

V16

Rutherford-Streuung

Ann-Sophie Schubert
ann-sophie.schubert@udo.edu

Lars Funke
lars.funke@udo.edu

Durchführung: 15. Mai 2017

Abgabe: 1. Januar 1970

TU Dortmund – Fakultät Physik

1 Ziel

In diesem Versuch soll die Streuung von α -Strahlung an Folien aus Gold, Aluminium und Bismut untersucht werden. Es sollen die Aktivität der verwendeten Probe, die verwendete Foliendicke und der differentielle Wirkungsquerschnitt bestimmt werden. Des Weiteren soll die Z-Abhängigkeit sowie Mehrfachstreuung untersucht werden.

2 Theorie

2.1 α -Zerfall

Ein α -Zerfall sieht im Allgemeinen wie folgt aus



Ein Nuklid X zerfällt in ein Tochternuklid Y und ein α -Teilchen, welches aus einem Heliumkern besteht. Aufgrund des Massendefekts wird bei dem Zerfall zusätzlich eine Energie ΔE frei, wodurch das α -Teilchen kinetische Energie erhält. Die Energie kann auch in Form eines angeregten Zustands des Tochternuklids vorliegen. Der Übergang zum Grundzustand erfolgt durch die Emission von γ -Strahlung. Für die in diesem Experiment verwendete Probe gilt entsprechend



Americium zerfällt in Isotope von Neptunium. Das zugehörige Zerfallsschema ist in Abbildung 1 dargestellt.

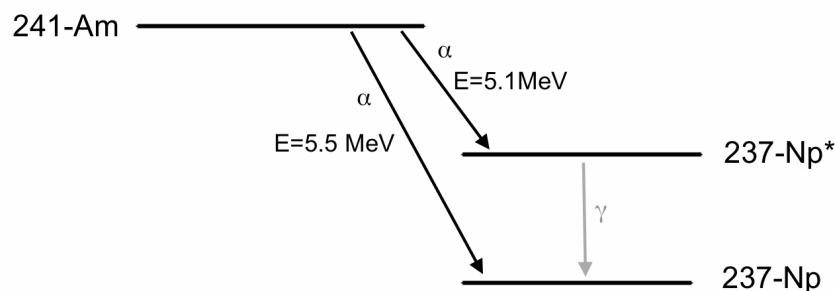


Abbildung 1: Zerfallsschema von ${}^{241}\text{Am}$.

Im Atomkern wirken sowohl die starke als auch die elektrostatische Wechselwirkung. Durch kurzreichweitige starke Wechselwirkung wirken anziehende Kräfte im Atomkern. Durch die schwächere langreichweitige elektrostatische Wechselwirkung wiederum treten

abstoßende Kräfte zwischen gleichen Ladungen auf. Daher liegt der sogenannte Coulombwall vor, den das α -Teilchen zu Verlassen des Kerns überwinden muss. Die Energie, die dafür benötigt wird, ist größer als die, die dem α -Teilchen zur Verfügung steht. Somit liegt bei klassischer Betrachtung eine stabile Bindung vor. Der in der Quantenmechanik beschriebene Tunneffekt besagt jedoch, dass Teilchen mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit einen klassisch verbotenen Bereich durchqueren kann. Somit kann ein α -Teilchen die Potentialbarriere trotz zu geringer kinetischer Energie überwinden.

2.2 Wechselwirkung mit Materie

Die Reichweite von α -Strahlung in Luft beträgt ungefähr 0,1 m (bei Normaldruck). Sie ist proportional zu $\frac{1}{p}$ mit p als Druck. In Abbildung 2 ist der Zusammenhang von Reichweite und Druck für den hier verwendeten Strahler graphisch dargestellt.

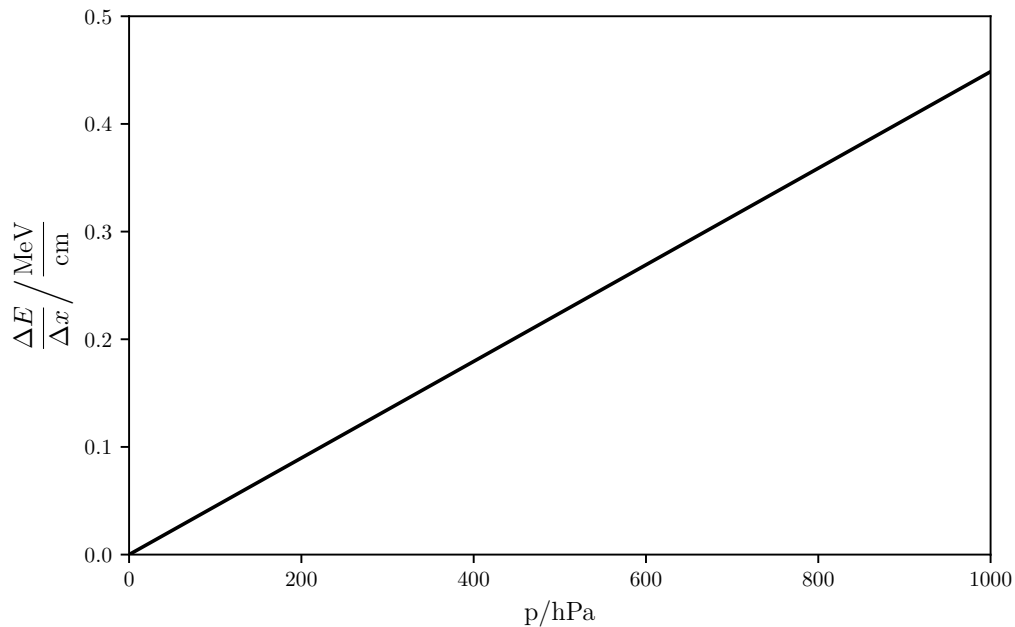


Abbildung 2: Energieverlust der α -Teilchen in Luft in Abhängigkeit vom Druck p .

Trifft ein α -Teilchen auf Materie, können verschiedene Wechselwirkungen auftreten. Davon sollen die Wechselwirkung mit Hüllenelektronen sowie Wechselwirkung mit dem Kern im Folgenden erläutert werden.

2.2.1 Bethe-Bloch-Gleichung

Die Bethe-Bloch-Gleichung beschreibt den mittleren Energieverlust pro Strecke schwerer geladener Teilchen in Materie.

$$-\frac{dE}{dx} = -\frac{4\pi e^4 z^2 N Z}{m_0 v^2 (4\pi \epsilon_0)^2} \ln \frac{2m_0 v^2}{I} \quad (3)$$

Dabei ist E die Energie, x die Strecke, z die Ladungszahl des Teilchens, N die Anzahl der Atome pro cm^3 , Z die Kernladungszahl des Materials, m_0 die Ruhemasse des Elektrons, v die Geschwindigkeit des Teilchens und I die mittlere Ionisationsenergie. Die Ionisationsenergie kann mit folgender Formel berechnet werden

$$I = 10 \text{ eV} \cdot Z. \quad (4)$$

Bei der Wechselwirkung mit einem Hüllenelektron findet ein inelastischer Stoß statt. Somit gibt das geladene Teilchen (hier α -Teilchen) Energie an dieses Elektron ab. Eine Richtungsänderung findet nicht statt. Der Energieverlust bezieht nur Verluste durch Ionisation mit ein. Diese Gleichung gilt nicht für Elektronen, da diese von den Hüllenelektronen des Streumaterials nicht unterscheidbar sind. Sowohl relativistische als auch quantenmechanische Effekte werden berücksichtigt.

2.2.2 Rutherfordsche Streuformel

Für die elastische Streuung am Kern gilt die Rutherfordsche Streuformel.

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta) = \frac{1}{(4\pi\epsilon_0)^2} \left(\frac{zZe^2}{4E} \right)^2 \frac{1}{\sin^4\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (5)$$

$\frac{d\sigma}{d\Omega}$ ist der differentielle Wirkungsquerschnitt, wobei Ω dem Raumwinkel entspricht. θ ist der Streuwinkel und E_α die mittlere kinetische Energie des α -Teilchens. Da elastische Streuung vorliegt, findet kaum Energie übertragen und die Flugrichtung des Teilchens geändert. In dieser Formel wird der Einfluss von Mehrfachstreuung nicht berücksichtigt. Außerdem gilt sie nicht für quantenmechanische und relativistische Effekte. Für hohe Energien wird die Wechselwirkung mit dem Kern durch die sogenannte Mott-Streuung beschrieben, welche den Formfaktor sowie quantenmechanische und relativistische Effekte beinhaltet.

3 Aufbau und Durchführung

Als Strahlungsquelle wird ^{241}Am verwendet. Zur Kollimation dienen Schlitzblenden der Größe $2 \text{ mm} \cdot 10 \text{ mm}$. Anschließend wird die α -Strahlung an einer dünnen Folie gestreut und von einem Surface-Barrier Detektor in Abhängigkeit vom Streuwinkel θ aufgenommen. Die vom Detektor gemessenen Impulse werden mittels Amplifier nachverstärkt. Um Wechselwirkung der α -Teilchen mit Luft zu verhindern, wird der Versuch im Vakuum durchgeführt. Zum Evakuieren wird eine Drehschieberpumpe verwendet. Für die Messreihe zur Ermittlung der Foliendicke wird ein Oszilloskop benutzt und zur Messung der Zählrate wird ein Zähler an den Detektor angeschlossen. Die Maße des Versuchsaufbaus können Abbildung 3 entnommen werden.

Dicken der Folien:

- Gold: $x_1 = 2 \mu\text{m}$, $x_2 = 4 \mu\text{m}$

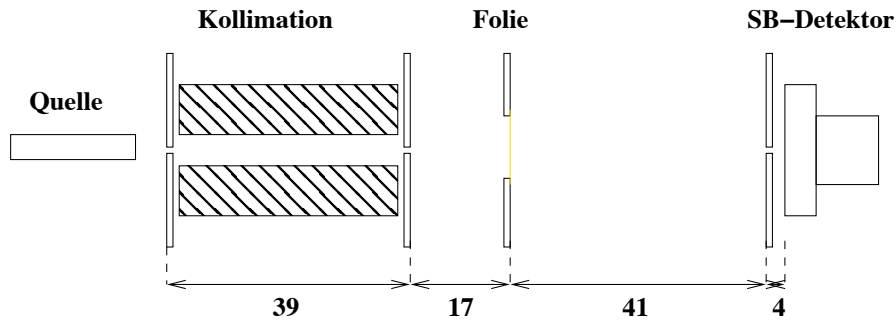


Abbildung 3: Abmessungen des Aufbaus. [1]

- Aluminium: $x = 2 \mu\text{m}$
- Bismut: $x = 1 \mu\text{m}$

3.1 Durchführung

Zunächst wird die Apparatur evakuiert. Das Oszilloskop wird angeschlossen, um die Pulse einmal mit und einmal ohne Folie beobachten zu können.

Um die Aktivität zu bestimmen, wird die Zählrate (Ereignisse pro Zeit) ohne Folie gemessen.

Zur Bestimmung der Foliendicke wird eine Energieverlustmessung durchgeführt. Dabei ist der Streuwinkel $\theta = 0^\circ$. Die Pulshöhe wird in Abhängigkeit des Drucks in der Streukammer gemessen. Die Messung erfolgt einmal mit und einmal ohne die Folie.

Um den differentiellen Wirkungsquerschnitt bestimmen zu können, wird die Zählrate in Abhängigkeit vom Streuwinkel gemessen. Dabei ist zu beachten, dass das Zeitintervall, in dem gemessen wird, für größere Winkel länger sein muss, um ausreichend viele Ereignisse zu detektieren.

Für die Messung zum Einfluss der Mehrfachstreuung wird die Zählrate für beide Goldfolien unter einem festen Winkel ($\theta = 10^\circ$) gemessen.

Zur Untersuchung der Z -Abhängigkeit soll die Intensität der α -Teilchen für die verschiedenen Folien unter einem großen Streuwinkel gemessen werden. Diese Messreihe entfällt hier, da die Folien aus Aluminium und Bismut nicht richtig in der Apparatur angebracht werden konnten.

4 Auswertung

4.1 Aktivität

Die Aktivität des Strahlers kann auf zwei verschiedene Arten ermittelt werden. Einerseits mit dem Zerfallsgesetz

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\frac{\ln 2}{t_{1/2}} t}, \quad (6)$$

was eine Aktivität von

$$A(14. \text{ Mai } 2017 - \text{ Oktober } 1994) = 330 \text{ kBq} \cdot e^{-\frac{\ln 2}{432,2 \text{ a}} \cdot 22,62 \text{ a}} = 318,2 \text{ kBq} \quad (7)$$

ergibt. Andererseits kann auch von der Zählrate, die in einem bestimmten Raumwinkel gemessen wird, auf die Vollkugel hochgerechnet werden:

$$A = N \cdot \frac{4\pi}{\Omega} = \frac{5360}{180 \text{ s}} \cdot \frac{4\pi}{\frac{2 \text{ mm} \cdot 10 \text{ mm}}{(101 \text{ mm})^2}} = 190 \text{ kBq} \quad (8)$$

Im Folgenden wird mit der zweiten, gemessenen, Aktivität weitergerechnet, da sie mehr Bezug zum tatsächlichen Versuchsaufbau besitzt.

4.2 Verstärker

Bei der Beobachtung der Detektorimpulse auf dem Oszilloskop ergab sich, dass die Anstiegszeit vor dem Verstärker

$$t_i = 300 \text{ ns}, \quad (9)$$

und nach dem Verstärker

$$t_f = 1000 \text{ ns} \quad (10)$$

betrug.

4.3 Foliendicke

Die Energieverlustmessung ergab die in Tabelle 1 aufgelisteten und in Abbildung 4 geplotteten Ergebnisse mit und ohne Folie. Die Spannung wird als proportional zur am Detektor eintreffenden Teilchenenergie angenommen. Zur Ermittlung der Dicke wird dann die Energiedifferenz der beiden Messreihen bestimmt. Dies geschieht über

$$\Delta E = E_\alpha \cdot \frac{U_{\text{ohne}} - U_{\text{mit}}}{U_{\text{ohne}}} = E_\alpha \cdot \left(1 - \frac{U_{\text{mit}}}{U_{\text{ohne}}} \right) = (1,659 46 \pm 0,000 20) \text{ MeV}, \quad (11)$$

mit den beiden U -Achsenabschnitten der linearen Regression der Messdaten. Um daraus die Dicke zu bestimmen, wird (3) nach Δx umgestellt:

$$\Delta x = \frac{\Delta E}{\frac{4\pi e^4 z^2 N Z}{m_0 v^2 (4\pi \epsilon_0)^2} \ln \frac{2m_0 v^2}{I}} \quad (12)$$

Mit eingesetzt

$$Z = 79 \quad (13)$$

$$z = 2 \quad (14)$$

$$v = c \sqrt{1 - \frac{1}{(1 + \frac{E_{\text{kin}}}{E_0})^2}} = 16\,248,2 \text{ km s}^{-1} \quad (15)$$

$$I = 10 \text{ eV} \cdot Z \quad (16)$$

$$\rho = 19,3 \text{ g cm}^{-3} [2] \quad (17)$$

$$M = 196,97 \text{ g mol}^{-1} [2] \quad (18)$$

$$N = \frac{\rho}{M} N_A \quad (19)$$

und Naturkonstanten aus [3] ergibt sich für die Dicke ein Wert von

$$\Delta x = (3,8402 \pm 0,0005) \mu\text{m} \quad (20)$$

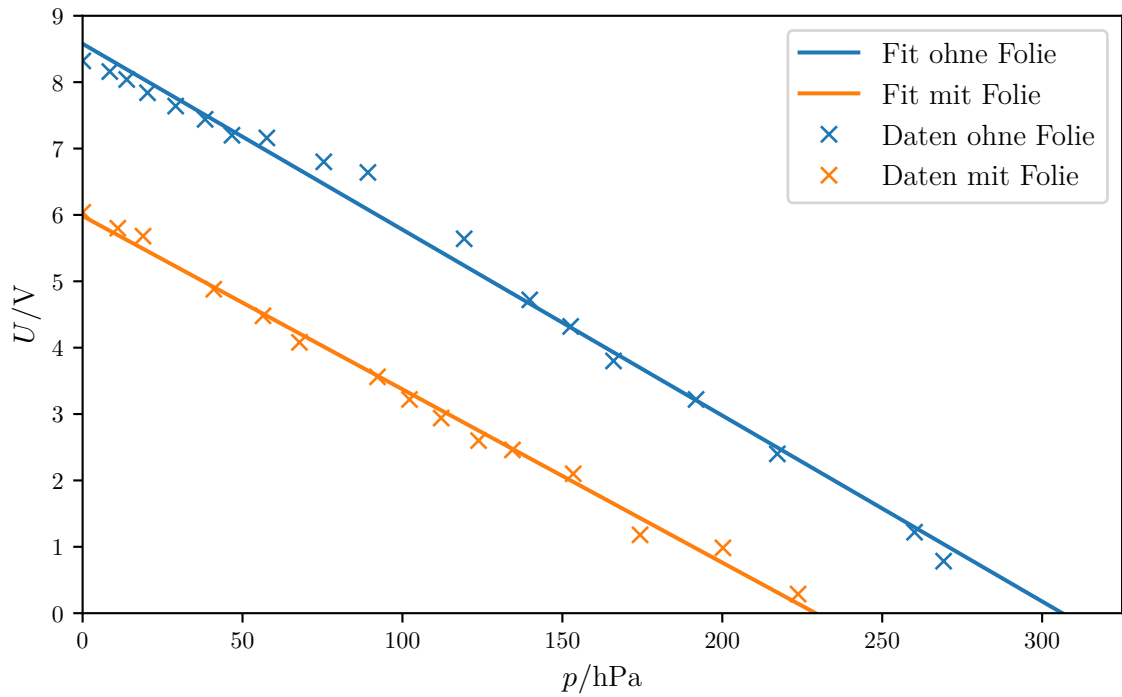


Abbildung 4: Energieverlustmessung zur Dickenbestimmung. Abgelesene, gemittelte Spannungswerte auf der Ordinate, Luftdruck der Apparatur auf der Abszisse.

Tabelle 1: Messdaten der Energieverlustmessung

U_1/V	p_1/hPa	U_2/V	p_2/hPa
8,32	0,045	6,04	0,045
8,16	8,5	5,80	11
8,04	13,8	5,68	18,9
7,84	20,3	4,88	41,0
7,64	29,1	4,48	56,4
7,44	38,3	4,08	67,8
7,20	46,7	3,56	92,2
7,16	57,6	3,22	102,2
6,80	75,4	2,94	112,1
6,64	89,2	2,60	123,8
5,64	119,3	2,46	134,4
4,72	139,8	2,10	153,4
4,32	152,6	1,18	174,3
3,80	166,0	0,984	200,2
3,22	191,8	0,288	223,7
2,40	217,2		
1,22	260,1		
0,784	269,2		

4.4 Differentieller Wirkungsquerschnitt

Im zweiten Teil soll die Rutherford-Streuformel verifiziert werden. Dazu wird aus den gemessenen Zählraten in Abhängigkeit vom Streuwinkel der differentielle Wirkungsquerschnitt berechnet, dies geschieht über

$$\frac{\Delta\sigma}{\Delta\Omega} = \frac{N}{N_0} \cdot \frac{A}{N_T} \cdot \frac{1}{\Delta\Omega} \quad (21)$$

mit der Zählrate ohne Streufolie

$$N_0 = \frac{5360}{180\text{ s}}, \quad (22)$$

der Blenden-Spaltfläche

$$A = 10\text{ mm} \cdot 2\text{ mm}, \quad (23)$$

der Anzahl der bestrahlten Targetteilchen (für N siehe (13))

$$N_T = A \cdot 2\text{ }\mu\text{m} \cdot N \quad (24)$$

und dem Raumwinkel

$$\Delta\Omega = \frac{A}{r^2} = 1,96 \text{ msr.} \quad (25)$$

Daraus folgen die in Tabelle 2 und Abbildung 5 dargestellten Werte. In Abb. 5 ist zusätzlich die Kurve geplottet, die ein Einsetzen der entsprechenden (bereits erwähnten) Werte in (5) ergibt.

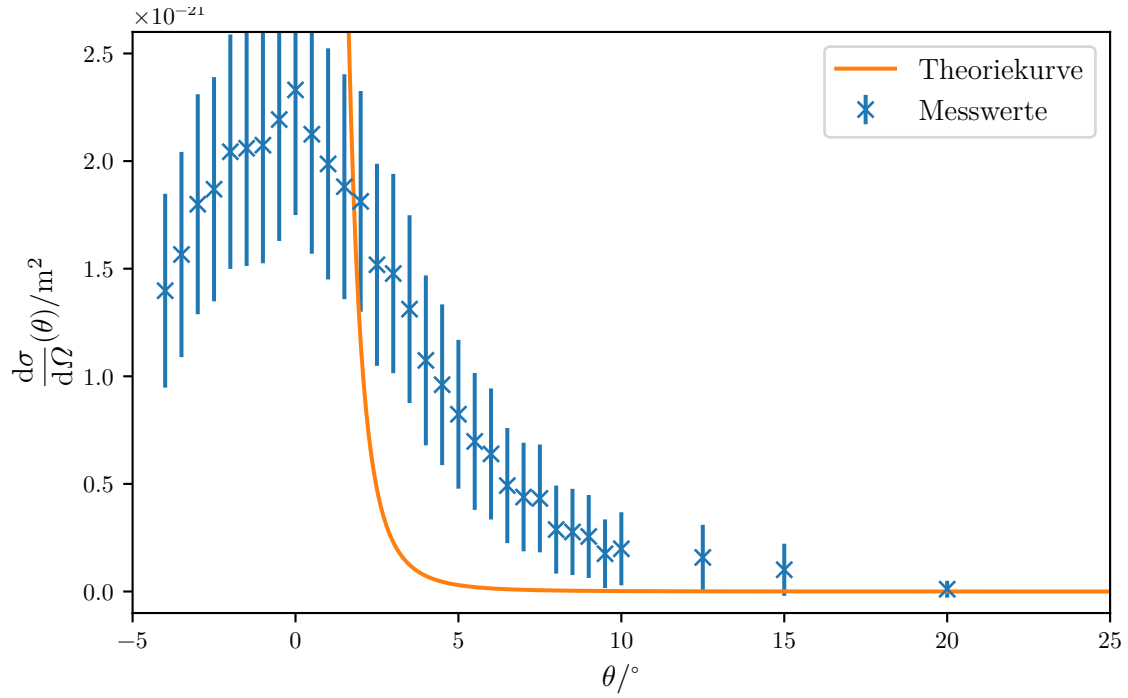


Abbildung 5: Gemessene differentielle Wirkungsquerschnitte in Abhängigkeit vom Streuwinkel.

4.5 Mehrfachstreuung

Bei der Messung verschieden dicker Goldfolien zu den Effekten der Mehrfachstreuung unter einem Winkel

$$\theta = 10^\circ \quad (26)$$

wurden die folgenden Zählraten gemessen:

$$N_{2\mu\text{m}} = 1,368 \text{ s}^{-1} \quad (27)$$

$$N_{4\mu\text{m}} = 1,159 \text{ s}^{-1} \quad (28)$$

Tabelle 2: Messwerte und daraus abgeleitete Größen bei der Messung des Streuquerschnitts.

$\theta/^\circ$	N_{mess}	t/s	N/s^{-1}		$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta)/\text{m}^2$
-4,0	963	100	9,630	± 3	$1,400 \cdot 10^{-21} \pm 5 \cdot 10^{-22}$
-3,5	1079	100	10,79	± 3	$1,570 \cdot 10^{-21} \pm 5 \cdot 10^{-22}$
-3,0	1240	100	12,40	± 4	$1,800 \cdot 10^{-21} \pm 5 \cdot 10^{-22}$
-2,5	1288	100	12,88	± 4	$1,870 \cdot 10^{-21} \pm 5 \cdot 10^{-22}$
-2,0	1408	100	14,08	± 4	$2,040 \cdot 10^{-21} \pm 5 \cdot 10^{-22}$
-1,5	1419	100	14,19	± 4	$2,060 \cdot 10^{-21} \pm 5 \cdot 10^{-22}$
-1,0	1429	100	14,29	± 4	$2,070 \cdot 10^{-21} \pm 5 \cdot 10^{-22}$
-0,5	1511	100	15,11	± 4	$2,190 \cdot 10^{-21} \pm 6 \cdot 10^{-22}$
0,0	1606	100	16,06	± 4	$2,330 \cdot 10^{-21} \pm 6 \cdot 10^{-22}$
0,5	1464	100	14,64	± 4	$2,120 \cdot 10^{-21} \pm 6 \cdot 10^{-22}$
1,0	1369	100	13,69	± 4	$1,990 \cdot 10^{-21} \pm 5 \cdot 10^{-22}$
1,5	1296	100	12,96	± 4	$1,880 \cdot 10^{-21} \pm 5 \cdot 10^{-22}$
2,0	1249	100	12,49	± 4	$1,810 \cdot 10^{-21} \pm 5 \cdot 10^{-22}$
2,5	1046	100	10,46	± 3	$1,520 \cdot 10^{-21} \pm 5 \cdot 10^{-22}$
3,0	1018	100	10,18	± 3	$1,480 \cdot 10^{-21} \pm 5 \cdot 10^{-22}$
3,5	904	100	9,040	± 3	$1,310 \cdot 10^{-21} \pm 4 \cdot 10^{-22}$
4,0	740	100	7,400	± 3	$1,070 \cdot 10^{-21} \pm 4 \cdot 10^{-22}$
4,5	993	150	6,620	± 3	$9,610 \cdot 10^{-22} \pm 4 \cdot 10^{-22}$
5,0	1135	200	5,675	± 2	$8,240 \cdot 10^{-22} \pm 3 \cdot 10^{-22}$
5,5	961	200	4,805	± 2	$6,970 \cdot 10^{-22} \pm 3 \cdot 10^{-22}$
6,0	1013	230	4,404	± 2	$6,390 \cdot 10^{-22} \pm 3 \cdot 10^{-22}$
6,5	780	230	3,391	± 2	$4,920 \cdot 10^{-22} \pm 3 \cdot 10^{-22}$
7,0	756	250	3,024	± 2	$4,390 \cdot 10^{-22} \pm 3 \cdot 10^{-22}$
7,5	894	300	2,980	± 2	$4,330 \cdot 10^{-22} \pm 3 \cdot 10^{-22}$
8,0	694	350	1,983	± 1	$2,880 \cdot 10^{-22} \pm 2 \cdot 10^{-22}$
8,5	858	450	1,907	± 1	$2,770 \cdot 10^{-22} \pm 2 \cdot 10^{-22}$
9,0	881	500	1,762	± 1	$2,560 \cdot 10^{-22} \pm 2 \cdot 10^{-22}$
9,5	665	550	1,209	± 1	$1,750 \cdot 10^{-22} \pm 2 \cdot 10^{-22}$
10,0	889	650	1,368	± 1	$1,990 \cdot 10^{-22} \pm 2 \cdot 10^{-22}$
12,5	981	900	1,090	± 1	$1,580 \cdot 10^{-22} \pm 2 \cdot 10^{-22}$
15,0	627	901	0,6959	$\pm 0,8$	$1,010 \cdot 10^{-22} \pm 1 \cdot 10^{-22}$
20,0	73	999	0,073 07	$\pm 0,3$	$1,060 \cdot 10^{-23} \pm 4 \cdot 10^{-23}$

5 Diskussion

5.1 Aktivität

Die deutliche Abweichung der aus dem Zerfallsgesetz bestimmten Aktivität gegenüber der gemessenen ist vermutlich auf Unzulänglichkeiten des Versuchsaufbaus zurückzuführen: Die Akzeptanz des Detektors wird nicht berücksichtigt und es ist nicht bekannt, wie genau die reale Geometrie des Aufbaus mit der Versuchsanleitung übereinstimmt. Daraus folgt ein möglicher Fehler bei der Bestimmung des Raumwinkels. Des Weiteren kann eine exakt rechtwinklige Ausrichtung des Strahlers nicht gewährleistet werden.

5.2 Foliendicke

Die bestimmte Foliendicke von $3,84\mu\text{m}$ unterscheidet sich signifikant von der angegebenen Dicke von $2\mu\text{m}$. Dies kann möglicherweise durch eine nicht ganz rechtwinklig zum Strahlengang angebrachte Folie erklärt werden, andererseits ist diese selbst nicht (mehr) ganz plan. Das gleichzeitige Ablesen von Druck und gemittelter Spannung ist nur eingeschränkt möglich, da beide sich nicht stabil verhalten. Die Bethe-Formel enthält einen Geschwindigkeitsterm v , dessen Änderung im Laufe des Materiedurchtritts von uns nicht berücksichtigt wird.

5.3 Rutherford-Streuung

In Abbildung 5 ist erkennbar, dass unser gemessener differentieller Wirkungsquerschnitt einen der Theoriekurve annähernd ähnlichen Verlauf vorweist. Im Gegensatz zu dieser ist er jedoch nicht „steil genug“. Dass die Messwerte für kleine Winkel nicht gegen unendlich gehen ergibt sich aus der endlichen Aktivität der Quelle. Zu wenig Statistik durch kurze Integrationszeiten scheint nicht der Grund für die Abweichung zu sein, da keine großen Schwankungen im Messdatenverlauf zu erkennen sind. Weiterhin findet keine Hintergrund-Messung (des Strahlprofils) statt, durch die die gestreuten von den ungestreuten Signalen unterschieden werden könnten.

5.4 Mehrfachstreuung

Anhand der geringeren Zählrate für die dickere Folie ($1,159\text{s}^{-1}$ gegenüber $1,368\text{s}^{-1}$) lässt sich ableiten, dass dort Mehrfachstreuung in nicht vernachlässigbarer Häufigkeit stattfindet. Durch einen längeren Weg innerhalb der Folie finden mehr Wechselwirkungen statt, durch die mehr Teilchen absorbiert werden.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuchsanleitung zu Versuch 16: Rutherford-Streuung*. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/FP/SKRIPT/Rutherford.pdf> (besucht am 21.05.2017).

- [2] *Wolfram/Alpha*. URL: <http://wolframalpha.com>.
- [3] Peter J. Mohr, Barry N. Taylor und David B. Newell. „CODATA recommended values of the fundamental physical constants“. In: (2014). URL: <http://physics.nist.gov/cuu/Constants/>.
- [4] Travis E. Oliphant. „NumPy: Python for Scientific Computing“. Version 1.9.2. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 10–20. URL: <http://www.numpy.org/>.
- [5] 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/>.
- [6] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.