

Name 1:	Matrikelnummer:
Name 2:	Matrikelnummer:

Datum:	Antestat:
Datum:	Abtestat:
Gruppennr.:	Punkte:

B2: Radioaktive Strahlung / Biologische Strahlenwirkung und Analysemethoden

1. Kurzbeschreibung

In diesem Versuch werden die Grundlagen radioaktiver Strahlung und ihrer Wirkung in Abhängigkeit von Abstand sowie Abschirmung auf Organismen erarbeitet.

1.1 Biologischer Kontext

Ordnet man das Spektrum der elektromagnetischen Wellen nach zunehmender Energie der Photonen, so hat man folgende Reihenfolge: Ausgehend vom sichtbaren Licht (\rightarrow Versuch B3) schließen sich die UV-Strahlung, Röntgenstrahlung und γ -Strahlung an. Je nach Energie kann die Strahlung mehr oder weniger stark Materie durchdringen bzw. wird absorbiert, reflektiert oder gestreut.

Als ionisierende Strahlung bezeichnet man Strahlung, die genügend Energie besitzt, um aus elektrisch neutralen Atomen und Molekülen positiv und negativ geladene Teilchen – Ionen – zu erzeugen. γ -Strahlung, Röntgenstrahlung sowie kurzwellige UV-Strahlung besitzen genügend Energie, um Atome und Moleküle zu ionisieren. Beim Durchgang durch Materie – zum Beispiel durch eine Zelle oder einen Organismus – werden dabei Molekülstrukturen aufgebrochen und es entstehen freie Radikale. Dies kann in belebter Materie im Einzelfall zu Veränderungen der DNA oder zum Zelltod führen.

1.2 Physikalischer Kontext

Nicht nur elektromagnetische Strahlung kann ionisierend wirken. Auch geladene Teilchen werden ab einer Energie von etwa 4 eV zur ionisierenden Strahlung gezählt; also auch α - und β -Strahlung. Diese bestehen aus Heliumatomkernen (α -Strahlung) und energiereichen Elektronen (β^- -Strahlung) bzw. Positronen (β^+ -Strahlung). Entsteht bei einer radioaktiven α - oder β -Umwandlung ein Atomkern im angeregten Zustand, so geht er im Allgemeinen durch Emission eines oder mehrerer γ -Quanten in seinen Grundzustand über.

Im folgenden Versuch beschäftigen Sie sich mit ionisierender Strahlung. An verschiedenen radioaktiven Substanzen lernen Sie die Statistik von Strahlungsprozessen sowie den α -, β^- - und γ -Zerfall kennen. Dabei untersuchen Sie die Strahlung auf ihre Reichweite in Luft und ihre Fähigkeit, Materie zu durchdringen und bestimmen die Aktivität einer Kobaltquelle (γ -Strahlung).

1.3 Physikalische Grundbegriffe

α -, β - und γ -Strahlung, ionisierende Strahlung, Geiger-Müller-Zählrohr, Totzeit des Zählrohrs, Zählrate, wahre Zählrate, Mittelwert, Erwartungswert, Standardabweichung, Unsicherheit des Mittelwertes, Absorption, Streuung, exponentielles Schwächungsgesetz, Schwächungskoeffizient, quadratisches Abstandsgesetz, Flächenquellenkorrektur, mittlere Reichweite, Luftäquivalent, Statistik eines Strahlungsprozesses, Aktivität, Zerfallsgesetz, Zerfallskonstante, Halbwertszeit, Photoeffekt, Compton-Effekt, Paarbildung, Halbwertsschichtdicke, Ionendosis, Energiedosis, Äquivalentdosis

2. Komponenten für den Versuchsaufbau

- Messraum, abgeschirmt durch Blei
- 1 Präparatehalter
- 1 Geiger-Müller-Zählrohr auf Halter
- 1 Impulsratenzähler
- Box mit Plättchen verschiedener Materialien (Blei, Aluminium, Eisen, Plexiglas, Hartplastik)
- 1 Halter für Plättchen
- 1 Stoppuhr
- 1 Maßstab
- 1 Präparatesatz radioaktiver Quellen (Ausgabe erst durch den Assistenten)

3. Durchführung des Versuches

Die nachfolgende Anleitung zur Durchführung des Versuches hat vier wesentliche Komponenten.

- A Fragen und Aufgabenstellungen sind am Anfang mit einem A gekennzeichnet.
- F Formeln und Regeln werden vorne mit einem F gekennzeichnet und durchnummeriert.
- *Kursiv geschriebene Zeilen markiert mit einem Punkt dienen als Anleitung bzw. Hilfestellung zur Versuchsdurchführung.*
- H *Kursiv geschriebene Zeilen, die zusätzlich mit H gekennzeichnet sind, enthalten darüber hinaus kleinschrittige Erklärungen, die in einzelnen Fällen hilfreich sein können.*

3.1 Vorbereitung

- *Machen Sie sich mit den einzelnen Komponenten des Versuchsaufbaus (2.) vertraut und kontrollieren Sie, dass alle Teile vorhanden sind.*

Sicherheitsbestimmungen für den Umgang mit radioaktiven Quellen:

Bei diesem Versuch werden radioaktive Substanzen vermessen. Diese werden in einem Schutzschrank aus Blei aufbewahrt und sind nur vom Assistenten auszuhändigen. Sobald Sie einen Präparatecontainer erhalten haben, stellen Sie diesen möglichst weit entfernt vom Geiger-Müller-Zählrohr in den mit Blei abgeschirmten Messraum an Ihrem Arbeitsplatz. Der Präparatesatz enthält einen α -, zwei β - sowie einen γ -Strahler. Alle Präparate sind für die Lehre zugelassen und entsprechen den gesetzlichen Strahlenschutzvorschriften (StrlSchV).

Für den Umgang mit den Strahlungsquellen gilt:

- Nehmen Sie nur diejenige Strahlungsquelle aus dem Container, die Sie für die aktuelle Messung benötigen.
- Halten Sie die Strahlungsquelle sicher und fest in der Hand, so dass diese nicht herunterfallen kann.
- Richten Sie die Öffnung der Strahlungsquelle nicht auf andere Personen oder Körperteile.

Für den folgenden Versuch gelten die gleichen Sicherheitsvorkehrungen wie für das gesamte Praktikum. Der Verzehr von Speisen und Getränken am Arbeitsplatz ist untersagt. Weiterhin sollten Sie sich nach dem Praktikum – insbesondere vor dem Essen und Trinken – gründlich die Hände waschen. Blei ist ein Schwermetall und giftig!

Das Zählrohr ist gegen mechanische Einwirkungen sehr empfindlich und kann bei grobem Umgang beschädigt werden. Gehen Sie damit besonders vorsichtig um. **Die schwarze Schutzkappe auf dem Geiger-Müller-Zählrohr darf niemals entfernt werden!** Diese Kappe soll der Zerstörung des sehr dünnen Zählrohrfensters vorbeugen; stecken Sie keine spitzen Gegenstände durch die Öffnung der Schutzkappe.

3.2 Ermitteln Sie die Radioaktivität in der Umgebung

Aufgrund der Höhenstrahlung, radioaktiver Strahlung der Erde und radioaktiver gasförmiger Stoffe in unserer Luft (z. B. Radon) kann man an jedem Ort mehr oder weniger viel Radioaktivität nachweisen. Dies geschieht z. B. durch Impulszählung mit einem Geiger-Müller-Zählrohr und einem Impulsratenzähler.

Grundsätzlich ist das Geiger-Müller-Zählrohr zum Nachweis von α -, β - und γ -Strahlung geeignet. Seine Arbeitsweise beruht auf der ionisierenden Wirkung der radioaktiven Strahlung: Die Strahlung, die ins Zählrohr gelangt, stößt längs

ihrer Bahn auf Gasmoleküle, welche durch den Stoß ionisiert werden. Dabei entstehen freie Elektronen. Ein elektrisches Feld im Zählrohr beschleunigt diese so stark, dass die leicht beweglichen Elektronen genug Energie besitzen, weitere Ionen-Elektronenpaare zu erzeugen. Durch die lawinenartig entstandenen freien Elektronen, die wiederum entlang des elektrischen Feldes beschleunigt werden, entsteht ein Stromfluss, der über einen Draht und durch einen Widerstand abfließt. Die am Widerstand durch den Stromfluss entstandene Spannung wird verstärkt und einem Lautsprecher zugeführt. So erzeugt jedes im Zählrohr ankommende Teilchen ein Ereignis am Impulsratenzähler. Eine detailliertere Beschreibung der Funktionsweise des Geiger-Müller-Zählrohres und Ausführungen zur Stoßionisation finden Sie in *Meschede: Gerthsen Physik, 22. Aufl. Seite 464 ff.*

- Stellen Sie das Geiger-Müller-Zählrohr auf dem Halter in den Messraum.
 - Schalten Sie den Impulsratenzähler ein.
 - Der Drehregler muss auf dem Symbol „Handmessung“ stehen.
 - Um eine Messung zu starten bzw. anzuhalten, drücken Sie den Schalter „START/UP“ bzw. „STOPP/DOWN“.
- H Zu Beginn der ersten Messung zeigt Ihnen das Gerät zunächst die Torzeit (100 s) an. Um eine Messung starten zu können, betätigen Sie einmal den Schalter „RESET“.
- Um die Anzeige zwischen zwei Messungen zu löschen, drücken Sie ebenfalls den Schalter „RESET“.
 - Messen Sie nun 5-mal jeweils 40 s lang die Anzahl an Ereignissen Z und tragen Sie sie in die erste Zeile der Tabelle ein.

Nummer der Messung i	1	2	3	4	5
Anzahl an Ereignissen Z					
Zählrate N/Bq					
wahre Zählrate N_w/Bq					

Die Anzahl an Ereignissen pro Sekunde nennt man Zählrate N . Sie wird in der Einheit Becquerel angegeben.

F(1)
$$N = \frac{Z}{t}$$

N : Zählrate (SI-Einheit: $1 \frac{1}{s} = 1 \text{ Bq} = 1 \text{ Becquerel}$)
 Z : Anzahl der Ereignisse
 t : Zeit (SI-Einheit: $1 \text{ s} = 1 \text{ Sekunde}$)

A Berechnen Sie die Zählrate N . **Runden Sie Ihre Ergebnisse im Verlauf des gesamten Versuchs sinnvoll.**

H Um die Zählrate N zu erhalten, müssen Sie Ihre ermittelten Werte für Z durch 40 s teilen. Dann erhalten Sie die Zählrate in der Einheit $\frac{1}{s} = 1 \text{ Bq}$.

A Diskutieren Sie, **wie viele** Stellen nach dem Komma angegeben werden sollten. Ist es sinnvoll, die Ergebnisse der berechneten Zählraten auf ganze Zahlen zu runden?

.....

.....

.....

H Die Zählrate gibt die Anzahl der Ereignisse pro Sekunde an. Diese Anzahl ist natürlich prinzipiell ganzzahlig. Bedenken Sie jedoch, dass sich die im Verlauf des Versuchs gemessenen Zählraten z. T. erst ab der ersten Nachkommastelle unterscheiden und Sie eine statistische Auswertung durchführen sollen.

Durch den durch die freien Elektronen erzeugten Stromfluss bricht die Spannung im Geiger-Müller-Zählrohr, die zum Aufbau des elektrischen Feldes nötig ist, kurzzeitig zusammen. In der Zeit bis die Spannung und damit auch das Feld wieder hergestellt ist, kann das Zählrohr keinen neuen Impuls registrieren. Diese Zeit nennt man Totzeit τ . Die gemessene Zählrate muss immer um diesen Fehler korrigiert werden, um die wahre Zählrate N_w zu erhalten. **Korrigieren Sie im gesamten Versuch nur Zählraten, die oberhalb von 10 Bq liegen!** Bei geringeren Zählraten ist der Unterschied zwischen Zählrate N und wahrer Zählrate N_w kleiner als 0,1 % und kann daher vernachlässigt werden.

$$F(2) \quad N_w = \frac{N}{1 - N \cdot \tau}$$

N_w : wahre Zählrate (SI- Einheit: $\frac{1}{s} = 1 \text{ Bq} = 1 \text{ Becquerel}$)

N : gemessene Zählrate (SI- Einheit: $\frac{1}{s} = 1 \text{ Bq} = 1 \text{ Becquerel}$)

τ : Totzeit (SI-Einheit: $1 \text{ s} = 1 \text{ Sekunde}$)

- A Berechnen Sie nun die wahre Zählrate N_w in der obigen Tabelle aus der Zählrate N , indem Sie eine Totzeit von $\tau = 10^{-4} \text{ s}$ annehmen.

In der Praxis können keine unendlich langen Messreihen aufgenommen werden. Werden also n Messungen (hier 5) einer Größe (hier Z bzw. N) durchgeführt, kann der arithmetische Mittelwert als guter Schätzwert für den Erwartungswert berechnet werden (vgl. Kapitel 4.1, 4.2). Die Streuung der Messwerte um den Mittelwert wird mit der Standardabweichung σ abgeschätzt. Sie ist ein Maß dafür, wie nah die Messwerte beieinanderliegen bzw. wie weit die Messwerte gestreut sind.

$$F(3) \quad \sigma(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$\sigma(x)$: Standardabweichung der Stichprobe x

n : Anzahl der Messungen

x_i : Messwert der i -ten Messung

\bar{x} : Mittelwert der Stichprobe

- A Bestimmen Sie aus den Werten der Tabelle den arithmetischen Mittelwert für die wahre Zählrate: $\bar{N}_w = \dots\dots\dots \text{ Bq}$

- A Berechnen Sie nun ebenfalls die Standardabweichung der wahren Zählrate: $\sigma(N_w) = \dots\dots\dots \text{ Bq}$

Führen Sie eine lange Nullratenmessung durch.

Während Sie Versuchsteil 3.3 auswerten bzw. während des Kolloquiums, können Sie ohne zusätzlichen Zeitaufwand über eine lange Zeit (mindestens 20 Minuten) eine Nullratenmessung durchführen.

- *Verstauen Sie vor der Nullratenmessung die Präparate wieder im Behälter.*
- *Um eine Langzeitmessung durchzuführen, muss der Drehregler erneut auf die Handmessung gedreht werden. Dann regeln Sie mit dem Taster „START/UP“ die Messzeit auf mindestens 4000 s. Anderenfalls wird die Messung nach 100 s automatisch gestoppt. Um eine Messung starten zu können, betätigen Sie nach Einstellung der Messzeit wieder den Schalter „RESET“.*
- *Starten Sie eine Messung. Die Dauer der Messung wird mit einer Stoppuhr bestimmt.*

- A Notieren Sie Ihre Ergebnisse und korrigieren Sie diese wieder um die Totzeit.

Anzahl an Ereignissen: $Z = \dots\dots\dots$

Dauer der Messung: $t = \dots\dots\dots \text{ s}$

Zählrate: $N = \dots\dots\dots \text{ Bq}$

Wahre Zählrate: $N_w = \dots\dots\dots \text{ Bq}$

- A Welche Auswirkung hat die Nullrate auf die Messergebnisse der weiteren Messungen?

.....

.....

.....

3.3 Untersuchen Sie die Abschirmung von γ -Strahlung

Zur Schwächung ionisierender Strahlung beim Durchgang durch Materie tragen sowohl Absorption als auch Streuung bei. Absorption bezeichnet den Energie- und Intensitätsverlust, den die Strahlung bei der Ionisation von Atomen oder Molekülen der Materie erfährt (vgl. Kapitel 4.4, 4.5). In biologischem Gewebe kann diese Ionisation zur Veränderung des bestrahlten Organismus (somatische Strahlenwirkung) oder des Erbgutes (genetische Strahlenwirkung) führen (vgl. Kapitel 5.1). Streuung bezeichnet die Richtungsänderung der Strahlung durch Wechselwirkung mit der Materie. Sie führt zur Gefährdung von Gewebe, das sich außerhalb des geradlinigen Strahlengangs befindet.

Beide Prozesse können sich gegenseitig bedingen: Z. B. tritt bei jeder Ionisation auch energieärmere Streustrahlung auf und Streuung kann wiederum mit einem Energieverlust des gestreuten Photons verbunden sein.

γ -Strahlung ist eine Folgeerscheinung eines radioaktiven α - oder β -Zerfalls (vgl. Kapitel 4), wobei der Atomkern anschließend von einem angeregten in einen energetisch günstigeren Zustand übergeht. Die dabei frei werdende Energie wird mittels γ -Strahlung – hochenergetische elektromagnetische Strahlung – ausgesandt. Diese kann nur portionsweise, in sogenannten **Quanten** abgegeben werden.

Die folgende Messung führen Sie an einer Kobaltquelle (^{60}Co , grün) durch.

- Nehmen Sie die γ -Quelle aus dem Behälter und befestigen Sie sie im Präparatehalter.
- Stellen Sie einen Abstand von 5 cm zwischen Präparat und Zählrohr ein.
- Bestimmen Sie die Absorptionskurve der Kobaltquelle für Blei im Bereich von $x = 3$ bis $x = 19$ mm Absorberdicke, wobei Sie in Schritten von 2 mm messen.

H Messen Sie wiederum die Anzahl an Ereignissen Z in einem Zeitraum von jeweils 40 s.

A Tragen Sie Ihre Messungen in die Tabelle ein und ermitteln Sie die Zählrate sowie die wahre Zählrate.

x/mm	3	5	7	9	11	13	15	17	19
Z									
N/Bq									
N_w/Bq									

Das Ausmaß der Schwächung von γ -Strahlung in Materie hängt nur vom verwendeten Material sowie der Schichtdicke des absorbierenden Materials ab. Die Zählrate vor dem Durchgang durch den Absorber hat keinen Einfluss. Es gilt: Die Intensität (und somit auch die Zählrate) der Strahlung wird durch eine bestimmte Schichtdicke x immer um den gleichen Faktor geschwächt. Das heißt: halbiert ein Absorber der Dicke x die Strahlungsintensität, so wird diese bei einer doppelten Schichtdicke nochmals halbiert, also geviertelt.

Beschrieben wird ein solcher Zusammenhang durch eine abfallende Exponentialfunktion (vgl. Abb. 1a). Die Material- und Energieabhängigkeit wird dabei durch den Schwächungskoeffizienten (oder auch Absorptionskoeffizient) μ beschrieben.

$$F(4) \quad N(x) = N_0 \cdot \exp(-\mu \cdot x) = N_0 \cdot e^{-\mu x}$$

$N(x)$: Zählrate nach einer Schichtdicke x

(SI-Einheit: $1 \frac{1}{s} = 1 \text{ Bq}$)

N_0 : Ausgangszählrate (SI-Einheit: $1 \frac{1}{s} = 1 \text{ Bq}$)

μ : Schwächungskoeffizient (SI-Einheit: $1 \frac{1}{m}$)

Im folgenden sollen Sie die Messdaten halblogarithmisch aufgetragen. Durch die Anwendung des natürlichen Logarithmus (\ln) auf beiden Seiten der Gleichung F(4) entsteht eine Geradengleichung mit der Steigung μ :

$$\ln(N) = \ln(N_0) - \mu x$$

H Logarithmisches Papier ist ein Spezialpapier, das das Zeichnen bestimmter Funktionen und damit das Erkennen der zugrunde liegenden funktionalen Zusammenhänge erleichtert. Es verfügt über ein logarithmisches Koordinatennetz, d. h., die Skalenteile der Achsen sind nicht äquidistant; die Achsenaufteilung ist unregelmäßig. Bei halblogarithmischem Papier ist nur eine Achse logarithmisch (hier zur Basis 10) geteilt, in unserem Fall ist dies die y-Achse. Da das Papier ein logarithmisches Koordinatensystem zur Basis 10 (lg) hat, die obige Umrechnung jedoch mit dem natürlichen Logarithmus, also zur Basis e (Eulersche Zahl $\approx 2,7$), umgeformt wurde, ist die von Ihnen berechnete Steigung gerade $\mu \cdot \lg(e)$:

$$\lg(N) = \lg(N_0) - \mu \cdot \lg(e) \cdot x$$

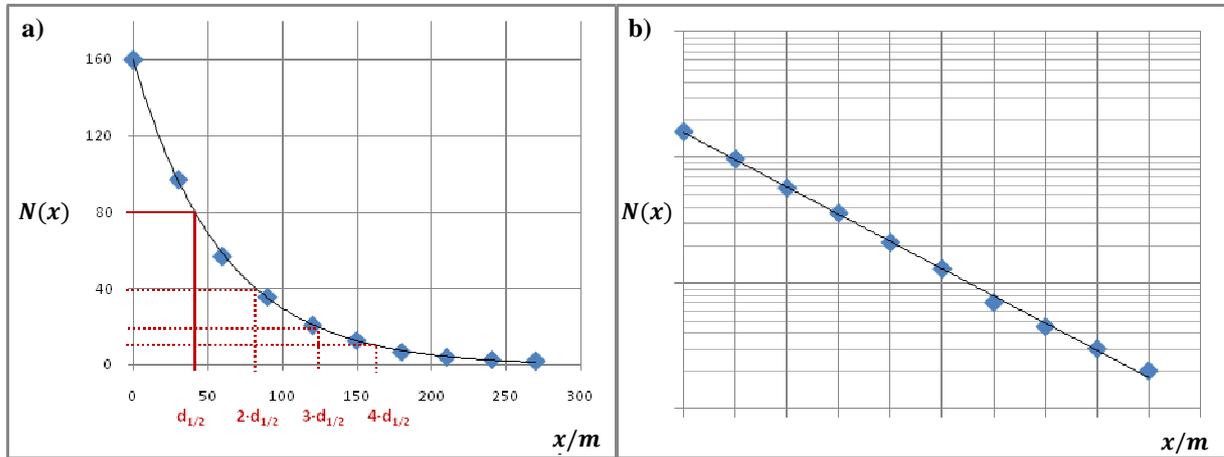


Abb. 1: Schwächung von γ -Strahlung in Materie

A Tragen Sie die wahren Zählraten N_w über der Absorberdicke x auf einfachlogarithmischem Papier auf. (Führen Sie währenddessen die lange Nullratenmessung durch, falls Sie dies noch nicht gemacht haben!) Können Sie das exponentielle Schwächungsgesetz bestätigen? Begründen Sie!

.....

.....

A Zeichnen Sie eine Ausgleichsgerade und bestimmen Sie den Schwächungskoeffizienten von Blei μ_{Blei} für die Kobaltquelle aus der Steigung der Geraden über die Formel: $\lg(N) = -\mu \cdot \lg(e) \cdot x + \lg(N_0)$

H Die allgemeine Formulierung der Geradengleichung lautet $y = m \cdot x + b$. Überlegen Sie sich für die Bestimmung von μ , welche Parameter in der obigen Formel den Parametern in der Geradengleichung entsprechen.

$$\mu_{\text{Blei}} = \dots\dots\dots \frac{1}{\text{cm}}$$

A Führen Sie die Messung ohne Absorber sowie für Eisen, Aluminium und Plexiglas durch. Hierbei genügt jeweils **eine** Messung bei einer Absorberdicke von 3 mm.

Material	ohne	Blei	Eisen	Aluminium	Plexiglas
x/mm	---	3	3	3	3
Z					
N/Bq					
N_w/Bq					

- A Übertragen Sie die Zählrate für Blei und diskutieren Sie die Qualität der von Ihnen untersuchten Materialien bezüglich ihrer Fähigkeit, γ -Strahlung zu absorbieren und damit abzuschirmen.

.....

.....

.....

3.4 Untersuchen Sie das Abstandsgesetz von γ -Strahlung

Die Strahlenschutzordnung besagt, dass jede "unnötige" Strahlenexposition von Personen zu vermeiden ist. Um Strahlenschäden so gering wie möglich zu halten, sind Strahlenschutzmaßnahmen zu treffen. Die Grundprinzipien des Strahlenschutzes lassen sich durch vier Stichworte zusammenfassen: Abstand, Abschirmung und Aufenthaltszeit und Aktivität der Quelle.

Abb. 2 zeigt ein Präparatstift mit der durchstrahlten Fläche. Je weiter man sich von der Strahlungsquelle entfernt, desto größer ist die Fläche, die von der Strahlung durchsetzt wird. Dieselbe Strahlung verteilt sich somit auf unterschiedlich große Flächen.

Es gilt: Verdoppelt man den Abstand, verteilt sich die Strahlung auf eine viermal so große Fläche. Dies gilt jedoch streng genommen nur bei punktförmigen Quellen. Die gemessene Zählrate (und damit auch die Strahlenbelastung) nimmt also mit dem Abstand r zwischen Quelle und Detektor ab, sie ist proportional zu $\frac{1}{r^2}$, das Abstandsgesetz lautet:

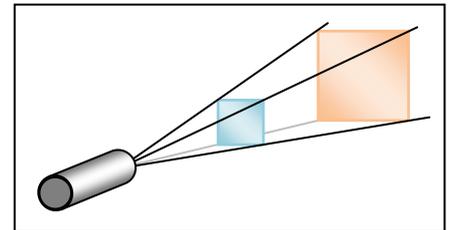


Abb. 2: Zum Abstandsgesetz

F(5)
$$N(r) = N(r_0) \cdot \frac{r_0^2}{r^2}$$

$N(r)$: Zählrate im Abstand r von der Quelle

$N(r_0)$: Zählrate im Abstand r_0 von der Quelle

- A Führen Sie eine Reichweitenmessung mit der Kobaltquelle durch. Bestimmen Sie die Anzahl an Ereignissen Z in einem Zeitraum von 40 s und in einem Abstand r von 1 cm bis 20 cm. Vergrößern Sie diesen dabei wie in der Tabelle angegeben. Bestimmen Sie wiederum die Zählrate und die wahre Zählrate.

r/cm	1	2	3	4	5	6
Z						
N/Bq						
N_w/Bq						
r/cm	7	8	9	10	15	20
Z						
N/Bq						
N_w/Bq						

Wie Sie in Kapitel 3.1 bereits erfahren haben, ist das Zählrohr mit einer Schutzkappe versehen. Den Abstand zwischen Zählrohrfenster und Vorderkante der Schutzkappe d_k müssen Sie in Ihrer Auswertung berücksichtigen. Zusätzlich hat die Kobaltquelle im Präparatstift einen Abstand d_p von der Vorderkante des Stiftes. Sie müssen also zu jedem eingestellten Abstand r sowohl den Abstand zwischen Quelle und Stiftvorderkante d_p als auch den Abstand vom Zählrohrfenster bis zur Vorderkante der Schutzkappe d_k hinzuaddieren. Es ergibt sich damit ein Abstand $r' = r + d_k + d_p$.

- A Tragen Sie die wahre Zählrate über dem korrigierten Abstand r' auf doppeltlogarithmischem Papier auf und ermitteln Sie die Steigung a . Es gilt $d_k = 0,2$ cm sowie für die Kobaltquelle $d_p = 1,7$ cm.

$a = \dots\dots\dots$

H Bei doppeltlogarithmischem Papier sind beide Achsen logarithmisch skaliert.

- A Was sagt die Steigung der Geraden aus? Stellen Sie einen Zusammenhang zum Abstandsgesetz her.

.....

.....

.....

H Die Steigung der Geraden erhalten Sie, wenn Sie auf beide Seiten der Gleichung F(5) den Logarithmus anwenden und die Steigung der Geradengleichung bestimmen: $\lg(N) = -2 \cdot \lg(r) + \lg(N_0 \cdot r_0^2)$

Die allgemeine Formulierung der Geradengleichung lautet $y = m \cdot x + b$. Überlegen Sie sich für den Zusammenhang mit Ihren Messwerten, welche Parameter in der obigen Formel den Parametern in der Geradengleichung entsprechen.

3.5 Untersuchen Sie die Absorption/Abschirmung von β^- -Strahlung.

Im folgenden Versuchsteil sollen Sie das Schwächungsgesetz für β^- -Strahlung überprüfen. Weiterhin untersuchen Sie verschiedene Materialien auf ihre Fähigkeit, β^- -Strahlung abzuschirmen.

- Tauschen Sie die Kobaltquelle gegen das β^- -Präparat (Strontium, ^{90}Sr , schwarz) aus.
- Die Kobaltquelle legen Sie vor der nächsten Messung zurück in den Präparatecontainer.
- Stellen Sie einen Abstand von 2 cm zwischen Präparat und Geiger-Müller-Zählrohr ein.

- A Messen Sie die Anzahl an Ereignissen des β^- -Präparates für jeweils 40 s bei 10 unterschiedlichen Absorberdicken zwischen 0 mm und 3 mm. Benutzen Sie hierbei die Aluminiumplättchen. Bestimmen Sie die Zählrate und die wahre Zählrate.

x/mm					
Z					
N/Bq					
N_w/Bq					
x/mm					
Z					
N/Bq					
N_w/Bq					

- A Bestimmen Sie die wahre Zählrate ebenfalls für Hartplastik und Plexiglas und einmal ohne absorbierendes Material zwischen Quelle und Digitalzähler. Hierbei genügt jeweils eine Messung bei einer Absorberdicke von 1 mm.

Material	ohne	Aluminium	Hartplastik	Plexiglas
x/mm	---	1	1	1
Z				
N/Bq				
N_w/Bq				

- A Übertragen Sie die Zählrate für Aluminium und diskutieren Sie die Qualität der von Ihnen untersuchten Materialien bezüglich ihrer Fähigkeit, β^- -Strahlung zu absorbieren und damit abzuschirmen.

.....

.....

.....

3.6 Untersuchen Sie das Abstandsgesetz und die Reichweite von β^- -Strahlung.

- A Führen Sie eine Reichweitenmessung mit der Strontiumquelle durch. Bestimmen Sie die Anzahl an Ereignissen (40 s) in einem Abstand r von 1 cm bis 16 cm. Vergrößern Sie den Abstand dabei wie in der Tabelle angegeben. Bestimmen Sie wiederum die Zählrate und wahre Zählrate.

r/cm	1	2	3	4	5	6
Z						
N/Bq						
N_w/Bq						
r/cm	7	8	10	12	14	16
Z						
N/Bq						
N_w/Bq						

Zusätzlich zum Abstand zwischen Quelle und Stiftvorderkante d_p und zum Abstand zwischen Zählrohrfenster und Vorderkante der Schutzkappe d_k , müssen Sie beim β^- -Strahler die sogenannte Flächenquellenkorrektur d_Q berücksichtigen (vgl. Abb. 3): Da die Quelle nicht punktförmig ist, müssen Sie zu Ihrem gemessenen Abstand r zusätzlich den Abstand zum geometrischen punktförmigen Ursprung der Quelle hinzuaddieren. Es ergibt sich damit ein korrigierter Abstand von $r' = r + d_k + d_p + d_Q$.

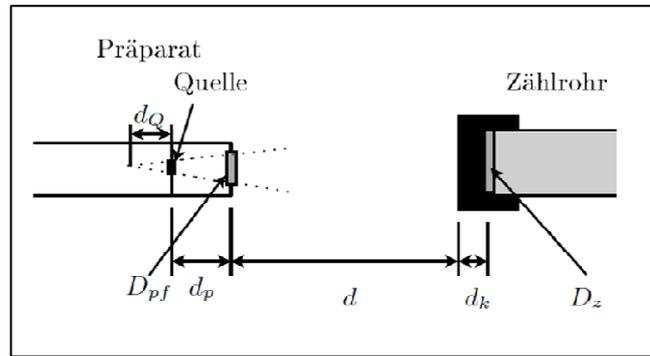


Abb. 3: Schematischer Versuchsaufbau

3.7 Untersuchen Sie die Abschirmung von α -Strahlung.

Untersuchen Sie verschiedene Materialien auf ihre Fähigkeit, α -Strahlung abzuschirmen.

- Tauschen Sie die Strontiumquelle gegen den α -Strahler (Americium, ^{241}Am , rot) aus.
- Die Strontiumquelle legen Sie vor der nächsten Messung zurück in den Präparatecontainer.
- Stellen Sie die Americiumquelle direkt vor das Zählrohr.

A Bestimmen Sie die wahre Zählrate beim Abstand Null jeweils einmal ohne Absorber, mit Transparentpapier und mit Kleenexpapier zwischen Quelle und Detektor.

Material	ohne	Transparentpapier	Kleenexpapier
Z			
N/Bq			
N_w/Bq			

A Diskutieren Sie die Qualität der von Ihnen untersuchten Materialien bezüglich ihrer Fähigkeit, α -Strahlung zu absorbieren und damit abzuschirmen.

.....

.....

.....

.....

3.8 Untersuchen Sie das Abstandsgesetz und die Reichweite von α -Strahlung.

Im letzten Versuchsteil untersuchen Sie die Reichweite von α -Strahlung. Wie Sie in Versuchsteil 3.7 festgestellt haben, lässt sich α -Strahlung bereits durch eine dünne Schicht Kleenexpapier deutlich reduzieren. Beim Durchgang durch das Zählrohrfenster sowie die Präparatabdeckung geht ein Teil der α -Strahlung also bereits verloren (vgl. Abb. 3). Die Beiträge, die Sie später in Ihrer Auswertung berücksichtigen müssen, werden durch das sogenannte Luftäquivalent des Zählrohrfensters D_z und das Luftäquivalent der Präparatabdeckung D_{pf} beschrieben. Das **Luftäquivalent** gibt gerade den Weg an, den die α -Teilchen in Luft zurücklegen müssten, damit sie um den gleichen Betrag abgeschwächt werden wie durch das Zählrohrfenster.

A Messen Sie mit dem α -Strahler die Anzahl an Ereignissen \dot{N} zu 40 s bei den Abständen $d = 1 - 16$ mm wie in der Tabelle angegeben.

r/mm	0	1	2	3	4	5	6
Z							
N/Bq							
N_w/Bq							
r/mm	7	8	9	10	12	14	16
Z							
N/Bq							
N_w/Bq							

A Tragen Sie die wahren Zählraten auf Millimeterpapier gegen den korrigierten Abstand r' auf.

H Der Abstand zwischen Quelle und Stiftvorderkante beträgt $d_p = 4$ mm, die Flächenquellenkorrektur $d_Q = 9$ mm und der Abstand vom Zählrohrfenster bis zur Vorderkante der Schutzkappe wie oben $d_k = 2$ mm. Für die Luftäquivalente gilt: $D_z = 10$ mm und $D_{pf} = 1$ mm.

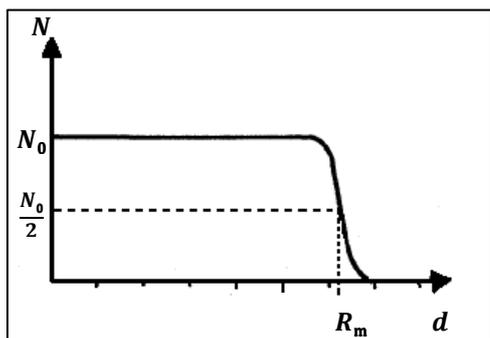


Abb. 4: Mittlere Reichweite von α -Strahlung in Luft

Abb. 4 zeigt die Abhängigkeit der gemessenen Zählrate N vom Abstand des Detektors d von der Probe für einen α -Strahler in Luft. Bis zu einer bestimmten Entfernung von der Quelle sinkt die Zählrate kaum ab, danach fällt sie umso steiler. Da α -Strahlung aufgrund ihres starken Ionisationsvermögens nur eine sehr geringe Reichweite in Luft hat, zeigen Ihre Messungen nur den fallenden Teil der Kurve.

Die mittlere Reichweite lässt sich graphisch durch den Funktionswert der halben Ausgangszählrate $\frac{N_0}{2}$ abschätzen.

A Aufgrund der, in der theoretischen Kurve nicht berücksichtigten, Luftäquivalente kann es sein, dass sie nur den abfallenden Teil der Kurve sehen können. Schätzen Sie die mittlere Reichweite aus Ihrer graphischen Auftragung ab:

$$R_m = \dots\dots\dots \text{ cm}$$

4. Physikalische Grundlagen

4.1 Mittelwert und Standardabweichung

Die sinnvollste Möglichkeit, Aussagen über die Unsicherheit einer physikalischen Messgröße x zu erhalten, ist es, die Messung dieser Größe unter gleich bleibenden Bedingungen möglichst oft zu wiederholen. Bei n -facher Messung von x ergeben sich aufgrund statistischer Abweichungen in der Regel unterschiedliche Messwerte x_i . Diesen Effekt haben Sie bereits im ersten Semester in der Physikvorlesung bei der Messung eines Holzquaders kennen gelernt.

Die einzelnen Messwerte x_i schwanken um einen Erwartungswert μ . Der Erwartungswert ist ein theoretischer Mittelwert von unendlich vielen Messungen. In der Praxis ist eine unendlich lange Messreihe natürlich nicht zu realisieren. Deswegen schätzen wir den Erwartungswert mit dem arithmetischen Mittelwert ab. Bei n Messungen ist der arithmetische Mittelwert \bar{x} der Messreihe (x_1, x_2, \dots, x_n) gerade:

$$F(6) \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i)$$

\bar{x} : Mittelwert der Messreihe (x_1, x_2, \dots, x_n)

n : Anzahl der Messungen

x_i : i -ter Messwert der Messreihe (x_1, x_2, \dots, x_n)

Weiterhin interessiert uns Schwankung – die sogenannte Streuung – der einzelnen Messwerte um den Mittelwert. Diese lässt sich gut mit der Standardabweichung $\sigma(x)$ der Einzelwerte **abschätzen**. (Die wahre Standardabweichung ist abhängig von der – einem stochastischen Prozess zugrundeliegenden – Wahrscheinlichkeitsverteilung. Vgl. Kapitel 4.2) Sie macht eine Aussage über die Qualität der Messmethode und ist ein Maß dafür, wie nah die Messwerte beieinanderliegen bzw. wie weit die Messwerte gestreut sind.

$$F(3) \quad \sigma(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$\sigma(x)$: Standardabweichung der Einzelwerte

n : Anzahl der Messungen

x_i : i -ter Messwert der Messreihe (x_1, x_2, \dots, x_n)

\bar{x} : Mittelwert der Messreihe (x_1, x_2, \dots, x_n)

Für die letztendliche Bewertung der Aussagekraft von Messreihen kommt es jedoch auf die Unsicherheit des Mittelwertes $\sigma(\bar{x})$, also auf die Abweichung des Mittelwertes vom Erwartungswert, an. Anders als die Standardabweichung geht die Unsicherheit des Mittelwertes für unendlich lange Messreihen gegen Null, da der Mittelwert in diesem Fall dem Erwartungswert entspricht. Die Streuung des Mittelwertes um den Erwartungswert kann mit folgender Formel abgeschätzt werden.

$$F(7) \quad \sigma(\bar{x}) = \frac{\sigma(x)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$\sigma(\bar{x})$: Unsicherheit des Mittelwertes

$\sigma(x)$: Standardabweichung der Einzelwerte

n : Anzahl der Messungen

x_i : i -ter Messwert der Messreihe (x_1, x_2, \dots, x_n)

\bar{x} : Mittelwert der Messreihe (x_1, x_2, \dots, x_n)

Da eine Reihe von systematischen Abweichungen, wie beispielsweise die Benutzung falsch geeichter Messgeräte, die Verwendung unreiner Substanzen oder vernachlässigte physikalische Effekte existieren, wird der Erwartungswert selten mit dem wahren Wert einer physikalischen Größe übereinstimmen. Systematische Abweichungen verfälschen das Ergebnis stets in die gleiche Richtung und sind – sofern sie bekannt sind – beliebig reduzierbar. Dies erfordert jedoch oft großen Aufwand und ist unter Praktikumsbedingungen nicht realisierbar.

4.2 Statistik eines Strahlungsprozesses

Der Zerfall eines radioaktiven Präparates zeigt ein stochastisches Verhalten. Das heißt, dass die Anzahl aller gemessenen Impulse k (1 Impuls = 1 Zerfall) in einer bestimmten Zeit um einen Erwartungswert μ schwankt und die Anzahl der Impulse des nächsten Zeitabschnittes nicht vorhersagbar, sondern zufällig ist.

Trägt man die Häufigkeit der einzelnen Impulszahlen $H(k)$ über den einzelnen Impulszahlen k auf, so kann man sehen, dass dem Zerfallsprozess eine Wahrscheinlichkeitsverteilung – genauer: eine **Poissonverteilung** – zugrunde liegt (vgl. Abb. 5). Wie im Allgemeinen (vgl. Kapitel 4.1) gilt auch hier: Der Mittelwert \bar{k} ist eine gute Näherung für den Erwartungswert μ , sofern eine große Anzahl an Messungen durchgeführt wird.

Die Standardabweichung $\sigma(k)$ (Fehler der Einzelmessung) der Poissonverteilung lässt sich zu $\sigma(k) = \sqrt{\mu} \approx \sqrt{\bar{k}}$ bestimmen. Dabei liegen etwa 68 % der Impulszahlen im Intervall $[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$. Wie im allgemeinen Fall, ist die

Unsicherheit des Mittelwertes definiert als $\sigma(\bar{k}) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{\sqrt{\bar{k}}}{\sqrt{n}}$.

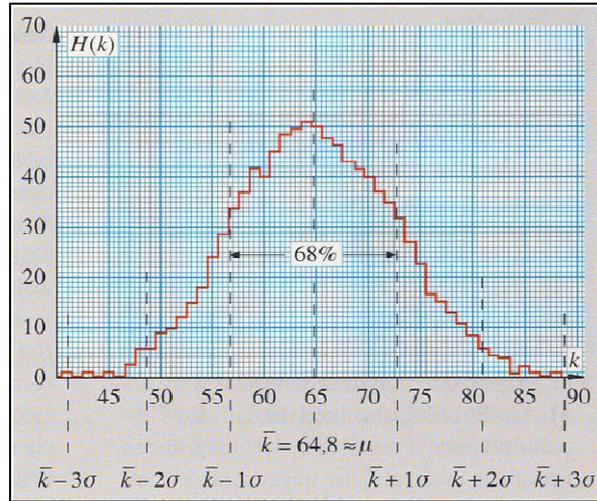


Abb. 5: Beispiel für die Zählstatistik

Im Folgenden sollen Sie Ihre Messung zur Umgebungsradioaktivität (Versuchsteil 3.2) auswerten.

- A1 Übertragen Sie die Zählrate N_i aus Versuchsteil 3.2. (i kennzeichnet dabei die Nummer der Messung.) Sie betrachten zunächst die 40sekündigen Einzelmessungen. Dabei machen Sie die Annahme, dass es sich bei den N_i um die Mittelwerte (vgl oben: \bar{k}) jeweils $n = 40$ einzelner Messungen handelt. Berechnen Sie die Unsicherheit des Mittelwerts jeder 40sekündigen Einzelmessung: $\sigma(\bar{k}) = \sigma(N_i) = \frac{\sqrt{N_i}}{\sqrt{40}}$

Nummer der Messung i	1	2	3	4	5
Zählrate N_i/Bq					
Unsicherheit $\sigma(N_i)/\text{Bq}$					

- A2 Betrachten Sie nun die 5 Einzelmessungen als eine lange Messung über 200 s. Berechnen Sie die Unsicherheit des Mittelwerts der langen Messung: $\sigma(\bar{N}) = \sigma(\bar{N}) = \frac{\sqrt{\bar{N}}}{\sqrt{200}}$. Dabei ist \bar{N} der Mittelwert der langen Messung. (Sie erhalten \bar{N} , wenn Sie den Mittelwert aller N_i berechnen und diesen durch 200 s teilen.)

$$\sigma(\bar{N}) = \dots\dots\dots \frac{1}{s}$$

- A3 Verfahren Sie analog bei der langen Nullratenmessung, die Sie während des Kolloquiums durchgeführt haben.

$$\sigma(\bar{N}) = \dots\dots\dots \frac{1}{s}$$

- A4 Vergleichen Sie die Ergebnisse der beiden Berechnungen untereinander sowie mit der langen Nullratenmessung. Diskutieren Sie Vor- sowie Nachteile der Messungen.

.....

.....

.....

.....

4.3 Aktivität

Die Menge N eines radioaktiven Stoffes nimmt im Laufe der Zeit ab, ebenso wird dessen Strahlungsintensität schwächer. Die Anzahl der unzerfallenen Atomkerne der Substanz $N(t)$ schwankt dabei um eine Kurve exponentiellen Verlaufs (vgl. Abb.6). Diese idealisierte Kurve lässt sich mit folgender Formel, dem Zerfallsgesetz, beschreiben.

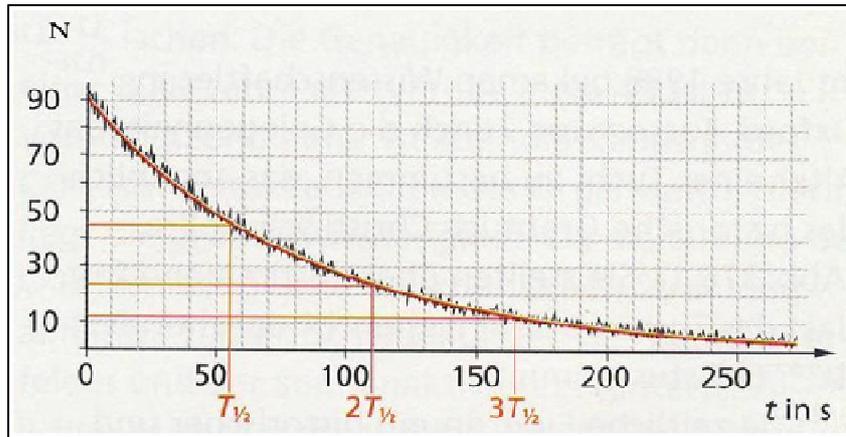


Abb. 6: exponentieller Verlauf und Halbwertszeit

F(8)

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

$N(t)$: Anzahl der unzerfallenen Atomkerne zum Zeitpunkt t

N_0 : Anzahl der unzerfallenen Atomkerne zum Zeitpunkt $t = 0$

λ : Zerfallskonstante (SI-Einheit: $1 \frac{1}{s}$)

t : Zeit (SI-Einheit: 1 s)

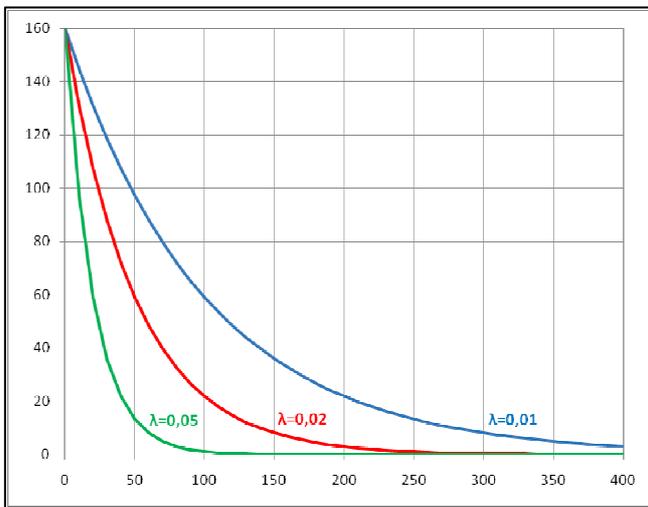


Abb. 7: Einfluss der Zerfallskonstanten

Dabei gibt die Zerfallskonstante λ an, wie schnell die Strahlungsintensität abnimmt. Sie ist eine für jede radioaktive Substanz charakteristische Größe. Abb. 7 zeigt eine exponentielle Funktion mit verschiedenen Werten für λ . Je größer die Zerfallskonstante ist, desto schneller fällt die Exponentialkurve ab.

Die Zahl der radioaktiven Zerfälle dN pro Zeiteinheit dt heißt **Aktivität A** oder Zerfallsrate. Sie wird in der Einheit Becquerel (Bq) angegeben. Es gilt: $1 \text{ Bq} = 1 \frac{1}{s} = 1$ Zerfall pro Sekunde. Mit Hilfe von Gleichung F(8) lässt sich die Aktivität A als Produkt der Zerfallskonstanten λ und $N(t)$, der Anzahl der unzerfallenen Atome zum Zeitpunkt t , darstellen.

F(9)

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N(t)$$

A : Aktivität (SI-Einheit: 1 Bq = 1 Becquerel = $1 \frac{1}{s}$)

dN : Anzahl der radioaktiven Zerfälle dN pro Zeiteinheit dt

$N(t)$: Anzahl der unzerfallenen Atomkerne zum Zeitpunkt t

λ : Zerfallskonstante (SI-Einheit: $1 \frac{1}{s}$)

Eine Methode zur Bestimmung der Aktivität A einer γ -Quelle ist die graphische Ermittlung anhand des Verhaltens der Teilchenstromdichte n_γ bei Veränderung des Abstands r zwischen Quelle und Detektor. Die Teilchenstromdichte ist definiert als die Anzahl der γ -Quanten (gemessenen Impulse) Z pro bestrahlter Fläche F in der Zeit t . Das entspricht gerade der, durch das Zählrohrfenster der Fläche $F = 6,36 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$ gemessenen Zählrate N : $n_\gamma = \frac{Z/t}{F} = \frac{N}{F}$

Die Teilchenstromdichte n_γ verhält sich – analog zum Abstandsgesetz – proportional zu $\frac{1}{r^2}$:

$$\text{F(10)} \quad n_\gamma = \frac{m \cdot A}{4\pi \cdot r^2} = \frac{A}{4\pi} \cdot \frac{1}{r^2}$$

n_γ : Teilchenstromdichte (SI-Einheit: $1 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^2}$)

m : Anzahl, der bei einem Zerfall emittierten Quanten
(für ^{60}Co : $m = 2$, aufgrund der Totzeit gilt jedoch: $m = 1$)

A : Aktivität (SI-Einheit: $1 \text{ Bq} = 1 \frac{1}{\text{s}}$)

r : Abstand zwischen Quelle und Detektor (SI-Einheit: 1 m)

Hierbei ist m die Anzahl der bei einem Zerfall emittierten γ -Quanten. Für Ihre Kobaltquelle gilt $m = 2$. Allerdings wird aufgrund der Totzeit nur eines der beiden Quanten registriert, so dass wir in Gleichung F(10) $m = 1$ setzen können.

A5 Tragen Sie mit Hilfe Ihrer Messung und $n_\gamma = \frac{N}{F}$ die Teilchenstromdichte n_γ über $\frac{1}{r^2}$ auf Millimeterpapier auf. Es sollte sich eine Gerade ergeben; bestimmen Sie die Steigung aus dem Graphen. Ermitteln Sie dann **aus der soeben bestimmten Steigung und Gleichung F(10)** $n_\gamma = \frac{A}{4\pi} \cdot \frac{1}{r^2}$ die Aktivität A der Kobaltquelle.

Neben der charakteristischen Zerfallskonstante λ gibt es noch zwei weitere Größen, die mit ihr in direktem Zusammenhang stehen: die **mittlere Lebensdauer** τ und die **Halbwertszeit** $T_{1/2}$ (vgl. Abb. 6). Die Halbwertszeit ist die Zeit, in der die Hälfte aller anfänglich vorhandenen Atome der Substanz zerfällt. Es gilt der Zusammenhang:

$$\text{F(11)} \quad T_{1/2} = \tau \cdot \ln(2) = \frac{\ln(2)}{\lambda}$$

$T_{1/2}$: Halbwertszeit (SI-Einheit: 1 s)

τ : mittlere Lebensdauer (SI-Einheit: 1 s)

λ : Zerfallskonstante (SI-Einheit: $1 \frac{1}{\text{s}}$)

Die von Ihnen verwendeten Quellen haben folgende Halbwertszeiten:

^{241}Am : 432,2 Jahre

^{90}Sr : 28,6 Jahre

^{60}Co : 5,3 Jahre

Ausführliche Erläuterungen und Herleitungen zum Zerfallsgesetz, zur Zerfallskonstanten, Aktivität und Halbwertszeit finden Sie in *Tipler: Physik. 3. Aufl., Seite 1398f.* sowie in *Halliday, Resnick, Walker: Physik. Seite 1266 – 1270.*

4.4 Arten ionisierender Strahlung

Heute kennt man mehr als 270 stabile und 70 instabile (radioaktive) natürliche Nuklide. Mehr als 2000, davon die meisten instabil, können künstlich erzeugt werden. Dazu gehören auch die von Ihnen vermessenen Quellen ^{241}Am , ^{90}Sr und ^{60}Co . Instabile Nuklide können sich auf verschiedene Arten in andere Kerne umwandeln. In den vorangegangenen Versuchsteilen haben Sie verschiedene Arten ionisierender Strahlung bzw. Zerfallsarten und dessen Eigenschaften kennen gelernt.

α -Strahlung

Beim α -Zerfall wird vom Nuklid ein Heliumkern emittiert. Dieser besteht aus zwei Neutronen und zwei Protonen. Aus dem ursprünglichen Atomkern mit Z Protonen (Z : Kernladungszahl) und A Nukleonen (A : Massenzahl) entsteht ein Kern mit $Z - 2$ Protonen und $A - 4$ Nukleonen (= Protonen + Neutronen). Nach dieser Emission geht der Tochterkern selten direkt den Grundzustand über, meistens verbleibt der Tochterkern einige Zeit in einem angeregten Zustand. Beim Übergang in den Grundzustand sendet er Energie in Form von γ -Strahlung aus.

Wie Sie in Versuchsteil 3.7 und 3.8 untersucht haben, wird α -Strahlung bereits durch ein Blatt Papier nahezu komplett abgeschirmt und besitzt in Luft nur eine mittlere Reichweite von wenigen Zentimetern. Ursache hierfür ist das hohe Ionisationsvermögen aufgrund ihrer Größe und zweifach positiven Ladung. Die **mittlere Reichweite** in Luft gibt die Strecke an, den die Teilchen im Mittel „in Luft“ aufgrund ihrer Energie zurücklegen. α -Strahlung besitzt ein diskretes Energiespektrum, wobei die Energie zwischen 2 und 10 MeV liegt und charakteristisch für die entsprechende Probe ist.

Die mittlere Reichweite in Luft lässt sich mit folgender empirischen Formel berechnen. (Empirisch bedeutet, dass der Formel kein physikalisches Gesetz zugrunde liegt, aus dem man sie ableiten kann. Sie ist aus experimentellen Daten ermittelt. Des Weiteren stimmen die Einheiten beider Seiten der Gleichung nicht überein. Sie erhalten die mittlere Reichweite in cm, wenn Sie den Zahlenwert der Energie der α -Strahlung in MeV einsetzen.)

$$\text{F(12)} \quad R_m = 0,32 \cdot E^{\frac{3}{2}} \quad R_m: \text{ mittlere Reichweite in Luft in cm}$$

E : Energie der α -Strahlung in MeV

- A6 Berechnen Sie die mittlere Reichweite R_m der α -Strahlung in Luft für Ihre Americiumprobe; sie besitzt eine Energie von $E = 5,638$ MeV. Vergleichen Sie den Wert mit Ihrer Messung aus Versuchsteil 3.8.

Beim Durchgang durch Materie wirken α -Teilchen aufgrund ihrer großen Masse und Ladung stark ionisierend, sie werden kaum abgelenkt. Bis zu einer bestimmten Grenzdicke werden alle Teilchen durchgelassen, danach fällt die gemessene Zählrate – wie auch in der Luft – steil ab. Ihre Energie wird um einen Energiebetrag abgeschwächt, der in Längeneinheiten als **Luftäquivalent** angegeben wird. In Ihren Messungen haben Sie die gemessene mittlere Reichweite um diese versuchsbedingten Anteile korrigiert.

β -Strahlung

Als β -Zerfall bezeichnet man die Umwandlung eines Atomkerns durch Emission eines energiereichen negativen oder positiven Elektrons. Letzteres wird Positron genannt; es ist das Antiteilchen des Elektron und seine Merkmale (Masse, Größe...) stimmen mit denen des Elektrons bis auf das Vorzeichen der elektrischen Ladung überein. Es wird zwischen β^- - und β^+ -Strahlung unterschieden, in beiden Fällen wird zusätzlich zum Elektron bzw. Positron ein Antineutrino bzw. ein Neutrino, elektrisch neutrale Elementarteilchen, emittiert. Bei dem Elektron handelt es sich nicht um ein Elektron der Atomhülle. Sowohl das Antineutrino (Neutrino) als auch das Elektron (Positron) entstehen erst im Laufe der Kernumwandlung durch die Umwandlung eines Neutrons in ein Proton (Proton in ein Neutron). Bei diesem Prozess wird ein Elektron und ein Antineutrino (ein Positron und ein Neutrino) ausgesendet. Durch die Umwandlung von Neutron in Proton (Proton in Neutron) entsteht als Tochterkern ein Nuklid mit einer um 1 erhöhten Kernladungszahl: $Z + 1$ (um 1 verringerten Kernladungszahl $Z - 1$). Die Massenzahl A bleibt aufgrund der Umwandlung gleich.

Wie beim α -Zerfall entsteht beim β -Zerfall in den meisten Fällen ein Atomkern im angeregten Zustand, welches wiederum durch Aussendung von γ -Strahlung in den Grundzustand übergeht.

- A7 In Versuchsteil 3.5 haben Sie die Absorption von β^- -Strahlung untersucht. Im Folgenden werten Sie Ihre Messwerte analog zur Absorptionsmessung von γ -Strahlung aus. Tragen Sie dazu die wahren Zählraten N_w über der Absorberdicke x auf einfachlogarithmischem Papier auf. Diskutieren Sie, ob das exponentielle Schwächungsgesetz auch für β -Strahlung gilt!

.....

.....

.....

Typisch für β -Strahlung sind Energien von einigen MeV und eine Reichweite in Luft von einigen Dezimetern. Wie Sie in Versuchsteil 3.5 exemplarisch für die Strontiumprobe untersucht haben, wird β -Strahlung bereits durch Aluminiumplättchen mit einer Dicke von weniger als einem Millimeter deutlich reduziert und bereits bei wenigen Millimetern vollkommen abgeschirmt. Anders als bei der elektromagnetischen γ -Strahlung wird die Absorption der Elektronen und Positronen der β -Strahlung durch die Coulomb-Wechselwirkung (Kräfte zwischen zwei elektrischen Ladungen) beeinflusst.

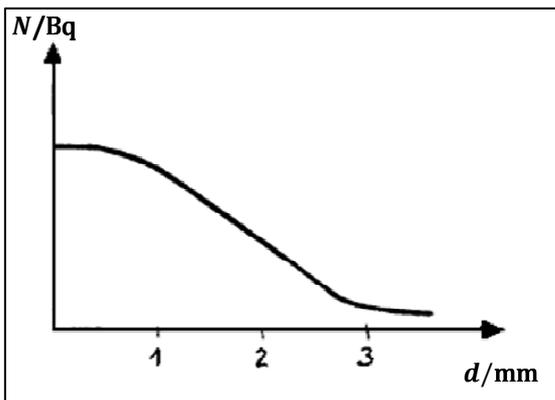


Abb. 8: Absorption monoenergetischer β -Strahlung in Aluminium

Dies führt dazu, dass neben den Energieverlusten durch Ionisation, die Teilchen stark abgelenkt werden und eine sogenannte Bremsstrahlung entsteht. Aus diesem Grund ist bei monoenergetischer β -Strahlung ein anderer Kurvenverlauf zu sehen, als bei γ -Strahlung (vgl. Kapitel 4.4).

Ihre Messungen haben Sie an einer Strontium-Strahlungsquelle vorgenommen. Natürliche β -Strahler besitzen eine Energieverteilung, wodurch bei der Absorption durch Aluminium ein annähernd exponentieller Verlauf beobachtet werden kann.

- A8 In Versuchsteil 3.6 haben Sie das Abstandsgesetz und die Reichweite von β^- -Strahlung untersucht. Tragen Sie die wahre Zählrate über dem korrigierten Abstand r' auf doppeltlogarithmischem Papier auf und ermitteln Sie die Steigung a .

$a = \dots\dots\dots$

- H Die Flächenquellenkorrektur für das β^- -Präparat beträgt $d_Q = 9 \text{ mm}$, der Abstand zwischen Quelle und Stiftvorderkante $d_p = 4 \text{ mm}$. Der Abstand vom Zählrohrfenster bis zur Vorderkante der Schutzkappe bleibt $d_k = 2 \text{ mm}$.

- A9 Können Sie das Abstandsgesetz bestätigen? Begründen Sie!

.....

.....

.....

γ -Strahlung

γ -Strahlung hat seine Ursache in einem vorangegangenen α - oder β -Zerfall (s. u.). In Versuchsteil 3.3 und 3.4 haben Sie eine Kobaltquelle untersucht. Kobalt zerfällt über einen β -Zerfall (s. o.) in Nickel. Erst danach geht der Tochterkern durch Emission zweier γ -Quanten (vgl. Kapitel 3.3) in einen energetisch günstigeren Zustand über. Die Kernladungszahl Z und Massenzahl A ändern sich dabei nicht.

A10 Welche Auswirkungen könnte die Kobaltzerfallsreihe auf die Abstands- und die Absorptionsmessung mit der Kobaltquelle haben? Wie können diese vermieden werden?

Weiterhin haben Sie die Reichweite sowie die Abschirmung von γ -Strahlung durch Blei untersucht. Einzelne γ -Quanten können theoretisch unendlich dicke Schichten durchdringen. Dabei wird jedoch die Wahrscheinlichkeit dafür mit größer werdender Absorberdicke immer kleiner. γ -Strahlung hat somit aufgrund von Absorption durch Moleküle in der Luft effektiv eine Reichweite von einigen Metern und lässt sich nur durch zentimeterdickes Blei abschirmen. Bei der Wechselwirkung von γ -Quanten mit Materie kann man 3 verschiedene Vorgänge unterscheiden:

Photoeffekt: Trifft ein γ -Quant auf ein Atom oder Molekül, so kann es ein oder mehrere Elektronen aus dessen Hülle herauslösen und es damit ionisieren. Dabei gibt es seine gesamte Energie an das Elektron ab. Dieses besitzt dann die Energie $E_e = E_\gamma - E_b$, wobei E_γ die Energie des γ -Quants und E_b die Bindungsenergie des Elektrons ist. Durch die hohe Energie der γ -Quanten werden großteils Elektronen aus unteren Schalen der Elektronenhülle herausgelöst. Um wiederum in den Grundzustand zurückzukehren, „rücken“ Elektronen äußerer Schalen nach.

Compton-Effekt: Beim Compton-Effekt löst ein γ -Quant ein Elektron heraus und ionisiert das dazugehörige Atom bzw. Molekül. Im Gegensatz zum Photoeffekt gibt das γ -Quant nur ein Bruchstück seiner Energie an das Atom oder Molekül ab. Dabei wird es gestreut, es ändert also seine Bewegungsrichtung und kann weitere Atome bzw. Moleküle auf gleiche Weise ionisieren. Dieser Effekt setzt sich fort, bis das γ -Quant durch Photoeffekt seine gesamte Energie abgibt und verschwindet.

Paarbildung: Bei der Paarbildung wird ein γ -Quant in ein Elektron und ein Positron, also in ein Teilchen-Antiteilchen-Paar, umgewandelt. Das γ -Quant benötigt dafür eine Mindestenergie von $E = 1,02$ MeV. Wird diese überschritten, wird der „Überschuss“ zu Bewegungsenergie des Teilchenpaares. Wiederum kann eine Ionisation durch die beiden entstandenen Teilchen stattfinden.

4.5 Schwächung von γ -Strahlung in Materie

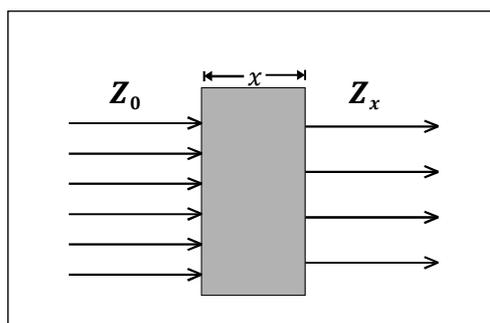


Abb. 9: Zum Schwächungsgesetz

Phänomenologisch wird die Schwächung durch das Schwächungsgesetz beschrieben. Es besagt, dass (bei einer festen Photonenenergie) durch eine bestimmte Schichtdicke x eines bestimmten Materials die Strahlung unabhängig von ihrer Ausgangsintensität Z_0 immer um den gleichen Faktor geschwächt wird. Der Quotient $\frac{Z_x}{Z_0}$ ist unabhängig von Z_0 (vgl. Abb. 9), er hängt also nur von der Schichtdicke x sowie vom verwendeten Material und der Energie der Strahlung ab. Der Schwächungskoeffizienten μ beschreibt die Material- und Energieabhängigkeit.

Mathematisch wird so ein Zusammenhang durch eine Exponentialfunktion, wie das Schwächungsgesetz, beschrieben:

$$F(13) \quad Z(x) = Z_0 \cdot \exp(-\mu \cdot x) = Z_0 \cdot e^{-\mu x}$$

$Z(x)$: Intensität nach einer Schichtdicke x
 Z_0 : Ausgangsintensität
 μ : Schwächungskoeffizient (SI-Einheit: $1 \frac{1}{m}$)

Schwächt eine Schicht die Intensität der γ -Strahlung um die Hälfte (50 %), so bezeichnet man die Dicke dieser Schicht als Halbwertsschichtdicke $d_{1/2}$. Jede weitere Halbwertsschichtdicke reduziert die verbleibende Intensität wieder um die Hälfte (vgl. Abb. 1a). Das heißt eine Schicht der Dicke $2 \cdot d_{1/2}$ (aus dem gleichen Material) reduziert die Intensität (der gleichen Strahlung) auf ein Viertel ($= \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2}$); eine Schicht der Dicke $3 \cdot d_{1/2}$ reduziert sie auf ein Achtel ($= \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2}$).

Die Halbwertsschichtdicke steht mit dem Schwächungskoeffizienten im Zusammenhang $d_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}$: Je größer der Schwächungskoeffizient, desto kleiner ist die Halbwertsschichtdicke.

A11 Bestimmen Sie die Halbwertsschichtdicke für Blei für die Kobaltquelle. Vergleichen Sie den Wert mit Ihren Messergebnissen, wodurch können Abweichungen bedingt sein?

Für die Energie- und Materialabhängigkeit der Schwächung (und damit des Schwächungskoeffizienten) gelten die folgenden Zusammenhänge:

Energieabhängigkeit der Schwächung: Je höher die Energie der γ -Strahlung, desto geringer ist der Schwächungskoeffizient. Niederenergetische ("weiche") Strahlung wird also wesentlich stärker geschwächt als hochenergetische ("harte") Strahlung. Erstere verursacht aufgrund der stärkeren Absorption im Gewebe eine größere Strahlenbelastung (vgl. Kapitel 5.1). Das führt bei Strahlung verschiedener Energien, wie beispielsweise die Röntgenstrahlung in der medizinischen Anwendung, zur sogenannten Aufhärtung der Strahlung: der niederenergetische Anteil wird bereits in den obersten Gewebeschichten (Haut) stärker geschwächt als der hochenergetische, so dass die Strahlung, welche die tiefer liegenden Gewebeschichten erreicht, im Mittel hochenergetischer ("aufgehärtet") ist. Diese Aufhärtung kann man statt durch die obersten Gewebeschichten auch durch dünne Aluminiumfilter erreichen. So wird die Strahlenbelastung der obersten Gewebeschichten durch niederenergetische Strahlung reduziert.

Materialabhängigkeit der Schwächung: Diesen Zusammenhang haben Sie in Versuchsteil 3.3 an der Kobaltquelle qualitativ untersucht. Es gilt: Je höher die Kernladungszahl eines Elements ist, desto größer ist der Schwächungskoeffizient. Bei Materialien, die aus Verbindungen mehrerer Elemente unterschiedlicher Kernladungszahlen bestehen, tragen alle Elemente gemäß ihrer Kernladungszahl zur Schwächung bei. Dabei hängt der Beitrag von der Dichte (Masse pro Volumen) ab, mit der dieses Element in dem Material vertreten ist. Bei Photonenenergien unterhalb etwa 50 keV ist die Abhängigkeit des Schwächungskoeffizienten von den Kernladungszahlen der Elemente sehr stark (μ ist proportional zur vierten Potenz der Kernladungszahl). Gleichzeitig ist mit niedrigen Photonenenergien eine hohe Strahlenbelastung verbunden. Bei höheren Photonenenergien (über etwa 50 keV) ist die Abhängigkeit wesentlich schwächer (μ ist nur noch proportional zur Kernladungszahl).

4.6 Dosimetrie

Absorption von radioaktiver Strahlung im Gewebe führt im Wesentlichen zur Ionisation der Moleküle im Gewebe. Die Strahlung wird aus diesem Grund auch als ionisierende Strahlung bezeichnet. Die ionisierende Wirkung der Strahlung wird beispielsweise in der Strahlentherapie ausgenutzt, um Tumorgewebe zu schädigen. Sie muss daher gezielt zu dosieren sein. Grundlage für eine quantitative Angabe der Strahlenwirkung ist die Messung der Ionendosis (in einem bestimmten Material). Die Ionendosis J ist die pro durchstrahlte Masse m erzeugte Ladung (eines Vorzeichens):

$$F(14) \quad J = \frac{Q}{m}$$

J : Ionendosis (SI-Einheit: $1 \frac{C}{kg}$)

m : durchstrahlte Masse des Absorbers (SI-Einheit: 1 kg)

Q : Betrag der durch Ionisation erzeugten Ladung eines Vorzeichens (SI-Einheit: 1 C = 1 Coulomb)

Die gemessene Ionendosis sagt noch nichts aus über die schädigende Wirkung der Strahlung auf biologisches Gewebe. Dazu muss aus der Ionendosis erst unter Berücksichtigung der Art des Gewebes sowie der Strahlung die Äquivalentdosis berechnet werden. Im Folgenden sollen Sie die Definitionen der weiteren, für die Dosimetrie relevanten Größen, kennen lernen:

Die Ionendosis J gibt an, wie viel Ladung (eines Vorzeichens) pro Absorbermasse m erzeugt wird. Dieser Wert ist abhängig davon, auf welches Material und wie lange die Strahlung einwirkt. Die Energiedosis D gibt an, wie viel Energie pro Absorbermasse von der Strahlung auf den Absorber übertragen wird:

$$F(15) \quad D = \frac{E}{m}$$

D : Energiedosis (SI-Einheit: $1 \text{ Gy} = 1 \text{ Gray} = 1 \frac{J}{kg}$)

E : auf einen Absorber der Masse m übertragene Energie (SI-Einheit: 1 J)

Da eine direkte Messung der Energiedosis oft nicht möglich ist, wird diese in der Regel aus der gemessenen Ionendosis berechnet. Bei jeder Ionisation wird im Mittel ein bestimmter Energiebetrag auf die Materie übertragen. Kennt man diesen, so kann man aus der Ionendosis die Energiedosis berechnen: Für Luft ist der mittlere Energieübertrag 33,85 Joule pro Coulomb erzeugter Ladung (eines Vorzeichens). Die Umrechnung von "Ionendosis in Luft" auf "Energiedosis in Luft" besteht in der Multiplikation mit diesem Faktor.

$$F(16) \quad D_{\text{Luft}} = J_{\text{Luft}} \cdot 33,85 \frac{\text{Gy}}{\text{C/kg}}$$

D_{Luft} : Energiedosis in Luft (SI-Einheit: $1 \text{ Gy} = 1 \frac{J}{kg}$)

J_{Luft} : Ionendosis in Luft (SI-Einheit: $1 \frac{C}{kg}$)

Um die Energiedosis in anderen Materialien zu berechnen, benötigt man den Dosisumrechnungsfaktor für das entsprechende Material:

$$F(17) \quad D_{\text{Material } X} = f_X \cdot D_{\text{Luft}}$$

$D_{\text{Material } X}$: Energiedosis im Material X (SI-Einheit: $1 \text{ Gy} = 1 \frac{J}{kg}$)

f_X : Dosisumrechnungsfaktor für Material X (dimensionslos)

Für Muskelgewebe beträgt der Dosisumrechnungsfaktor z. B. $f \approx 1,1$. Für andere Gewebe, z. B. Knochen oder Fett, hängt er außerdem noch von der Energie der Strahlung ab.

Aus der Energiedosis ergibt sich die Äquivalentdosis durch Multiplikation mit dem Bewertungs- bzw. Gewichtungsfaktor q . Der Gewichtungsfaktor berücksichtigt die unterschiedliche biologische Wirkung verschiedener Strahlenarten. Für γ -Strahlung ist er $q = 1$ (definitionsgemäß). α -Strahlung besitzt eine zwanzigfach höhere biologische Wirksamkeit als γ -Strahlung, d. h., der Bewertungsfaktor ist $q = 20$. Die Äquivalentdosis H gibt die biologische Wirksamkeit der Strahlung an.

$$F(18) \quad H = q \cdot D$$

H : Äquivalentdosis (SI-Einheit: $1 \text{ Sievert} = 1 \text{ Sv} = 1 \frac{J}{kg}$)

q : Gewichtungsfaktor (dimensionslos)

D : Energiedosis (SI-Einheit: $1 \text{ Gy} = 1 \text{ Gray} = 1 \frac{J}{kg}$)

Die Einheit der Äquivalentdosis („Sievert“) ist nur eine andere Bezeichnung für die gleiche physikalische Einheit, wie die der Energiedosis („Gray“): $\frac{1}{\text{kg}}$. Der Bezeichnungswechsel soll die Unterscheidung zwischen gewichteter bzw. nicht gewichteter Größe vereinfachen. Die in Kapitel 5.2 angegebenen Äquivalentdosen beziehen sich jeweils auf ein Jahr und werden in der Einheit Sievert (bzw. mSv = Millisievert) angegeben.

5. Transfer und interdisziplinäre Anknüpfungspunkte

5.1 Biologische Strahlenwirkung

Die biologische Wirkung von Strahlung aus radioaktiven Quellen beruht auf der Ionisation von Molekülen des Gewebes. Dieser Effekt wird quantitativ beschrieben durch die Ionendosis. Dass der Effekt der Erwärmung des Gewebes durch die Absorption der Strahlung (bzw. Strahlungsenergie) demgegenüber zu vernachlässigen ist, zeigt eine einfache Abschätzung: Der primäre, physikalische Effekt der Ionisation kann weitere chemische und biologische Prozesse auslösen: die Entstehung veränderter Moleküle oder Molekülstrukturen und die Schädigung oder Zerstörung von Zellen. So kann z. B. Zellwasser (H_2O) durch Ionisation in Wasserstoffperoxid (H_2O_2), ein starkes Zellgift, umgewandelt werden.

Der menschliche Körper besitzt bis zu einem gewissen Grad die Fähigkeit, solche Störungen zu kompensieren, indem die geschädigten oder zerstörten Zellen repariert bzw. abgebaut werden. Darüber hinaus kommt es zu Strahlenschäden, wobei man zwischen somatischen und genetischen Schäden unterscheidet: Somatische Schäden betreffen nur den bestrahlten Organismus, genetische Schäden betreffen die Keimzellen und treten erst bei nachfolgenden Generationen zu Tage. Die Reparaturfähigkeit ist dabei von Gewebe zu Gewebe unterschiedlich: Während z. B. das blutbildende System eine sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber ionisierender Strahlung besitzt, ist diese bei Muskeln und Knochen sehr gering. Die extrem geringe Reparaturfähigkeit von Tumorgewebe gegenüber gesundem Gewebe wird in der Strahlentherapie gezielt ausgenutzt.

Dosimetrie (d. h. "Dosismessung") dient der quantitativen Beschreibung der Strahlenwirkung, die durch ionisierende Strahlung in biologischem Gewebe hervorgerufen wird. Diese ist insbesondere vor therapeutischem Einsatz der Strahlung sehr genau für die verschiedenen betroffenen Gewebetypen zu berechnen, damit Energie und Intensität der Strahlung geeignet "dosierte" werden können. In *Tipler: Physik. 3. Aufl., Seite 1417 f.* erhalten Sie einen guten Überblick über die Dosisgrößen und biologische Strahlenwirkung.

5.2 Medizinische Anwendung

Radioaktive Strahlung findet häufig Anwendung in der Krebstherapie. Ziel ist es dabei, die Tumorzellen zum Zeitpunkt ihrer Teilung zu zerstören. Im Gegensatz zu gesunden Zellen, haben Tumorzellen weniger ausgebildete Fähigkeiten, zerstörte Zellen zu reparieren, so dass diese im günstigsten Fall absterben.

Besonders erwähnenswert aufgrund seiner Wirksamkeit und historischer Relevanz ist hier das Gammatron, auch Kobaltkanone oder Telekobaltanlage genannt. Der Name Kobaltkanone lässt sich auf verschiedene Bohrungen zurückführen, in denen Kobalt (^{60}Co) eingelagert ist und durch die präzisen, verschließbaren Bohrungen die Strahlung gezielt auf Tumorgewebe gerichtet werden kann. Der Raum, in denen sich das Kobalt befindet, ist mit Blei abgeschirmt. Die Bohrungen sind meist fächerartig angeordnet, es existieren aber auch Geräte mit einzelnen Bohrungen, die durch einen Schwenkarm fächerartig bewegt werden. In einem Spiegel-Artikel aus dem Jahr 1958 werden die Funktionsweise und den Einsatz der ersten Kobaltkanonen in deutschen Krankenhäusern wie folgt beschrieben:

„An einem Steuerpult im Nachbarraum, hinter der dicken Schutzwand, betätigt ein Mediziner den Schalter, der die Mündung der "Kanone" öffnet, und minutenlang prasselt durch den Schußkanal des Geräts energiereiche Strahlung auf die Krebsgeschwulst des Patienten. Ähnlich wie bei der Röntgen-Tiefenbestrahlung von Krebsherden pendelt der strahlenspeiende Schußkanal langsam hin und her, damit verschiedene Hautpartien abwechselnd getroffen werden, die Geschwulst im Körperinneren aber unter ständigem Beschuss bleibt. So werden Strahlenschäden auf der Haut vermieden und die gesunden Körpergewebe vor und hinter dem Krebsherd geschont. (...) Die ersten Ergebnisse der Bestrahlungen - es wurden vorwiegend tiefsitzende Krebsgeschwulste behandelt - mit dem Gammatron sind ermutigend. Von Heilerfolgen wollen die Mediziner allerdings noch nicht sprechen, weil es üblich ist, eine günstig verlaufende Behandlung erst fünf Jahre nach Behandlungsbeginn als Heilung zu bezeichnen. Immerhin konnten die Ärzte aber bereits von beachtli-

chen Primär-Erfolgen berichten - die Geschwulste begannen nach dem Beschuß durch die "Kobalt-Kanone" zu schrumpfen und verschwanden schließlich.“ (Quelle: Der Spiegel 51/1958¹)

Mittlerweile wird das Gammatron häufig durch Linearbeschleuniger ersetzt. Diese haben den Vorteil, dass sie hoch-energetische Photonenstrahlung (Röntgenstrahlung) oder Elektronenstrahlung unterschiedlicher Energien erzeugen können, wodurch die Eindringtiefe variabel gewählt werden kann und das umliegende Gewebe geschützt wird. Weitere Informationen zum Einsatz ionisierender Strahlung zur Krebstherapie finden Sie beispielsweise auf der Internetpräsenz der Deutschen Krebsgesellschaft e.V.²

5.3 Umweltradioaktivität

Auf der Internetpräsenz des Niedersächsischen Ministeriums für Umwelt und Klimaschutz³ heißt es zum Thema „Allgemeine Überwachung der Umweltradioaktivität“:

„Radioaktivität ist in unserer Umwelt allgegenwärtig. Radioaktive Stoffe sind zum einen natürlichen Ursprungs - natürliche Radionuklide sind in der Erdkruste vorhanden -, zum anderen wird Radioaktivität künstlich erzeugt und freigesetzt, z. B. durch oberirdische Kernwaffenversuche oder den Betrieb von Kernkraftwerken. Auch Veränderungen der Umwelt des Menschen durch technische Entwicklungen können eine unbeabsichtigte Anreicherung natürlicher radioaktiver Stoffe zur Folge haben und damit zu einer zivilisatorisch bedingten Erhöhung der natürlichen Radioaktivität in unmittelbarer Umgebung von Menschen führen. In diesem Zusammenhang ist insbesondere die Freisetzung von Radon in Gebäuden als wesentlich anzusehen. Ferner können radioaktive Stoffe auch durch Anwendung in Medizin, Forschung und Technik in die Umwelt gelangen.“

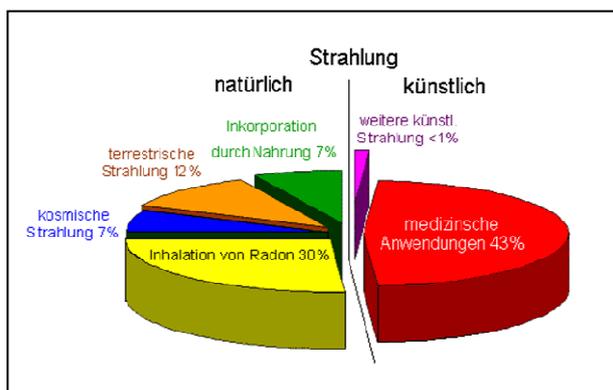


Abb. 10: Anteile an der mittleren jährlichen Strahlenbelastung

Abb. 10 veranschaulicht die prozentualen Anteile verschiedener Bereiche zur mittleren jährlichen Strahlenbelastung⁴ der BRD. Insgesamt tritt die Belastung durch medizinische Anwendungen, wie beispielsweise Therapien unter Verwendung ionisierender Strahlung und radioaktiver Substanzen, besonders hervor. Die Röntgendiagnostik macht hier den Hauptanteil aus.

Weitere künstliche Strahlung umfasst zum einen den Fallout des Tschernobylunfalls ($\approx 0,02$ mSv) sowie oberirdischer Kernwaffenversuche zwischen 1956 und 1962 ($< 0,01$ mSv). zum anderen aber auch berufliche Strahlenexposition und kerntechnische Anlagen (jeweils $< 0,01$ mSv).

Insgesamt ist die mittlere jährliche Strahlenbelastung durch künstliche Strahlung mit ungefähr 2 mSv etwas geringer als die der natürlichen und „zivilisatorisch veränderten natürlichen“. Letztere umfassen das Einatmen von Radon und seiner Folgeprodukte mit Atemluft, kosmische wie terrestrische Strahlung und Inkorporation durch Nahrung. Radon ist nicht nur in Baumaterialien, sondern auch in Gesteinen und im Erdboden enthalten. (Quelle: <http://leifi.physik.uni-muenchen.de>)

Im Strahlenschutzvorsorgegesetz (StrVG) ist festgelegt, dass die radioaktive Belastung der Umwelt stetig überwacht werden muss. Dafür stellt die Bundesrepublik Messprogramme zur Verfügung. Diese wurden in Niedersachsen zusätzlich durch eigene ergänzt, wobei dem *Niedersächsischen Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Verbraucherschutz und Landesentwicklung* die Überwachung von Lebensmitteln sowie sogenannte Bioindikatoren, wie Wildpilze und Fichtennadeln, dem *Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten und Naturschutz* die wasserrechtliche Radioaktivitätsmessung und dem *Niedersächsischen Ministerium für Umwelt und Klimaschutz* die Überwachung kerntechnischer Anlagen, obliegt. Alle gesammelten Daten werden an die Bundesbehörden weitergeleitet und werden dort zu einer aktuellen Lagedarstellung des Bundes weiterverarbeitet.

¹ URL: <http://www.spiegel.de/spiegel/print/d-42621051.html> (09.03.2011)

² URL: http://www.krebsgesellschaft.de/db_strahlentherapie,83285.html (09.03.2011)

³ URL: http://www.niedersachsen.de/master/C744070_N11476_L20_D0.html (09.03.2011)

⁴ Bei Messung der Umweltradioaktivität wird im Allgemeinen nicht zwischen radioaktiver Strahlung und Röntgenstrahlung unterschieden. Die angegebenen Strahlenexpositionen beziehen sich auf die Belastung durch ionisierende Strahlung.

5.4 Gentechnisch veränderte Organismen

Der Einsatz gentechnischer Verfahren an Lebensmitteln wird kontrovers diskutiert. Werden beispielsweise Keimlinge ionisierender Strahlung ausgesetzt, so hat eine schwache Bestrahlung eine positive Wirkung, eine starke Bestrahlung eine sehr negative Wirkung. Vor allem γ - und β -Strahlung wird zur Verlängerung der Haltbarkeit und Verbesserung der hygienischen Qualität von Lebensmitteln, zur Verhinderung der Keimung von Gemüse und Kartoffeln, zum Abtöten von Insekten in Getreide u.v.m. eingesetzt.

Diesem Verfahren stehen jedoch andere Konservierungsverfahren gegenüber, so dass die Notwendigkeit ionisierender Strahlung hinterfragt wird. In der BRD existiert ein Verbot, Lebensmittel zu bestrahlen und bestrahlte Lebensmittel in den Umlauf zu bringen. Lediglich die Bestrahlung von Gewürzkräutern ist durch die EU geregelt und so dürfen diese auch in Deutschland in Umlauf gebracht werden.

Bei der Bestrahlung mit ionisierender Strahlung werden durch das Auftreten chemischer Veränderungen in den Lebensmitteln bestehende Verbindungen gespalten und – ebenso wie bei anderen Konservierungsverfahren – neue Verbindungen entstehen, die nach heutigem Wissen keine negativen gesundheitlichen Wirkungen zur Folge haben. Jedoch sind bestrahlte Lebensmittel von unbestrahlten Lebensmitteln optisch nicht zu unterscheiden. Eine Bestrahlung mit reiner γ -Strahlung kann die Zerstörung großer Moleküle, darunter die DNA, zur Folge haben. Hohe Dosisleistung töten Insekten sowie Salmonellen in Getreide und Fleisch.

In der Pflanzenzucht wird in jüngster Zeit immer wieder über den Einsatz gezielter Genmanipulation gesprochen. Durch Züchtung haben sich im Laufe der Jahre durch Umsiedlung und Kreuzung verschiedener Pflanzen verschiedene zufällige Mutationen entwickelt. Durch Anbau besonders ertragreicher und schädlingsarmer Pflanzen sterben die „Urpflanzen“ nach und nach aus. Eine Beschleunigung dieses Prozesses erreichte man mit der (in geeigneten Dosierungen) Bestrahlung z. B. von Pflanzensamen, welche eine Mutation der Erbsubstanz nach sich zieht. Erhaltenswerte Mutationen werden daraufhin weitergezüchtet; so erreicht man nicht nur eine Zunahme des Ertrags, sondern auch eine Reduktion der verwendeten Schädlingsbekämpfungsmittel und damit eine geringere Umweltbelastung. Genmanipulation, wie sie oben beschrieben ist, wurde jahrelang betrieben, ohne dass öffentlich Kritik geübt wurde. Erst die gezielte Veränderung der DNA hat eine öffentliche Diskussion erzeugt.

Seit April 2004 müssen EU-weit alle Lebensmittel und Futtermittel, die gentechnisch veränderte Organismen enthalten, gekennzeichnet werden. Dabei bedeutet *gentechnisch verändert* hier explizit, dass der Organismus eine veränderte DNA besitzt, wie sie unter natürlichen Bedingungen, wie durch Rekombination und Kreuzung, nicht möglich ist. (Quelle: Niedersächsisches Landesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit⁵)

5.5 Biophysik: radioaktive Tracermethoden

Tracermethoden in der Biophysik können unterschiedlicher Natur sein: chemische Markierungen, Fluoreszenzmarkierungen, radioaktive Markierungen u. a.. Zum Ziel haben alle gemeinsam die Untersuchung von Organisationsstrukturen oder dem dynamischen Verhalten von biologischen Systemen. Hierbei haben sich die radioaktiven Tracermethoden durchgesetzt. Zum einen können radioaktive Substanzen auch in sehr kleinen Mengen verhältnismäßig einfach quantitativ bestimmt werden. Zum anderen unterscheiden sich radioaktive Isotope bzw. radioaktiv markierte Moleküle organischer Substanzen weder chemisch noch biologisch von den nicht-markierten im System befindlichen Molekülen, da die Markierung keinen Einfluss auf die Elektronen – welche hauptsächlich die chemischen Eigenschaften eines Atoms bzw. eines Moleküls bestimmen – des Biomoleküls hat. Der Nachweis radioaktiver Substanzen erfolgt dabei stets über die Wechselwirkungsprozesse der jeweiligen Strahlung mit Materie.

Melvin Calvin erforschte bereits kurz nach dem 2. Weltkrieg unter Verwendung des radioaktiven Tracers ¹⁴C die Photosynthese. Für die Erklärung ihres genauen Ablaufs erhielt er 1961 den Nobelpreis für Chemie. Als Beispiele für den heutigen Einsatz radioaktiver Tracermethoden in der Biophysik sind Stoffwechseluntersuchungen, Organfunktionsuntersuchungen sowie Untersuchungen zum Transport von Molekülen zu nennen. Die dafür benötigten radioaktiven Nuklide kommen in der Natur – wenn überhaupt – nur in sehr geringen Mengen vor und werden daher zumeist künstlich hergestellt. Dies erfolgt z. B. durch Neutronenbeschuss im Kernreaktor, Beschuss mit hochenergetischen Teilchen im Teilchenbeschleuniger oder Ausnutzung von Zerfallsreihen.

⁵ URL: http://www.laves.niedersachsen.de/master/C3551418_N7335694_L20_D0_I826.html

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1, 2, 7: eigene Darstellung

Abb. 3: Physikalisches Praktikum für Biologen: *Versuch R Messungen zur Radioaktivität.*, Institut Für Angewandte Physik, TU Braunschweig

Abb. 4, 8: veränderte Darstellung nach: *Reichweite von β -Strahlen.* Justus-Liebig-Universität Gießen
URL: <http://pcweb.physik.uni-giessen.de/schulpraktikum/Betazerfall.PDF>

Abb. 5: *Dorn Bader. Physik Sek II. Gymnasium Gesamtband.* Schroedel Verlag 2000

Abb. 6: veränderte Darstellung nach: *Physik Oberstufe. Gesamtband.* Cornelsen Verlag 2008

Abb. 9: Physikalisches Praktikum für Biologen: *B 61 Röntgenstrahlung.* Physikalische Grundpraktika, Heinrich Heine Universität Düsseldorf.

Abb. 10: *Strahlenbelastung des Menschen.* Leifi.

URL: http://www.leifiphysik.de/web_ph12/umwelt_technik/11belast/belast.htm (09.03.2011)