

## Versuch 4

### Radioaktivität

#### Versuchsziel:

Atomkerne bestehen aus Protonen und Neutronen, wobei die Protonenzahl identisch mit der Ordnungszahl des Elements ist. Im Periodischen System nimmt die Zahl der Neutronen stärker zu als die der Protonen. Oberhalb des Elements Wismut (Bi) existieren keine stabilen Kerne. Diese instabilen Kerne zerfallen radioaktiv, d.h. unter Emission energiereicher Strahlung. Auch unterhalb des Elements Wismut sind nur bestimmte Kombinationen von Protonen und Neutronen stabil. Diese bilden die auf der Nuklidkarte schwarz markierte „stabile Reihe“. (Die Nuklidkarte hängt im Praktikum aus). Alle Kerne außerhalb der stabilen Reihe zerfallen solange radioaktiv, bis ein stabiler Kern entstanden ist. Wegen ihrer hohen Energie wirkt die radioaktive Strahlung ionisierend. Da Luft, Boden, Wasser und damit auch pflanzliche und tierische Nahrungsmittel natürliche Radionuklide enthalten, inkorporiert der Mensch mit der Nahrung radioaktives Material. Das essentielle Element Kalium enthält 0,0117 % K-40, was zu einer internen Strahlenbelastung von ca. 0,2 mSv/a führt. Aufgrund der ionisierenden Wirkung ist radioaktive Strahlung leicht nachweisbar, die genaue Messung eines Radionuklids ist allerdings schwierig und erfordert eine permanente Qualitätskontrolle.

In der Medizin werden Radionuklide für Diagnose und Therapie eingesetzt. Bekannte Anwendungen sind: Szintigramme der Schilddrüse und des Skeletts mit metastabilem Tc-99, Tele-gammatherapie (Kobaltbombe, Co-60) und das After-loading-Verfahren (Ir-192, Au-198). In den Biowissenschaften werden radioaktive Isotope zur Markierung einzelner Atome in einem Molekül eingesetzt. Damit werden die chemischen Eigenschaften des Moleküls nicht verändert und es lassen sich so Stoffwechselprozesse verfolgen.

Beim Umgang mit offener Radioaktivität sind äußerste Sorgfalt und konzentriertes Arbeiten unerlässlich. Bei Inkorporation verteilen sich die Radionuklide entsprechend ihrer chemischen Eigenschaften im Körper. Kolloidbildner wie Th, Pu, Am werden hauptsächlich in der Leber und Milz (RES) deponiert, Erdalkalien wie Ra und Sr-90 werden im Knochen eingebaut und Cs-137 sowie H-3 werden ubiquitär verteilt.

Bei der Inhalation schwerlöslicher Stäube ( $\text{PuO}_2$ ) wird hauptsächlich die Lunge belastet. Der Nachweis der Inkorporation erfolgt durch Ausscheidungsanalyse oder, bei genügend harter  $\gamma$ -Strahlung, mit dem Ganzkörperzähler.

Ein radioaktiver Kern zerfällt mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit. Das Zerfallsgesetz lautet:

$$N_t = N_o \cdot e^{-\lambda t}$$

$N_t$  : zur Zeit t vorhandene Kerne

$N_o$  : zur Zeit  $t = 0$  vorhandene Kerne

$t$  : Zeit, nach der noch  $N_t$  Kerne vorhanden sind

$\lambda$  : Zerfallskonstante

Eine andere Schreibweise desselben Gesetzes ist:  $\frac{-dN}{dt} = \lambda \cdot N$ .

$\frac{-dN}{dt}$  wird Aktivität (A) genannt. Da die Aktivität proportional zur vorhandenen Anzahl der Kerne ist, gilt auch:

$$A_t = A_o \cdot e^{-\lambda t}$$

Die Aktivität wird in Becquerel gemessen. 1 Bq = 1 Zerfall/s. Früher wurde die Aktivität in Curie angegeben: 1 Ci =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Bq. Vorsicht bei der Umrechnung alter Literaturangaben!!

Ein Radionuklid kann, unter anderem, durch seine Zerfallskonstante charakterisiert werden. Eine wesentlich anschaulichere charakteristische Größe ist die Halbwertszeit, d.h. die Zeit, nach der die Hälfte einer vorhandenen Menge eines Radionuklids zerfallen ist. Zwischen diesen beiden Größen besteht der folgende einfache Zusammenhang:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Im Praktikum sollen die Halbwertszeiten von zwei radioaktiven Silberisotopen gemessen werden. Beim Messen radioaktiver Präparate ist die pro Zeiteinheit bestimmte Anzahl von Ionisationsereignissen (Impulsrate) nicht identisch mit der Aktivität. Es wird immer nur ein Teil der Aktivität gemessen, dessen Größe von der Geometrie der Meßanordnung, der Eigenabsorption der Probe, der Ansprechwahrscheinlichkeit des Zählsystems, der Strahlenart und Strahlungsenergie usw. abhängt. Eine sorgfältige Kalibrierung ist daher immer erforderlich.

Im Gegensatz zu einer Röntgenröhre läßt sich ein radioaktives Präparat nicht „abschalten“. Es sind daher immer Strahlenschutzvorkehrungen zu treffen. Bei einer punktförmigen Strahlenquelle, wie sie meist annähernd bei Arbeiten im Labor vorliegt, ist die Strahlungsintensität umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstands, wenn von einer Wechselwirkung der Strahlung mit Materie abgesehen wird. Diese rein geometrische Überlegung (die Kugeloberfläche ist proportional zu  $r^2$ ) ist nur für  $\gamma$ -Strahlung in Luft einigermaßen erfüllt. Trotzdem ist es aber immer sinnvoll, radioaktive Präparate beim Transport vom Körper weg zu halten und unter Umständen Manipulatoren zu verwenden.

Zur Veranschaulichung dieses Zusammenhangs soll die Abstandsabhängigkeit der Impulsrate bei einem Radiumpräparat in Teil 1 des Versuchs gemessen werden.

Falls ein ausreichender Abstand nicht eingehalten werden kann, muß die Strahlung abgeschirmt werden. Für reine  $\alpha$ -Strahler genügt dazu bereits eine Aluminiumfolie, für  $\beta$ -Strahler müssen Aluminium- oder Kunststoffziegel verwendet werden und  $\gamma$ -Strahler werden am raumsparendsten mit Blei abgeschirmt. Dieses unterschiedliche Verhalten der einzelnen Strahlenarten wird in Teil 2 des Versuchs sichtbar.

Ist eine Abschirmung auch nicht möglich, verbleibt als ungünstigste Schutzmaßnahme nur noch eine Verkürzung der Expositionsdauer, d.h. Flucht. (Bei Unfall durch großflächige Kontamination anschließend Kleider wechseln, waschen. Haare nicht vergessen!!, Dekontamination).

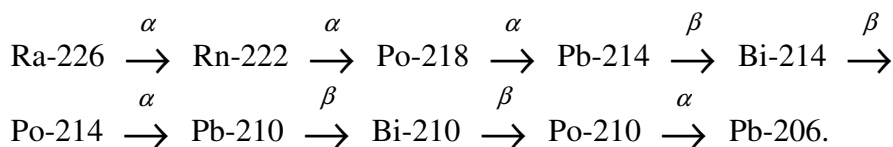
## Versuchsteile:

1. Ermittlung der Abstandsabhängigkeit der Zählrate und der Reichweite radioaktiver Strahlen.
2. Messung des Durchdringungsvermögens radioaktiver Strahlen.
3. Bestimmung der Halbwertszeiten von zwei in einer Neutronenquelle künstlich erzeugten radioaktiven Silberisotopen.

## Durchführung:

Für diesen Versuch sind 2 verschiedene Meßanordnungen aufgebaut. Zwei Praktikumsgruppen müssen unbedingt mit Teil 3 beginnen!

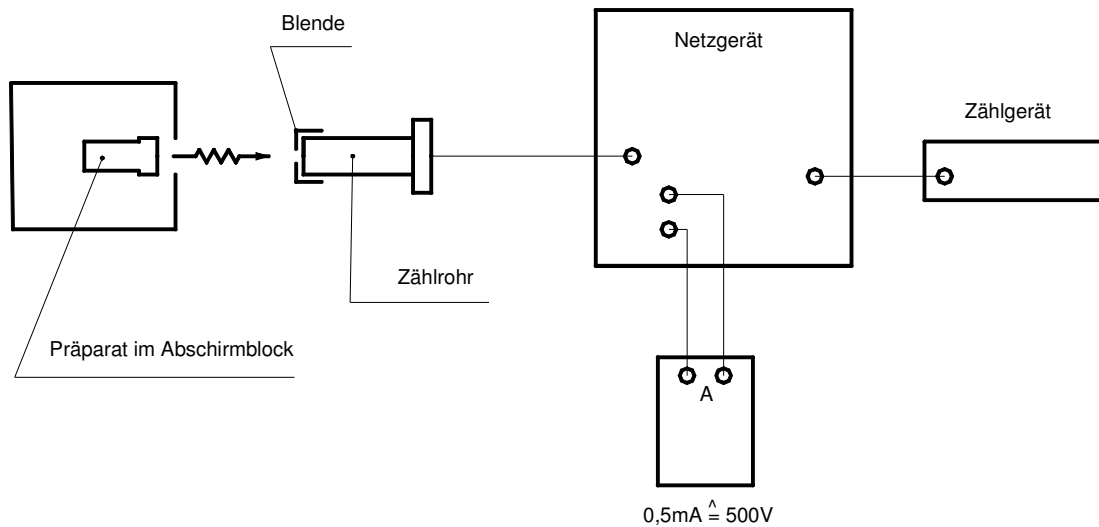
**Teil 1:** Das im Praktikum eingesetzte Präparat ist ein „geschütztes radioaktives Präparat mit Blende“. Es besteht aus Ra-226, welches als Sulfat in eine Edelmetallfolie eingebettet ist und am Ende eines Metallstabs durch eine Leichtmetallkappe gehalten wird. Die Kappe ist mit 3 Bohrungen zum Austritt der Strahlung versehen. Die Aktivität des Präparats beträgt  $3,3 \cdot 10^5$  Bq. Ra-226 besitzt eine Halbwertszeit von 1600 Jahren und zerfällt nach folgendem Schema:



Unter der Voraussetzung, daß das Edelgas Radon nicht aus der Trägerfolie herausdiffundiert, sind auch alle Tochternuklide in dem Präparat vorhanden.

Zunächst muß der Nulleffekt der Meßanordnung innerhalb und außerhalb des leeren Abschirmblocks gemessen werden. Dazu wird bei einer Zählrohrspannung von 450 V (0,5 mA entsprechen 500 V) jeweils für 5 Minuten die Anzahl der Impulse registriert. Der Nulleffekt muß bei einem Teil der Meßwerte (spätestens wenn er 10 % des Meßwerts beträgt) berücksichtigt werden. Zur Messung des Nulleffekts wird der Impulszähler durch Drücken des Knopfes "Event" auf 0 gestellt und gleichzeitig die Uhr eingeschaltet. Nach 5 Minuten wird die angezeigte Impulszahl notiert. Anschließend wird vom Praktikumsbetreuer das Präparat in den Abschirmblock eingesteckt. Es sind nun bei jedem eingestellten Abstand die Impulse pro 30 s zu bestimmen. Bei dieser Messung kann die Impulszahl nicht mehr bei laufendem Meßgerät abgelesen werden. Es wird daher der ausliegende Taster zwischen Meßverstärker und Impulszähler geschaltet. Nach Rückstellung auf 0 wird die Uhr gestartet und gleichzeitig der Taster niedergedrückt. Nach 30 Sekunden wird der Taster losgelassen und die zuletzt erscheinende Impulszahl notiert. Achtung: Das Zählgerät zeigt die gemessene Impulszahl mit einer kleinen Verzögerung an!

Den Abstand „0“ erreichen Sie, wenn Sie das Zählrohr bis zum Anschlag in den Abschirmblock einschieben. Der Pfeil auf der Rückseite des Zählrohrhalters zeigt dann auf den Nullpunkt des montierten Maßbandes. Der tatsächliche Abstand zwischen Zählrohr und Präparat beträgt dann etwa 25 mm.



Einzustellende Abstände:

0 - 50 mm : alle 5 mm  
 50 - 150 mm : alle 10 mm

150 - 500 mm : alle 50 mm  
 500 - 1000 mm : alle 100 mm

Tragen Sie die Ergebnisse auf einfach-logarithmisches Papier auf (4-Dekaden) und verbinden Sie die Meßpunkte ausnahmsweise nicht durch eine Linie. Können Sie aus dem Diagramm ersehen, ob verschiedene Strahlenarten auftreten? Können Sie die Reichweite einer Strahlenart ablesen? (Abknicken der Meßpunktreihe? Welche Strahlung tritt auf?). Überprüfen Sie für verschiedene Abstände das  $1/r^2$ -Gesetz. Bei Verdopplung des Abstands sollte die Impulsrate auf ein Viertel sinken. Warum finden Sie Abweichungen?

**Teil 2:** Im Abstand 0 soll das Durchdringungsvermögen der radioaktiven Strahlung für Aluminium und Blei gemessen werden. Damit das Zählrohr auch  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlen registrieren kann, ist es mit einem dünnen Fenster versehen. Dieses ist sehr empfindlich und kann bereits durch Berührung mit dem Finger zerstört werden. (Kosten 400,- €). Deshalb ist das Zählrohr mit einer doppelten Schutzkappe aus Messing, die gleichzeitig als Folienhalter dient, gesichert. Zum Einlegen des Abschirmmaterials wird die innere Schutzkappe durch leichtes Eindrücken des Fingernagels in den Schlitz am Rand der Kappe festgehalten und dann die äußere Messinghülle abgezogen. Anschließend werden in den Folienhalter nacheinander 1, 2, 4, 7 und 10 von den ausliegenden dünnsten Aluminiumfolien (0,01 mm) eingelegt und die Anzahl der Impulse für 30 s registriert. Danach wird das Experiment mit der jeweils gleichen Anzahl der stärkeren Aluminiumfolien (0,1 mm), dem Aluminiumblech (1 mm) und dem Bleiblech (1 mm) wiederholt.

Tragen Sie das Ergebnis auf halblogarithmischem Papier (3 Dekaden) auf und wählen Sie auf der x-Achse als Einheit die Anzahl der Folien/Bleche ohne Berücksichtigung der Dicke. Verwenden Sie für die Graphik auch den Meßwert für den Abstand „0“ ohne Abschirmung aus Teil 1. Durch Analyse der Kurven können Sie folgende Fragen beantworten:

Wie groß ist die Reichweite von  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlen in Aluminium? Warum erhalten Sie für die unterste Kurve (Bleiabschirmung) eine Gerade? Wie groß ist die Halbwertsschicht in Blei für die durch die unterste Kurve charakterisierte Strahlung?

**Teil 3:** Es sollen die Halbwertszeiten zweier, mit Hilfe einer Neutronenquelle künstlich erzeugter Silberisotope gemessen werden. Die Neutronenquelle besteht aus einer Ra/Be-Mischung. Durch einen  $\alpha, n$ -Prozeß werden darin Neutronen erzeugt, die durch Paraffin auf thermische Energie abgebremst werden. Diese thermalisierten Neutronen können leicht von Atomkernen absorbiert werden, wodurch ein Nuklid mit Neutronenüberschuß entsteht. Solche Kerne zerfallen unter Emittierung von  $\beta^-$ -Strahlung, welche in speziellen Zählrohren nachgewiesen wird. Um die maximale Ausbeute an Radionukliden zu erhalten, muß die Probe bis zum Erreichen des radioaktiven Gleichgewichts bestrahlt werden. Das radioaktive Gleichgewicht ist erreicht, wenn pro Zeiteinheit genausoviele radioaktive Kerne erzeugt werden wie zerfallen. Eine längere Bestrahlung kann dann die Ausbeute nicht mehr erhöhen. In unserem Fall muß 25 Minuten mit Neutronen bestrahlt werden, d.h. wenn beim Registrieren der Meßreihe Fehler gemacht werden, muß die Gruppe 25 Minuten warten bis wieder gemessen werden kann. Nach der Messung ist die Probe vom Assistenten unverzüglich zur neuen Aktivierung in eine Bohrung des innersten Rings der Neutronenquelle einzuführen. Zu Beginn der Messung wird für das in einem Abschirmblock montierte Zählrohr (Spannung 500 V) während der Dauer von 5 min die Nullrate bestimmt. (Die Nullrate muß bei 1 bis 2 Impulsen pro 5 s liegen. Falls sie deutlich größer ist, muß die Spannung am Zählrohr etwas reduziert werden). Das Zählgerät ist so eingestellt, daß es 5 Sekunden alle Impulse addiert und dann die Summe anzeigt. Die Impulszählung wird durch Drücken des Knopfes "Event" gestartet; sobald die Zahl "0" erscheint wird die große Stoppuhr in Gang gesetzt. Nach 5 Minuten wird am laufenden Zählgerät die Impulszahl abgelesen und daraus der Nulleffekt für 5 s errechnet. Danach entnimmt der Gruppenbetreuer die Silberprobe aus der Neutronenquelle, startet dabei die Stoppuhr und überführt die aktivierte Probe möglichst schnell in den Abschirmblock. Gleichzeitig wird die Zähleranzeige durch Drücken des Knopfes "Event" auf "0" zurückgestellt. Die aufleuchtenden Impulszahlen sind 10 Minuten lang fortlaufend abzulesen und zu notieren.

Da natürliches Silber etwa zu gleichen Teilen aus Ag-107 und Ag-109 besteht, werden bei der Neutronenaktivierung die beiden radioaktiven Isotope Ag-108 und Ag-110 gebildet. Gemessen wird demnach die Summe der beiden Zerfallskurven.

Die Auswertung des Versuchs kann nach 2 Methoden erfolgen. Die Praktikumsgruppen sollten sich vor der Auswertung absprechen, damit nicht alle dasselbe Auswertungsverfahren anwenden!

**1. Methode:** Durch Logarithmieren des Zerfallsgesetzes erhält man

$$\ln N_t = \ln N_0 - \lambda t$$

Trägt man also die Anzahl der radioaktiven Kerne auf einfach-logarithmischem Papier (3 Dekaden) als Funktion der Zeit auf, erhält man eine Gerade mit der Steigung  $-\lambda$  und dem Achsenabschnitt  $N_0$ .

**Durchführung:**

Es wird angenommen, daß nach 10 Minuten alle radioaktiven Kerne zerfallen sind. Die Impulszahl nach 10 Min., korrigiert um den Nulleffekt für 10 Min., wird als  $N_0$  bei der Zeit  $t = 0$  eingetragen. Von diesem Wert werden dann die nach 5 s, 10 s usw. zerfallenen Kerne subtrahiert und die so erhaltenen Werte bei den entsprechenden Zeiten eingetragen.

**Achtung:** Dabei muß bei den subtrahierten Zahlen der zunehmende Anteil des Nulleffekts berücksichtigt werden. Gegen Ende der Meßzeit bricht die errechnete Kurve meist plötzlich steil ab. Dann wird die Auswertung physikalisch unsinnig und ist zu beenden (kleine Differenzen fehlerbehafteter Werte!).

### **Auswertung:**

Liegen, wie in unserem Fall, 2 Radionuklide nebeneinander vor, erhält man als Meßkurve die Summenkurve zweier Geraden. Da das eine Silberisotop (Ag-108) eine wesentlich größere Halbwertszeit hat, geht die gemessene Kurve für längere Zeiten in eine Gerade über (Zerfallskurve des langlebigen Nuklids). Zur Analyse der Meßkurve wird nun dieser lineare Anteil zur Zeit  $t = 0$  extrapoliert. Die so erhaltene Gerade ist die Zerfallskurve von Ag-108. Es werden nun für kurze Zeiten einzelne Punkte auf dieser Geraden abgelesen und graphisch von den entsprechenden Punkten der Summenkurve subtrahiert. Man erhält so eine zweite Gerade, die die Zerfallskurve von Ag-110 darstellt. Aus den beiden Kurven sind die Halbwertszeiten der Silberisotope abzulesen.

**2. Methode:** Da die Aktivität proportional zur vorhandenen Anzahl radioaktiver Kerne ist, gilt natürlich auch

$$\ln A_t = \ln A_0 - \lambda t$$

Man kann also auch die Aktivität halblogarithmisch gegen die Zeit auftragen und erhält prinzipiell die gleichen Kurven wie oben beschrieben. Man bildet die Differenz zweier aufeinander folgender Impulszahlen, korrigiert um den Nulleffekt für 5 s und hat damit ein Maß für die Aktivität der Probe zu der entsprechenden Zeit. Trägt man die so errechneten Zahlen halblogarithmisch (3 Dekaden) gegen die Zeit auf, erhält man für kurze Zeiten eine schöne Kurve. Diese geht bei längeren Zeiten bald in eine Punktwolke über, bei der nur noch eine schwach fallende Tendenz ersichtlich ist.

Da man aber weiß, daß für längere Zeiten die Meßkurve in eine Gerade übergeht, legt man eine Gerade durch die Punktwolke und extrapoliert bis zur Zeit  $t = 0$ . Anschließend verfährt man wie bei Methode 1 beschrieben.

Die Erfahrung hat gezeigt, daß mit beiden Methoden gleich gute/schlechte Ergebnisse erhalten werden. Die nach den verschiedenen Verfahren erzeugten Graphiken sollten nebeneinander betrachtet werden. Sie demonstrieren anschaulich, wie durch geschickte Präsentation ungenauer Meßdaten der Eindruck einer relativ genauen Messung erzeugt werden kann. An diese Möglichkeit sollte man beim Lesen von Veröffentlichungen stets denken.

### **Fragen zum Versuch:**

1. Welche Arten der Strahlung treten beim radioaktiven Zerfall auf?
2. Wie werden Neutronenstrahlen erzeugt?
3. Was ist Kernspaltung?
4. Wie lautet das Gesetz des radioaktiven Zerfalls?
5. Was versteht man unter der Aktivität eines Präparats und in welcher Einheit wird sie

gemessen?

6. Wie ist die Halbwertszeit eines radioaktiven Elements definiert?
7. In welcher Größenordnung liegt die Energie radioaktiver Strahlung?
8. Was geschieht beim Durchgang von radioaktiven Strahlen durch Materie?
9. Wie groß ist die Reichweite radioaktiver Strahlung?
10. Was versteht man unter der Halbwertsdicke eines Materials?
11. Was ist eine Kobaltquelle?
12. Wie ändert sich die auf eine Einheitsfläche auftreffende Strahlungsleistung mit dem Abstand, wenn keine Abschwächung in Materie stattfindet?
13. Wie kann man die einzelnen Strahlungsarten nachweisen?
14. Wie ist die Wirkungsweise eines Zählrohrs?
15. Was sind die wichtigsten Strahlenmeßgeräte?
16. Wie kann man die absorbierte Strahlendosis messen?
17. Welche Wirkungen können im Organismus durch radioaktive Strahlen verursacht werden?
18. Wozu werden Radionuklide in der Medizin und den Biowissenschaften verwendet?
19. Was ist Autoradiographie?
20. Was versteht man unter der Strahlenbelastung eines Menschen?