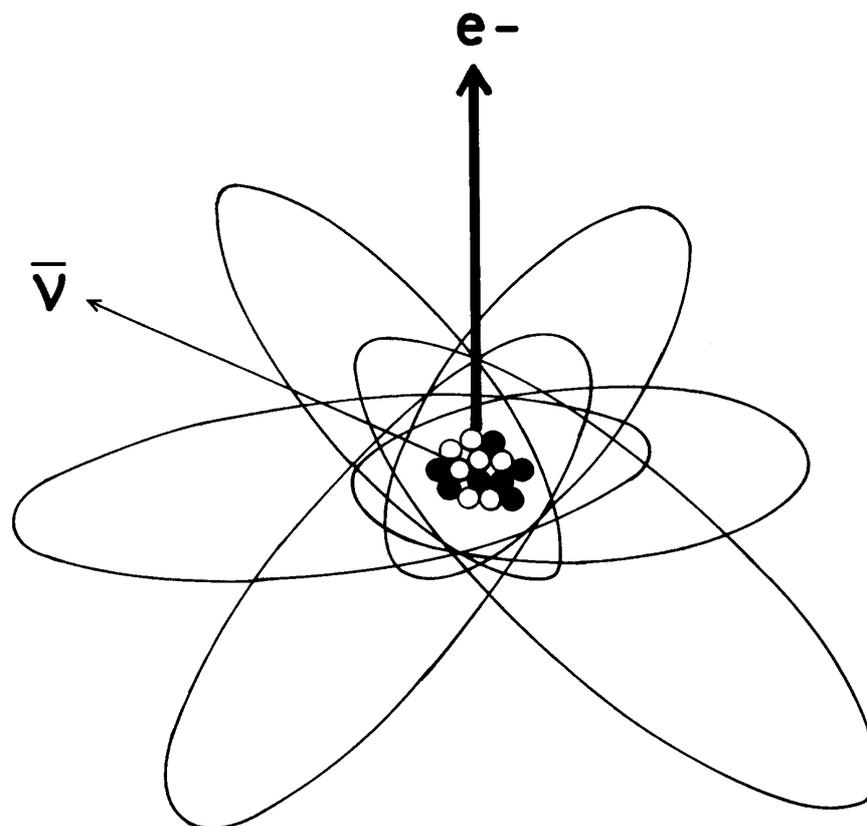


RADIOAKTIVITÄT



RADIOAKTIVITÄT

Radionuklide spielen in Diagnostik, Therapie und Forschung der Medizin eine wichtige Rolle. Man kann damit z.B. den Kreislauf, den Eisenstoffwechsel, die Ausscheidung von Stoffen aus der Niere untersuchen. Zur Bestrahlung bösartiger Geschwülste werden sog. Kobaltkanonen eingesetzt.

Sie werden in diesem Versuch einige physikalische Grundlagen zur Radioaktivität wie z.B. das quadratische Abstandsgesetz, Absorption von radioaktiven Strahlen, Definition von Maßeinheiten kennenlernen. Darüberhinaus werden die Grundlagen des Strahlenschutzes erläutert.

Enge Wechselbeziehungen bestehen dabei zur Thematik Röntgenstrahlen, dessen Grundlagen in einem Lehrbuch nachgelesen werden sollten.

Schließlich werden Sie einen Versuchsteil machen, Tumorlokalisierung genannt, bei dem eine punktförmige radioaktive Quelle mit einem Zählrohr geortet werden soll. Die Quelle ist nicht zugänglich in einem undurchsichtigen Würfel befestigt.

1 Grundlagen

1.1 Radioaktiver Zerfall

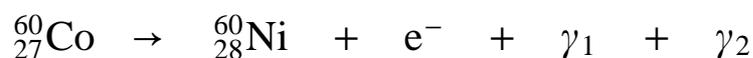
Ein Element bzw. Atom (z.B. Kohlenstoff; Symbol C) wird durch die Anzahl der Protonen (= Ordnungszahl = Kernladungszahl) im Kern charakterisiert (man schreibt diese Zahl links unten vor das Symbol, z.B. ${}_6\text{C}$ bedeutet, daß Kohlenstoff 6 Protonen im Kern hat). Die Massenzahl (= Summe der Protonen und Neutronen) des Atoms wird links oben vor das Symbol geschrieben (z.B. ${}^{12}\text{C}$ bedeutet, daß es sich um ein Kohlenstoffatom mit insgesamt 12 Nukleonen (Protonen, Neutronen) handelt).

Eine Art von Atomen, die hinsichtlich Ordnungszahl und Massenzahl identisch sind, wird durch das Wort Nuklid bezeichnet (nicht Isotop).

Unterschiedliche Nuklide mit gleicher Ordnungszahl werden als Isotope oder isotope Nuklide bezeichnet (z.B. gibt es beim Kohlenstoff die Isotope ${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{14}_6\text{C}$ und weitere). In einer Nuklidkarte, wie sie auch im Praktikum aushängt, sind die verschiedenen Isotope mit ihren Kenndaten verzeichnet.

Radioaktiv nennt man Nuklide, welche - unbeeinflußt von äußeren Einwirkungen - einen Heliumatomkern (α -Teilchen), ein Elektron (β^- -Strahlen) oder ein Positron (β^+ -Strahlen) ausstoßen. β^- und β^+ -Strahlen werden zusammen als β -Strahlen bezeichnet. Als weitere Folge können auch elektromagnetische Strahlen hoher Energie (γ -Strahlen) ausgesendet werden. Diese Prozesse spielen sich alle im Kern des Atoms ab.

In diesem Praktikumsversuch wird eine Kobalt-Quelle als radioaktives Präparat verwendet (auch Kobalt-60 genannt). Derartige Quellen spielen in der Medizin bei Bestrahlung bösartiger Geschwülste eine Rolle (Kobalt-Kanonen). Kobalt-60 sendet zunächst β^- -Strahlen aus und wandelt sich dabei in Nickel um. Sodann werden noch γ -Strahlen emittiert. Man schreibt das Zerfallschema so:



Man erkennt, daß die Ordnungszahl bei einem β -Zerfall dieser Art um eins erhöht (27→28) wird, die Massenzahl hingegen gleich bleibt. Man schreibt zwei γ -Strahlen in die Gleichung, weil zwei γ -Strahlen verschiedener Energie ($\gamma_1 = 1,17 \text{ MeV}$; $\gamma_2 = 1,33 \text{ MeV}$, beide etwa gleich stark) ausgesendet werden. Die γ -Strahlen haben eine definierte Energie; den β -Strahlen läßt sich aus hier nicht näher ausgeführten Gründen keine definierte Energie zuschreiben.

Der Mittelwert der Energie der emittierten Elektronen liegt hier bei $E_\beta = 0,095 \text{ MeV}$, der Maximalwert der Elektronen liegt bei $E_{\text{max}} = 0,31 \text{ MeV}$.

RAD

1.1.1 Das Zerfallsgesetz

Radioaktive Kerne zerfallen nach folgendem, exponentiellen Gesetz:

$$N(t) = N(0) \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

$N(0)$ ist die zur Zeit 0 (zu Beginn) vorhandene Anzahl radioaktiver Kerne; $N(t)$ ist die zur Zeit t vorhandene Anzahl radioaktiver Kerne. λ heißt Zerfallskonstante.

Die im Gesetz verwendete Zerfallskonstante λ ist kein unmittelbar anschaulicher Wert. Man benutzt stattdessen lieber die Halbwertszeit $T_{1/2}$. Das ist die Zeit, in der jeweils die Hälfte der ursprünglich vorhandenen radioaktiven Kerne zerfallen ist.

Setzt man diese Bedingung in die Zerfallsgleichung ein, so erhält man:

$$N(T_{1/2}) = \frac{N(0)}{2} = N(0) \cdot e^{-\lambda \cdot T_{1/2}}$$

daraus folgt

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$

Das in diesem Versuch verwendete Kobalt 60 hat eine Halbwertszeit von 5,27 Jahren. Die Halbwertszeiten verschiedener Radionuklide reichen von Bruchteilen von Sekunden bis zu vielen tausend Jahren. In der Medizin finden z.B. noch Verwendung: Jod-123 mit $T_{1/2} = 13,2$ Stunden und Radium-226 mit $T_{1/2} = 1620$ Jahren und weitere. In der Biologie wird die C-14 Methode zur Altersbestimmung von organischen Materialien benutzt.

Die Häufigkeit $dN(t)/dt$, mit der radioaktive Kerne zerfallen, bezeichnet man als Aktivität A . Dabei spielt die Art des Zerfalls keine Rolle (ob α -, β - oder γ -Strahlen), nur die Anzahl ist wichtig.

Aus obigen Gleichungen ergibt sich der Zusammenhang:

$$A(t) = \frac{dN(t)}{dt} = \lambda \cdot N(0) \cdot e^{-\lambda \cdot t} = \lambda \cdot N(t) = \frac{0,693}{T_{1/2}} \cdot N(t) = A(0) \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

Die Aktivität ist also bei gleicher Anzahl von Ausgangsatomen umso größer, je kurzlebiger das radioaktive Präparat ist. Die Aktivität charakterisiert die Stärke einer radioaktiven Quelle und ist ein, auch in der Strahlenschutzverordnung häufig gebrauchter Begriff.

Die Aktivität wird angegeben in Zerfällen pro Sekunde (Einheit 1 Becquerel = 1 s^{-1} ; Zeichen Bq). Bis zum 31.12.1985 war auch noch die Einheit Curie (Zeichen Ci; $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1} = 37 \text{ GBq} = 37 \text{ Gigabecquerel}$) zulässig. Die Größenordnung der Einheit Curie ist historisch dadurch zu erklären, daß 1 g Radium die Aktivität 1 Ci hat.

1.2 Wechselwirkung von ionisierenden Strahlen mit Materie

Beim Durchgang durch Materie treten die Strahlen in Wechselwirkung mit der Elektronenhülle des Atoms, die dabei angeregt oder ionisiert werden kann. Im Falle der Ionisation entstehen positiv geladene Teilchen (Ionen) und negativ geladene Teilchen (Elektronen). Die freigesetzten Elektronen besitzen oft genug Energie, um weitere Ionisationen zu bewirken.

Die Wechselwirkung geladener Teilchen (α - und β -Teilchen) mit Materie ist relativ stark. Daher ist ihre Reichweite bzw. Durchdringungsvermögen gering; sie werden relativ schnell absorbiert. α -Strahlen lassen sich schon von einem Blatt Papier abschirmen; gefährlich sind sie allerdings, wenn man sie in den Körper aufnimmt. Plutonium ist deswegen so "giftig", weil es inkorporiert krebserzeugend wirkt.

β -Strahlen haben ein größeres Durchdringungsvermögen als die α -Strahlen, sind jedoch durch wenige Millimeter Aluminium schon weitgehend abzuschirmen.

Bei der Wechselwirkung von γ -Strahlung mit der Materie treten verschiedene Prozesse auf, die alle zur Erzeugung von Elektronen führen:

Beim **Photoeffekt** wird die gesamte Energie des einfallenden γ -Quants vom Atom absorbiert und auf ein in der Hülle des Atoms gebundenes Elektron übertragen. Das Elektron wird dadurch aus der Bindung der Atomhülle gelöst; es entsteht ein freies Elektron und ein Ion.

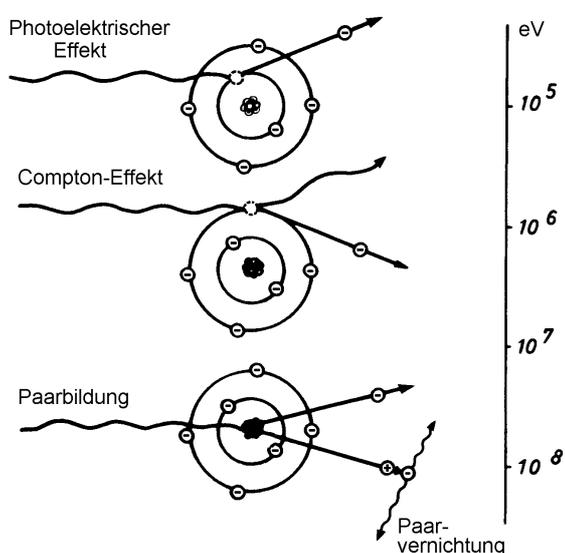
Beim **Comptoneffekt** wird, ähnlich wie beim Photoeffekt, ein Elektron aus der Atomhülle freigesetzt. Es wird hierbei jedoch nicht die gesamte Energie des einfallenden λ -Quants an das Elektron übertragen und somit absorbiert, sondern nur ein Teil davon. Der andere Teil verbleibt in einem energieärmeren gestreuten γ -Quant.

Die **Paarbildung** führt zur Erzeugung eines Elektron-Positron-Paares. Das einfallende γ -Quant wird im Feld des Atomkerns in Teilchen umgewandelt (gemäß der Einsteinschen Beziehung zwischen Energie und Masse). Das Positron wird in einer Paarvernichtung wieder in Strahlung verwandelt.

Bei allen beschriebenen Wechselwirkungen entstehen also sekundäre Elektronen. Diese Elektronen kann man nachweisen.

Die Abschirmung von γ -Strahlen ist im Vergleich zu α - und β -Strahlen verhältnismäßig schwierig. Häufig nimmt man Blei.

Abb.1: Schematische Darstellung der Strahlenwechselwirkungsprozesse. Die Energieskala am Rand deutet den Energiebereich an, in dem der jeweilige Prozeß am häufigsten stattfindet.



RAD

1.2.1 Schwächung von ionisierenden Strahlen in Materie

Die Schwächung von γ -Strahlen ist durch die beschriebenen Wechselwirkungsprozesse sowie durch klassische Streuung erklärbar und ist durch ein Exponentialgesetz sehr gut beschreibbar.

Die Schwächung von β -Strahlen ist nur *angenähert* durch ein Exponentialgesetz beschreibbar, da die Elektronen außer durch Streuung beim Durchgang durch Materie durch Ionisierung ständig Energie verlieren und deshalb eine endliche Reichweite haben.

Bedeutet $\dot{D}(x)$ die Dosisleistung nach Durchqueren einer Materieschicht der Dicke x , $\dot{D}(0)$ die entsprechende Dosisleistung vor dem Durchqueren, dann gilt:

$$\dot{D}(x) = \dot{D}(0) \cdot e^{-\mu \cdot x} \quad (\text{der Begriff Dosisleistung wird später erläutert})$$

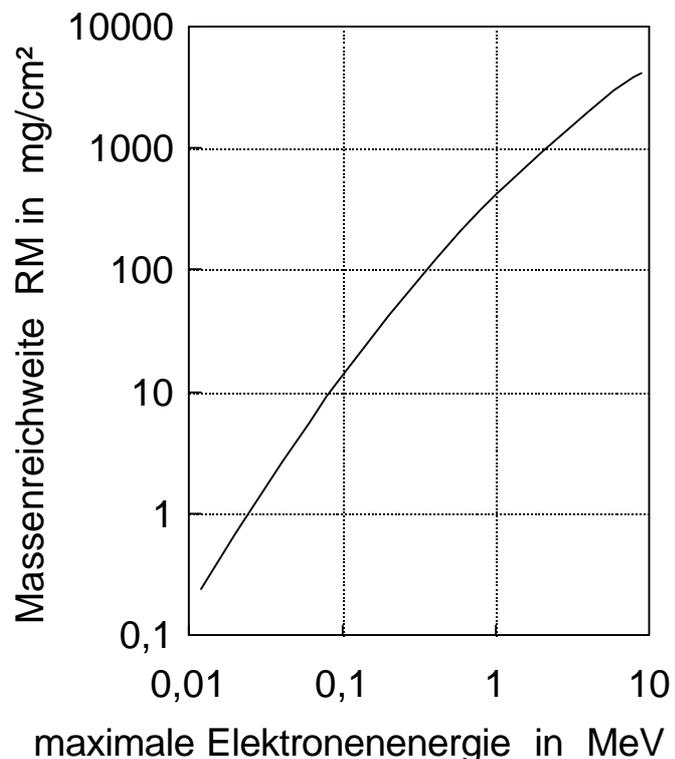
μ heißt Schwächungskoeffizient (bzw. auch totaler Absorptionskoeffizient); seine Dimension ist Länge⁻¹ (Einheit cm⁻¹ bzw. m⁻¹). Er ist abhängig vom Absorbermaterial und von der Energie der Strahlen.

Den Kehrwert des Schwächungskoeffizienten bezeichnet man bei β -Strahlen auch als Reichweite R . Multipliziert man die Dichte ρ eines Stoffes (angegeben in mg/cm³) mit der Reichweite R (in cm), erhält man eine Größe, die weitgehend unabhängig vom Absorbermaterial ist (aber noch abhängig von der Energie). In Abbildung 2 ist diese Größe, die sog. Massenreichweite R_M (in mg/cm² !) als Funktion der Energie wiedergegeben.

Aus dem angegebenen Wert für E_{\max} von Kobalt 60 kann man die Reichweite von Elektronen z.B. für Aluminium ($\rho_{\text{Alu}} = 2,7 \text{ g/cm}^3$) ermitteln. Beim Versuch werden Sie die Reichweite von Elektronen in Aluminium messen und dann die Werte vergleichen können.

Es gilt: $R_M = \rho \cdot R = \rho / \mu$

Abb. 2: Massenreichweite von Elektronen R_M als Funktion der maximalen Elektronenenergie



Ein immer wieder gebrauchter Begriff ist die sog. Halbwertsdicke bzw. Halbwertsschicht $x_{1/2}$. Analog zur Halbwertszeit versteht man darunter die Dicke einer absorbierenden Schicht, durch die die Strahlung auf die Hälfte vermindert wird. Es gilt:

$$\dot{D}(x_{1/2}) = \frac{\dot{D}(0)}{2} = \dot{D}(0) \cdot e^{-\mu \cdot x_{1/2}}$$

Daraus folgt:

$$x_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}$$

1.3 Nachweis von ionisierenden Strahlen

Unter Verwendung geeigneten Wandmaterials wird ein im allgemeinen mit Gasen gefülltes Meßvolumen hergestellt. Die einfallende Strahlung erzeugt in dem Meßvolumen durch Ionisation positive Ionen und negative Elektronen. Durch Einbau von Elektroden in das Volumen und Anlegen einer Absaugspannung können die erzeugten Ladungen zur Messung abgeleitet werden.

Werden nur die von der Strahlung direkt erzeugten Ladungen abgesaugt und gemessen, so arbeitet die Anordnung im Ionisationskammerbereich.

Bei Erhöhung der Spannung entstehen im Meßvolumen durch Zusammenstoß zwischen den zur positiven Elektrode eilenden Elektronen und neutralen Atomen weitere Ionen und Elektronen. Dieser Vorgang heißt Gasverstärkung. Zunächst ist die nach der Gasverstärkung erzeugte Ladungsmenge noch der primär durch Strahlung erzeugten Ladungsmenge proportional. Die Meßanordnung arbeitet im sog. Proportionalbereich.

Bei hinreichend hohen Spannungen (z.B. 600 V) wird durch jede primäre Ionisation eine kurzzeitige Entladung im Meßvolumen ausgelöst. Die Entladung bedeutet, daß mindestens ein ionisierendes Teilchen oder γ -Quant die Anordnung getroffen hat. Der Betrieb in diesem Bereich - dem Auslösebereich - ermöglicht es mittels einer Zählvorrichtung einzelne Teilchen bzw. γ -Quanten zu zählen. Für die Auswertung der Zählergebnisse müssen die Gesetze der Zählstatistik berücksichtigt werden.

Mißt man im Ionisationskammerbereich, so benutzt man oft flache Kammern mit einem Eintrittsfenster, sog. Ionisationskammern (siehe Lehrbuch).

Sollen Entladungen gezählt werden, so verwendet man meist eine rohrförmige Anordnung, in der die Elektroden konzentrische Zylinder bilden. Diese Anordnung erbringt eine besonders hohe Gasverstärkung, da das elektrische Feld stark zur Zylindermittte hin ansteigt. Wegen dieser Zylinderform werden solche Anordnungen auch Zählrohre genannt. Man spricht je nach Betriebsart von Proportional- und Auslösezählrohren. Letztere werden nach ihren Erfindern auch GEIGER-MÜLLER-Zählrohre genannt.

Die biologische Wirkung einer im lebenden Material absorbierten radioaktiven Strahlung ist von vielen Faktoren abhängig und keinesfalls mit der physikalischen Wirkung gleichzusetzen. Eine große Rolle spielt z.B. die Strahlenart. Für Strahlenschutz Zwecke hat man grob gültige Qualitätsfaktoren q ermittelt, die die biologische Wirkung verschiedener Strahlenarten bei der Bestrahlung des Menschen relativ zueinander kennzeichnen. Der Qualitätsfaktor der Röntgen- und γ -Strahlung wurde zu eins festgesetzt. Für andere Strahlen gilt (vergleiche auch Strahlenschutzverordnung):

Strahlenart	q
-----	-----
Röntgen, γ , β	1
Neutronen	10
α -Strahlung aus Radionukliden	20

Die Qualitätsfaktoren gehen in die sog. Äquivalentdosis ein, die ein Maß für die biologische Wirkung radioaktiver Strahlen darstellt:

$$\text{Äquivalentdosis} = \text{Energiedosis} \times \text{Qualitätsfaktor}$$

Gesetzliche Einheit ist das Sievert (Zeichen Sv; 1Sv=1J/kg).

Bis zum 31.12.85 war noch die Einheit Rem (Zeichen rem: 1 rem = 0,01 Sv) zulässig. Auch diese Einheit wird noch immer verwendet.

Die Äquivalentdosis hat formal die gleiche Grundeinheit J/kg wie die Energiedosis. Man darf sie jedoch nicht ohne weiteres als physikalische Energiedosis interpretieren.

Zur Bewertung der gesamten somatischen und genetischen Strahlenbelastung wird der Begriff **effektive Äquivalentdosis**, kurz effektive Dosis genannt, definiert. Die Äquivalentdosis in den einzelnen risikorelevanten Geweben und Organen wird dazu mit einem Strahlenrisiko-Wichtungsfaktor multipliziert und aufsummiert. Der Wichtungsfaktor ist jeweils der karzinogenen bzw. mutagenen Wirkung proportional. Die effektive Äquivalentdosis wird ebenfalls in Sievert angegeben.

Das Konzept der effektiven Äquivalentdosis erlaubt es, die Wirkung verschiedener Strahlenarten auf die einzelnen Teile des Körpers miteinander zu vergleichen.

Dem physikalischen Begriff Leistung folgend, versteht man unter Dosisleistung die Angabe einer Dosis pro Zeit, also z.B. R/h (Röntgen pro Stunde), rem/a (rem pro Jahr) Gy/s (Gray pro Sekunde). Bezeichnet man mit D die Dosis, so ist die Dosisleistung:

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt}$$

Der Punkt über dem D kennzeichnet die Ableitung einer Größe nach der Zeit.

RAD

1.5 Quadratisches Abnahmegesetz

Für die Dosisleistung \dot{D} einer punktförmigen, isotropen Strahlenquelle im leeren Raum (Vakuum) gilt, daß sie mit dem Quadrat der Entfernung R abnimmt:

$$\dot{D} = \frac{const}{R^2}$$

Isotrop bedeutet, daß die Quelle die Teilchen in alle Richtungen gleichmäßig ausstrahlt.

Bei nicht punktförmigen Quellen (z.B. flächenförmig) gelten komplizierte Zusammenhänge. Befindet man sich jedoch weit genug weg von der Quelle, d.h. ca. zehnmal weiter weg als der Durchmesser der Quelle, so läßt sich das quadratische Abnahmegesetz wieder näherungsweise anwenden.

Befindet sich die Quelle nicht im leeren Raum, sondern z.B. in Luft oder in sonstiger Materie, muß man die durch die Materie bewirkte Absorption berücksichtigen. In Luft als häufigster Umgebung wirkt sich das in einer kleinen Erhöhung des quadratischen Exponenten von R aus.

Das quadratische Abnahmegesetz ist die Grundlage für die wichtigste Regel des Strahlenschutzes: Sich so weit weg wie möglich von einer Strahlenquelle aufhalten. Für punktförmige γ -Strahler formuliert man das quadratische Abstandsgesetz auch so:

$$\dot{D} = \frac{\Gamma \cdot A}{R^2}$$

Γ heißt Dosisleistungskonstante; für Co-60 beträgt $\Gamma = 3,36 \cdot 10^{-13} \text{ Gy} \cdot \text{m}^2/\text{h} \cdot \text{Bq}$. Dosisleistungskonstanten liegen tabelliert vor. A bezeichnet die Aktivität der Quelle in Bq.

1.6 Strahlenschutz

Folgende drei Grundregeln des Strahlenschutzes sollen die Strahlenbelastung so gering wie möglich halten:

- 1) **Abstand halten!** Gemäß dem quadratischen Abstandsgesetz nimmt die Strahlung mit dem Quadrat des Abstandes ab
- 2) **Möglichst schnell arbeiten:** sich so kurz wie möglich der Strahlung aussetzen.
- 3) **Strahlung abschirmen:** Je dicker und dichter die Abschirmung desto geringer die Belastung.

Neben diesen Grundregeln, die sich aus physikalischen Gesetzen oder selbstverständlichen Überlegungen ergeben, existiert eine Strahlenschutzverordnung (StrlSchV vom 30.6.1989), die die gesetzlichen Grundlagen für den Umgang mit radioaktiven Stoffen regelt. Sie gilt für den Umgang mit offenen und umschlossenen radioaktiven Stoffen insbesondere auch für diagnostische und therapeutische Verwendung radioaktiver Stoffe im medizinisch-biologischen Bereich. Sie gilt auch für den Betrieb von Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlen mit einer Teilchenenergie von mindestens 5 Kiloelektronenvolt einschließlich des Betriebs von Röntgeneinrichtungen im Zusammenhang mit dem Unterricht in Schulen. Sie gilt aber nicht für die Einrichtung und den Betrieb von Röntgenanlagen, die der Röntgenverordnung (RöV vom 1.5.1990) unterliegen. Sowohl Strahlenschutzverordnung als auch Röntgenverordnung werden immer wieder ergänzt, um neueren Erkenntnissen gerecht zu werden.

Da es unmöglich ist, die umfangreiche Strahlenschutzverordnung auch nur annäherungsweise hier wiederzugeben (die Verordnung liegt vollständig am Versuch aus) werden im folgenden einige Auszüge dargestellt (die vollständige Verordnung ist im Internet unter <http://www.bfs.de/recht/index.htm> einsehbar):

Für nicht beruflich strahlenexponierte Personen (z.B. auch Studenten in ihrem Studium) läßt sich aus §44 der Verordnung entnehmen, daß die Strahlenexposition den - effektiven - Dosisgrenzwert von 1,5 mSv/Jahr nicht überschreiten darf (Ganzkörperdosis). Dieser Wert ist vergleichbar mit der natürlichen Strahlenbelastung, die in Deutschland ca. 2,4 mSv/Jahr beträgt, wobei allerdings erhebliche Schwankungen möglich sind (je nach Wohnort).

Werden nur Teile eines Körpers einer Strahlenexposition ausgesetzt, kann man aus §45 entnehmen, daß folgende Grenzwerte im Kalenderjahr nicht überschritten werden dürfen:

- | | |
|---|-------------------------|
| 1. Effektive Dosis, Teilkörperdosis für Keimdrüsen,
Gebärmutter, rotes Knochenmark | 0,3 Millisievert |
| 2. Teilkörperdosis für alle Organe und Gewebe, soweit
nicht unter 1. oder 3. genannt | 0,9 Millisievert |
| 3. Teilkörperdosis für Knochenoberfläche, Haut | 1,8 Millisievert |
- Anlage X Tabelle X 1 Fußnote 1 und Anlage X Tabelle X 2 sind anzuwenden**

Die zitierte Anlage X Tabelle X 1 Fußnote 1 und Anlage X Tabelle X 2 sehen so aus (Auszüge):

Fußnote 1) Zur Berechnung der effektiven Dosis bei einer Ganz- oder Teilkörperexposition werden die Äquivalentdosen der in Tabelle 2 genannten Organe und Gewebe mit den Wichtungsfaktoren der Tabelle 2 multipliziert und die so erhaltenen Produkte addiert.

RAD

Tabelle X 2

Organe und Gewebe	Wichtungsfaktoren
1. Keimdrüsen	0,25
2. Brust	0,15
3. rotes Knochenmark	0,12
4. Lunge	0,12
5. Schilddrüse	0,03
6. Knochenoberfläche	0,03
7. andere Organe und Gewebe: ¹⁾	je 0,06
Blase, oberer Dickdarm, unterer Dickdarm, Dünndarm, Gehirn, Leber, Magen, Milz, Nebenniere, Niere, Bauchspeicheldrüse, Thymus. Gebärmutter	

¹⁾ Zur Bestimmung des Beitrages der anderen Organe und Gewebe bei der Berechnung der effektiven Dosis ist die Teilkörperdosis für jedes der 5 am stärksten strahlenexponierten anderen Organe oder Gewebe zu ermitteln. Die Strahlenexposition der übrigen Organe und Gewebe bleibt bei der Berechnung der effektiven Dosis unberücksichtigt.

Addiert man die Wichtungsfaktoren unter Beachtung der Fußnote, erhält man 1. Das bedeutet gerade, daß 100% des Körpers erfaßt sind.

Beispiele:

1) Eine Lungendosis von 10mSv entspricht einer effektiven Äquivalentdosis von $0,12 \cdot 10\text{mSv} = 1,2\text{mSv}$ (wenn keine weiteren Organe einer Strahlung ausgesetzt waren).

Wird man z.B. an der Lunge geröntgt, läßt es sich nicht vermeiden, daß weitere Teile des Körpers (Brust, Skelett, Haut) von ionisierenden Strahlen betroffen werden. Die effektive Dosis erhöht sich dadurch. Die Berechnung der Gesamtdosis ist dann schon schon aufwendiger.

2) Befindet sich eine Co-60 Quelle mit einer Aktivität von 1 MBq nicht abgeschirmt in einem Abstand von einem Meter von einem Körper, ergibt sich gemäß dem quadratischen Abstandsgesetz eine Strahlenexposition von

$$\dot{D} = \frac{\Gamma \cdot A}{R^2} = \frac{3,36 \cdot 10^{-13} \text{ Gy} \cdot \text{m}^2 / \text{h} \cdot \text{Bq} \cdot 10^6 \text{ Bq}}{1 \text{ m}^2} = 3,36 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mGy}}{\text{h}}$$

Da hier γ -Strahlung vorliegt (Qualitätsfaktor 1) beträgt die Exposition $3,36 \cdot 10^{-4}$ mSv/h. Würde man sich ein Jahr lang (8760h) neben dieser Quelle aufhalten, erhielte man eine Ganzkörperdosis von etwa 3mSv. Das wäre gemäß §44 nicht zugelassen. Allerdings ist die Annahme auch etwas unreal, daß man sich ein Jahr lang neben der Quelle aufhält.

3) Befindet sich eine Co-60 Quelle mit einer Aktivität von 1 MBq nicht abgeschirmt in einem Abstand von 10cm von den Händen, ergibt sich gemäß dem quadratischen Abstandsgesetz eine Strahlenexposition von

$$\dot{D} = \frac{\Gamma \cdot A}{R^2} = \frac{3,36 \cdot 10^{-13} \text{ Gy} \cdot \text{m}^2 / \text{h} \cdot \text{Bq} \cdot 10^6 \text{ Bq}}{(0,1 \text{ m})^2} = 3,36 \cdot 10^{-2} \frac{\text{mGy}}{\text{h}}$$

In der Tabelle X 2 ist für die Hände (erstaunlicherweise!) kein expliziter Wichtungsfaktor enthalten. Rechnet man in Anlehnung an Punkt 7 mit einem Faktor von 0,06, ergibt sich eine Exposition von 0,002mSv/h. Würde sich die Quelle 4 Stunden in diesem Abstand von den Händen befinden, erhielte man eine Dosis von 0,008mSv. Die maximale Teilkörperdosis für Hände beträgt laut §45, Absatz 2 0,9 Millisievert pro Jahr, d.h. der Grenzwert wird bei weitem nicht erreicht.

Zur Abschätzung der Strahlenbelastung und möglicher Risiken seien einige Zahlenwerte angeführt:

Mittlere effektive Dosis der Bevölkerung in der BRD im Jahr 1991

(aus einem Bericht des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS); siehe auch im Internet:

<http://www.bfs.de>)

Ingestion natürlicher radioaktiver Stoffe	0,25mSv
terrestrische Strahlung von außen	0,42mSv
kosmische Strahlung (in Meereshöhe)	0,35mSv
Inhalation von Radon-Folgeprodukten	1,35mSv
Summe natürliche Strahlenexposition	ca. 2,4mSv
Forschung und Technik	< 0,01mSv
berufliche Strahlenexposition	< 0,01mSv
Fall-Out von Kernwaffenversuchen	< 0,01mSv
kerntechnische Anlagen	< 0,01mSv
Medizin (Röntgen, Nuklearmedizin)	1,50mSv
Summe zivilisatorische Strahlenexposition	ca. 1,6mSv

Gesamtsumme natürliche und zivilisatorische Strahlenexposition ca. 4,0mSv

Es ist wichtig zu beachten, daß die in solchen Tabellen angegebenen Werte seit etwa 1990 wegen der Einführung der effektiven Dosis erheblichen Veränderungen unterworfen wurden. Früher bezog man die Werte auf die genetisch signifikante Dosis, heute bezieht man mit dem Konzept der effektiven Dosis den ganzen Körper ein. Außerdem hat sich die Bewertung der Radon-Exposition deutlich erhöht. Dadurch ist heute die natürliche Strahlenexposition größer als die künstliche Strahlenexposition. Bei der künstlichen Strahlenexposition dominieren außerdem die medizinischen Anwendungen. Und da wird im Durchschnitt so gerechnet, daß wenn von zwei Personen eine strahlenexponiert wird und die andere nicht, im Mittel beide die halbe Dosis zugerechnet bekommen! Die Strahlenbelastung durch medizinische Anwendungen geht außerdem in letzter Zeit zurück. Neue Röntgengeräte und neue Filme bzw. Auswertemethoden kommen mit geringeren Dosen aus. Es wird allgemein weniger geröntgt, u.a. weil auch neuartige bzw. verbesserte diagnostische Hilfsmittel (Kernspintomograph, Ultraschall) zur Verfügung stehen.

1.7 Statistik radioaktiver Messungen

Beim radioaktiven Zerfall kann man nicht sagen, welches Atom wann zerfallen wird. Es handelt sich um einen statistischen Prozeß, der der sog. **Poissonverteilung** folgt, d.h. nicht der Normalverteilung nach Gauß. Dieser Unterschied ist aber bei einer Anzahl von Ereignissen größer als 50 praktisch nicht mehr relevant. Die Verteilung der Durchmesser von roten Blutkörperchen folgt streng genommen auch der Poissonverteilung. Da man aber meist mehr als 10 Ery's misst, kann man mit der Gauß-Verteilung rechnen.

Hat man viele Messungen für ein vorgegebenes Zeitintervall gemacht, wobei sich im Mittel N Ereignisse (Impulse) ergeben haben, so ist die Standardabweichung (mittlere Fehler) der Einzelmessungen $\Delta N = \pm \sqrt{N}$. Hat man beispielweise 100 Impulse gezählt, ergibt sich der mittlere Fehler zu 10 Impulsen; der relative Fehler beträgt in diesem Fall

$$\Delta N/N = \sqrt{N}/N = 1/\sqrt{N} = 1/10 = 0,1 = 10\%$$

Man kann es auch so ausdrücken, daß mit einer Wahrscheinlichkeit von 68% der wahre Wert im Intervall $N \pm \sqrt{N}$ liegt, d.h. konkret zwischen 90 und 110 Impulsen.

Je größer die Anzahl der Ereignisse bei radioaktiven Messungen, um so kleiner wird der relative Fehler. Bei 10000 Impulsen beträgt er beispielsweise nur noch 1%.

Zu beachten ist der Unterschied zur Ermittlung des zufälligen Fehlers nach Gauß. Bei Ereignissen nach der Poisson-Statistik genügt eine Messung (möglichst mit mehr als 50 Ereignissen), um den zufälligen Fehler berechnen zu können. Nach Gauß muß man mehrere Meßwerte haben, aus denen sich der Mittelwert und der zufällige Fehler berechnet. Es ist deswegen auch nicht richtig und nicht sinnvoll, bei einer Versuchsanordnung mit radioaktiven Zerfallsereignissen fünf Mal hintereinander die gleiche Zeit zu messen und dann einen Mittelwert mit Fehler aus den fünf Messungen zu bilden. Man kann gleich fünf Mal so lange messen oder - falls man doch fünf Mal hintereinander gemessen hat - die Anzahl der Impulse aller fünf Messungen addieren, um daraus den Fehler zu berechnen.

Um die Schwankungsbreite bei Messungen dieser Art anschaulich kennenzulernen, kann es es dennoch sinnvoll sein, bei einer bestimmten Versuchsanordnung die gleiche Messung mehrere Male hintereinander durchzuführen.

Bei radioaktiven Messungen tritt immer ein sogenannter Nulleffekt auf. Als **Nulleffekt** (bezogen auf die Zeiteinheit heißt das dann **Nullrate**) wird diejenige Anzahl von Impulsen bezeichnet, die von einer Meßapparatur auch ohne Vorhandensein eines radioaktiven Präparats registriert wird. Sie rührt von den natürlichen und künstlichen radioaktiven Nukliden in unserer Umwelt einschließlich unseres eigenen Körpers her. Der Nulleffekt ist im Zeitablauf zufälligen Schwankungen unterworfen und hängt u.a. vom Ort (insbesondere von der Meereshöhe) und dem Gebäude (Baustoffe, Abschirmung, Lüftung) ab. Er sollte vor Beginn jeder Meßreihe erfaßt werden.

Im folgenden werden Zählergebnisse (Anzahl der Impulse) mit N (Nulleffekt N_0) und Zählraten mit Z (Nullrate Z_0) bezeichnet. Zählraten werden gemäß $Z = N/T$ (mit T als Zähldauer) bestimmt.

Zur Vermeidung von Verfälschungen durch den Nulleffekt ist eine Korrektur der gemessenen Zählergebnisse N bzw. der Zählraten Z um den Nulleffekt N_0 bzw. die Nullrate Z_0 nötig.

Die **Nutzrate R** ergibt sich aus der tatsächlich gemessenen Zählrate zu $R = Z - Z_0$.

Die Standardabweichung der Nutzrate s_R unterscheidet sich aber von den Standardabweichungen $s_z = \sqrt{N}/T$ der Zählrate Z und $s_o = \sqrt{N_0}/T_0$ der Nullrate Z_0 . Es gilt für die Standardabweichung (mittlerer Fehler) der Nutzrate $R = Z - Z_0$:

$$s_R = \sqrt{s_z^2 + s_o^2} = \sqrt{N/T^2 + N_0/T_0^2} \quad \text{bzw.} \quad s_R = \sqrt{N + N_0}/T \quad \text{falls} \quad T = T_0$$

Als Faustregel kann man formulieren:

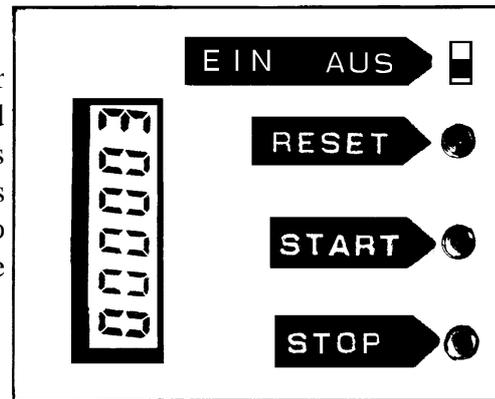
Der Einfluß der Nullrate auf den mittleren Fehler s_R der Nutzrate kann vernachlässigt werden, wenn ihre Standardabweichung s_o weniger als ein Drittel der Standardabweichung s_z der Zählrate beträgt. Es gilt dann:

$$s_R \approx s_z = \sqrt{N}/T$$

RAD

2 Versuchszubehör

Vorhanden ist ein einfacher, selbstgebauter Geiger-Müller-Zähler, der eine Stop-, Start- und Resettaste besitzt (Reset heißt die Anzeige des Zählers auf Null setzen). An der Seite ist das Gerät mit einem Plexiglasfenster versehen, so daß man ins Innere blicken kann und auch die Lage des Zählrohres selbst ermitteln kann.



Das Zählrohr hat zur Abschirmung einen beweglichen Schieber aus Plexiglas; mit vorgezogenem Schieber ist das Zählrohr praktisch nur für γ -Strahlung empfindlich. Ohne Plexiglasschutz kann man auch β -Strahlen registrieren.

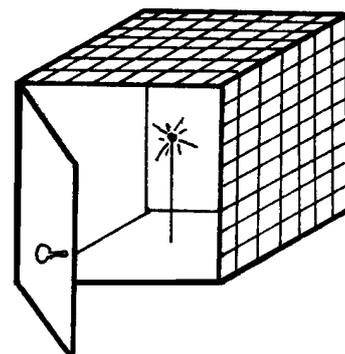
Zählrohre sind erschütterungsempfindlich, deshalb bitte ruckhafte Bewegungen vermeiden.

Der Zähler ist auf einer Schiene gehalten bzw. ansetzbar. Auf der Schiene lassen sich Reiter verschieben und befestigen.

Als radioaktive Quelle ist eine Kobalt-60-Perle vorhanden, deren Aktivität zu einem definierten Zeitpunkt aus der Beschriftung der Quelle ersichtlich ist. Die Halbwertszeit von Co-60 beträgt 5,27 Jahre.

Ein Dosimeter (Bereich 0-2 mSv) gestattet, die Dosis direkt zu messen.

Ein großer Plastikwürfel (Kantenlänge 30 cm) enthält im Inneren an variierbarer Stelle die gleiche punktförmige Co-60 Perle, wie oben beschrieben. Auf drei Würfelflächen ist ein Meßgitter aufgezeichnet. Der Würfel ist verschließbar (Schlüssel beim Betreuer)



Ferner vorhanden: Stoppuhr, Meterstab, Absorptionsmaterial verschiedener Dicke.

3 Versuchsdurchführung

3.1 Ermittlung der eigenen Körperdosis

Falls das Dosimeter entladen ist, Betreuer benachrichtigen. Plastikkappe des Dosimeters **nicht** abschrauben.

Lesen Sie die Taschendosimeter zu Beginn des Versuchs ab (wie groß ist die Ablesegenauigkeit z.B. auch bei verschiedenen Positionen des Dosimeters?) und stecken Sie das Dosimeter irgendwo ans Hemd an. Normalerweise wird es in die Brusttasche des Kittels gesteckt.

Sie können das Dosimeter auch möglichst nah von der Kobalt-60 Quelle anordnen. Wichtig ist, im Protokoll zu vermerken, wo es wirklich war.

Dann bestimmen Sie möglichst genau (d.h. lange Meßzeit während Sie Punkt 3.2 berechnen) den Nulleffekt. Hierzu alle radioaktiven Quellen möglichst weit entfernen.

3.2 Aktivität und Dosisleistung der Co-60-Perle

(Auswertung sofort im Praktikum!; ohne die Berechnungen dieses Versuchsteils darf der Versuch aus Sicherheitsgründen nicht weitergeführt werden)

Notieren Sie die Nummer und Aktivität der Quelle mit den angegebenen Daten.

Berechnen Sie die Aktivität der Co-60-Quelle am Praktikumstag.

Berechnen Sie die Dosisleistung (in mGy/h und mrad/h) der im Versuch verwendeten Co-60-Quelle für 1 mm, 1 cm und 1 m Abstand von der Quelle.

Wie wird sich die bei dieser Rechnung nicht berücksichtigte β -Strahlung der Co-60-Quelle auf die Dosisleistung auswirken?

Welche Dosisleistung erhält demnach die Haut Ihrer Fingerkuppen, wenn Sie die Quelle so eng wie möglich mit den Fingern umfassen (Abstand ermitteln)?

Wie lange pro Jahr dürften Sie die Quelle gemäß Strahlenschutzverordnung höchstens so anfassen?

3.3 Quadratisches Abstandsgesetz

Befestigen Sie die radioaktive Co-60-Quelle auf dem besonders gekennzeichneten Reiter auf der Schiene. Dabei soll sich die Quelle selbst auf der Höhe des Zählrohres befinden. Schieber beim Zählrohr geschlossen!

Messen Sie die Zahl der Impulse in Abhängigkeit vom Abstand der Quelle vom Zählrohrmittelpunkt; Meßzeit ca. 30 s bis 1 min; mindestens 10 verschiedene, *geeignet* (d.h. dem quadratischen Abstandsgesetz entsprechend sinnvoll) gewählte Abstände; bei einigen Abständen Mehrfachmessungen.

RAD

3.4 Schwächung von β - und γ -Strahlen

Berechnen Sie aus der Grafik in Abb.2 die Reichweite von Elektronen mit einer Energie $E = 0,3 \text{ MeV}$ in Aluminium ($\rho_{\text{Alu}} = 2,7 \text{ g/cm}^3$).

Öffnen Sie den Schieber. Das Zählrohr ist jetzt auch für β -Strahlen empfindlich.

Schieben Sie die Co-60-Quelle in einen Abstand von ca. 5 cm zur Frontfläche des Zählrohrs; der Halter für die Aluminiumproben kommt zwischen Quelle und Zählrohr (etwa in die Mitte).

Messen Sie die Zahl der Impulse (Meßzeit länger als 2 min) in Abhängigkeit von der Dicke des durchstrahlten Aluminiums. Die Dicke der gesamten Probe variieren Sie durch Kombination der vorhandenen, verschieden starken Alu-Plättchen.

Messen Sie mindestens 10 verschiedene Dicken (auch die Dicke 0 mm) und bei einigen Proben mehrfach (zur Anschaulichmachung der Meßunsicherheit).

Messen Sie für mehr als fünf verschiedene Bleidicken ebenfalls die Schwächung. Auch hier die Dicke 0 mm nicht vergessen.

3.5 Strahlung von anderen Objekten (freiwillig)

Entfernen Sie alle radioaktiven Quellen möglichst weit weg vom Zählrohr.

Messen Sie (bei geöffnetem Schieber) die durch einen Fernsehapparat, einen Ziegelstein, eine Probe Kochsalz (mit K-40), die Leuchtziffern einer Uhr o.ä. verursachte Zahl der Impuls.

3.6 Tumorlokalisation

Der Betreuer befestigt im Würfel an einer für Sie nicht bekannten Stelle die Co-60-Quelle und verschließt den Würfel.

Durch Messung mit dem Zählrohr soll der Ort der Quelle im Inneren des Würfels mit der Genauigkeit des aufgezeichneten Quadratrasters ermittelt werden. Versuchen Sie mit so wenig Messungen wie möglich in geringstmöglicher Zeit auszukommen.

Das Kippen des Würfels muß relativ vorsichtig geschehen, damit die Quelle im Inneren sich nicht verschiebt. Sie können dann auf jeder Würfel­fläche messen.

In diesem Versuch kann man sich viel Zeit durch vorhergehende Überlegungen sparen. Beschreiben Sie in der Ausarbeitung Ihre Überlegungen, Ihre Vorgehensweise und Ergebnisse so, daß Ihr Betreuer sie in eindeutiger Weise verstehen kann.

Ihr Betreuer soll am Ende dieses Versuchsteils im Praktikumsheft den wahren Ort der Quelle und die Übereinstimmung mit Ihrer Messung vermerken.

3.7 Ermittlung der eigenen Körperdosis

Lesen Sie das Taschendosimeter ab und stellen Sie sofort fest, wie groß die während des Versuchs empfangene Dosis war.

Dosimeter bitte im Praktikum lassen!!

3.8 Sorgfaltspflicht

Bitte Quelle unbedingt in den Aufbewahrungsbehälter zurücklegen!

4 Versuchsauswertung

4.3 Quadratisches Abnahmegesetz

Berücksichtigen Sie den Nulleffekt bei Ihren Messungen, d.h. von jedem Meßwert müssen Sie den Nulleffekt abziehen (bezogen auf die gleiche Zeit wie die Meßzeit).

Tragen Sie in doppelt-logarithmisches Papier die Nutzrate, d.h. die um die Nullrate korrigierte Zählrate als Funktion des Abstandes Quelle - Mittelpunkt Zählrohr inklusive Fehlerbalken ein. Läßt sich eine Gerade durch die Meßpunkte legen?

Bestimmen Sie die Steigung der **Geraden(!)** inklusive eines Fehlers (Fehlergeraden einzeichnen) und vergleichen Sie sie mit dem theoretischen Wert.

(freiwillig): Zeichnen Sie in doppelt-logarithmisches Papier mit Hilfe der Dosisleistungskonstanten von Co-60 die Dosisleistung (in mGy/h) in Abhängigkeit von der Impulsrate (Impulse/min) für das verwendete Zählrohr ein.

4.4.1 Schwächung von β -Strahlen

Berechnen Sie die Zählraten und subtrahieren Sie von allen so berechneten Werten diejenige Zählrate, die Sie bei der dicksten Aluminiumprobe ermittelt haben; Sie eliminieren damit die γ -Strahlung (warum?).

Tragen Sie die so ermittelte Zählrate inklusive Fehlerbalken als Funktion der durchstrahlten Aluminiumdicke inklusive Fehler in einfach-logarithmisches Papier ein.

RAD

Versuchen Sie eine Gerade und auch Fehlergeraden durch die Meßpunkte zu legen (die Messpunkte streuen bei diesem Versuch manchmal sehr stark) und ermitteln Sie aus dieser den Schwächungskoeffizienten der β -Strahlen von Co-60 in Aluminium.

Wie groß ist die Reichweite (inklusive Fehler) dieser Elektronen in Aluminium?
Wie groß ist die Massenreichweite dieser Elektronen?

Ermitteln Sie mit Hilfe von Abb. 2 aus dieser Anleitung die Energie der Elektronen von Co-60 (inklusive Fehler) und vergleichen Sie Ihren Wert mit dem in der Anleitung angegebenen Wert.

4.4.2 Schwächung von γ -Strahlen

Ermitteln Sie die die Nutzrate und tragen Sie sie ebenfalls in halblogarithmisches Papier auf und ermitteln daraus den Schwächungskoeffizienten (inklusive Fehler). Literaturwert $\mu_{\text{Pb}} = 0,7 \text{ cm}^{-1}$ für $E = 1,3 \text{ MeV}$.

4.5 Strahlung von anderen Objekten (freiwillig)

Wie groß ist das Verhältnis der von den Objekten (Ziegelstein usw.) erzeugten Zählrate zu der der Nullrate?

4.6 Tumorlokalisierung

Beschreiben Sie in eindeutiger Weise die Position der Quelle im Inneren des Würfels.



5 Aufgaben

- 1) Berechnen Sie die Zerfallskonstante λ von Co-60?
- 2) Ermitteln Sie aus Abb. 2 die maximale Reichweite von Co-60-Elektronen für Luft ($\rho_{\text{Luft}} = 1,29 \text{ kg/m}^3$).

- 3) Für γ -Strahler gilt folgende Faustformel:

In 1 m Abstand von einer punktförmigen, isotropen Strahlenquelle ist die Dosisleistung in rem/h größenordnungsmäßig gleich der Aktivität der Quelle in Ci.

Wie genau stimmt das für die im Versuch verwendete Co-60-Quelle?
Daten aus Versuchsprotokoll entnehmen.

- 4) Beschreiben Sie Aufbau und Funktion von Ionisationskammer und Zählrohr.
- 5) Folgende Meßwerte für die Dosisleistung D einer radioaktiven Quelle in Abhängigkeit vom Abstand R seien gemessen worden:

D (Gy/s)	3800	2500	1250	1020	590	340	195
R (cm)	15	20	30	35	50	72	100

- a) Tragen Sie die Meßwerte in doppelt-logarithmisches Papier ein.
- b) Ist das quadratische Abstandsgesetz erfüllt?
- 6) Die Aktivität einer Co-60-Quelle betrage 300kBq.
Wie groß ist die Anzahl der radioaktiven Kerne dieser Quelle?
- 7) Wieviel Halbwertsdicken braucht man, um eine Strahlung auf 1/1000 des ursprünglichen Wertes abzuschwächen?
- 8) Um welchen Faktor muß man die Meßzeit mit einem Zählrohr verlängern, um den relativen statistischen Fehler zu halbieren?
- 9) Wie groß ist der Schwächungskoeffizient μ von β -Strahlen mit einer Energie von 50 keV in Blei? ($\rho_{\text{Pb}} = 11,4 \text{ g/cm}^3$)