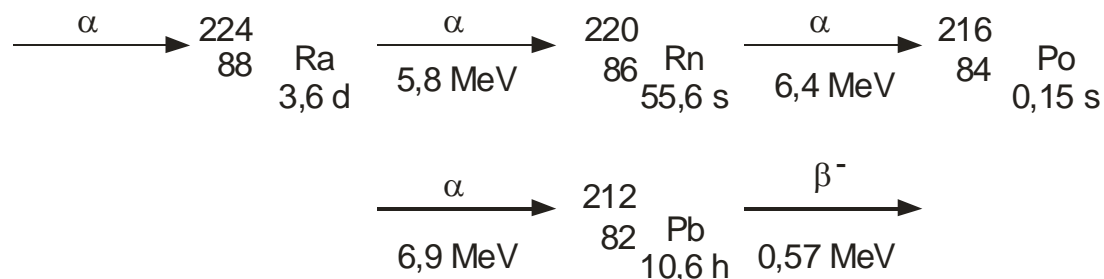
wobei N_0 die Zahl der vorhandenen Kerne zum Zeitpunkt $\tau=0$ ist. Die reziproke Zerfallskonstante $1/\lambda=\tau$ gibt die mittlere Lebensdauer der betrachteten Atomkerne an.

Anschaulicher als diese Größe ist die Zeit, die im Mittel vergeht, bis die Anzahl der noch nicht zerfallenen Kerne auf die Hälfte abgenommen hat (oder mit anderen Worten, bis die Hälfte der Kerne zerfallen ist). Diese "Halbwertszeit" $T_{1/2}$ hängt mit der mittleren Lebensdauer τ zusammen. Setzt man in Gl.3 $N= N_0/2$ und $\tau = T_{1/2}$, so erhält man

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau \ln 2 \quad . \quad (4)$$

Im vorliegenden Versuch wird die Halbwertszeit aus dem zeitlichen Verlauf des Stromes ermittelt, der durch die Strahlung in einer Ionisationskammer erzeugt wird. Die Halbwertszeiten liegen je nach Nuklid zwischen vielen Jahren (z. B. $4,51 \cdot 10^9$ a für U 238) und Bruchteilen einer Sekunde (z. B. $1,64 \cdot 10^4$ s für Po 214).

Die meisten natürlichen radioaktiven Nuklide gehören Zerfallsreihen an. Bei der Bestimmung der Halbwertszeit eines derartigen Nuklids durch Messung des zeitlichen Abklingens seiner radioaktiven Strahlung hat man darauf zu achten, dass die Strahlungen der Vorläufersubstanzen und seiner Folgekerne das Ergebnis nicht verfälschen. Diese Bedingung lässt sich sehr gut bei einem Radonisotop, dem Radon 220, (auch als Thoron bezeichnet) das der Thoriumreihe angehört, erfüllen. Der interessierende Teil dieser Zerfallsreihe hat folgendes Aussehen:



Über den Pfeilen steht jeweils die Zerfallsart, unter den Pfeilen die Zerfallsenergie und unter den Nukliden die Halbwertszeit. Radon ist ein Edelgas, das sich über jedem Radiumpräparat ansammelt und daher von der Muttersubstanz leicht getrennt werden kann, so dass von dieser Seite keine Einflüsse möglich sind. Wegen der kurzen Lebensdauer des auf Rn 220 folgenden Po 216 Nuklids wird man neben den α -Teilchen des Rn 220 auch solche des Po 216 erhalten. Diese erhöhen zwar die Aktivität, aber für den zeitlichen Verlauf des Zerfalls ist dieses Tochternuklid, wie noch gezeigt wird, ohne Bedeutung.

Aufgrund der langen Halbwertszeit des Th 232 ($T_{1/2} = 1,4 \cdot 10^{10}$ a) befinden sich die nachfolgenden Zerfallsnuklide, die alle deutlich kürzere Halbwertszeiten aufweisen, im radioaktiven Gleichgewicht, welches durch

$$A_i(t) = A_{i+1}(t) \quad (5)$$

mit A_i als Aktivität des Nuklides i , A_{i+1} als Aktivität des Folgenuklides $i+1$ und A_{0i} als Aktivität des Nuklides i zum Zeitpunkt $t=0$ gekennzeichnet ist und im zeitlichen Verlauf vom Mutternuklid bestimmt wird.

Da sich in messtechnisch relevanten Zeiträumen die Aktivität des Thoriums und damit ebenfalls die der Zerfallsprodukte praktisch nicht ändert, spricht man von einem Dauergleichgewicht. Das heißt, die Aktivitäten sind in den betrachteten Zeitintervallen als konstant anzusehen (Abb.1). Das radioaktive Gleichgewicht stellt sich nach ca. 7 Halbwertszeiten des Folgeproduktes ein.

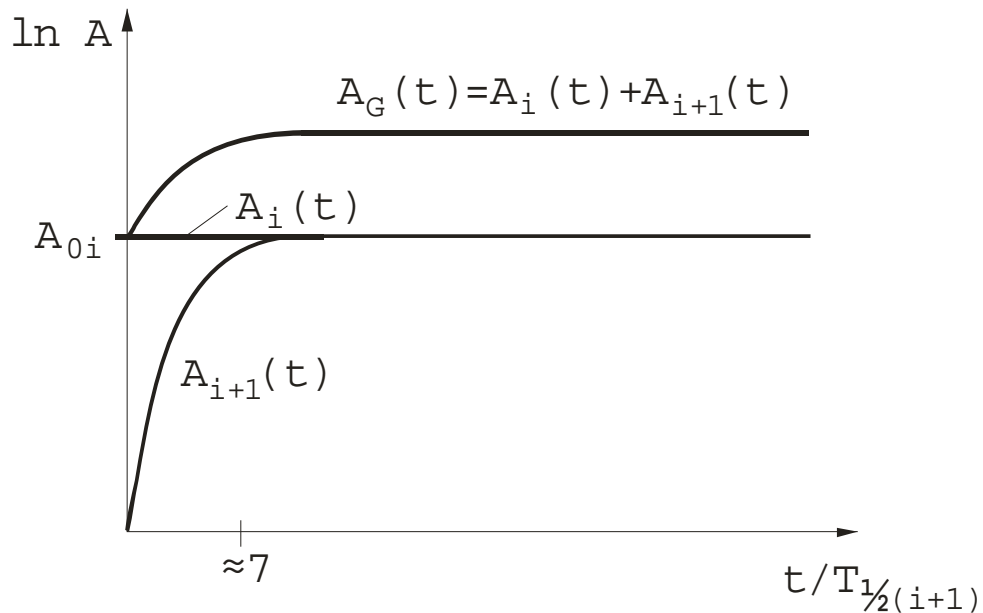


Abb.1: Dauergleichgewicht

Wird die Zerfallsreihe aufgetrennt, so wirkt das abgetrennte Nuklid als neue Muttersubstanz, und es stellt sich ein anderes Gleichgewicht ein.

Eine Rechnung ergibt für den Fall, dass die Zeit t mehr als das 7 fache der Halbwertszeit des Folgeproduktes $T_{1/2}$ beträgt, einem Aktivitätsgleichgewicht gemäß

$$A_2(t) = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} A_1(t) , \quad (6)$$

Mit λ_1 und λ_2 als Zerfallskonstanten von Mutter- und Tochternuklid.

Wenn $\lambda_1 < \lambda_2$ ist, wird der Faktor $\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} > 1$, d.h., die zeitlichen Änderungen von Mutter- und Tochternuklid sind bis auf einen konstanten Faktor gleich

(Abb. 2). Man spricht von einem laufenden Gleichgewicht.

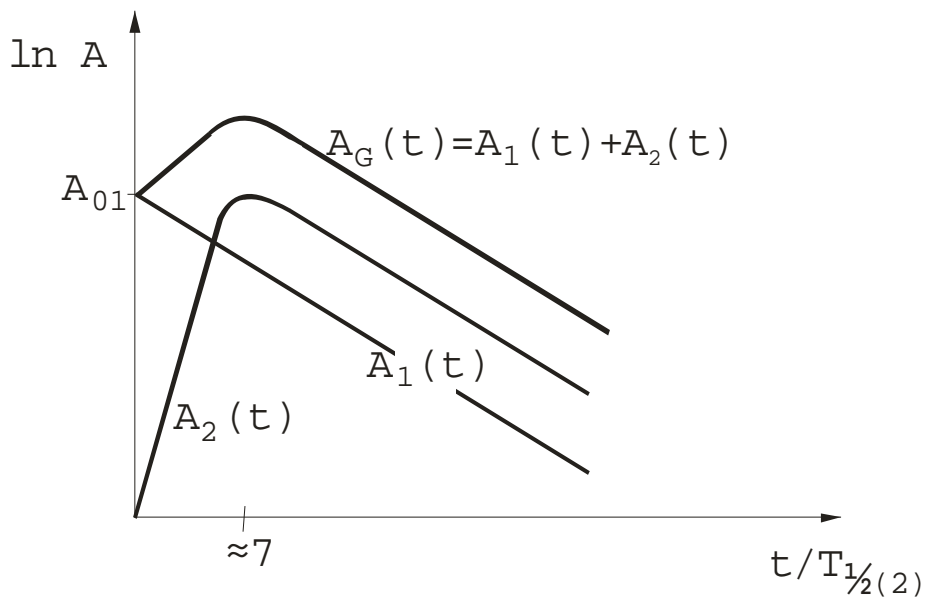


Abb.2: Laufendes Gleichgewicht

Da im vorliegenden Versuch Radon als Mutternuklid verwendet wird, tritt Polonium als Tochternuklid auf (Abb.3). Da die Halbwertszeiten von Rn und Po deutlich unterschiedlich sind, gilt auch $\lambda_{Rn} \ll \lambda_{Po}$, damit wird der Vorfaktor in (6) eins, und es gilt

$$A_{Rn}(t) = A_{Po}(t) \quad . \quad (7)$$

Die Gesamtaktivität $A_G(t)$ beträgt somit

$$A_G(t) = A_{Rn}(t) + A_{Po}(t) = 2A_{0Rn} \cdot e^{-\lambda_{Rn} \cdot t} \quad (8)$$

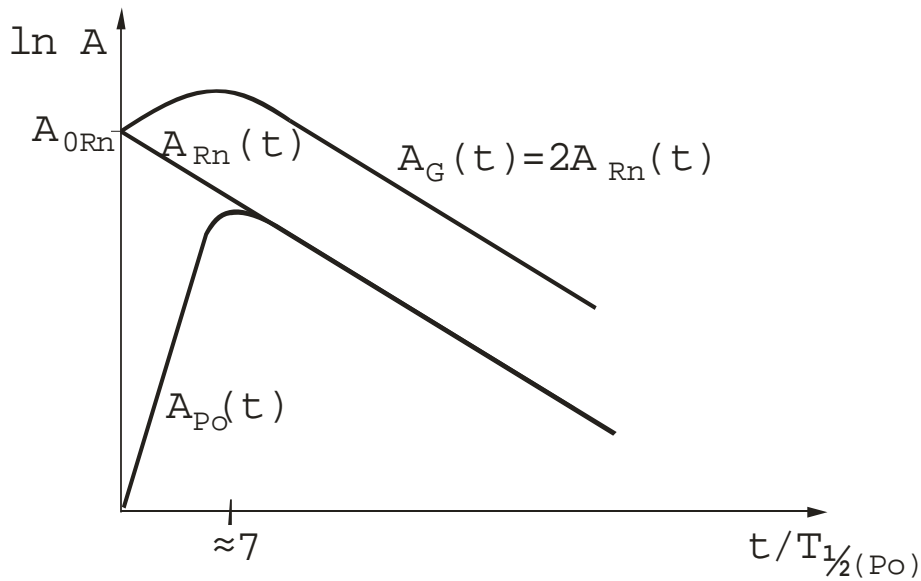


Abb.3: Qualitative Darstellung des radioaktiven Gleichgewichts zwischen Rn 220 und Po 216.

Da der zeitliche Abfall von A_G nach Einstellung des Gleichgewichtes durch λ_{Rn} bestimmt wird, lässt sich λ_{Rn} bzw. $T_{1/2Rn}$ aus dem Anstieg der Kurve $A_G(t)$, die durch den Ionisationskammerstrom repräsentiert ist, bestimmen.

Auf Grund der langen Halbwertszeit des nächsten Folgeproduktes Pb 212 wird dieses sowie weitere Folgeprodukte am Ionisationskammerstrom nur einen vernachlässigbaren Anteil haben.

3. Versuchsaufbau

Eine Ionisationskammer ist im Prinzip ein (Platten- oder Zylinder-) Kondensator, zwischen dessen Elektroden sich ein Detektorgas befindet. In unserem Fall handelt es sich um Luft unter Atmosphärendruck. An die Elektroden wird eine Gleichspannung gelegt und ein hochempfindlicher Strommesser in den Kreis geschaltet. Der α -Strahler wird in die Ionisationskammer gepumpt. Die emittierten α -Teilchen ionisieren durch Stoß die Gasmoleküle in der Kammer. Infolge der angelegten Spannung wandern die entstandenen Ladungen (negative Elektronen und positive Ionen) je nach Polarität zur entsprechenden Elektrode. Der von den beweglichen Ladungen erzeugte Strom wird gemessen.

Jedes α -Teilchen erzeugt auf Grund seiner hohen kinetischen Energie von einigen MeV etwa 10^5 Ion/Elektron-Paare durch Ionisation. Diese Ladungsmenge ist

zu klein, um mit der einfachen Ionisationskammer des Praktikums ein einzelnes α -Teilchen nachzuweisen. Allerdings ist der Nachweis einer kontinuierlichen Strahlungsintensität möglich. Zum Einzelnachweis von radioaktiven Teilchen müsste ein Zählrohr verwendet werden.

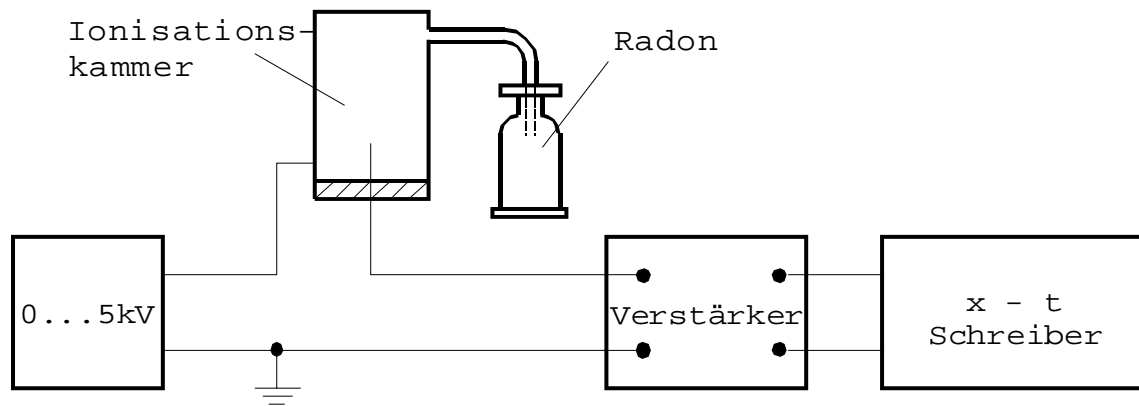


Abb. 4 : Versuchsaufbau (schematisch)

4. Versuchsdurchführung

Zunächst wird die Schaltung aufgebaut, wie sie in Abb.4 schematisch gezeichnet ist. Durch wiederholtes Pumpen an dem Einweg-Blasebalg wird Radon 220 in die Ionisationskammer gebracht, bis der Schreiberstift einen möglichst großen Ausschlag zeigt. Die zeitliche Änderung des Ionisationskammerstromes wird für unterschiedliche Betriebsspannungen der Ionisationskammer aufgenommen (mindestens so lange, bis kaum noch eine Änderung der Aktivität zu erkennen ist).

Da der Ionisationskammerstrom proportional zur Aktivität A ist, kann aus der vom Schreiber aufgezeichneten Zerfallskurve die Halbwertszeit ermittelt werden. Auf dem Schreiberdiagramm wird ein geeigneter Zeit-Nullpunkt ausgewählt und die Zeitachse entsprechend der Papiervorschubgeschwindigkeit beschriftet (Kalibrierung!). Der Y-Achsenabschnitt zur Zeit $t=0$ ist ein Maß für A_0 .

Hinweis:

Treten Selbstentladungen in der Ionisationskammer auf, die sich als schmale Peaks auf der Schreiberkurve bemerkbar machen, so muss die Ionisationskammer gesäubert werden.

5. Kontrollfragen

- 5.1 Welche Eigenschaften haben α -Teilchen, und wie können diese nachgewiesen werden?
- 5.2 Was versteht man unter einem Nuklid, und was ist ein Isotop?
- 5.3 Erläutern Sie die Einzelprozesse beim Zerfall von Thorium (Thoriumzerfallsreihe).
- 5.4 Mit Hilfe von Radionukliden werden Altersbestimmungen zu archäologischen, geologischen u. a. Problemen durchgeführt. Welche Methoden kennen Sie?
- 5.5 Welche Umweltrelevanz haben die verschiedenen Radonisotope?