

VERSUCH 704

Absorption von Beta- und Gamma-Strahlung

Annika Bennemann
annika.bennemann@tu-dortmund.de

Paulin Vehling
paulin.vehling@tu-dortmund.de

Durchführung: 26.04.2022

Abgabe: 03.05.2022

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	3
2	Theorie	3
2.1	Gamma-Strahlung	3
2.1.1	Wechselwirkung mit Materie	3
2.2	Beta-Strahlung	5
2.2.1	Wechselwirkung mit Materie	6
3	Aufbau und Durchführung	7
4	Auswertung	7
4.1	Gamma-Strahlung	8
4.2	Beta-Strahlung	10
5	Diskussion	12
6	Anhang	13
	Literatur	14

1 Zielsetzung

Ziel dieses Versuches ist die Absorptionskoeffizienten von Eisen und Blei zu bestimmen, indem sie mit γ -Strahlen beschossen werden.

Für die β -Strahlung soll ebenfalls die Absorptionskurve aufgenommen werden. Daraus soll die Maximalenergie des β -Strahlers berechnet werden.

2 Theorie

Wenn β - und γ -Strahlung auf Materie trifft, treten Wechselwirkungen mit der Materie auf. Die Häufigkeit der Wechselwirkungen kann dargestellt werden mit dem Wirkungsquerschnitt σ . Je größer σ , desto größer ist die Anzahl der Wechselwirkungen. Für die γ -Strahlung gilt

$$N(D) = N_0 e^{-\mu D}, \quad (1)$$

wobei $N(D)$ die Anzahl der Teilchen hinter dem Absorber ist, N_0 ist die Ausgangsaktivität, D die Dicke und μ der Absorptionskoeffizient. Diese Formel wird auch Absorptionsgesetz genannt. Dieses berechnet sich mit

$$\mu = n \cdot \sigma, \quad (2)$$

wobei n die Anzahl der Teilchen innerhalb des Absorbers ist und sich mit

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

berechnet. Dabei ist z die Ordnungszahl, N_A die Avogadrokonstante, V_{mol} das Molvolumen, M das Molekulargewicht und ρ die Dichte.

2.1 Gamma-Strahlung

Bei dem Übergang eines Atomkerns von einem höheren Energieniveau zu einem niedrigeren wird die frei werdende Energie in Form eines γ -Quants abgegeben. Die emittierten Quanten sind Photonen und breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus. Deswegen verhält sich diese Strahlung teilweise wie eine elektromagnetische Welle. Die Energiezustände die ein Atomkern annehmen kann sind diskret, weswegen es sich bei dem Spektrum eines γ -Strahlers um ein Linienspektrum handelt. Die Energie E eines Quants ist gegeben durch $E = h\nu$, wobei h das Plancksche Wirkungsquantum ist und ν die Frequenz des Quants.

2.1.1 Wechselwirkung mit Materie

Für γ -Energie zwischen 10keV und 10MeV treten, abhängig davon womit sie wechselwirken, verschiedene Effekte auf. Diese werden in Abbildung 1 dargestellt.

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: Wechselwirkungen von γ -Strahlung mit Materie[5, S. 233].

In diesem Versuch wird der Photoeffekt, der Compton-Effekt und die Paarbildung betrachtet.

Bei dem Photoeffekt wechselwirkt das γ -Quant mit einem Hüllenelektron, wobei das Elektron aus seiner Schale gelöst wird, wenn die γ -Energie größer ist als die Bindungsenergie des Elektrons. Die übrigbleibende Energie des Photons wird dann von dem Elektron absorbiert und somit wird das γ -Quant vernichtet.

Der Compton-Effekt ist in Abbildung 2 dargestellt, wobei ein Quant mit einem freien Elektron wirkt. Diese Wechselwirkungen ist eine inelastische Streuung und es kommt zu einer Änderung der Energie und zu einer Richtungsänderung beider Teilchen. Aus dem Energie- und Impulssatz folgt, dass ein γ -Quant nie seine ganze Energie auf ein freies Elektron übertragen kann.

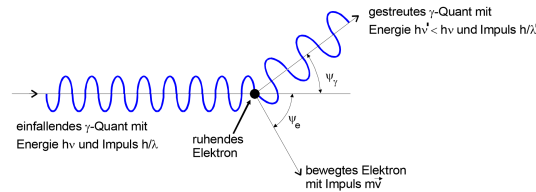


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Compton-Streuprozess[5, S. 234].

Nach dem Streuprozess nimmt die Intensität eines γ -Strahls aufgrund der Ablenkung ab. Der Wirkungsquerschnitt der Compton-Streuung ist durch

$$\sigma_{\text{com}} = 2\pi r_e^2 \left(\frac{1+\epsilon}{\epsilon^2} \left(\frac{2(1+\epsilon)}{1+2\epsilon} - \frac{1}{\epsilon} \ln(1+2\epsilon) \right) + \frac{1}{2\epsilon} \ln(1+2\epsilon) - \frac{1+3\epsilon}{(1+2\epsilon)^2} \right) \quad (4)$$

dargestellt. Das Verhältnis der Quantenenergie E_q zur Ruheenergie des Elektrons entspricht $\epsilon = \frac{E_q}{m_0 c^2}$ und für den Elektronenradius r_e gilt

$$r_e = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e c^2} = 2,82 \cdot 10^{-15} \text{m},$$

wobei e_0 die Elementarladung ist und ϵ_0 ist die Influenzkonstante. Der Absorptionskoeffizient kann durch

$$\mu_{\text{com}} = \frac{z N_A \rho}{M} \sigma_{\text{com}} \quad (5)$$

berechnet werden.

Die Paarbildung tritt auf, wenn die Energie des γ -Quants größer als die doppelte Ruhemasse des Elektrons ist. Dann wird das γ -Quant unter der Bildung eines Elektrons und

eines Positrons annihiliert.

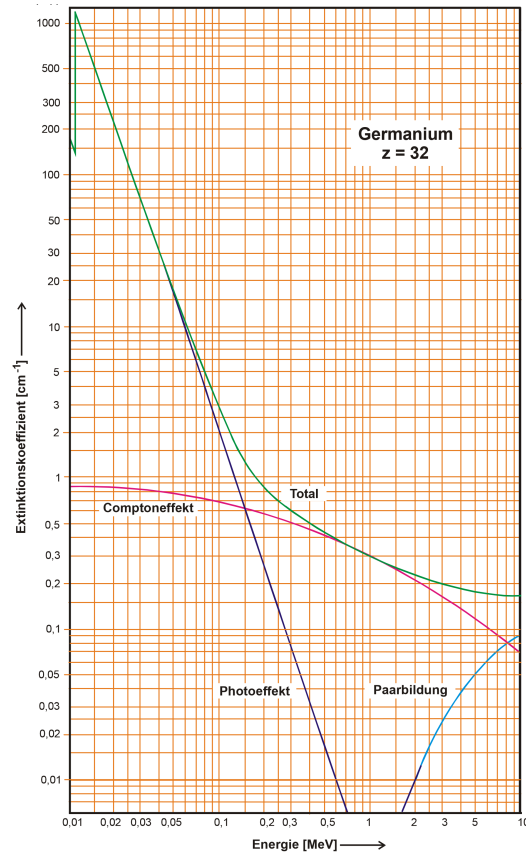


Abbildung 3: Absorptionskoeffizient von Germanium in Abhängigkeit von der Energie[5, S. 236].

Die drei genannten Effekte treten bei dem Durchgang eines γ -Strahls durch eine Materieschicht auf, weswegen der Absorptionskoeffizient kompliziert ist. In Abbildung 3 ist die Energieabhängigkeit des Absorptionskoeffizienten für Germanium dargestellt. Der Photoeffekt ist dabei für kleine Energien, der Compton-Effekt für mittlere Energien und die Paarbildung für große Energien des γ -Quants von entscheidender Bedeutung.

2.2 Beta-Strahlung

Bei dem Zerfall von einem Atomkern entsteht β -Strahlung. Bei dem β^- -Zerfall zerfällt ein Neutron in ein Proton, ein Elektron und ein Antineutrino, wobei das Elektron dabei als β -Teilchen bezeichnet wird. Der β^+ -Zerfall beschreibt wie ein Proton in ein Neutron, Positron und ein Neutrino zerfällt. Die Energie verteilt sich dabei beliebig auf die jeweiligen Komponenten, weswegen β -Strahlung ein kontinuierliches Spektrum besitzt. Die Wechselwirkung des Neutrinos mit der Materie ist so klein, dass sie vernachlässigt

werden kann.

2.2.1 Wechselwirkung mit Materie

Die β -Teilchen erfahren beim Durchgang durch Materie wesentlich mehr Wechselwirkung als bei γ -Strahlung. Im wesentlichen werden hier drei Prozesse voneinander unterschieden. Es gibt die elastische Streuung am Atomkern des Absorbermaterials, was auch als Rutherford-Streuung bezeichnet wird. Bei dieser Streuung werden die Elektronen der β -Strahlung durch die wirkenden Kräfte des Coulomb-Feldes der Atomkerne abgelenkt. Die Energiedifferenz vor und nach der Wechselwirkung ist im Vergleich zu anderen Effekten klein.

Eine andere Wechselwirkung ist die inelastische Streuung an einem Atomkern, wobei die β -Teilchen in dem Coulomb-Feld eine Beschleunigung erfahren. Sie senden gleichzeitig Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung ab, wodurch sie wieder abgebremst werden. Diese wird als Bremsstrahlung bezeichnet.

Zuletzt gibt es die inelastische Streuung an einem Elektron. Dies beschreibt den Prozess der Ionisation und Anregung der Atome des Absorbers. Dabei verlieren die β -Teilchen nur einen Bruchteil ihrer Energie. Die Wahrscheinlichkeit dieser Stöße ist proportional zur Anzahl der Elektronen pro Volumenheit, diese Stöße können somit häufig auftreten. Deswegen könne durch diesen Prozess β -Teilchen trotzdem ihre ganze Energie verbrauchen.

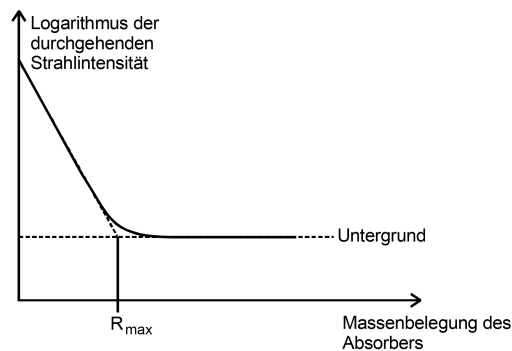


Abbildung 4: Absorptionskurve für einen natürlichen β -Strahler[5, S. 241].

Für β -Teilchen aus natürlicher Quelle gilt bei nicht allzu großen Absorberschichtdicken näherungsweise Gleichung 1. Jedoch weicht die Messwerte bei Schichtdicken in der Nähe der maximalen Massenbelegung R_{max} deutlich vom Gesetz ab. Oberhalb von dieser Reichweite wird dann nur noch die Bremsstrahlung gemessen. Dies wird in Abbildung 4 dargestellt. R_{max} ist fast ausschließlich durch die energiereichsten Elektronen bestimmt, weswegen daraus die Größe E_{max} durch

$$E_{max} = 1,92\sqrt{R_{max}^2 + 0,22R_{max}} \quad (6)$$

berechnet werden kann.

3 Aufbau und Durchführung

Bei dem Versuch wird eine Messapparatur wie in Abbildung 5 benutzt mit einer Verbindung zu einem elektronischen Zählwerk. In dem Versuch ist eine Strahlungsquelle in einer Halterung befestigt, welche von einer Abschirmung umgeben ist, wodurch die Strahlung nicht zur Seite entweichen kann. In einem gewissen Abstand befindet sich ein Plattenhalter, in den Platten unterschiedlicher Dicke einspannen werden können. Dahinter ist ein Geiger-Müller-Zählrohr, mit dem die Intensität der Strahlung gemessen wird. Der ganze Aufbau ist auch nochmal mit einer Abschirmung umgeben, damit die Strahlung nach außen hin abgefangen wird und die Apparatur vor äußeren Einflüssen geschützt wird.

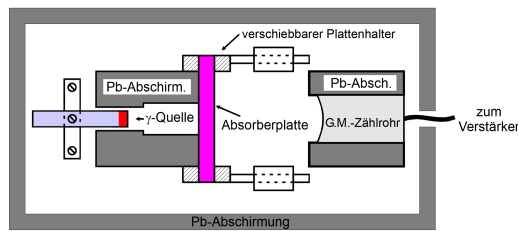


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Messapparatur[5, S. 243].

Zur Beginn der Messungen wird der Nulleffekt gemessen. Es wird über einen hinreichend langen Zeitraum (900 Sekunden) die Zählrate ohne jeglichen Einfluss eines extra eingebauten Strahlers gemessen.

Anschließend wird eine Quelle eingebaut und bei unterschiedlichen Dicken der Absorberplatte die Zählrate über einen entsprechend langen Zeitraum (je dicker die Platte, desto länger der Zeitraum) gemessen. Die Dicke, die Zählrate und die Zeit wird in einer Tabelle aufgetragen. Diese Messung wird für die γ - und β -Strahlung analog durchgeführt.

4 Auswertung

Bevor mit der eigentlichen Messung begonnen wird, wird der Nulleffekt gemäß Abschnitt 3 durchgeführt und die Daten in Tabelle 1 notiert.

Tabelle 1: Messdaten zur Nullmessung beim γ - und β -Zerfall.

Strahlungsart	Messzeit t/s	N_0	$\frac{N_0}{t} / \frac{1}{s}$
γ	900	$828 \pm 28,77$	$0,92 \pm 0,03$
β	900	$657 \pm 25,63$	$0,73 \pm 0,03$

4.1 Gamma-Strahlung

Der Versuch wird nach Abschnitt 3 mit einer γ -Quelle und unterschiedlich dicken Platten aus Eisen und Blei durchgeführt. Die Ergebnisse der Messungen werden in Tabelle 2 und Tabelle 3 eingetragen.

Tabelle 2: Messdaten zum γ -Zerfall mit Eisen als Absorber.

d/mm	Messzeit t/s	N	$\frac{N}{t}/\frac{1}{\text{s}}$
0,0	60	$6976 \pm 83,52$	$116,27 \pm 1,39$
0,5	60	$6738 \pm 82,09$	$112,30 \pm 1,37$
1,0	60	$6635 \pm 81,46$	$110,58 \pm 1,36$
1,5	60	$6374 \pm 79,84$	$106,23 \pm 1,33$
2,0	60	$6463 \pm 80,39$	$107,72 \pm 1,34$
2,5	60	$6261 \pm 79,13$	$104,35 \pm 1,32$
3,0	60	$5622 \pm 74,98$	$97,30 \pm 1,25$
5,0	60	$5410 \pm 73,55$	$90,17 \pm 1,23$
6,0	60	$5681 \pm 75,37$	$94,68 \pm 1,26$
7,0	60	$5318 \pm 72,92$	$88,63 \pm 1,22$
10,0	60	$4569 \pm 67,59$	$76,15 \pm 1,13$
15,0	60	$4101 \pm 64,04$	$68,35 \pm 1,07$
20,0	60	$2955 \pm 54,36$	$49,25 \pm 0,91$
25,0	60	$2428 \pm 49,27$	$40,47 \pm 0,82$

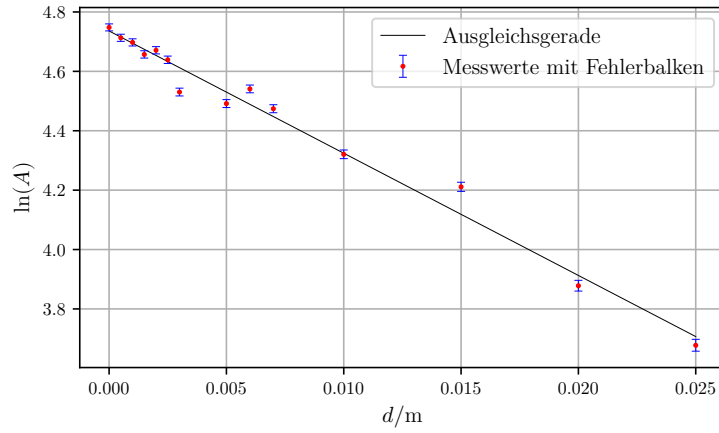
Tabelle 3: Messdaten zum γ -Zerfall mit Blei als Absorber.

d/mm	Messzeit t/s	N	$\frac{N}{t}/\frac{1}{\text{s}}$
0,0	60	$6718 \pm 81,96$	$111,97 \pm 1,37$
1,0	60	$5866 \pm 76,59$	$97,77 \pm 1,28$
2,0	90	$7875 \pm 88,74$	$87,50 \pm 0,99$
3,0	90	$7675 \pm 87,61$	$85,28 \pm 0,97$
4,0	90	$6727 \pm 82,02$	$74,74 \pm 0,91$
5,0	90	$5963 \pm 77,22$	$66,26 \pm 0,86$
6,0	90	$5287 \pm 72,71$	$58,74 \pm 0,81$
10,0	120	$5014 \pm 70,81$	$41,78 \pm 0,59$
11,0	150	$5913 \pm 76,90$	$39,42 \pm 0,51$
12,0	150	$5363 \pm 73,23$	$35,75 \pm 0,49$
14,0	180	$5103 \pm 71,44$	$28,35 \pm 0,40$
15,0	180	$4511 \pm 67,16$	$25,06 \pm 0,37$

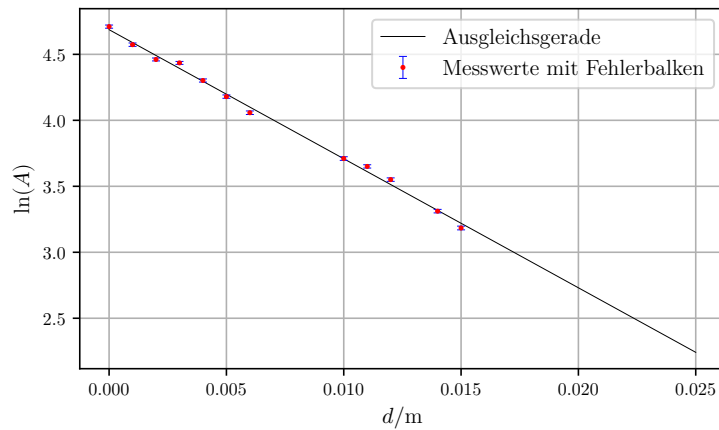
Aus den Messwerten wird die Aktivität

$$A = \frac{N}{t} - \frac{N_0}{t} \quad (7)$$

berechnet. Diese wird logarithmisch in Beziehung zur Schichtdicke d in Abbildung 6a beziehungsweise Abbildung 6b dargestellt. Außerdem wird mithilfe vom Pythonmodul matplotlib [4] eine lineare Regression der Form $a \cdot x + b$ berechnet und als Ausgleichsgerade in den Plot eingetragen.



(a) Lineare Ausgleichsrechnung zur Bestimmung des Absorptionskoeffizienten μ_{Fe} von Eisen.



(b) Lineare Ausgleichsrechnung zur Bestimmung des Absorptionskoeffizienten μ_{Pb} von Blei.

Abbildung 6: Messdaten zur Bestimmung der Absorptionskoeffizienten aus der Zählrate.

Der Absorptionskoeffizient entspricht der negativen Steigung der Geraden

$$\begin{array}{lll} -a_{\text{Fe}} = & \mu_{\text{Fe}} = & (41.16 \pm 1.56) \frac{1}{\text{m}} \\ -a_{\text{Pb}} = & \mu_{\text{Pb}} = & (97.80 \pm 1.81) \frac{1}{\text{m}}. \end{array}$$

Die Größe $N(0)$ wird jeweils als erstes durch eine Messung ohne eingesetzte Absorber bestimmt und ist in Tabelle 2 und Tabelle 3 aufgeführt.

Die im ersten Versuchsteil bestimmten Absorptionskoeffizienten werden nun mit theoretisch nach Gleichung 4 und Gleichung 5 berechneten Absorptionskoeffizienten verglichen. Für die Berechnung der Wirkungsquerschnitte σ_{com} wird der für den ^{137}Cs -Strahler charakteristische Wert $\varepsilon = 1,295$ benutzt. Dabei bezeichnet z die Kernladungszahl, M die molare Masse und ρ die Dichte des jeweiligen Stoffes. Die Daten zur Berechnung der Werte, sowie die gemessenen Werte sind in Tabelle 4 zu finden. Außerdem wird die Abweichung der gemessenen Werte von den Theoriewerten nach der Formel

$$a = \frac{|\mu_{\text{com}} - \mu_{\text{berechnet}}|}{\mu_{\text{berechnet}}} \cdot 100$$

berechnet. Auch die Abweichung ist in Tabelle 4 aufgelistet.

Tabelle 4: Theoretische Werte für die Absorptionskoeffizienten von Zink und Eisen [1],[2].

Absorber	$\sigma_{\text{com}} [\text{m}^2]$	z	$M \left[\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right]$	$\rho \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$	$\mu_{\text{com}} \left[\frac{1}{\text{m}} \right]$	$\mu_{\text{berechnet}} \left[\frac{1}{\text{m}} \right]$	Abweichung [%]
Eisen	2,57	26	55,8	7,874	$41,16 \pm 1,56$	56,78	27,5
Blei	2,57	82	207,2	11,340	$97,80 \pm 1,81$	69,46	40,8

4.2 Beta-Strahlung

Die Messung wird nach Abschnitt 3 mit einer β -Quelle durchgeführt und die Werte werden in Tabelle 5 eingetragen. Außerdem ist in der Tabelle auch der Nulleffekt A_U pro Zeit (siehe Tabelle 1) von der Aktivität A pro Zeit abgezogen.

Tabelle 5: Messdaten von β -Strahlung durch Aluminium.

Dicke $d/\mu\text{m}$	Zeit t/s	N	$A - A_U / \frac{1}{\text{s}}$
0	100	$57\,621 \pm 240$	$575,54 \pm 2,37$
100	100	4093 ± 64	$40,20 \pm 0,61$
125	100	973 ± 31	$9,00 \pm 0,28$
153	150	1537 ± 39	$9,52 \pm 0,23$
160	150	897 ± 30	$5,25 \pm 0,17$
200	200	456 ± 21	$1,55 \pm 0,08$
253	300	207 ± 14	$-0,04 \pm 0,02$
302	300	208 ± 14	$-0,04 \pm 0,02$
338	300	225 ± 15	$0,02 \pm 0,02$
400	400	280 ± 17	$-0,03 \pm 0,01$
444	450	593 ± 24	$0,59 \pm 0,03$
482	450	319 ± 18	$-0,02 \pm 0,01$

Die Aktivität $A - A_U$ wird logarithmisch in Beziehung zur Schichtdicke d in Abbildung 7 dargestellt.

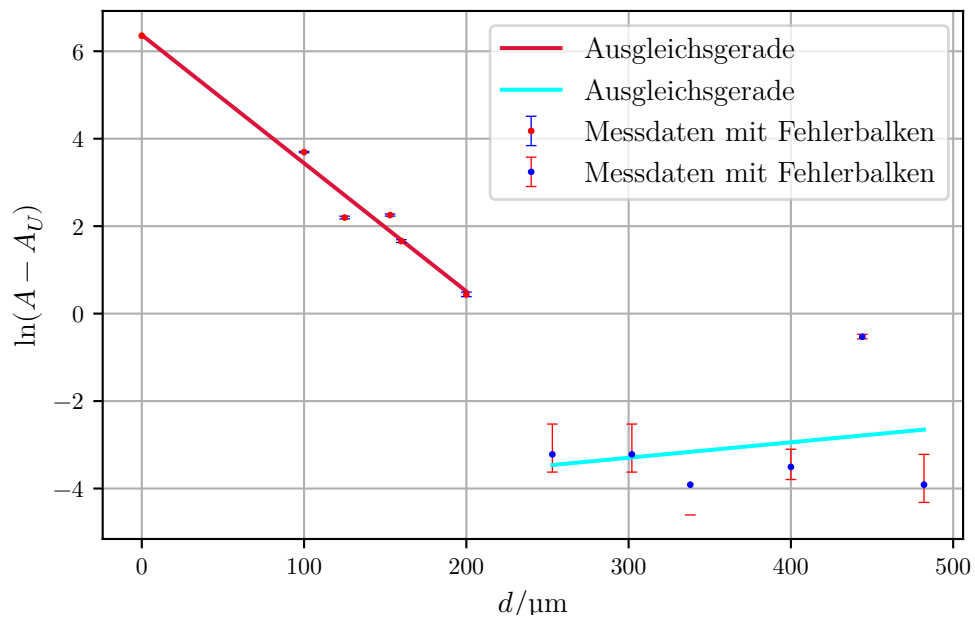


Abbildung 7: Lineare Regression der Aktivität aufgetragen gegen die Dicke.

Auch hier wird mithilfe vom Pythonmodul matplotlib [4] eine lineare Regression der Form $a \cdot x + b$ berechnet und als Ausgleichsgerade in den Plot eingetragen. Die Werte der

Koeffizienten der Ausgleichsgrade werden zu

$$\begin{aligned}a_1 &= (-0.029 \pm 0.002) \frac{1}{\mu\text{m}} \\b_1 &= (6.372 \pm 0.305) \\a_2 &= (0.004 \pm 0.007) \frac{1}{\mu\text{m}} \\b_2 &= (-4.357 \pm 2.673)\end{aligned}$$

berechnet. Die x-Koordinate des Schnittpunkts der beiden Ausgleichsgeraden ist der Wert R_{max} und ergibt sich aus

$$R_{max} = \frac{b_2 - b_1}{a_1 - a_2}. \quad (8)$$

Dieser muss dann noch mit der Dichte von Aluminium $\rho = 2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ [3] verrechnet werden und ergibt sich somit zu

$$R_{max} = 0,0878 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2}. \quad (9)$$

Der Fehler von R_{max} wird mit der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung

$$\sigma_R = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \sigma_i \right)^2} = \sqrt{\frac{\sigma_{a_1}^2 (-b_1 + b_2)^2}{(-a_1 + a_2)^4} + \frac{\sigma_{a_2}^2 (-b_1 + b_2)^2}{(-a_1 + a_2)^4} + \frac{\sigma_{b_1}^2}{(-a_1 + a_2)^2} + \frac{\sigma_{b_2}^2}{(-a_1 + a_2)^2}}$$

berechnet, sodass sich R_{max} zu

$$R_{max} = (0,0878 \pm 8,156 \cdot 10^{-3}) \frac{\text{g}}{\text{cm}^2} \quad (10)$$

ergibt. Damit und mit Gleichung 6 kann die Energie E_{max} zu

$$E_{max} = 0,316 \text{ MeV} \quad (11)$$

berechnet werden. Mit der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung

$$\sigma_E = 1.92 \sqrt{\frac{\sigma_R^2 (R + 0.11)^2}{R^2 + 0.22R}}$$

ergibt sich E_{max} zu

$$E_{max} = (0,316 \pm 9.464 \cdot 10^{-3}) \text{ MeV}. \quad (12)$$

5 Diskussion

In Tabelle 4 sind die Ergebnisse der Messungen zur γ -Strahlung gezeigt. Es lässt sich feststellen, dass die gemessenen Werte bei beiden Absorbermaterialien weit von den

theoretisch bestimmten Werten abweichen. Anzumerken ist, dass der gemessene Wert für Blei über dem theoretischen Wert liegt, sodass angenommen werden kann, dass hier eher der Photoeffekt eine Rolle spielt. Messfehler können durch das Absorbermaterial entstanden sein, da dieses eventuell nicht überall dieselbe Dicke aufweist.

Bei der β -Strahlung ist der Verlauf ähnlich zu dem erwarteten Verlauf. Die Abweichungen können zum einen darin liegen, dass der Zerfall zufällig ist und gegen Ende hauptsächlich der Nulleffekt gemessen wurde, welcher auch kein gleichbleibender Wert ist, sondern nur ein gemittelter Wert über eine bestimmte Zeit. Die Messfehler können hauptsächlich durch Verlängerung der Messzeit verringert werden. Es ist anzumerken, dass die Schichtdicke soweit angepasst werden sollte, dass die Zählrate annähernd gleich bleibt, bis auf statistische Schwankungen.

6 Anhang

704 Absorption von γ - & β -Strahlung				
Eisen		Nulleffekt	828	
Dicke	t	N		\sqrt{N}
0 mm 0 mm	60s	6976		83,52
0,5 mm	60s	6738		82,09
1 mm	60s	6635		81,46
1,5 mm	60s	6374		79,84
2 mm	60s	6463		80,39
2,5 mm	60s	6261		79,13
3 mm	60s	5622		74,98
5 mm	60s	5410		73,55
10 mm				
6 mm	60s	5681		75,37
7 mm	60s	5318		72,92
10 mm	60s	4569		67,59
15 mm	60s	4101		64,04
Blei				
0 mm	60s	6718		81,96
1 mm	60s	5866		76,59
2 mm	90s	7875		88,74
3 mm	90s	7675		87,61
4 mm	90s	6727		82,02
5 mm	90s	5963		77,22
6 mm	90s	5287		72,71
10 mm	120s	5014		70,81
11 mm	150s	5913		76,90
12 mm	150s	5363		73,23
14 mm	180	5103		71,44
15 mm	180	4511		67,16

Abbildung 8: Messwerte zum Versuch.

V704 Absorption von α - und β -Strahlung

β -Strahlung $N_0 = 657 \pm 26$ $A_0 = \frac{N_0}{t} = 0,73 \frac{1}{s} \pm 0,03$ Fehler = \sqrt{N}
 Poisson-Fehler
 $t = 900 s$

Nulleffekt:

Zählrate	Dicke / μm	Zeit / s	Aktivität A
57621 \pm 240	0	100	576,21 \pm 2,4
4093 \pm 64	100	100	40,93 \pm 0,64
973 \pm 31	150 125	100	9,73 \pm 0,31
1532 \pm 38	153 \pm 0,5	150	10,25 \pm 0,26
897 \pm 30	160 \pm 1	150	5,98 \pm 0,20
456 \pm 21	200 \pm 1	200	2,28 \pm 0,11
207 \pm 14	253 \pm 1	300	0,69 \pm 0,05
208 \pm 14	302 \pm 1	300	0,69 \pm 0,05
225 \pm 15	338 \pm 1	300	0,75 \pm 0,05
280 \pm 17	400 \pm 1	400	0,70 \pm 0,04
593 \pm 24	444 \pm 2	450	1,32 \pm 0,05
319 \pm 18	482 \pm 1	450	0,71 \pm 0,04

Abbildung 9: Messwerte zum Versuch.

Literatur

- [1] LUMITOS. 1997-2022. URL: <https://www.chemie.de/lexikon/Eisen.html> (besucht am 27.04.2022).
- [2] LUMITOS. 1997-2022. URL: <https://www.chemie.de/lexikon/Blei.html> (besucht am 27.04.2022).
- [3] LUMITOS. 1997-2022. URL: <https://www.chemie.de/lexikon/Aluminium.html> (besucht am 27.04.2022).
- [4] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. Version 1.4.3. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 90–95. URL: <http://matplotlib.org/>.
- [5] *Versuchsanleitung zu Versuch Nr. 704 Absorption von α - und β -Strahlung*. TU Dortmund, Fakultät Physik. 2022.