

VERSUCH 701

Reichweite von Alpha-Strahlung

Annika Bennemann
annika.bennemann@tu-dortmund.de

Paulin Vehling
paulin.vehling@tu-dortmund.de

Durchführung: 19.04.2022

Abgabe: 26.04.2022

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
3 Durchführung	4
4 Auswertung	5
4.1 Bestimmung der mittleren Reichweite und Energie von Alpha-Teilchen . .	5
4.2 Statistik des radioaktiven Zerfalls	10
5 Diskussion	12
6 Anhang	14
Literatur	15

1 Zielsetzung

Ziel des Versuches ist es, die Reichweite von Alpha-Strahlung in Luft und dadurch die Energie der Alpha-Strahlung zu bestimmen. Außerdem soll die Statistik des radioaktiven Zerfalls bestimmt werden.

2 Theorie

Wenn Alpha-Teilchen durch Luft laufen, kommt es zur Wechselwirkung mit anderen Atomen. Aufgrund von Ionisierungsprozessen, Anregung und Dissoziation von Molekülen, kommt es zu Energieverlusten bzw. einer Abgabe von Energien. Dieser Energieverlust pro Wegstück ist abhängig von der Dichte, der durchlaufenen Materie und der Energie der Alpha-Strahlung. Die Wechselwirkungswahrscheinlichkeit nimmt bei kleinen Geschwindigkeiten zu, es gibt jedoch keine universelle Formel. Für alle Energiebereiche gelten unterschiedliche Formeln, bei hinreichend großen Energien gilt die Bete-Bloch-Gleichung

$$-\frac{dE_\alpha}{dx} = \frac{z^2 e^4}{4\pi\epsilon_0 m_e} \frac{nZ}{v^2} \ln \left(\frac{2m_e v^2}{I} \right). \quad (1)$$

wobei v die Geschwindigkeit der α -Strahlung, z die Ladung, n die Teilchendichte, I die Ionisierungsenergie des durchlaufenen Gases, Z die Ordnungszahl sind. Aufgrund von Ladungsaustauschprozessen gilt die Bete-Bloch-Gleichung nicht für kleine Energien. Deshalb wird eine empirisch gewonnene Kurve für die Alpha-Strahlung in Luft verwendet. Es muss

$$R_m = 3,1 \cdot E_\alpha^{3/2} \quad (2)$$

gelten, weswegen nur Energien unter 2,5 MeV berücksichtigt werden. R_m ist die mittlere Reichweite von α -Teilchen, welche die Reichweite angibt, die die Hälfte der Teilchen noch erreichen. Die Reichweite R eines Alpha-Teilchens lässt sich durch

$$R = \int_0^{E_\alpha} \frac{dE_\alpha}{-dE_\alpha/dx} \quad (3)$$

beschreiben, wobei die Energie in Megaelektronenvolt angegeben in einem Bereich unter 2,5 MeV liegen sollte und R in Millimeter angegeben wird. Wenn die Temperatur und das Volumen konstant bleiben, so ist die Reichweite R eines Alpha-Teilchens proportional zum Druck. Es wird eine Absorptionsmessung durchgeführt, sodass sich die effektive Länge x bei festem Abstand x_0 zwischen Probe und Detektor durch

$$x = x_0 \frac{p}{p_0} \quad (4)$$

ausdrücken lässt. Der Normaldruck p_0 beträgt hierbei $p_0 = 1013 \text{ mbar}$.

3 Durchführung

Bei dem im Versuch verwendeten α -Strahler handelt es sich um $^{241}_{95}\text{Am}$, welches mit einer Halbwertszeit von $T_{1/2} = 458a$:



zerfällt.

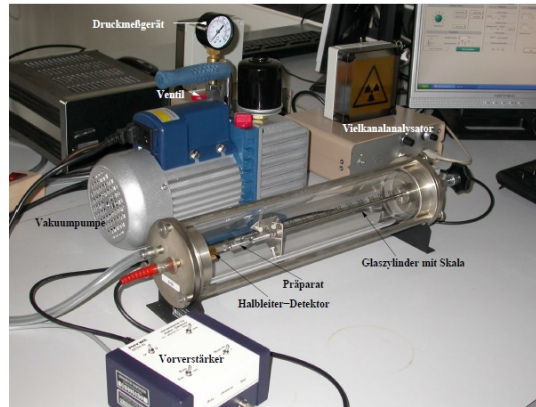


Abbildung 1: Versuchsaufbau zur Messung der Reichweite von Alphastrahlung[2, S. 2].

Wie in Abbildung 1 zu sehen, wird der Versuch aufgebaut. Das Präparat befindet sich auf einer beweglichen Halterung in einem evakuierbaren Glaszylinder. Im Glaszylinder befindet sich außerdem ein Detektor. Mit der beweglichen Halterung kann der Abstand x_0 zwischen Präparat und Detektor verändert werden. Bei dem Detektor handelt es sich um einen Halbleiter-Sperrschichtzähler, der ähnlich wie eine in Sperrichtung betriebene Diode funktioniert. Sobald ein Alpha-Teilchen auf den Detektor trifft entsteht ein Elektronen-Loch-Paar in der Verarmungszone, wodurch ein Stromimpuls entsteht. Dieser wird durch einen Vorverstärker verstärkt und an einen Vielkanalanalysator weitergeleitet. Die Auswertung des Vielkanalanalysators erfolgt über ein Computerprogramm.

Vor der Messung muss die Diskriminatorschwelle am Vielkanalanalysator eingestellt werden um Rauschen vom Verstärker zu unterdrücken, welches das Ergebnis verfälschen würde. Außerdem wird der Glaszylinder evakuiert. Das Präparat wird auf einen Abstand $x_0 = 1,7\text{cm}$ zum Detektor platziert und die Messung gestartet. Der Messzeitraum beträgt jeweils 120 s. Der Druck im Glaszylinder wird um 50 mbar erhöht und die Messung wiederholt. Dieses Verfahren wird so lange wiederholt bis im Glaszylinder wieder Normaldruck herrscht. In einer Tabelle werden der Druck p , die Zählrate N und der Kanal des Energiemaximums notiert. Der Abstand x_0 wird auf $x_0 = 3,0\text{cm}$ vergrößert und die Messung erneut durchgeführt.

Anschließend soll die Statistik des radioaktiven Zerfalls überprüft werden, indem bei vollkommen evakuiertem Zylinder 100 Messungen zu je 10 s durchgeführt werden, in denen die Anzahl der Zerfälle aufgenommen wird. Danach werden hieraus die Varianz und der Mittelwert errechnet und mit einer Gauß- und Poissonverteilung verglichen.

4 Auswertung

4.1 Bestimmung der mittleren Reichweite und Energie von Alpha-Teilchen

Zur Berechnung der mittleren Reichweite der α -Teilchen wird der Versuch nach Abschnitt 3 mit einem Abstand $x_0 = 1,7\text{ cm}$ durchgeführt und die Ergebnisse in Tabelle 1 aufgelistet. Aus den Messwerten wird der effektive Abstand x mithilfe von Gleichung 4 berechnet und auch in Tabelle 1 eingetragen. Die Energie wird dadurch bestimmt, dass die Position des Maximums bei $p = 0\text{ mbar}$, nachfolgend als N_0 bezeichnet, dem Energiewert 4 MeV entspricht und die restlichen Channel und Energien proportional dazu sind. Auch die Energiewerte werden in der Tabelle notiert. Dieselbe Messung wird für einen Abstand von $x_0 = 3,0\text{ cm}$ wiederholt und die Ergebnisse analog zur ersten Messreihe in Tabelle 2 notiert.

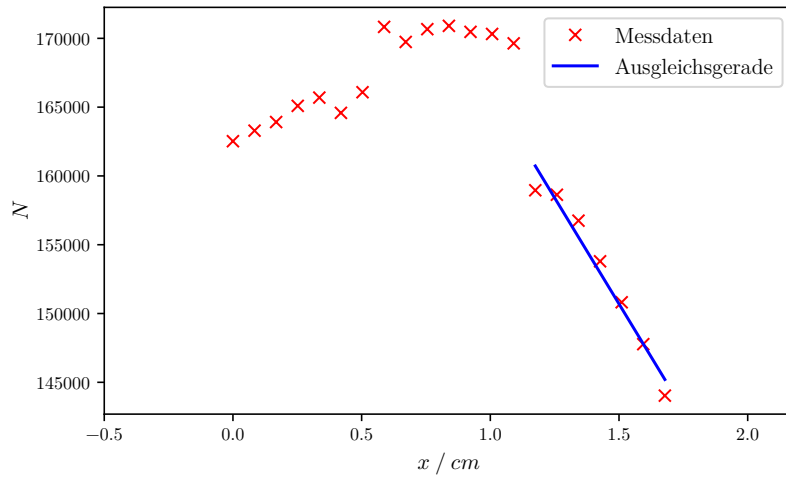
Tabelle 1: Messdaten zum Alpha-Zerfall bei einem Abstand von $x_0 = 1,7\text{ cm}$.

Luftdruck p/mbar	Anzahl N der Intensi- tätsmaxima	Kanal des Energima- ximums	effektiver Abstand x/cm	Energie E/MeV
0	162 524	1023	0	4,00
50	163 290	960	0,08	3,75
100	163 917	1039	0,17	4,06
150	165 093	1023	0,25	4,00
200	165 693	1023	0,34	4,00
250	164 583	1023	0,42	4,00
300	166 084	1023	0,50	4,00
350	170 833	1039	0,59	4,06
400	169 738	1023	0,67	4,00
450	170 667	1007	0,76	3,94
500	170 908	1023	0,84	4,00
550	170 471	1023	0,92	4,00
600	170 319	1023	1,01	4,00
650	169 636	975	1,09	3,81
700	158 958	911	1,17	3,56
750	158 632	903	1,26	3,53
800	156 749	879	1,34	3,44
850	153 795	847	1,43	3,31
900	150 817	847	1,51	3,31
950	147 773	815	1,59	3,19
1000	144 032	803	1,68	3,14

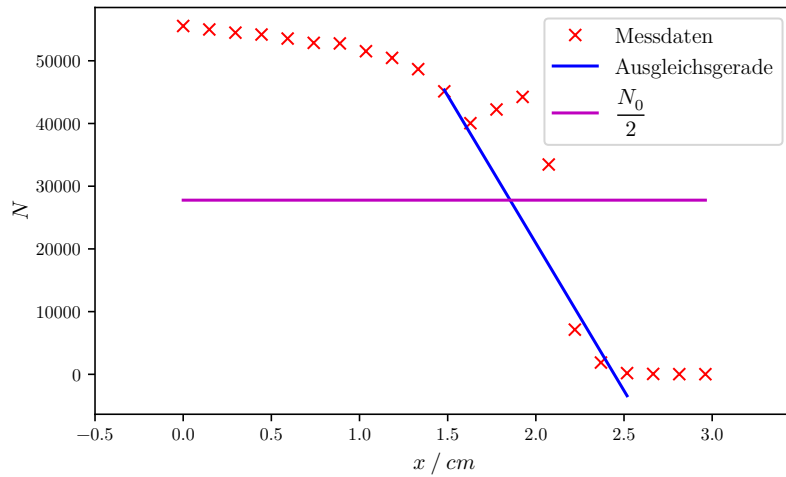
Tabelle 2: Messdaten zum Alpha-Zerfall bei einem Abstand von $x_0 = 3\text{cm}$.

Luftdruck p/mbar	Anzahl N der Intensi- ttsmaxima	Kanal des Energima- ximums	effektiver Abstand x/cm	Energie E/MeV
0	55 548	1107	0,00	4,00
50	54 994	1023	0,15	3,70
100	54 486	1023	0,30	3,70
150	54 186	987	0,44	3,57
200	53 546	911	0,59	3,29
250	52 861	911	0,74	3,29
300	52 766	896	0,89	3,24
350	51 527	896	1,04	3,24
400	50 461	847	1,18	3,06
450	48 665	847	1,33	3,06
500	45 128	847	1,48	3,06
550	40 047	751	1,63	2,71
600	42 233	719	1,78	2,60
650	44 238	655	1,92	2,37
700	33 459	652	2,07	2,36
750	7126	688	2,22	2,49
800	1878	687	2,37	2,48
850	195	687	2,52	2,48
900	67	686	2,67	2,48
950	28	686	2,81	2,48
1000	23	686	2,96	2,48

Zur Bestimmung der Reichweite der α -Teilchen sind in Abbildung 2a und Abbildung 2b die Messwerte der Anzahl N der Intensitätsmaxima gegen den effektiven Abstand x aufgetragen.



(a) Messdaten zur Bestimmung der mittleren Reichweite aus der Zählrate (Messreihe 1).



(b) Messdaten zur Bestimmung der mittleren Reichweite aus der Zählrate (Messreihe 2).

Abbildung 2: Messdaten zur Bestimmung der mittleren Reichweite aus der Zählrate.

In Abbildung 2a wird eine lineare Regression der abfallenden Werte im Intervall $x = 1,17 \text{ cm}$ bis $x = 1,68 \text{ cm}$ mittels des Pythonmoduls matplotlib [1] in der Form $N = m \cdot x + b$ durchgeführt. Für die lineare Regression in Abbildung 2b geht das Intervall von $x = 1,48 \text{ cm}$ bis $x = 2,37 \text{ cm}$, jedoch werden hier die Werte zwischen $x = 1,78 \text{ cm}$ bis $x = 2,07 \text{ cm}$ nicht mit berücksichtigt, da diese nicht dem linearen Verlauf folgen. Die Parameter betragen hierbei

$$m_1 = (-30827.55 \pm 2675.73) \frac{1}{\text{cm}},$$

$$b_1 = 196939.29 \pm 3843.14$$

und

$$m_2 = (-47049.01 \pm 3437.24) \frac{1}{\text{cm}},$$

$$b_2 = 115016.41 \pm 7165.45.$$

Eine horizontale Gerade ist außerdem auf Höhe von $\frac{N_0}{2}$ eingezeichnet. (Bei Abbildung 2a nicht im angezeigten Bereich.) Der Schnittpunkt der beiden Geraden wird durch

$$\frac{N_0}{2} = m \cdot x + b$$

$$x = \frac{1}{m} \left(\frac{N_0}{2} - b \right)$$

berechnet, wobei das errechnete x der mittleren Reichweite R_m der α -Teilchen entspricht. Da m und b , fehlerbehaftete Größen sind, muss der Fehler von R_m mithilfe der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung

$$\Delta R_m = \sqrt{\left(-\frac{1}{m^2} \left(\frac{N_0}{2} - b \right) \right)^2 \cdot (\Delta m)^2 + \left(\frac{1}{m} \right)^2 \cdot (\Delta b)^2}$$

berechnet werden. Somit ergibt sich für die mittleren Reichweiten R_m der α -Strahlung

$$R_{m1} = (6.40 \pm 0.60) \text{cm}$$

$$R_{m2} = (2.43 \pm 0.23) \text{cm}.$$

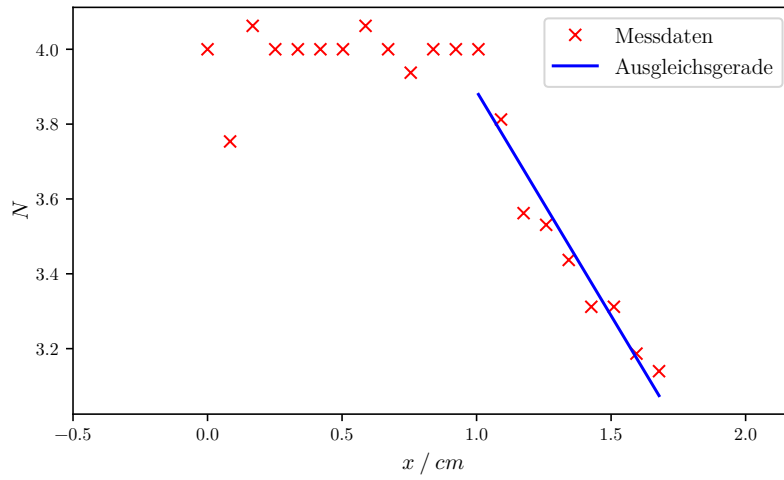
Aus den mittleren Reichweiten lassen sich durch Umstellen der Gleichung 2 die zugehörigen Energien E_α zu

$$E_{\alpha,m1} = (1.62 \pm 0.10) \text{MeV}$$

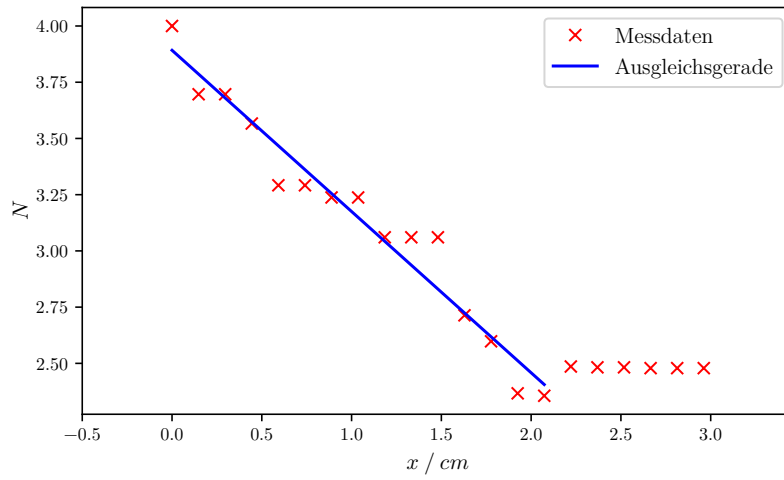
$$E_{\alpha,m2} = (0.85 \pm 0.05) \text{MeV}$$

berechnen.

Die Messwerte der Energie E aus Tabelle 1 und Tabelle 2 werden zudem in Abbildung 3a und Abbildung 3b jeweils gegen x aufgetragen.



(a) Bestimmung des Energieverlustes aus den Messdaten (Messreihe 1).



(b) Bestimmung des Energieverlustes aus den Messdaten (Messreihe 2).

Abbildung 3: Bestimmung des Energieverlustes.

Auch hier werden Regressionsgeraden mittels Python erstellt und die Parameter der linearen Regressionen der Form $E = c \cdot x + d$ lauten

$$\begin{aligned}
 c &= (-1.199 \pm 0.120) \frac{\text{MeV}}{\text{cm}} \\
 d &= (5.087 \pm 0.164) \text{MeV} \\
 c_2 &= (-0.717 \pm 0.044) \frac{\text{MeV}}{\text{cm}} \\
 d_2 &= (3.892 \pm 0.054) \text{MeV}.
 \end{aligned}$$

Die Änderung der Energie ist die Steigung der Ausgleichsgerade. Somit ergeben sich für

die Änderung der Energie $\frac{dE_\alpha}{dx}$

$$\frac{dE_{\alpha,m1}}{dx} = c = (-1.199 \pm 0.120) \frac{\text{MeV}}{\text{cm}}$$

$$\frac{dE_{\alpha,m2}}{dx} = c2 = (-0.717 \pm 0.044) \frac{\text{MeV}}{\text{cm}}.$$

4.2 Statistik des radioaktiven Zerfalls

Nach Abschnitt 3 wird die Messung durchgeführt und die erhobenen Zählraten in Tabelle 3 notiert.

Tabelle 3: 100 statistische Messwerte der Zählrate bei $p = 0$ mbar und Abstand $x = 3,0$ cm.

4361	4256	4627	4272	4460
4104	4177	4266	4433	4389
4524	4259	4270	4630	4357
4638	4394	4602	4570	4528
4459	4436	4378	4466	4585
4564	4320	4455	4617	4347
4570	4305	4514	4534	4399
4384	4196	4525	4413	4573
4379	4425	4290	4600	4153
4580	4606	4265	4439	4370
4529	4650	4506	4622	4488
4415	4643	4491	4321	4629
4379	4212	4080	4546	4298
4345	4402	4607	4589	4706
4539	4602	4371	4444	4173
4586	4451	4576	4435	4577
4419	4521	4455	4513	4483
4321	4340	4289	4381	4348
4580	4360	4560	4588	4723
4313	4414	4216	4396	4651

Aus den Daten in Tabelle 3 werden zunächst der Mittelwert

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i = 4443,47$$

und die Standardabweichung

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (N_i - \mu)^2} = 141,70$$

bestimmt.

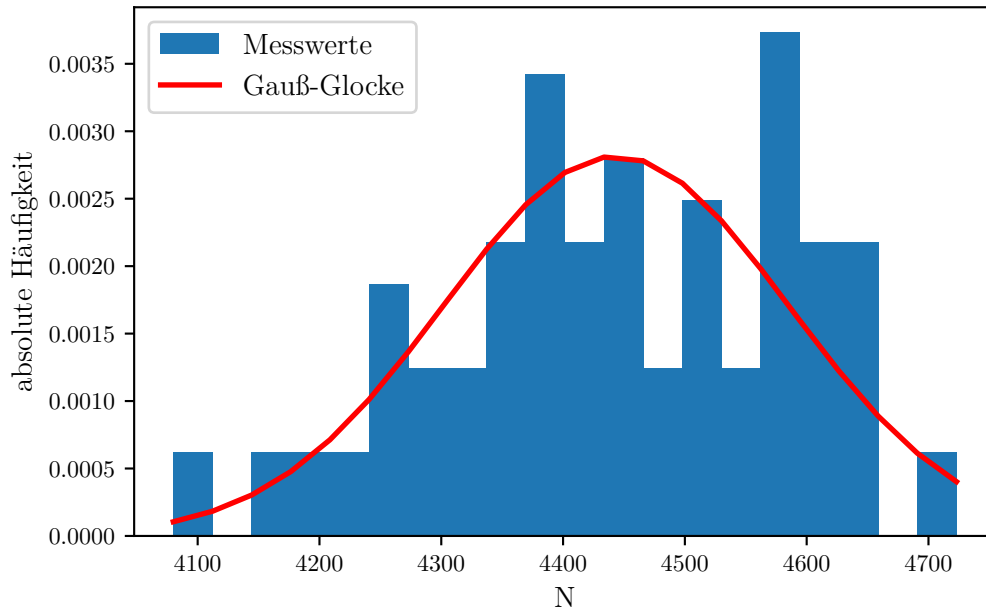


Abbildung 4: Gaußverteilung der Messwerte.

In Abbildung 4 sind die Werte gaußverteilt in einem Histogramm dargestellt. Die zugehörige Gaußkurve

$$G(N, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(N - \mu)^2}{2\sigma^2}\right).$$

ist außerdem abgebildet.

Um die Poissonverteilung zu berechnen werden die Werte zuerst normiert

$$M = N_{i, \text{norm}} = \frac{N_i - N_{\min}}{n}.$$

$N_{\min} = 4080$ ist hierbei der kleinste der gemessenen Werte. Die normierten Werte M liegen nun zwischen 0 und 7. Der Mittelwert der normalverteilten Werte beträgt

$$\mu_P = 3.61.$$

In Abbildung 5 sind nun die normalverteilten Messwerte und die theoretische Poissonverteilung nach der Formel

$$p_{\mu_P}(M) = \frac{\mu_P^M}{M!} \cdot e^{-\mu_P}$$

in einem Histogramm aufgetragen.

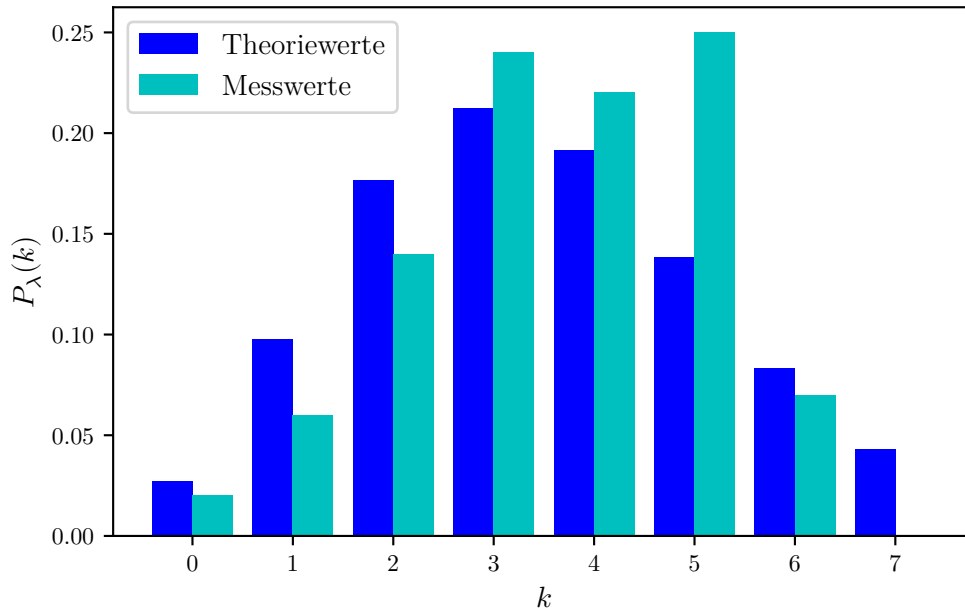


Abbildung 5: Poissonverteilung der Messwerte.

5 Diskussion

Im ersten Versuchsteil werden die mittleren Reichweiten der Alpha-Strahlung zu

$$R_{m1} = (6.40 \pm 0.60) \text{ cm}$$

$$R_{m2} = (2.43 \pm 0.23) \text{ cm}$$

und die zugehörigen Energien zu

$$E_{\alpha,m1} = (1.62 \pm 0.10) \text{ MeV}$$

$$E_{\alpha,m2} = (0.85 \pm 0.05) \text{ MeV}$$

bestimmt. Die Energieänderungen betragen

$$\frac{dE_{\alpha,m1}}{dx} = c = (-1.199 \pm 0.120) \frac{\text{MeV}}{\text{cm}}$$

$$\frac{dE_{\alpha,m2}}{dx} = c2 = (-0.717 \pm 0.044) \frac{\text{MeV}}{\text{cm}}.$$

Es fällt auf, dass die Werte der beiden Messreihen stark voneinander abweichen, was so nicht zu erwarten war. Eine Fehlerquelle in der ersten Messreihe kann ein zu geringer

Abstand x_0 sein, weshalb unter anderem der Wert $\frac{N_0}{2}$ von der Zählrate während der Messung nicht erreicht wird. Daher sind die Messwerte aus Messreihe 1 eventuell nicht geeignet um die mittlere Reichweite und dementsprechend auch die zugehörige Energie zu bestimmen. Die Messreihe 2 entspricht eher den zu erwartenden Ergebnissen. Jedoch gibt es in Abbildung 2b wenige Werte die im Intervall der linearen Regression liegen, jedoch dem linearen Verlauf der Gerade nicht folgen. Diese Werte können als „Ausreißer“ beziehungsweise fehlerhafte Werte angenommen werden. Gleichung 2 gilt außerdem nur für Energien unter 2,5 MeV, was im Versuch auch nicht gegeben ist. Weitere Fehlerquellen sind der ungenau abzulesende Abstand x_0 und der Druck p .

Im zweiten Versuchsteil wird das Histogramm der Messwerte mit einer Gaußkurve und einer Poissonverteilung verglichen. Bei dem Vergleich mit der Gaußkurve fällt auf, dass die Werte im Bereich um $N = 4600$ stark von der Gaußkurve abweichen, ansonsten aber recht nah an der Kurve liegen. Auch bei der Poissonverteilung lässt sich ein ähnliches Ergebnis im Bereich $k = 5$ feststellen. Der Alpha-Zerfall ist ein zufälliger Prozess, sodass eine Anzahl von 100 Messungen zu gering ist um eine Häufigkeitsverteilung genau abbilden zu können.

6 Anhang

V 701	Reichweite	Von	Druck !	Maximum	Counts	Charakter
Länge	Pulse !	Zeit	Druck !	Maximum	Counts	Charakter
		120s	0	523		
1,7 cm	162524		50		1023	
	163290		100		860	
	163817		150		1023	
	165083		200		1023	
	165653		250		1023	
	164583		300		1023	
	166084		350		1031	
	170833		400		1023	
	169788		450		1023	
	170667		500		1023	
	170906		550		1023	
	170471		600		1023	
	170389		650		976	
	169636		700		911	
	158958		750		903	
	158632		800		873	
	156748		850		847	
	153735		900		847	
	150817		950		815	
	147773		1000		803	
	144032					
3 cm	55548		0		1101	
	54894		50		1023	
	54486		100		1023	
	54486		150		987	
	53546		200		911	
	52861		250		911	
	52766		300		856	
	51527		350		856	
	50461		400		847	
	48665		450		847	
	45128		500		847	
	40047		550		751	
	42233		600		719	
	44238		650		655	
	33459		700		657	
	7126		750		688	
	1878		800		687	
	135		850		687	
	67		900		686	
	28		950		686	
	23		1000		688	
Pulse						
1. 4361	8. 4266	15. 4357	22. 4436	29. 4617	36. 4384	43. 4290
2. 4256	9. 4433	16. 4638	23. 4378	30. 4347	37. 4136	44. 4600
3. 4627	10. 4389	17. 4384	24. 4466	31. 4570	38. 4525	45. 4153
4. 4272	11. 4524	18. 4602	25. 4585	32. 4305	39. 4413	46. 4580
5. 4460	12. 4233	19. 4570	26. 4564	33. 4514	40. 4573	47. 4606
6. 4104	13. 4270	20. 4528	27. 4370	34. 4534	41. 4373	48. 4265
7. 4177	14. 4630	21. 4459	28. 4455	35. 4388	42. 4425	49. 4439

Abbildung 6: Messwerte zum Versuch 701.

50. 4370	56. 4415	62. 4212	68. 4607	74. 4444
51. 4523	57. 4643	63. 4080	69. 4585	75. 4173
52. 4650	58. 4491	64. 4546	70. 4206	76. 4586
53. 4506	59. 4321	65. 4298	71. 4539	77. 4451
54. 4622	60. 4625	66. 4345	72. 4602	78. 4576
55. 4488	61. 4379	67. 4402	73. 4371	79. 4435
80. 4577	83. 4455	86. 4321	88. 4391	92. 4360
81. 4413	84. 4513	87. 4340	90. 4348	93. 4560
82. 4521	85. 4483	88. 4289	91. 4580	94. 4586
				95. 4723
				96. 4313
				97. 4414
				98. 4210
				99. 4210
				100. 4210

Abbildung 7: Messwerte zum Versuch 701.

Literatur

- [1] 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/>.
- [2] *Versuchsanleitung zu Versuch Nr. 701 Reichweite von -Strahlung*. TU Dortmund, Fakultät Physik. 2022.