

V704

Absorption von γ - und β -Strahlung

Umut Aydinli
umut.aydinli@tu-dortmund.de

Muhammed-Sinan Demir
sinan.demir@tu-dortmund.de

Durchführung: 31.05.2022

Abgabe: 07.05.2022

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
2.1 γ -Strahlung	3
2.2 β -Strahlung	5
3 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	7
3.1 Absorption der γ -Strahlung	8
3.2 Absorption der β -Strahlung	8
4 Auswertung	9
4.1 γ -Absorptionskurven	9
4.2 β -Absorptionskurve	12
5 Diskussion	13
6 Anhang	15
Literatur	17

1 Zielsetzung

In dem Versuch V704 geht es um die Absorption von Gamma sowie Beta-Strahlung verschiedener Stoffen. Dabei sollen die Absorptionskoeffizienten sowie die Maximalenergie eines Beta-Strahlers untersucht werden.

2 Theorie

Teilchen und Materie können miteinander wechselwirken, wenn Teilchen auf Materie treffen. Diese Wechselwirkung kann durch den sogenannten Wirkungsquerschnitt σ dargestellt werden. Wichtig dabei ist die Dicke D des zu durchstrahlenden Absorbers, da diese die Anzahl von Wechselwirkungen von der Dicke abhängig ist. Dabei gilt für γ -Strahlung ein exponentieller Abfall der Strahlung, je dicker das Absorbermaterial ist

$$N(D) = N_0 \cdot e^{-n \sigma D} . \quad (1)$$

Das N_0 steht für die Ausgangsaktivität, n für die Anzahl der Teilchen im Absorber pro Volumen und $n \sigma$ der sogenannte Absorptionskoeffizient, welcher auch als μ definiert wird. Die Schichtdicke D , bei welcher sich die Ursprungsintensität halbiert beträgt

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

Die Anzahl der Teilchen im Absorber wird bestimmt durch

$$n = \frac{z N_L}{V_{\text{mol}}} = \frac{z N_L \rho}{M} , \quad (3)$$

wobei N_L für die Loschmidtsche Zahl, z für die Ordnungszahl und V_{mol} für das Molvolumen steht.

2.1 γ -Strahlung

Damit γ -Strahlung entsteht, muss ein angeregter Atomkern aus einem Zustand der Energie E_1 in einen energetisch niedrigeren Zustand E_2 übergehen. Die Energie E_γ des γ -Quants wird berechnet durch

$$E_\gamma = E_1 - E_2 . \quad (4)$$

Da diese Energieniveaus diskrete Zustände sind, folgt ebenfalls, dass das Linienspektrum der γ -Strahler diskret ist. Die Strahlung besitzt für elektromagnetische Wellen typischen Eigenschaften, wie zum Beispiel Interferenz, wodurch bei Wechselwirkung mit einem γ -Quant unterschiedliche Effekte auftreten, wie in Abbildung 1 zu sehen.

W-W-Prozess \ W-W-Partner	Annihilation	Inelast. Streuung	Elast. Streuung
Elektron	(innerer) Photoeffekt	Compton-Effekt	Thomson-Streuung
Kern	Kernphotoeffekt	Kernresonanz-Streuung	
Elektr. Felder	Paarerzeugung		Delbrück-Streuung

Abbildung 1: Die verschiedenen Wechselwirkungen von γ -Strahlung mit Materie [1].

Die wesentlichen Prozesse die eintreten sind der Photoeffekt, der Compton-Effekt und die Paarbildung. Der Photoeffekt tritt bei Wechselwirkung des γ -Quants mit einem Hüllenelektron auf. Das Photon wird dabei vernichtet und die Energie vollständig an das Elektron abgegeben, nach überwinden der Bindungsenergie, was dazu führt, dass das Elektron aus seiner Bindung entfernt wird. Beim Compton-Effekt wird das Photon, im Gegensatz zum Photoeffekt, nicht vernichtet, sondern gibt ein teil seiner Energie an das Hüllenelektron, beim aneinander stoßen, ab. Beide werden durch den Stoß von ihrer Ursprünglichen Bahn abgelenkt. Der Wirkungsquerschnitt σ_{com} , von Klein und Nishina aufgestellt, wird berechnet durch

$$\sigma_{\text{com}} = 2 \pi r_e^2 \left(\frac{1 + \epsilon}{\epsilon^2} \left[\frac{2(1 + \epsilon)}{1 + 2\epsilon} - \frac{1}{\epsilon} \ln(1 + 2\epsilon) \right] \frac{1}{2\epsilon} \ln(1 + 2\epsilon) - \frac{1 + 3\epsilon}{(1 + 2\epsilon)^2} \right), \quad (5)$$

r_e steht dabei für den klassischen Elektronenradius, welcher $r_e = 2,82 \cdot 10^{-15} \text{ m}$ beträgt. Das ϵ steht hierbei für das Verhältnis der Quantenenergie zu Ruheenergie des Elektrons, $\epsilon = \frac{E_\gamma}{m_0 c^2}$. Bei kleinen Energien gilt für den Wirkungsquerschnitt

$$\sigma_{\text{Th}} = \frac{8}{3} \pi r_e^2, \quad (6)$$

welcher auch als Thomsonscher Wirkungsquerschnitt bezeichnet wird, da bei kleinen Energien das σ_{com} energieunabhängig wird. Der Absorptionskoeffizient, der durch den Compton-Effekt bedingt ist, wird berechnet durch.

$$\mu_{\text{com}} = \frac{z N_L \rho}{M} \sigma_{\text{com}}. \quad (7)$$

Die Paarbildung tritt auf, wenn die Energie des γ -Quants mindestens doppelt so hoch ist, wie die Ruhemasse eines Elektrons. Bei dieser Wechselwirkung entstehen ein Elektron und ein Positron. In Abbildung 2 wird der Verlauf, anhand von Germanium, des Absorptionskoeffizient in Abhängigkeit der Energie verbildlicht.

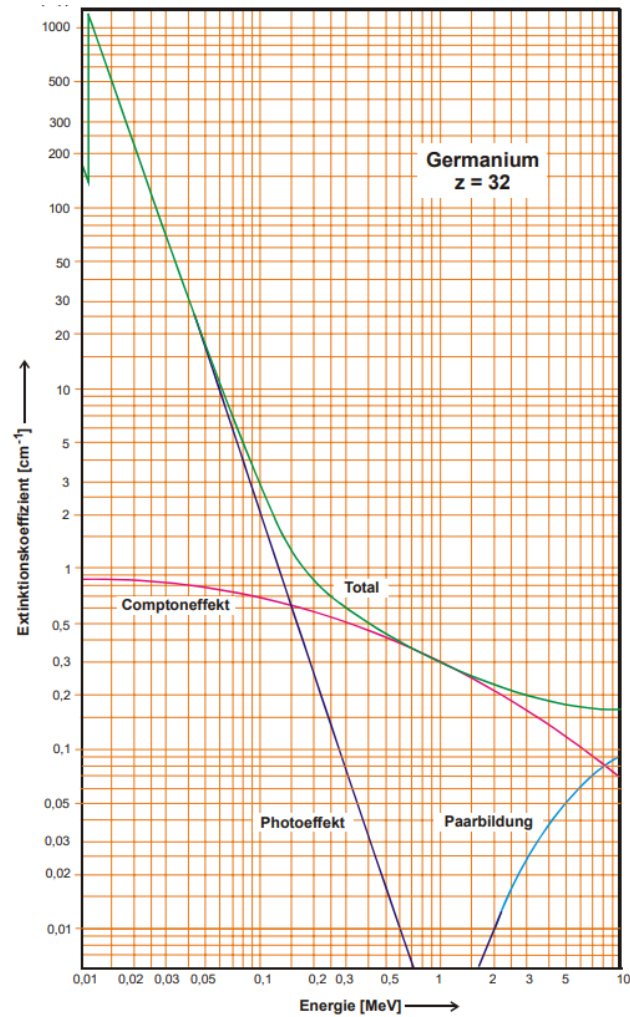


Abbildung 2: Energieabhängigkeit des Absorptionskoeffizienten μ für Germanium getrennt nach den verschiedenen Wechselwirkungsmechanismen sowie Totaleffekt [1].

2.2 β -Strahlung

β -Strahlung besteht aus Elektronen, welche eine hohe Geschwindigkeit besitzen. Diese entstehen durch den Zerfall im Atomkern

$$n \rightarrow p + \beta^- + \bar{\nu}_e. \quad (8)$$

$\bar{\nu}_e$ entspricht einem Antineutron und $\bar{\nu}_e$ einem Antineutrino, welches neben dem emittierten Elektron als weiteres Elementarteilchen emittiert wird. Die bei der Emission frei werdende Energie verteilt sich auf das Elektron und das Neutrino, wobei die Erhaltung dieser Energie durch die gleichzeitige Emission des Neutrinos gesichert wird. Beim Durchlaufen von β -Strahlung durch Materie treten drei Prozesse auf, bevor das Elektron vollständig absorbiert wird oder austreten kann.

Eine der drei Streuungsprozesse ist die **Rutherford-Streuung**. Diese ist eine elastische Streuung, bei der an den Kernen eine geringe Energieabnahme und starke Richtungsänderung der Teilchenbahn auftritt.

Ein weiterer Streuungsprozess ist die **inelastische Streuung an Atomkernen**. Bei dieser Streuung wird das β -Teilchen im Coulomb-Feld des Atomkerns beschleunigt, sodass nach quantenmechanischer Theorie energiereiche Photonenergie abgegeben wird. Der letzte Streuungsprozess ist die **inelastische Streuung an den Elektronen**, bei der nur ein Bruchteil der β -Strahlungsenergie verbraucht wird. Dabei ist es in der Lage eine Vielzahl von Ionisations- und Anregungsprozesse hintereinander auszuführen.

Wie bei der γ -Strahlung erfährt die β -Strahlung ebenfalls einen exponentiellen Abfall. Liegt die Dicke nah an der maximal Reichweite, so gilt der Verlauf nicht mehr. Nach der maximalen Reichweite R_{\max}

Bei Logarithmierung beider Strahlungsintensitäten kann, wie in Abbildung 3 zu sehen, die maximale Reichweite bestimmt werden. Die Reichweite R wird berechnet durch

$$R = \rho D. \quad (9)$$

Da die maximale Reichweite der β -Teilchen größtenteils durch die energiereichsten Elektronen bestimmt ist, folgt die maximal freiwerdende Gesamtenergie durch

$$E_{\max} = 1,92 \cdot \sqrt{R_{\max}^2 + 0,22 R_{\max}}. \quad (10)$$

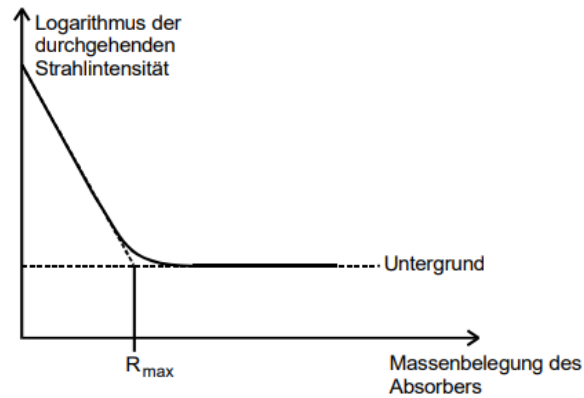


Abb.7: Absorptionskurve für einen natürlichen β -Strahler

Abbildung 3: Absorptionskurve für einen natürlichen β -Strahler [1].

3 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Zusehen sind beide Versuchsaufbauten in Abbildung 4 und Abbildung 5. Beide bestehen grundsätzlich aus einer Strahlungsquelle, welche sich mit einem Haltungsgerüst und einem Geiger-Müller-Zählrohr, in einem Bleikasten befinden. Das Geiger-Müller-Zählrohr ist dabei mit einem Zählgerät verbunden. Unterscheiden tun sich die Aufbauten durch die Dicke des Bleikastens und die Strahlungsquelle.

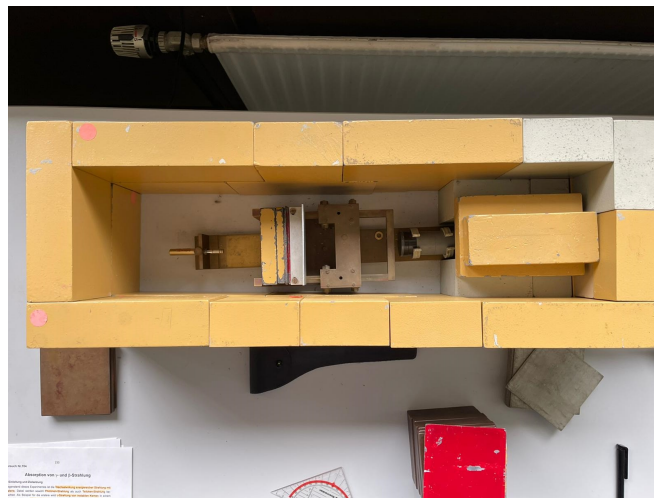


Abbildung 4: Versuchsaufbau zum ersten Teil.



Abbildung 5: Versuchsaufbau zum zweiten Teil.

3.1 Absorption der γ -Strahlung

Der Aufbau wird wie in Abbildung 4 zusehen aufgebaut. Verwendet wird hierbei Caesium. Zuerst wird die Zählrate des Caesiums ohne Absorber, für 900 s, aufgenommen. Danach werden für verschiedene dicken, in einem Intervall von 5mm bis 40mm, verschiedene Absorberplatten in die Halterung eingesetzt und die Zählrate erneut gemessen. Die Zeit in der die Zählrate gemessen wird ist frei zu wählen, jedoch sollte sie ausreichend lange sein. Die Absorberplatten die dabei verwendet werden sind Eisen und Blei. Durchgeführt wird dies für beide Materialien jeweils 12 mal durchgeführt.

3.2 Absorption der β -Strahlung

Der Versuch wird wie in Abbildung 5 zusehen aufgebaut. Verwendet wird hierbei Technetium. Wie zuvor wird die Zählrate des Technetiums ohne Absorber, für 900 s, aufgenommen. Danach werden erneut verschieden dicke Aluminiumabsorber, in einem Intervall von 100 μm bis 482 μm , in die Halterung eingesetzt und die Zählrate erneut gemessen. Zu Anfang wird die Zählrate nach 100 s aufgenommen, wobei nach jeder Messung die Zeit um 15 s verlängert wird. Dies wird für 11 verschiedene Dicken wiederholt.

4 Auswertung

4.1 γ -Absorptionskurven

Durchgeführt wurde die Nullmessung ohne einen Absorber. Die Messung liefert

$$\begin{aligned}\text{gemessene Zeit } t &= 900 \text{ s}, \\ \text{Anzahl der Wechselwirkung } N &= 959 \pm 30, \\ \text{Aktivität } A_0 &= (1,07 \pm 0,03) \frac{1}{\text{s}}.\end{aligned}$$

Gemessen werden die Aktivitäten mit der jeweiligen Zeit. Die Aktivitäten werden von der Aktivität der Nullmessung abgezogen. Gemessen wird für Blei und Eisen. Die Messwerte befinden sich in Tabelle 1 und 2. Die Aktivität wird dann gegen die Dicke in einem halblogarithmischen Diagramm abgetragen und über lineare Regression wird der Absorptionskoeffizient nach (1) bestimmt. Mit Hilfe der Formel (5), multipliziert mit der Formel (3), ergibt sich der Compton-Absorptionskoeffizient μ_{com} . Die Regressionen befinden sich in Abbildung 6 und 7.

Tabelle 1: Messwerte zur Bestimmung des Absorptionskoeffizienten von Eisen.

Dicke $d / 10^{-3}\text{m}$	Zeit t / s	Zählrate N	Aktivität $(A - A_0) / \frac{1}{\text{s}}$
5	100	9163 ± 95	$90,56 \pm 0,92$
5	100	8972 ± 94	$88,65 \pm 0,90$
10	100	7654 ± 87	$75,47 \pm 0,77$
10	200	14528 ± 120	$71,57 \pm 0,36$
15	100	6383 ± 79	$62,76 \pm 0,64$
15	200	11735 ± 108	$57,61 \pm 0,29$
20	200	10022 ± 100	$49,04 \pm 0,25$
20	300	14662 ± 121	$47,80 \pm 0,16$
25	200	8358 ± 91	$40,72 \pm 0,21$
30	300	10428 ± 102	$33,69 \pm 0,12$
35	300	8000 ± 89	$25,60 \pm 0,09$
40	300	6565 ± 81	$20,81 \pm 0,08$

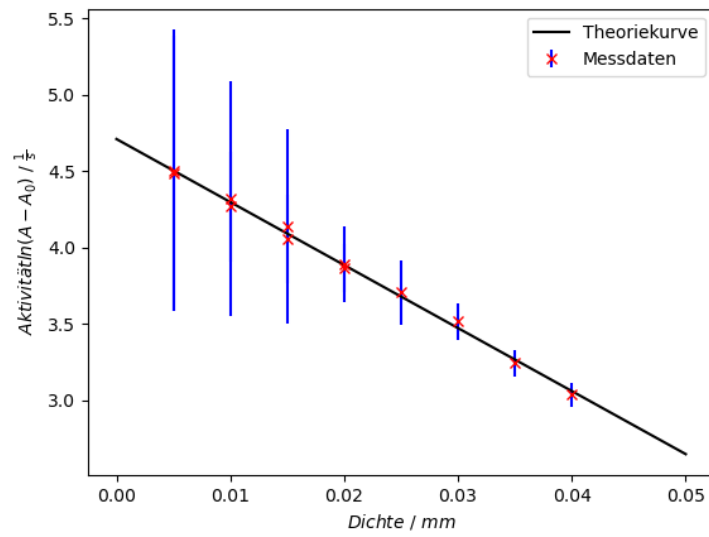


Abbildung 6: Ausgleichsrechnung von Eisen.

Daraus folgt

$$\begin{aligned}
 \text{negative Steigung} \equiv \text{Absorptionskoeffizient} : \quad \mu &= (41,28 \pm 0,82) \frac{1}{\text{m}}, \\
 \text{y-Achsenabschnitt} \equiv \text{Anfangsaktivität} : \quad A_0 &= (4,71 \pm 0,01) \frac{1}{\text{s}}, \\
 \mu_{\text{com}} &= 56,8 \frac{1}{\text{m}}.
 \end{aligned}$$

Tabelle 2: Messwerte zur Bestimmung des Absorptionskoeffizienten von Blei.

Dicke $d / 10^{-3}\text{m}$	Zeit t / s	Zählrate N	Aktivität $(A - A_0) / \frac{1}{\text{s}}$
1	100	10049 ± 100	$99,42 \pm 1,00$
10	100	4283 ± 65	$41,76 \pm 0,43$
12	100	3127 ± 55	$30,20 \pm 0,33$
15	100	2390 ± 48	$22,83 \pm 0,26$
17	100	1932 ± 43	$18,25 \pm 0,22$
20	200	3061 ± 55	$14,23 \pm 0,09$
22	200	2666 ± 51	$12,26 \pm 0,08$
25	200	1990 ± 44	$8,88 \pm 0,07$
30	300	2216 ± 47	$6,32 \pm 0,04$
32	400	2208 ± 46	$4,45 \pm 0,03$
35	400	1978 ± 44	$3,87 \pm 0,03$
40	500	1787 ± 42	$3,34 \pm 0,02$

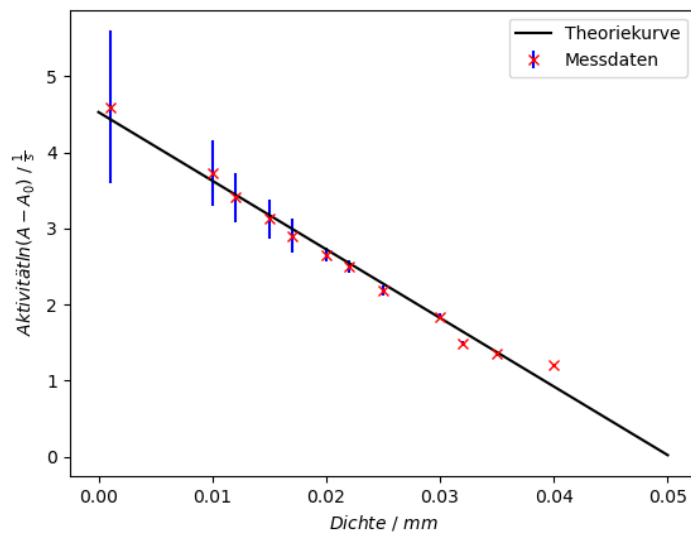


Abbildung 7: Ausgleichsrechnung von Blei.

Daraus folgt

$$\begin{aligned}\text{negative Steigung} \equiv \text{Absorptionskoeffizient} : \quad \mu &= (90,21 \pm 3,42) \frac{1}{\text{m}}, \\ \text{y-Achsenabschnitt} \equiv \text{Anfangsaktivität} : \quad A_0 &= (4,53 \pm 0,08) \frac{1}{\text{s}}, \\ \mu_{\text{com}} &= 68,2 \frac{1}{\text{m}}.\end{aligned}$$

Die Werte liegen über bzw. unter dem gemessenen Wert. Es ist daher anzunehmen, dass noch zusätzlich der Photoeffekt beteiligt ist.

4.2 β -Absorptionskurve

Aufgenommen wird die β Absorptionskurve von Aluminium. Daraus bestimmt wird die Maximalenergie des verwendeten β -Strahlers (Tc). Die Kurve wird in zwei lineare Bereiche zerlegt oberhalb und unterhalb von R_{max} . Erneut wird die Aktivität gegen die Dicke in einem halblogarithmischen Diagramm aufgetragen. Die ersten vier Messungen werden dem ersten Abschnitt zugeordnet und restlichen dem zweiten Abschnitt. Die letzte Messung wird in der Auswertung nicht beachtet und die Werte befinden sich in Tabelle 3. Geführt wird eine lineare Regression mit A_1 , A_2 , B_1 und B_2 mit der Geradengleichung

$$y = A_i x + B_i \quad (i = 1, 2),$$

zu sehen in der Abbildung 8. Berechnet wird der x-Wert (R_{max}) des Schnittpunktes mit

$$R_{\text{max}} = \frac{B_2 - B_1}{A_1 - A_2}. \quad (11)$$

Tabelle 3: Messwerte zur Bestimmung der Gesamtenergie des β -Strahlers-

Dicke $d / 10^{-6}\text{m}$	Zeit t / s	Zählrate N	Aktivität $A / \frac{1}{\text{s}}$	$R / \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$
ohne Absorber	100	55000 ± 234	$550 \pm 1,00$	-
100	150	5775 ± 75	$38,50 \pm 0,26$	0,27
125	200	1916 ± 43	$9,58 \pm 0,06$	0,33
$(153 \pm 0,5)$	250	2317 ± 48	$9,26 \pm 0,05$	0,41
(160 ± 1)	300	1787 ± 42	$5,95 \pm 0,03$	0,43
(200 ± 1)	350	875 ± 29	$2,50 \pm 0,03$	0,54
(253 ± 1)	400	380 ± 19	$0,95 \pm 0,02$	0,68
(302 ± 1)	450	332 ± 18	$0,73 \pm 0,02$	0,81
(338 ± 5)	500	360 ± 18	$0,72 \pm 0,02$	0,91
(400 ± 1)	550	354 ± 18	$0,64 \pm 0,01$	1,08
(444 ± 2)	600	354 ± 18	$0,59 \pm 0,01$	1,19
(482 ± 1)	650	454 ± 21	$0,71 \pm 0,01$	-

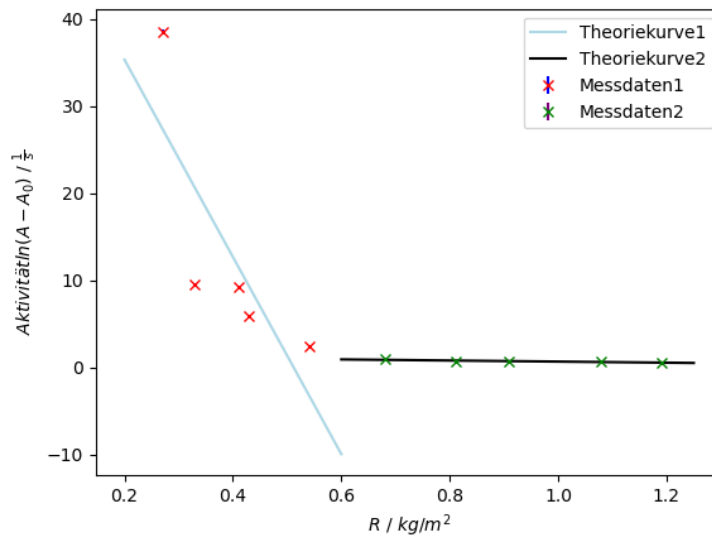


Abbildung 8: Absorptionskurve von Technetium 99.

Die gelieferten Koeffizienten lauten

$$\text{Steigung Teil 1: } A_1 = (-113,2 \pm 48,0) \frac{1}{\text{m}},$$

$$\text{Steigung Teil 2: } A_2 = (-0,62 \pm 0,14) \frac{1}{\text{m}},$$

$$\text{Y-Achsenabschnitt Teil 1: } B_1 = (57,90 \pm 19,50),$$

$$\text{Y-Achsenabschnitt Teil 2: } B_2 = (1,31 \pm 0,13).$$

Somit folgt

$$R_{\max} = (0,49 \pm 0,01) \frac{\text{g}}{\text{cm}^2}$$

und mit der Formel (10) für die Gesamtenergie

$$E_{\max} = (1,13 \pm 0,02) \cdot 10^6 \text{ eV}.$$

5 Diskussion

Folgende Werte und Abweichungen von den Literaturwerten wurden bestimmt

Tabelle 4: Abweichung in %

	$\mu_{\text{com,Eisen}}$	$\mu_{\text{com,Blei}}$
μ_{Eisen}	26,7	-
μ_{Blei}	-	32,3

Obwohl die Absorptionskoeffizienten auf dem ersten Blick positiv erscheinen, weisen sie dennoch gewisse Ungenauigkeiten auf, die gerade nicht gering sind. Die Ungenauigkeiten könnten auf die Apparatur zurückgeführt werden, wie z.B. bei der Messung der Zählrate. Die Materialien üben ebenso einen Effekt auf die Messung aus. Die Oberfläche von Blei war brüchig oder es ist anzunehmen, dass Blei einen deutlich schwereren Kern besitzt und somit der Photoeffekt einen größeren Effekt hat.

Auffällig bei der Messung der β -Strahlung war, dass die Zählrate mit dem Timer ab der Hälfte der Messung nicht übereinstimmte. Mögliche Fehlerquelle könnte die instabile Natur des Zerfalls gewesen sein. Um diese entgegenzukommen wurde die Dauer immer um 50 s erweitert.

Nichtsdestotrotz eignen sich die Methoden zur Untersuchung des Absorptionsgesetzes und der Maximalenergie eines β -Strahlers. Es ist jedoch anzumerken, dass die menschlichen Hände nicht präzise sind und somit Ungenauigkeiten auftreten können.

6 Anhang

~~1 mm~~ Schreib

100s	Blei	✓	1004g
	1 mm		
	10 mm		483
	12 mm		3127
	15 mm		2396
	17 mm		1932
200s	20 mm		3061
	22 mm		2666
	25 mm		1990
300s	30 mm		2216
400s	32 mm		2208
	35 mm		1978
500s	40 mm		1787

~~Ähnne~~ Schreib

100s	Blei	✓ 100g
	1 mm	
	10 mm	483
	12 mm	3127
	15 mm	2396
	17 mm	1932
200s	20 mm	3061
	22 mm	2666
	25 mm	1990
300s	30 mm	2216
400s	32 mm	2208
	35 mm	1978
500s	40 mm	1787

Nullelekt: 535 / 500s CS-137 : β -Strahlung

→ ohne Absorber:	100s / 55000
→ $100 \cdot 10^{-6}$ m:	150s / 5775
→ $125 \cdot 10^{-6}$ m:	200s / 1516
→ $(153 \pm 0,5) \cdot 10^{-6}$ m:	250s / 2317
→ $(160 \pm 1) \cdot 10^{-6}$ m:	300s / 1787
→ $(200 \pm 1) \cdot 10^{-6}$ m:	350s / 875
→ $(253 \pm 1) \cdot 10^{-6}$ m:	400s / 380
→ $(302 \pm 1) \cdot 10^{-6}$ m:	450s / 332
→ $(338 \pm 5) \cdot 10^{-6}$ m:	500s / 360
→ $(400 \pm 1) \cdot 10^{-6}$ m:	550s / 354
→ $(444 \pm 2) \cdot 10^{-6}$ m:	600s / 354
→ $(482 \pm 1) \cdot 10^{-6}$ m:	650s / 318 464

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Absorption von Gamma- und Beta-Strahlung*. 2022. URL: https://moodle.tu-dortmund.de/pluginfile.php/1977207/mod_resource/content/3/V704.pdf (besucht am 30.05.2022).