

# IIA5

Modul Atom-/Kernphysik

## Ablenkung im B-Feld

In diesem Versuch sollen mit einer Cäsium-Quelle einige Aspekte der Radioaktivität untersucht werden, so zum Beispiel das Abstandsgesetz, oder die Ablenkbartigkeit von Betastrahlen. Im theoretischen Teil werden Begriffe wie  $\alpha$ -  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlen, Zerfallsgesetz, Lebensdauer und Halbwertszeit eingeführt. Wichtigster und weitverbreitetster Detektor für Radioaktivität aller Art ist der Geigerzähler. Auch in diesem Versuch wird solch ein Zähler verwendet, und im experimentellen Abschnitt ist seine Funktionsweise erklärt.



## **Versuch IIA5 - Ablenkung im B-Feld**

In diesem Versuch sollen mit einer Cäsium-Quelle einige Aspekte der Radioaktivität untersucht werden, so zum Beispiel das Abstandsgesetz, oder die Ablenkbartigkeit von Betastrahlen. Im theoretischen Teil werden Begriffe wie  $\alpha$ -  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlen, Zerfallsgesetz, Lebensdauer und Halbwertszeit eingeführt. Wichtigster und weitverbreitetster Detektor für Radioaktivität aller Art ist der Geigerzähler. Auch in diesem Versuch wird solch ein Zähler verwendet, und im experimentellen Abschnitt ist seine Funktionsweise erklärt.

## 1.1 Fragen zur Vorbereitung

- Was versteht man unter dem Begriff *Radioaktivität*? Erkläre in eigenen Worten.
- Es ergibt physikalisch keinen Sinn, von *radioaktiver Strahlung* zu sprechen, wenn  $\alpha$ -,  $\beta$ - oder  $\gamma$ -Strahlung gemeint ist. Richtig wäre hierfür der Begriff der *ionisierenden Strahlung*. Warum ist das so?
- Wie kann man die verschiedenen Arten von ionisierender Strahlung abschirmen?
- Wie funktioniert ein Geiger-Müller-Zählrohr?
- Was versteht man unter der *Aktivität* einer radioaktiven Quelle?
- Ist es im Wissen über das Phänomen der *Bremsstrahlung* sinnvoll eine  $\beta$ -Quelle wie  $^{137}\text{Cs}$  in einem Bleibehälter aufzubewahren?
- Welche wichtigen Regeln müssen aus Gründen des Strahlenschutzes beim Arbeiten mit radioaktiven Quellen zwingend beachtet werden?
- Was passiert erwartungsgemäß mit einem Elektronenstrahl im Magnetfeld? Wie lässt sich das erklären?

## 1.2 Theorie

### 1.2.1 Entdeckung der Radioaktivität

Im Jahre 1896 entdeckte H. Bequerel, dass Uranmineralien eine äusserst durchdringende Strahlung aussenden, welche eine photographische Platte noch durch ziemlich dicke Schichten hindurch schwärzt. Anschliessend gelang es 1898 dem Ehepaar Marie und Pierre Curie, aus einer sehr grossen Menge Uranerz (Joachimstaler Pechblende) ganz geringe Mengen zweier neuer Elemente, des *Radiums* und des *Poloniums*, abzutrennen, in welchen diese Wirkung auf das äusserste konzentriert war. Eine bewundernswerte Leistung! Denn in der Pechblende entfällt nur ein Radiumatom auf  $3 \cdot 10^6$  Uranatome. Heute kennt man mehr als 40 in der Natur vorkommende Atomarten, die diese Eigenschaft der *natürlichen Radioaktivität* besitzen. Die Untersuchung der Ablenkbartigkeit der von diesen Stoffen ausgehenden Strahlen im magnetischen Feld zeigt, dass sie von dreierlei Art sein können.

- **$\alpha$ -Strahlen** sind eine *Teilchenstrahlung* und bestehen aus sehr schnellen Heliumkernen  $^{4}_2\text{He}$ , tragen also zwei positive Elementarladungen. Ihre Masse beträgt  $6.643 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ . Ihre Geschwindigkeit liegt - je nach der Art des radioaktiven Nuklids - zwischen etwa 5 – 7.5% der Lichtgeschwindigkeit. Dem entspricht eine kinetische Energie von etwa 4.6 – 10.4 MeV. Die allmähliche Bildung von Helium aus einem  $\alpha$ -strahlenden Stoff kann spektroskopisch nachgewiesen werden, ebenso auch aus dem stets vorhandenen Heliumgehalt aller solche Stoffe enthaltenden Mineralien.
- **$\beta$ -Strahlen** sind ebenfalls eine *Teilchenstrahlung* und bestehen aus sehr schnellen Elektronen. Ihre Geschwindigkeiten streuen über einen Bereich von sehr kleinen Geschwindigkeiten bis zu mehr als 99% der Lichtgeschwindigkeit. Ihre kinetische Energie erreicht Werte bis zu 12 MeV.
- **$\gamma$ -Strahlen** sind eine sehr kurzwellige *elektromagnetische Wellenstrahlung* bzw. sehr energiereiche *Lichtquanten*. Die kleinste beobachtete Wellenlänge beträgt  $4.66 \cdot 10^{-13} \text{ m}$ . Dem

entspricht eine Energie  $h\nu = 2.66 \text{ MeV}$  ( $h$  ist die Planck'sche Konstante,  $\nu$  die Frequenz der Strahlung). Im Allgemeinen sind aber die Wellenlängen um einiges grösser und damit die Energien entsprechend kleiner.

### 1.2.2 Das Zerfallsgesetz

Ein radioaktiver Kern, der in der nächsten Sekunde zerfallen wird, unterscheidet sich in nichts von einem, der noch 10'000 Jahre leben wird. Allgemein kennt man kein Merkmal, das atomare Einzelakte wie zum Beispiel einen Kernzerfall vorauszusagen gestattet. Der radioaktive Zerfall ist also eine Kerneigenschaft, die ausschliesslich vom inneren Zustand des Kerns abhängig ist. Sehr exakt angebbar ist dagegen die *Wahrscheinlichkeit*, dass ein gegebener Kern in der nächsten Sekunde zerfällt. Sie ist zahlenmässig gleich der *Zerfallskonstante*  $\lambda$  und wird in einer grossen Anzahl von Kernen durch die tatsächlich beobachtete relative Häufigkeit der Zerfallsakte beliebig gut angenähert. Von  $N$  Kernen zerfallen im nächsten Zeitintervall  $dt$  im Mittel  $\lambda \cdot N \cdot dt$ :

$$dN = -\lambda N dt \quad (1.1)$$

woraus durch Integration das *Zerfallsgesetz* folgt:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.2)$$

Dabei ist  $N_0$  die Zahl der Atome zur Zeit  $t = 0$ ,  $N(t)$  die Zahl der zur Zeit  $t$  noch vorhandenen Atome. Nach Ablauf der Zeit  $\tau = 1/\lambda$  hat die Zahl der Atome auf den e-ten Teil abgenommen (siehe Abbildung 1.1);  $\tau$  ist ihre *mittlere Lebensdauer*. Die *Halbwertszeit*  $T_{1/2}$ , nach der die Zahl der anfangs vorhandenen Atome durch Zerfall auf die Hälfte abgenommen hat, ist gegeben durch:

$$N(T_{1/2}) = \frac{1}{2}N_0 = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \quad (1.3)$$

oder

$$\lambda T_{1/2} = \ln(2) = 0.693 \quad (1.4)$$

Die exponentielle Abhängigkeit der Radioaktivität von der Zeit ist so streng erfüllt, dass der radioaktive Zerfall zur Altersbestimmung von Mineralien und ähnlichem verwendet wird.

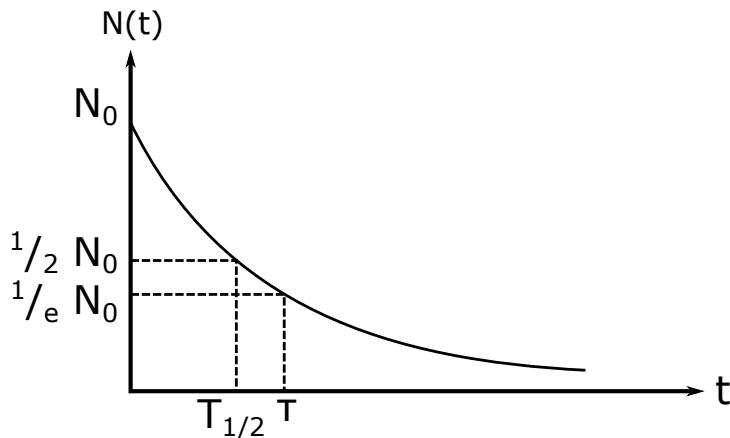


Abbildung 1.1: Halbwertszeit  $T_{1/2}$  und mittlere Lebensdauer  $\tau$ .

## 1.3 Experiment

### 1.3.1 Versuchszubehör

Komponente	Anzahl
Steuergerät für das Zählrohr	1
Zählrohr	1
Steckbrett	1
Cäsiumquelle	1
Magnet	2
$\beta$ -Abschirmung	1
Stange zum Montieren der Magnete	2
Steckhalterung für das Zählrohr	1
Steckhalterung für die Cäsiumquelle	1
Stoppuhr	1

### 1.3.2 Das Zählrohr (Geiger-Müller-Zähler)

Dieses genial einfache, heute auf der ganzen Welt verbreitete Gerät (H. Geiger, 1921) besteht meist aus einem Metallrohr von einigen *cm* Durchmesser, das mit Luft oder Argon (von einigen *mbar* bis zum Atmosphärendruck) und etwa 10 *mbar* Alkoholdampf gefüllt ist (siehe Abbildung 1.2). In der Achse ist ein möglichst dünner Wolfram- oder Stahldraht gespannt, der über einen hohen Widerstand  $R$  (mehr als  $1 \text{ M}\Omega$ ) zur Erde abgeleitet wird. Zwischen Rohrwand und Draht wird eine Hochspannung angelegt. Die Spannung reicht noch nicht zu einer andauernden selbstständigen Glimmentladung aus.

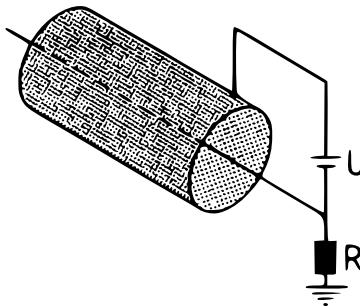


Abbildung 1.2: Geiger-Müller-Zähler.

Tritt aber ein ionisierendes Strahlteilchen (dies können  $\alpha$ -,  $\beta$ - oder  $\gamma$ -Strahlen sein) in das Rohrinnere, so leiten die von ihnen erzeugten Ionen einen Entladungsstoss ein, der wesentlich durch die Wirkung der Alkoholmoleküle schnell wieder erlischt. Nach jedem Entladungsstoss bleibt das Zählrohr gegen neu eintretende Strahlteilchen unempfindlich, bis die in der unmittelbaren Umgebung des Drahtes entstandenen positiven Ionen an die Kathode abgewandert sind. Erst nach Ablauf dieser Totzeit und anschliessender Erholungszeit, die sich zusammen etwa über einige  $10^{-4} \text{ s}$  erstrecken, ist es zum Nachweis eines folgenden Teilchens bereit. Die zum Draht und von dort zur Erde abfließenden negativen Ionen und Elektronen erzeugen am sehr grossen Widerstand  $R$  einen Spannungsabfall, der über einen elektronischen Verstärker ein Zählwerk betätigt. Ein solches Auslāse-Zählrohr spricht bereits auf ein einziges schnelles Elektron an; die Grösse des ausgelösten Impulses ist unabhängig von der Menge der Elektronen oder Ionen, die vom registrierten Elementarteilchen erzeugt werden. Beachte bei der Bedienung des Zählrohres unbedingt die folgenden Sicherheitshinweise:

- Empfindliches Glimmerfenster vor mechanischer Beschädigung, durch die das Zählrohr funktionsunfähig wird, schützen.
- Schutzkappe nur während der Messung abnehmen und danach wieder aufsetzen.
- Kappe vorsichtig abnehmen und aufsetzen; Kappe dabei nicht drehen.
- Glimmerfenster nicht berühren.
- Zählrohr nur mit aufgesetzter Schutzkappe aufbewahren.

### 1.3.3 Versuchsaufbau und Justage

Auf die graue Steckunterlage lassen sich Quelle, Zählrohr und die Magnete aufbauen (Abbildung 1.3). Die Quelle wird vom Assistierenden ausgegeben. **Berühre die Quelle nicht bei der Bohrung, da sich radioaktives Material ablösen könnte. Achte ebenso darauf, dass Du dich nicht im Strahlengang der Quelle befindest.**

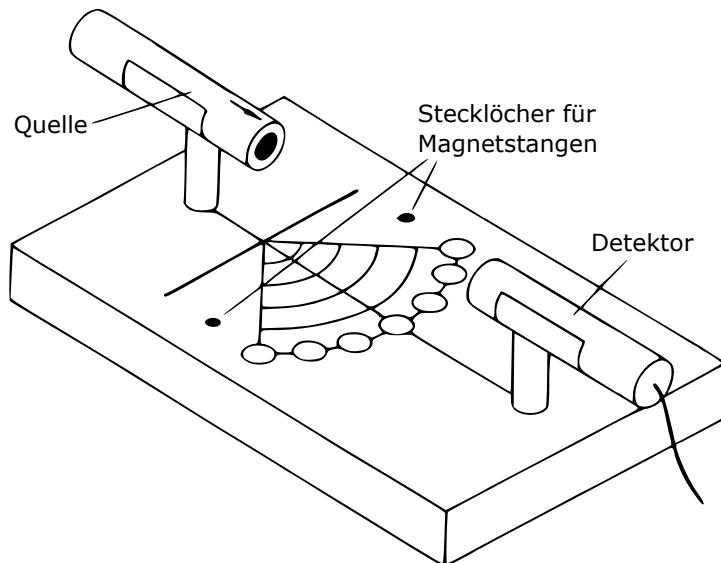


Abbildung 1.3: Versuchsaufbau.

- Schraube das Zählrohrkabel in die Anschlussbuchse an der Elektronik.
- Stelle den Wahlschalter unter der Anzeige auf die mittlere Position (Abbildung 1.4).
- Stoppe sowohl Anzeige wie Zähler.
- Stelle die Anzeige mit dem Taster rechts davon auf 0.
- Starte Anzeige und Zähler und starte auch die Stoppuhr.
- Willst Du ein Zwischenresultat nehmen, stoppe die Anzeige, lies ab und starte sie wieder. In der Zwischenzeit hat der Zähler weitergezählt und die Anzeige zeigt wieder den aktuellen Stand an.
- Mit dem Kippschalter oben rechts kannst Du den Lautsprecher betätigen.

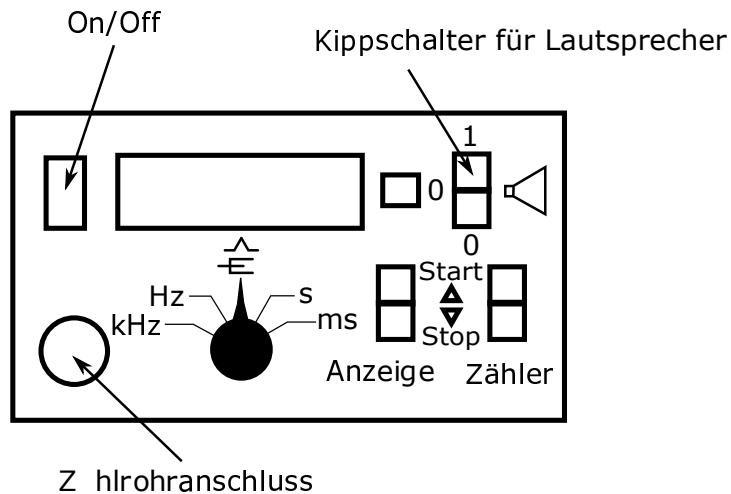


Abbildung 1.4: Auslese-Elektronik.

Für die Aufgabe 6 müssen die beiden Magnete zwischen Quelle und Zählrohr montiert werden. Stecke dazu die beiden Magnete in ihren Halterungen auf die beiden kleinen Stangen. Schiebe dabei die Magnete so auf die Stangen, dass sie einrasten. Sind die beiden Magnete eingerastet, dann haben sie den für das Experiment benötigten Abstand. Beachte auch, dass die Magnete einen roten Punkt aufweisen. Damit die Polung der beiden Magnete stimmt, müssen die Punkte entweder beide nach oben oder nach unten zeigen.

#### 1.3.4 Termschema und Reichweitendiagramm

Das Termschema (Abbildung 1.5) zeigt das Zerfallsschema von  $^{137}\text{Cs}$ . Ganz rechts sind die Energien der einzelnen Niveaus in MeV angegeben. Die blauen Pfeile symbolisieren  $\beta$ -Zerfälle und der rote Pfeil einen  $\gamma$ -Übergang. Unterhalb jedes Elementes ist seine Halbwertszeit angegeben.

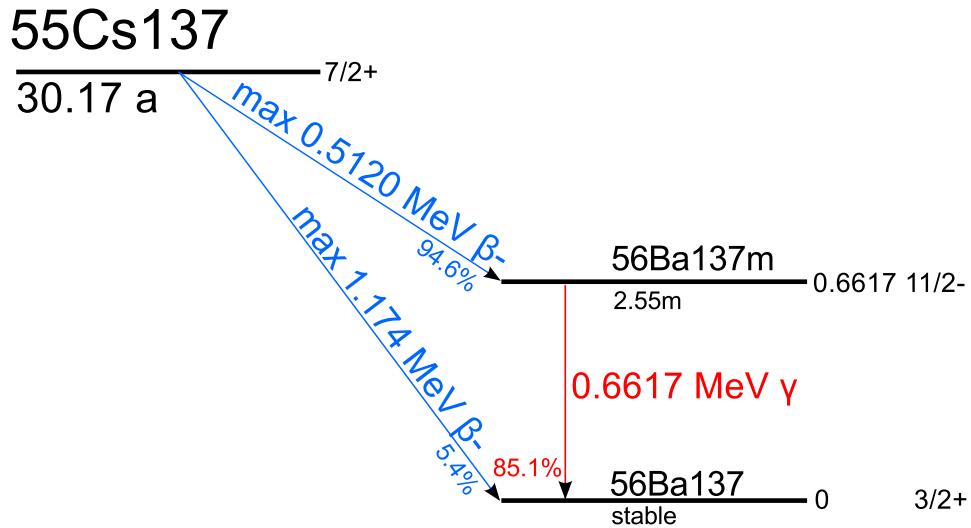


Abbildung 1.5: Termschema von  $^{137}\text{Cs}$ . Das Cäsium kann entweder direkt in den stabilen Grundzustand von  $^{137}\text{Ba}$  zerfallen, oder aber in einen angeregten Zustand von  $^{137}\text{Ba}$  der dann weiter durch eine  $\gamma$ -Emission in den Grundzustand übergeht.

Die Abhängigkeit der Reichweiten (Abbildung 1.6) verschiedener Teilchenarten von der Ener-

gie lassen sich nur angenähert allein durch die Massendichte ausdrücken; daher sind die Kurven für leichte und schwere Bremssubstanzen etwas verschieden. Zusammen mit der entsprechenden Dichte der Substanz, in der die Reichweite bestimmt werden soll, lässt sich aus dem Diagramm die Reichweite in  $cm$  problemlos angeben. Man bilde das Verhältnis zwischen Diagrammwert und entsprechender Dichte in  $g/cm^3$  und schon hat man die Reichweite in  $cm$ .

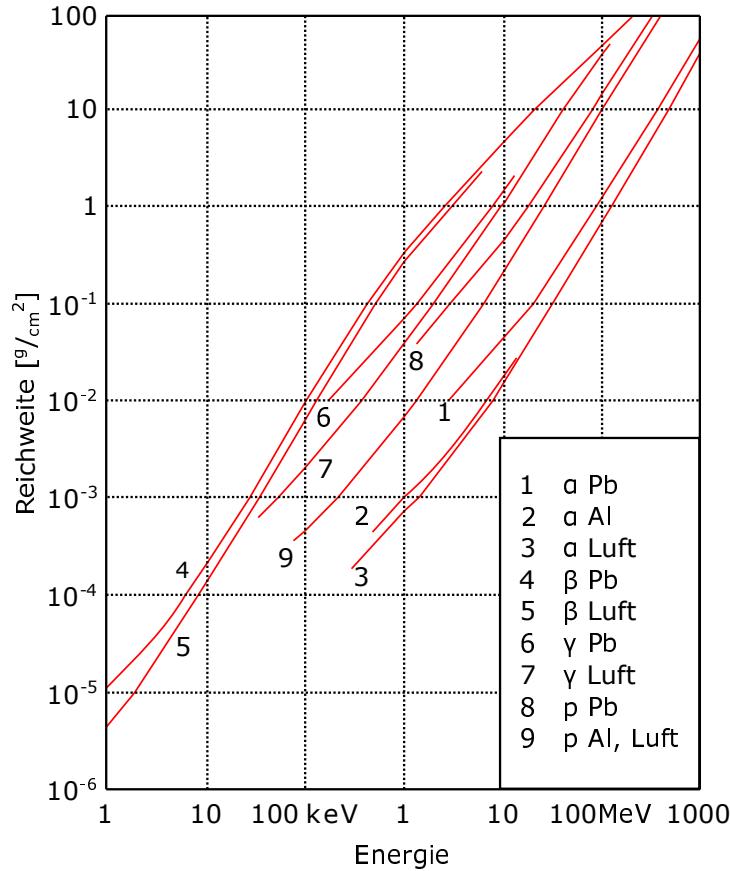


Abbildung 1.6: Reichweitendiagramm

### 1.3.5 Aufgaben zur Auswertung

- Der statistische Fehler einer Messung mit  $N$  Ereignissen ist gleich  $\Delta N = \sqrt{N}$ . Überlege Dir, wie gross die Anzahl  $N$  sein muss, damit eine Genauigkeit von  $\frac{\Delta N}{N} = 3\%$  erreicht wird. Wähle bei den folgenden Aufgaben die Messzeiten jeweils entsprechend.
- Das Zählrohr spricht auf alle drei Strahlungsarten ( $\alpha, \beta, \gamma$ ) an. Bestimme anhand des Termschemas (Abbildung 1.5) die Art der Strahlung, welche von der Cäsiumquelle ( $^{137}\text{Cs}$ ) emittiert wird.
- Miss die Zählrate in Funktion des Abstandes. Für diese Messung soll der Detektor in 5 verschiedenen Abständen (2, 4, 6, 8 und 10 cm) positioniert werden. Trage die Zählrate über  $1/r^2$  auf. Warum sollte man überhaupt ein  $1/r^2$ -Gesetz erhalten, bzw. warum nimmt die Zählrate so mit dem Abstand ab?
- Vermutlich wirst Du feststellen, dass die Zählrate mit zunehmender Entfernung kleiner wird als es aus einem reinen  $1/r^2$ -Gesetz folgen würde. Irgendwo geht irgend etwas

verloren. Was und wo? Überlege Dir, wie Deine Kurve aussehen würde wenn die Quelle sehr viel mehr Elektronen als Photonen emittieren würde. Was wäre dann mit dem  $1/r^2$ -Gesetz?

5. Was nützt die Abstandsvergrösserung im Zusammenhang mit dem Strahlenschutz?
6. Miss die Zählrate in Funktion des Winkels  $\theta$  mit und ohne montierten Magneten in einem Abstand von 5cm (damit die Magnete Platz haben) und trage die Ergebnisse auf. Was beobachtet man und warum?
7. Schätze mit Hilfe des Termschemas, aus der Du die Energie der Zerfallselektronen ablesen kannst, und dem Reichweitendiagramm (Abbildung 1.6) die Reichweite der von dieser Cäsiumquelle emittierten Elektronen in Luft ab. Um die Reichweite bestimmen zu können brauchst Du noch die Dichte der Luft, die Du in einer Tabelle nachschlagen kannst.
8. Am 26.04.1986 wurde bei der Reaktorkatastrophe in Tschernobyl auch Cäsium-137 freigesetzt. Aus dem Zerfallsschema (Abbildung 1.5) kannst Du die Halbwertszeit von  $^{137}\text{Cs}$  entnehmen. Berechne damit wie viel Prozent dieses Cäsiums bereits zerfallen ist.
9. Schätze die Quellstärke ab. Die Aktivität der Quelle ist die Summe aller Zerfälle die in beliebiger Richtung in den Raum emittiert werden. Mit dem Zählrohr zählt man nur einen Bruchteil dieser Zerfälle. Um nun die Aktivität der Quelle zu berechnen, musst Du Deine Zählrate, welche nur für die Detektorfläche  $a$  gilt, auf die ganze Kugeloberfläche  $A$  hochrechnen. Schätze dazu die Detektorfläche ab. Die Aktivität wird im SI-System in *Bequerel* ( $\text{Bq}$ ) gemessen. 1  $\text{Bq}$  entspricht einem Zerfall pro Sekunde. Ebenfalls noch gebräuchlich ist die Bezeichnung *Curie* ( $\text{Ci}$ ) und es gilt die Umrechnung  $1 \text{ Ci} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$ .
10. Schätze die reine  $\gamma$ -Aktivität der Quelle ab. Stelle dazu die  $\beta$ -Abschirmung vor die Quelle. Danach gehe wie in der letzten Aufgabe vor.

## 1.4 Literatur

- Povh, Rith, Scholz & Zetsche, *Teilchen und Kerne*, Springer
- Wolfgang Demtröder, *Experimentalphysik 3: Kern-, Teilchen- und Astrophysik*, Springer