



A26 - Onlineversuch zur Ionisierenden Strahlung

Nebenfachanleitung, Version: 15. Mai 2024

Name:

Datum:

Versuchsziel

Untersuchung physikalischer Eigenschaften von ionisierender Strahlung

Themen zur Vorbereitung

Aufbau eines Atomkerns, Arten ionisierender Strahlung, Aktivität, Energiedosis, Äquivalenzdosis, Zerfallsgesetz, Abstandsgesetz, Abschirmung, Funktionsweise eines Geiger-Müller-Zählrohrs, Maßnahmen zum Eigenschutz

Messaufgaben

1. **Abstandsgesetz** Messen Sie mit einem Geiger-Müller-Zählrohr die Impulszahlen N der Hintergrundstrahlung sowie eines radioaktiven ^{137}Cs -Präparates in Abständen von $r = 10 - 55$ cm in Schrittweiten von $\Delta r = 5$ cm unter Verwendung der in Abschnitt 3.1 vorgegebenen Zeitintervalle und weiteren Hinweise.
2. **Abschirmung** Messen Sie mit einem Geiger-Müller-Zählrohr die Impulszahlen eines radioaktiven ^{137}Cs -Präparates, welches nicht abgeschirmt und anschließend durch Kupfer, Blei und Eisen unterschiedlicher Materialdicke d abgeschwächt wird. Beachten Sie die Hinweise zur Durchführung in Abschnitt 3.2.

Auswertung

- **Hintergrundzählrate** Ermitteln Sie die Hintergrundzählrate R_U .
- **Abstand** Berechnen Sie die Zählraten $R(r) = N(r)/\Delta t$ des Geiger-Müller-Zählrohrs für das radioaktive Präparat bei verschiedenen Abständen zwischen Probe und Detektor. Korrigieren Sie diese Rate, indem sie die Hintergrundzählrate R_U abziehen und tragen Sie die korrigierte Impulszählrate $R_{\text{korr}}(r) = R(r) - R_U$ über den Abstand r auf. Welcher funktionale Zusammenhang ergibt sich?
- **Abschirmung** Berechnen Sie analog zur vorherigen Aufgabe die Impulszählrate $R(d)$ sowie die korrigierte Impulszählrate $R_{\text{korr}}(d)$ in Abhängigkeit von der Schichtdicke d des abschirmenden Materials. Normieren Sie die korrigierte Zählrate auf jenen Wert ohne Abschirmung $R_{\text{rel}}(d) = R_{\text{korr}}(d)/R_{\text{korr}}(d = 0)$ und tragen Sie den Logarithmus dieses Verhältnisses $\ln(R_{\text{rel}}(d))$ über die Schichtdicke auf d auf. Bestimmen Sie die Halbwertsdicke der Abschirmungsmaterialien über den Schnittpunkt der Funktion mit dem y-Wert $\ln(R_{\text{rel}}(d)) = \ln(0,5) = -0,69$. Diskutieren Sie die ermittelten Halbwertsdicken unterschiedlicher Materialien.

Im folgenden sind die einzelnen Schritte der Berechnungen für die Abschirmungsmessung noch einmal aufgeführt. Verdeutlichen Sie sich den Zweck eines jeden Schrittes und dokumentieren Sie die Materialdicken, Messzeiten, gemessenen Impulszahlen $N(d)$ sowie die berechneten Größen für jedes betrachtete Element übersichtlich in einer Tabelle.

1. Berechnung der Impulszählrate $R(d) = N(d)/\Delta t$
2. Korrektur der Impulszählrate $R_{\text{korr}}(d) = R(d) - R_U$
3. Normierung der Impulszählrate $R_{\text{rel}}(d) = R_{\text{korr}}(d)/R_{\text{korr}}(d = 0)$
4. Bildung des Logarithmus der normierten Impulszählrate $\ln(R_{\text{rel}}(d))$

1 Grundlagen

Der Mensch ist ständig von Strahlung umgeben, welche sich als elektromagnetische Welle oder als Teilchenstrom durch Raum und Materie ausbreitet. Ist die Energie der Strahlung so hoch, dass sie bei der Durchdringung von Stoffen an Atomen und Molekülen Ionisationsvorgänge auslöst, spricht man von ionisierender Strahlung.

Alle biologischen Reaktionen auf ionisierende Strahlung sind auf die gleichen Grundvorgänge der Ionisation und Anregung von Atomen und Molekülen zurückzuführen. Durch diese Prozesse kann der Stoffwechsel der Zelle gestört werden, wodurch es zu funktionellen und morphologischen Veränderungen kommen kann, an deren Ende die biologisch fassbare Strahlenwirkung steht. Diese ist unter anderem abhängig von den Eigenschaften des bestrahlten Gewebes, der Strahlungsart und der absorbierten Energie [1].

Der Mensch ist durch Quellen in der Medizin, Naturwissenschaft und Technik neben der natürlichen auch einer zivilisatorischen Strahlenexposition ausgesetzt. Es gilt daher stets die Grundregeln des praktischen Strahlenschutzes zu beachten:

- maximalen Abstand zur Strahlungsquelle,
- minimale Aufenthaltsdauer,
- angepasste Abschirmung.

1.1 Nuklide

Der Begriff Nuklid ist der Fachausdruck für einen Atomkern, welcher sich aus Protonen und Neutronen zusammensetzt. Eine typische Schreibweise eines beliebigen chemischen Elementes X ist

$$\begin{matrix} \text{Massenzahl} \\ \text{Ordnungszahl} \end{matrix} X, \quad (1)$$

wobei die Massenzahl der Summe aus der Protonenzahl (auch Kernladungs- oder Ordnungszahl genannt) und der Neutronenzahl entspricht.

Bei fester Ordnungszahl können Nuklide unterschiedliche Anzahl von Neutronen haben, sogenannte Isotope. Atomkerne bishin zum Element Wismut haben eine bestimmte Anzahl

von Neutronen, bei denen sie stabil sind. Isotope mit mehr oder weniger Neutronen (Radionuklide) sind instabil und zerfallen in stabilere Kerne. Für Elemente mit Ordnungszahlen größer als 83, gibt es keine stabilen Nuklide. Auf einer Nuklidkarte, als Erweiterung des Periodensystems der Elemente, werden Atomkerne als Funktion ihrer Neutronen- und Protonenzahl aufgetragen. Die farbige Codierung der Karte zeigt die Stabilität (schwarz) bzw. die Zerfallsart instabiler Nuklide an (Abb. 1).

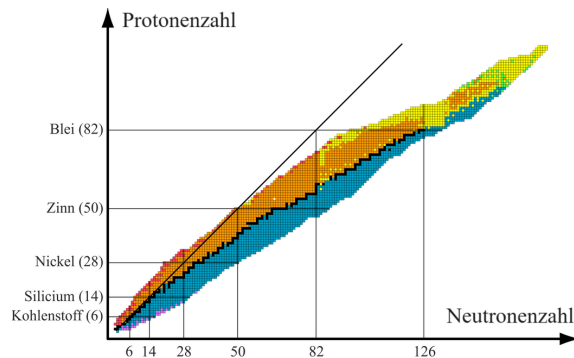


Abb. 1: Nuklidkarte bekannter Isotope. Schwarze Punkte kennzeichnen stabile Atomkerne. Farbige Punkte unterscheiden verschiedene Zerfallsarten (u.a. gelb - Alpha-Zerfall, blau - β^- -Zerfall, orange - β^+ -Zerfall) [2].

1.2 Strahlungsarten

1.2.1 Alphastrahlung

Ein α -Zerfall findet statt, indem ein instabiles Nuklid ein Fragment seines Kerns ausstößt, welches die beim Zerfall frei werdende Energie durch seine Bewegungsenergie davonträgt. Die Austrittsgeschwindigkeit aus dem Kern liegen dabei zwischen 15000 km/s und 20000 km/s.

Das Fragment, identisch mit dem Kern des ${}^4\text{He}$ -Atoms, besteht aus zwei Protonen und zwei Neutronen, wodurch sich die Massenzahl des ursprünglichen Nuklids um 4 Einheiten verringert, die Kernladungszahl um 2. Diese sogenannten Alphateilchen sind aufgrund der beiden Protonen, die sie enthalten, zweifach positiv geladen. Eine beispielhafte Reaktion ist gegeben durch ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He}$.

Nach dem Ausstoß des Alphateilchens verbleibt der Atomkern unter Umständen in einem angeregten Zustand. Der Übergang in den Grund-

zustand ist dann gegebenenfalls mit dem Ausstrahlen von Gammastrahlen verbunden.

1.2.2 Betastrahlung

Betastrahlung ist ebenfalls eine Teilchenstrahlung. Nuklide mit einem Überschuss an Neutronen zerfallen über den β^- -Prozess. Dabei wandelt sich ein Neutron des Kerns in ein Proton um und sendet dabei ein Elektron sowie ein Elektron-Antineutrino aus. Da sich nach dem Zerfallsprozess ein Neutron weniger, aber ein Proton mehr im Kern befindet, bleibt die Massenzahl unverändert, während sich die Kernladungszahl um 1 erhöht. Zum Beispiel: ${}^{40}_{19}\text{K} \rightarrow {}^{40}_{20}\text{Ca} + e^- + \bar{\nu}$.

Der β^+ -Zerfall tritt bei protonenreichen Nukliden auf. Hierbei wird ein Proton des Kerns in ein Neutron umgewandelt. Dabei entsteht zusammen mit einem Positron ein Elektron-Neutrino. Wie beim β^- -Zerfall bleibt die Massenzahl unverändert, jedoch verringert sich die Kernladungszahl um 1. Zum Beispiel: ${}^{30}_{15}\text{P} \rightarrow {}^{30}_{14}\text{Si} + e^+ + \nu$.

1.2.3 Gamma- und Röntgenstrahlung

Alle spontanen Kernzerfälle laufen ab, weil der Endzustand für den Kern energetisch günstiger ist als der Anfangszustand. Das bedeutet aber nicht, dass durch den Zerfall immer sofort der energetische Grundzustand erreicht wird. Zumeist müssen sich die Kernbausteine nach einem Zerfall neu anordnen. Dabei geben sie Energie in Form von γ -Strahlung ab. Der Energietransport erfolgt in Form von elektromagnetischen Wellen. Gammastrahlung kann anhand ihrer Wellenlänge und ihrer Frequenz beschrieben werden. Eine kurze Wellenlänge (also hohe Frequenz) zeugt von einer energiereichen Strahlung. Eine große Wellenlänge (also niedrige Frequenz) entspricht einer geringeren Energie [3].

Auch Röntgenstrahlung ist eine elektromagnetische Welle, dessen Energiebereich sich mit dem der Gammastrahlung teilweise überlappt. Bei gleicher Energie ist die biologische Wirkung wie auch Abschirmung beider Strahlungsarten vergleichbar. Jedoch werden Röntgenstrahlen

nicht durch Prozesse im Kern, sondern technisch beim Abbremsen von schnellen Elektronen in den Atomhüllen der Anode (positiv geladene Elektrode) einer Röntgenröhre erzeugt.

1.3 Kenngrößen der Radioaktivität

Der radioaktive Zerfall erfolgt spontan und rein statistisch. Er lässt sich durch Änderung physikalischer Größen wie z.B. Druck, Temperatur usw. nicht beeinflussen und ist auch von der chemischen Bindung des Radionuklids und dessen Alter unabhängig.

1.3.1 Zerfallsgesetz

Die Anzahl noch nicht zerfallener Kerne N zu einem Zeitpunkt t kann über das exponentielle Zerfallsgesetz

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (2)$$

bestimmt werden. Dabei stellt N_0 die Anzahl der Radionuklide zum Zeitpunkt $t = 0$ und λ die für jede Kernart charakteristische Zerfallskonstante dar. Diese entspricht der Wahrscheinlichkeit, mit der ein Kern innerhalb einer Sekunde zerfällt.

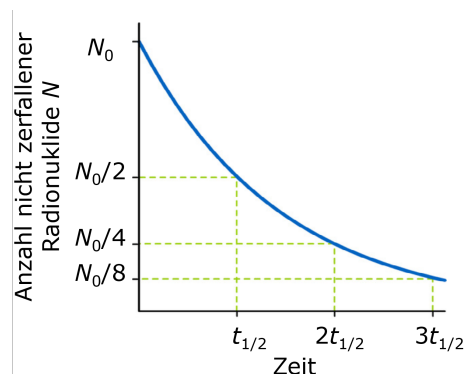


Abb. 2: Anzahl (noch) nicht zerfallener Radionuklide N als Funktion der Zeit. Nach 1, 2 bzw. 3 Halbwertszeiten verbleiben noch die Hälfte, ein Viertel bzw. ein Achtel der ursprünglichen Kerne.

Abbildung 2 zeigt das Zerfallsgesetz. Da die Zerfallswahrscheinlichkeit eines Atomkerns konstant ist, bleibt die Kurvenform unverändert, auch wenn die Messung zu einem späteren

Zeitpunkt begonnen wird. Man bezeichnet die Zeitspanne, nach der die Hälfte der ursprünglich vorhandenen Kerne zerfallen sind, als die Halbwertszeit $T_{1/2}$. Ausgehend vom Zerfallsgesetz (Gl. 2) ergibt sich

$$N = \frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t_{1/2}} \quad \text{und somit} \quad (3)$$

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda \cdot t_{1/2}} \quad \text{bzw.} \quad t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda} .$$

In der Praxis wird meist nicht die Anzahl der zerfallenen Kerne bestimmt, sondern die Anzahl der Zerfälle pro Sekunde. Die derart bestimmte Aktivität A wird in der Einheit Becquerel angegeben. 1 Becquerel entspricht dabei 1 Zerfall pro Sekunde, d.h. $1 \text{ Bq} = 1/\text{s}$. Es gilt

$$A = N \cdot \lambda . \quad (4)$$

1.3.2 Abstandsgesetz

Die Strahlungsenergie, welche in einer bestimmten Zeit durch eine senkrecht zur Ausbreitungsrichtung stehenden Fläche transportiert wird, nennt man Strahlungsintensität I .

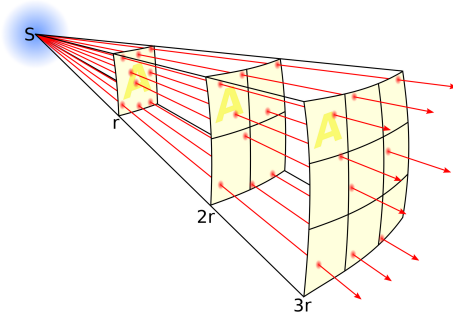


Abb. 3: Intensität ionisierender Strahlung in Abhängigkeit von der Entfernung r von der Strahlungsquelle [4].

Betrachtet man eine punktförmige Strahlungsquelle, die gleichmäßig in alle Raumrichtungen strahlt, verteilt sich die Strahlungsintensität auf einer Kugeloberfläche (Abb. 3). Da die Flächengröße quadratisch mit dem Abstand zur Strahlungsquelle steigt, sinkt die Strahlungsintensität quadratisch mit diesem Abstand. Es folgt:

$$I \sim 1/r^2 . \quad (5)$$

1.3.3 Reichweite ionisierender Strahlung

Alpha-Strahlung, als zweifach positiv geladene Teilchen, geben ihre Energie in nur wenigen Reaktionen vollständig an ihre Umgebung ab. In Luft ergibt sich dadurch eine Reichweite von nur wenigen Zentimetern. Auch mit Papier lässt sich eine vollständige Abschirmung ermöglichen.

Hochenergetische Positronen oder Elektronen, wie sie durch Betazerfälle erzeugt werden, können wie Alphateilchen durch Stöße und Ionisierungsprozesse abgebremst werden. Da diese Teilchen wesentlich leichter sind, ist der Energieübertrag pro Reaktion weniger effektiv und daher ihre Reichweite größer. Das Durchdringungsvermögen von Betateilchen beträgt in Luft einige Zentimeter bis Meter, in Weichteilgewebe oder Kunststoff wenige Millimeter bis Zentimeter. Für eine vollständige Abschirmung reicht zum Beispiel ein wenige Millimeter dickes Aluminiumblech. Allerdings wird dabei ein Teil der Energie der Betateilchen in Röntgen-Bremsstrahlung umgewandelt. Das heißt es wird ein zweiter Absorber benötigt, welcher die Röntgenstrahlung abschirmt.

Für Gamma- und Röntgenstrahlen lässt sich keine Reichweite angeben, da sich ihre Energie nicht durch die Wechselwirkung mit der umgebenden Materie verringert. Stattdessen reduziert sich die Intensität I der Strahlung bei Durchgang durch ein Material kontinuierlich mit der Materialdicke d entsprechend dem Lambertschen Gesetz:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot d} \quad (6)$$

Dabei entspricht I_0 der Intensität der Strahlung ohne Abschirmung und μ einem Schwächungskoeffizienten mit der Einheit $1/\text{m}$ oder $1/\text{cm}$. Dieser beschreibt, welcher Anteil der Intensität nach einem Durchgang der Strahlung durch einen Absorber noch gemessen werden kann. Der Absorptionskoeffizient ist abhängig von der Art und Energie der Strahlung sowie vom Material des Absorbers, insbesondere dessen Ordnungszahl.

Abbildung 4 zeigt den Zusammenhang zwischen der Intensität der Strahlung und der

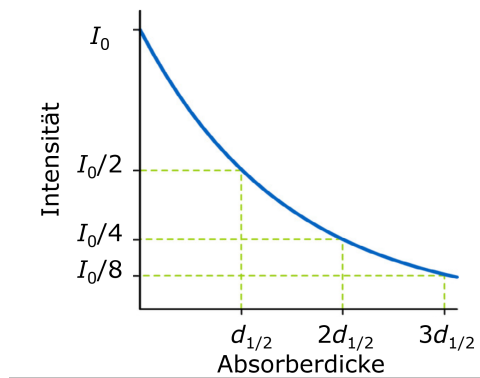


Abb. 4: Intensität I als Funktion der Absorberdicke. Nach 1, 2 bzw. 3 Halbwertsdicken $d_{1/2}$ verbleiben noch die Hälfte, ein Viertel bzw. ein Achtel der ursprünglichen Intensität.

Halbwertsdicke $d_{1/2}$. Als Halbwertsdicke bezeichnet man diejenige Schichtdicke eines Absorbers, nach dessen Durchquerung sich die Intensität der ionisierenden Strahlung halbiert. Es gilt:

$$d_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\mu} . \quad (7)$$

1.3.4 Biologische Wirkung

Für den Strahlenschutz ist die biologische Wirkung ionisierender Strahlung von zentraler Bedeutung. Zur Abschätzung der Belastung werden mehrere Größen herangezogen: Die Energie- und Äquivalenzdosis sowie die Äquivalenzdosisleistung [5].

Die Energiedosis D , auch Strahlendosis oder Dosis genannt, bezeichnet die gesamte absorbierte Energie pro Masse. Sie wird in der Einheit Gray (Gy) angegeben. Ein Gray entspricht dabei der Aufnahme von 1 Joule je 1 Kilogramm.

Die Äquivalenzdosis H berücksichtigt zusätzlich die unterschiedliche biologische Wirksamkeit verschiedener Strahlenarten, indem die Energiedosis mit einem Qualitätsfaktor Q multipliziert wird $H = D \cdot Q$. So wird zum Beispiel berücksichtigt, dass bei gleicher Energie α -Teilchen etwa 20 mal mehr Ionisationsprozesse auslösen als β - oder γ -Strahlen ($Q_{\beta,\gamma} = 1$, $Q_{\alpha} = 20$). Obwohl der Qualitätsfaktor einheitenlos definiert ist, erhält die Äquivalenzdosis zur besseren Unterscheidbarkeit eine neue Ein-

heit. Sie wird in Sievert ($1 \text{ Sv} = 1 \text{ J}/1 \text{ kg}$) angegeben. Zusätzlich kann ein organspezifischer Gewichtungsfaktor eingeführt werden (Gesamtkörperbestrahlung erhält den Faktor 1, Bestrahlung einzelner Bereiche kleinere Faktoren [6]). Beispielhaft erhält ein Patient eine Äquivalenzdosis von ca. 0,018 mSv bei einer Röntgenaufnahme des Thorax, aber ca. 5 mSv bei dessen CT-Untersuchung.

Um die Strahlenbelastung einzuschätzen wird in einem letzten Schritt die Äquivalenzdosisleistung ermittelt, indem die Äquivalenzdosis auf den Zeitraum der Bestrahlung normiert wird. Da der Mensch dauerhaft kosmischen wie terrestrischen Strahlungen ausgesetzt ist, ergibt sich eine natürliche Strahlenbelastung von ca. 1 mSv/a. Dies wird auch als Hintergrund- oder Untergrundstrahlung bezeichnet. Zivilisatorische Strahlenbelastung, hauptsächlich durch medizinische Diagnostik, erhöht die Äquivalenzdosisleistung um weitere 1 – 2 mSv/a. Insbesondere im Kontext medizinischer Berufe ist daher auf den Eigenschutz zu achten.

1.4 Nachweis ionisierender Strahlung

Da Strahlung mit den menschlichen Sinnesorganen nicht bzw. nur unzureichend wahrgenommen werden kann, müssen zur Messung von Strahlung technische Geräte verwendet werden. Es gibt verschiedene Arten von Messgeräten, die selbst geringste Mengen an radioaktiven Stoffen entdecken können. Im interaktiven Bildschirmexperiment werden Sie ein Geiger-Müller-Zählrohr verwenden. Dieses robuste Gerät weist α -, β - und γ -Strahlung durch deren Ionisationsvorgänge nach.

Grundlegend besteht ein Geiger-Müller-Zählrohr aus einem gasgefüllten Metallzylinder, welcher zentral positioniert einen Zähl draht enthält (Abb. 5). Dieser wird genutzt um im Inneren des Zylinders ein elektrisches Feld aufzubauen, welches nahe des zentralen Drahtes stärker ist als an den Außenseiten des Metallzylinders. Durchquert Strahlung das Zählrohr, ionisiert diese das Füllgas. Es entstehen Elektronen-Ionen-Paare. Aufgrund des elektrischen Feldes und ihrer geringen Masse, bewegen sich die Elektronen stark beschleunigt zum Zähl draht. Auf ihrem Weg

erzeugen Sie weitere Elektron-Ionen-Paare, so dass eine Elektronenlawine entsteht, die als Entladung den gesamten Metallzylinder erfasst und als elektrisches Signal detektiert werden kann.

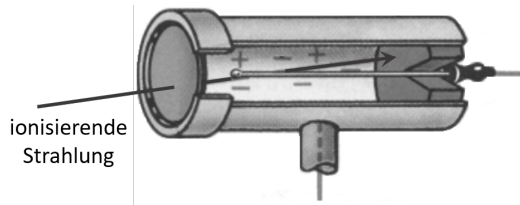


Abb. 5: Schematischer Aufbau eines Geiger-Müller-Zählrohrs [7].

Da nach jedem detektierten Ereignis in einem Geiger-Müller-Zählrohr zunächst die entstandene Entladung gestoppt werden muss, ergeben sich jeweils Zeitspannen von ca. 10^{-4} s, in denen kein weiterer Strahlungseingang nachgewiesen werden kann. Diese sogenannte Totzeit führt zu Zählverlusten und muss bei der Analyse reeller Messergebnisse berücksichtigt werden. Für die Zählraten des interaktiven Bildschirmexperimentes sind die Zählverluste jedoch so gering, dass Sie vernachlässigt werden können.

2 Versuchsaufbau

Um die Grundlagen der ionisierenden Strahlung gefahrenfrei untersuchen zu können, stehen Ihnen zwei interaktive Bildschirmexperimente zur Verfügung. Diese thematisieren die Aktivität bzw. die Zerfallsraten eines radioaktiven Präparates in Abhängigkeit vom Abstand zur Strahlungsquelle und den Einfluss von Abschirmungsmaterialien unterschiedlicher Dicke.

Abbildung 6 zeigt den Versuchsaufbau des interaktiven Bildschirmexperimentes zur Untersuchung des Abstandsgesetzes. Am linken Bildrand kann ein radioaktiver Strahler (^{137}Cs) in eine feste Halterung auf einer optischen Bank eingesetzt werden. Entlang dieser optischen Bank lässt sich zudem ein Geiger-Müller-Zählrohr verschieben. Die Ansteuerung des Geiger-Müller-Zählrohrs erlaubt die Auswahl fester Messzeiten ($\Delta t = 1, 10, 60, 100$ s).

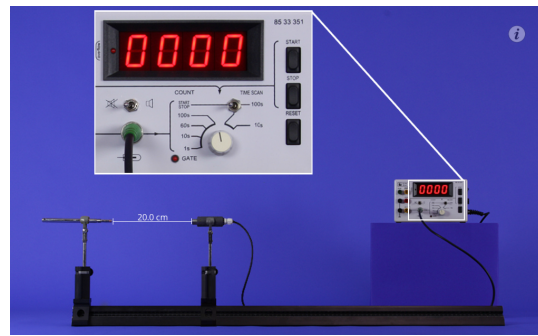


Abb. 6: Versuchsaufbau des interaktiven Bildschirmexperimentes zur Untersuchung des Abstandsgesetzes.

3 Hinweise

3.1 Abstandsmessung

Zur Durchführung der Impulszahlenmessung als Funktion des Abstandes, öffnen Sie das interaktive Bildschirmexperiment durch den im Moodlekurs hinterlegten Link.

Für die Ermittlung der Hintergrundzählrate R_U messen Sie zunächst die Impulszahlen ohne eingelegtes Präparat N_U in drei Messungen mit einer jeweiligen Messdauer von 100 s. Die Hintergrundzählraten ergeben sich aus der Division der Impulszahlen und der Messdauer $R_U = N_U/\Delta t$. Nutzen Sie die gemittelte Rate aus den drei Einzelmessungen als Hintergrundzählrate für alle weiteren Untersuchungen.

Verwenden Sie für die Abstandsmessung die in der Tab. 1 aufgeführten Messintervalle Δt . Dokumentieren Sie ihre Impulszahlen $N(r)$ und die anschließend zu berechnenden Raten $R(r)$ sowie $R_{\text{korrr}}(r)$ übersichtlich in einer Tabelle.

Tab. 1: Vorgaben der Zeitintervalle für die Abstandsmessung.

r / cm	10	15	20	25	30
$\Delta t / \text{s}$	10	10	60	60	60
r / cm	35	40	45	50	55
$\Delta t / \text{s}$	60	100	100	100	100

3.2 Untersuchung der Abschirmung verschiedener Metalle

Zur Durchführung der Impulszahlenmessung in Abhängigkeit von der Materialdicke verschiedener Metalle, öffnen Sie das interaktive Bildschirmexperiment durch den im Moodlekurs hinterlegten Link.

Nutzen Sie die in der Tabelle 2 aufgeführten Messintervalle Δt . Dokumentieren Sie ihre Impulszahlen N und die anschließend zu berechnenden Größen übersichtlich in einer Tabelle.

Tab. 2: Vorgaben der Zeitintervalle für die Abschirmungsmessung.

Kupfer						
d / mm	0	4	7	10	15	20
$\Delta t / \text{s}$	10	10	10	60	60	100
Blei						
d / mm	0	1,1	3,3	5,5	7,7	11
$\Delta t / \text{s}$	10	10	60	60	100	100
Eisen						
d / mm	0	5	10	15	20	25
$\Delta t / \text{s}$	10	10	60	60	100	100

3.3 Ergänzende Hinweise

Studierende derselben Gruppe dürfen gleiche Messwerte nutzen, müssen dies aber nicht tun.

Bitte stellen Sie sicher, dass ihr Protokoll alle gewohnten Abschnitte umfasst und es sowohl ihre Messergebnisse inkl. der Zwischenschritte als auch die vier zu erstellenden Diagramme sowie die Werte der Halbwertsdicken für die verschiedenen Materialien enthält. Die Nutzung von Tabellen fördert die Übersichtlichkeit. Diagramme dürfen computergestützt generiert und in das Protokollbuch eingeklebt werden. Sie müssen in jedem Fall selbsterklärend sein und daher auch Achsenbeschriftungen enthalten. Eine kurze Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse wird ebenso erwartet wie Literaturangaben.

Es ist bekannt, dass sich die interaktiven Bildschirmexperimente im Browser „Safari“ nicht immer öffnen lassen. Bitte nutzen Sie einen anderen Browser. Auch die Rechner der Bibliothek können zur Bearbeitung genutzt werden.

Die Bildschirmexperimente können mehrfach geöffnet und dadurch die Messungen zeitsparend parallelisiert durchgeführt werden.

Literatur

- [1] Strahlenschutz an der Ruhr-Universität Bochum. <https://fpraktikum.physik.ruhr-uni-bochum.de/sicherheit/>. Accessed: 2024-04-18.
- [2] Nuklidkarte. https://ibe.physik.rwth-aachen.de/build-MTL12_RAD/index.html. Accessed: 2024-04-18.
- [3] U. Haas. *Physik für Pharmazeuten und Mediziner*. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH Stuttgart, 1988.
- [4] Abbildung zur Erläuterung des Abstandsgesetzes. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Inverse_square_law.svg. Accessed: 2024-04-18.
- [5] H. Zabel. *Kurzlehrbuch Physik*. Thieme, 2016.
- [6] Strahlenschutz an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus Senftenberg. https://www-docs.b-tu.de/ag-experimentalphysik/public/downloads_und_materialien/Strahlenschutzheft.pdf. Accessed: 2024-04-18.
- [7] GSI - Schülerlabor zum Strahlungsnachweis mit dem Geiger-Müller-Zählrohr. https://web-docs.gsi.de/~wolle/Schuelerlabor/ANLEITUNG/Anleitung_2.pdf. Accessed: 2024-04-18.