

Versuch 16

Rutherfordstreuung

Annika Burkowitz
annika.burkowitz@tu-dortmund.de

Saskia Müller
saskia4.mueller@tu-dortmund.de

26. Juni 2017

TU Dortmund - Fakultät Physik

1 Zielsetzung

Ziel des Versuches ist es, die Streuung von α -Teilchen an einer Goldfolie zu untersuchen und zu überprüfen, ob die experimentellen Ergebnisse mit der Theorie, die mit Hilfe der Rutherford Streuformel beschrieben wird, vereinbar sind. Außerdem wird die Foliendicke über die Bethe-Bloch-Formel bestimmt.

2 Theorie

Die nachfolgenden Erklärungen orientieren sich an der Versuchsanleitung [1].

2.1 Theoretische Grundlagen

Die bei der Rutherfordstreuung zu untersuchende Wechselwirkung von α -Teilchen mit Materie wird hauptsächlich mittels zweier Effekte beschrieben. Einerseits kann das α -Teilchen mit den Hüllenelektronen der Atome wechselwirken, andererseits mit dem Kern der Atome. Wechselwirkt das α -Teilchen mit einem Hüllenelektron so ändert sich seine Richtung nicht und der Energieverlust dE/dx kann über die Bethe-Bloch-Formel (1) beschrieben werden. Die Streuung am Kern hingegen verursacht eine stärkere Richtungsänderung, welche durch die Rutherfordsche Streuformel beschrieben wird.

2.2 Grundlegende Begriffe des Versuchs

Im Folgenden werden die grundlegenden Begriffe dieses Versuchs kurz erklärt.

1. Bethe-Bloch-Formel: Die Bethe-Bloch-Formel gibt für schnelle geladene schwere Teilchen an, also auch α -Teilchen, wie groß der Energieverlust dieser Teilchen pro Wegintervall in der Materie ist. Der Energieverlust entsteht durch inelastische Stöße mit Hüllenelektronen der Materieatome. Durch diese Stöße werden die Materieatome ionisiert oder angeregt. Die Bethe-Bloch-Formel lautet

$$-\frac{dE}{dx} = -\frac{4\pi e^4 z^2 N Z}{m_0 v^2 (4\pi\epsilon_0)^2} \ln \frac{2m_0 v^2}{I}, \quad (1)$$

mit der Kernladungszahl Z , der Anzahl N der Atome pro cm^3 , der Ionisationsenergie I und der Ruheenergie m_0 des Elektrons.

2. Rutherford Streuformel: Die Rutherford Streuformel beschreibt die Streuung der Teilchen an Atomkernen, also den differentiellen Streuquerschnitt $\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta)$ (Wirkungsquerschnitt). Sie lautet

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

wobei z der Kernladungszahl der α -Teilchen entspricht und Z der Kernladungszahl der Materie an der die α -Teilchen gestreut wurden. Außerdem ist E_α die mittlere kinetische Energie des α -Teilchens in MeV und θ der Winkel zwischen dem einfallenden und gestreuten Teilchen.

-
3. differentieller Wirkungsquerschnitt: Der differentielle Wirkungsquerschnitt $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ beschreibt die Intensitätsverteilung einer Strahlung, die durch Streuung entsteht, über der Raumrichtung Ω .
 4. totaler Wirkungsquerschnitt: Der totale Wirkungsquerschnitt σ ist ein Maß der Wahrscheinlichkeit eines bestimmten Vorgangs. In diesem Vorgang ist es ein Maß der Streuwahrscheinlichkeit und hat die Einheit einer Fläche. Je größer der totale Wirkungsquerschnitt ist, desto wahrscheinlicher kommt es zur Streuung des Projektils (α -Teilchen) an dem Target (die Folie).

3 Aufgaben und Durchführung

3.1 Aufgaben

Mithilfe des Experimentes soll Folgendes überprüft/bestimmt werden:

1. Die Aktivität der ^{241}Am -Probe
2. Die Foliendicke aus der Messung des Energieverlustes
3. Der differentielle Streuquerschnitt einer Goldfolie sowie die zugehörige Herleitung. Außerdem soll an einer Au-, Bi-, und Al-Folie gezeigt werden, dass für große Streuwinkel eine Abhängigkeit von der Kernladungszahl Z besteht.
4. Das Auftreten von Mehrfachstreuung bei einer dickeren Goldfolie.

3.2 Versuchsaufbau

Der schematische Aufbau des Versuchs ist in Abbildung 1 dargestellt. Bei der Quelle handelt es sich um ein ^{241}Am -Präparat. Um sicherzustellen, dass die α -Teilchen parallel verlaufen (kollimiert werden), werden zwei 2 mm Schlitzblenden verwendet. Teilchen, die nicht parallel verlaufen werden dabei von einem Plastikblock absorbiert. Anschließend werden die parallelen Teilchen an einer dünnen Goldfolie gestreut. Um den Streuwinkel der α -Teilchen zu bestimmen wird ein Surface-Barrier (SB) Detektor verwendet. Insgesamt befindet sich der Aufbau in einem Vakuum, damit die α -Teilchen nicht nur eine Reichweite von 10 cm haben. Die Energieverlustmessung erfolgt über ein Speicheroszilloskop und die Bestimmung des Streuquerschnitts über einen Zähler. Um die Goldfolie zu schützen darf diese nicht berührt werden, außerdem darf die Streukammer nur langsam belüftet oder abgepumpt werden.

3.3 Durchführung

1. Um den Aufbau zu evakuieren wird eine Drehschieberpumpe verwendet. Langsames öffnen des Feindosierventils belüftet die Kammer.

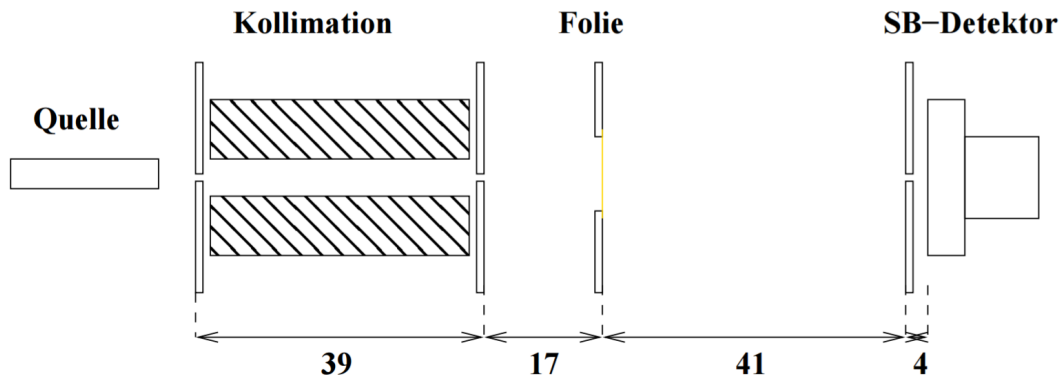


Abb. 1: Schematischer Aufbau des Rutherfordexperimentes[1].

2. Die Sperrspannung des SB Detektors wird auf $U_{\text{Det}} = 12$ Volt eingestellt und anschließend die verstärkten Impulse auf dem Oszilloskop beobachtet. Die Pulse und ihre Anstiegszeiten sollen nach jeder elektronischen Komponente untersucht werden.
3. Um die Foliendicke aus dem Energieverlust der Teilchen zu bestimmen, wird die Pulshöhe als Funktion des Kammerdrucks mit und ohne Goldfolie vermessen.
4. Der differentielle Streuquerschnitt der dünnen Goldfolie wird bestimmt, indem die Zählrate in Abhängigkeit des Streuwinkels gemessen wird. Dieser Zusammenhang soll grafisch dargestellt werden und mit die gemessenen Werte mit der Theorie verglichen werden.
5. Der Einfluss der Mehrfachstreuung wird untersucht, indem der Streuquerschnitt bei verschiedenen Foliendicken für einen festen Winkel bestimmt wird.
6. Die Z-Abhängigkeit der verschiedenen Folien wird bestimmt, indem die Intensität I_α für einen großen Streuwinkel ($\theta = 10^\circ$) gemessen wird. Außerdem soll $I_\alpha/(N \cdot x)$, mit N der Anzahl der Streuzentren und x der Foliendicke, gegen die Kernladungszahl Z aufgetragen werden.

4 Auswertung

Der Fehler der in der Auswertung auftretenden Zählraten N wird im Folgenden immer mit

$$\Delta N = \frac{\sqrt{C}}{\Delta t}$$

berechnet. Dabei ist C die Anzahl der im Zeitintervall Δt gemessenen Zerfälle (Counts).

4.1 Teilchenzahldichten

Für die Auswertung werden die Teilchenzahldichten von Luft und Gold benötigt, welche im Folgenden berechnet werden. Die Zusammensetzung der Luft wird genähert als 78 % N₂ und 21 % O₂. Mit den Molaren Massen

$$M_{\text{N}_2} = 2 \cdot 14.01 \frac{\text{g}}{\text{mol}} [3]$$

$$M_{\text{O}_2} = 2 \cdot 16.00 \frac{\text{g}}{\text{mol}} [4]$$

ergibt sich für die Molare Masse von Luft

$$M_{\text{Luft}} = \frac{M_{\text{N}_2} \cdot 78 + M_{\text{O}_2} \cdot 21}{99} = 28.86 \text{ g/mol}$$

Analog folgt mit den Dichten bei 20 °C und 1 atm

$$\rho_{\text{N}_2} = 1.165 \cdot 10^{-3} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} [3]$$

$$\rho_{\text{O}_2} = 1.332 \cdot 10^{-3} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} [4]$$

für die Dichte der Luft

$$\rho_{\text{Luft}} = \frac{\rho_{\text{N}_2} \cdot 78 + \rho_{\text{O}_2} \cdot 21}{99} = 1.20 \text{ g/cm}^3$$

Damit lässt sich mit der Avogadrokonstante N_A [2] die Teilchenzahldichte für Luft berechnen:

$$N_{\text{Luft}} = \frac{\rho_{\text{Luft}}}{M_{\text{Luft}}} \cdot N_A = 2.50 \cdot 10^{19} \frac{1}{\text{cm}^3} = 2.50 \cdot 10^{25} \frac{1}{\text{m}^3}.$$

Gold hat die Molare Masse $M_{\text{Gold}} = 196.97 \text{ g/mol}$ [2] und die Dichte $\rho_{\text{Gold}} = 19.32 \text{ g/cm}^3$ [2]. Für die Teilchenzahldichte von Gold gilt damit

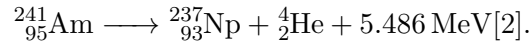
$$N_{\text{Gold}} = \frac{\rho_{\text{Gold}}}{M_{\text{Gold}}} \cdot N_A = 5.91 \cdot 10^{22} \frac{1}{\text{cm}^3} = 5.91 \cdot 10^{28} \frac{1}{\text{m}^3}.$$

4.2 Vorbereitung

Zur Vorbereitung des Versuches sollte die Reichweite von α -Teilchen in Luft mit der Bethe-Bloch Formel (1) bestimmt werden. Dazu wird der Energieverlust pro Wegstrecke über alle auftretenden Energien integriert:

$$R = \int_0^{E_\alpha} \left(\frac{-dE_\alpha}{dx} \right)^{-1} dE_\alpha = \frac{m_0 v^2 4\pi \epsilon_0^2}{e^4 z^2 Z N} \frac{1}{\ln(2m_0 v^2/I)} \cdot E_\alpha. \quad (3)$$

Bei jedem Alphazerfall wird eine für das jeweilige Element genau definierte Energie, welche aus dem Massendefekt zwischen Mutter- und Tochterkern stammt, frei. Für den Alphazerfall mit einer Halbwertszeit von $T_{1/2} = 432.7$ a von Americium gilt



Damit haben die α -Teilchen die Energie $E_\alpha = 5.486 \text{ MeV}$. Daraus kann mit $m_\alpha = 6.645 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ die Geschwindigkeit $v_\alpha = \sqrt{\frac{2E_\alpha}{m_\alpha}} = 16.3 \cdot 10^6 \text{ m/s} = 0.054c$ berechnet werden. Mit diesen Werten und

$$\begin{aligned} m_0 &= 0.511 \frac{\text{MeV}}{c^2} [2] \\ \epsilon_0 &= 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}} [2] \\ z_\alpha &= 2 \\ Z_{\text{Luft}} &= 6.8^1 \\ I_{\text{Luft}} &= 68 \text{ eV}^2 \\ N_{\text{Luft}} &= 2.50 \cdot 10^{25} \frac{1}{\text{m}^3} \end{aligned}$$

ergibt sich nach Gleichung (3) eine Reichweite von $R \approx 12 \text{ cm}$ der α -Teilchen in Luft.

Wird Luft als ideales Gas angenommen, so lässt sich die Dichte der Luft in Abhängigkeit des Drucks p über die Zustandsgleichung

$$\rho_{\text{Luft}} = \frac{p}{R_{\text{S,Luft}} \cdot T} \quad (4)$$

ausdrücken. Dabei ist $R_{\text{S,Luft}}$ die spezifische Gaskonstante für trockene Luft mit dem Wert $R_{\text{S,Luft}} = 287.04 \text{ J/(kg K)}$ [5]. Wird die Teilchenzahldichte N_{Luft} bei der festen Temperatur $T = 293.15 \text{ K}$ mit druckabhängiger Dichte in Gleichung (3) eingesetzt, so ergibt sich die Reichweite von α -Teilchen in Luft in Abhängigkeit vom Druck, wie sie in Abbildung 2 dargestellt ist.

¹Dieser Wert resultiert aus der Annahme, dass Luft zu 78 % aus Stickstoff ($Z = 7$) und zu 21 % aus Sauerstoff ($Z = 6$) besteht und die Zusammensetzung des restlichen 1 % vernachlässigt wird.

²Es gilt die Näherung $I \approx (10 \text{ eV}) \cdot Z$.

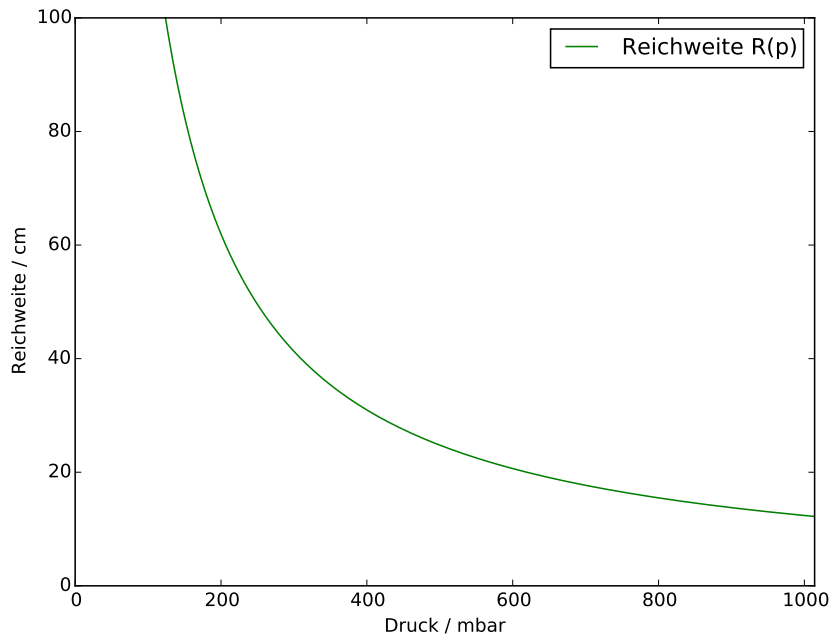


Abb. 2: Reichweite von α -Teilchen in Luft bei $T = 20^\circ\text{C}$ in Abhängigkeit des Drucks p .

4.3 Pulse und Anstiegszeiten

Die Pulshöhen U und Anstiegszeiten t des detektierten Signals des Surface-Barrier-Detektors werden einmal ohne und einmal mit Verstärkung durch den Amplifier (AMP) gemessen. Ohne Verstärkung wird

$$U_{\text{ohne}} = 118 \text{ mV},$$

$$t_{\text{ohne}} = 580 \text{ ns}$$

gemessen und mit Verstärkung

$$U_{\text{mit}} = 8.08 \text{ V},$$

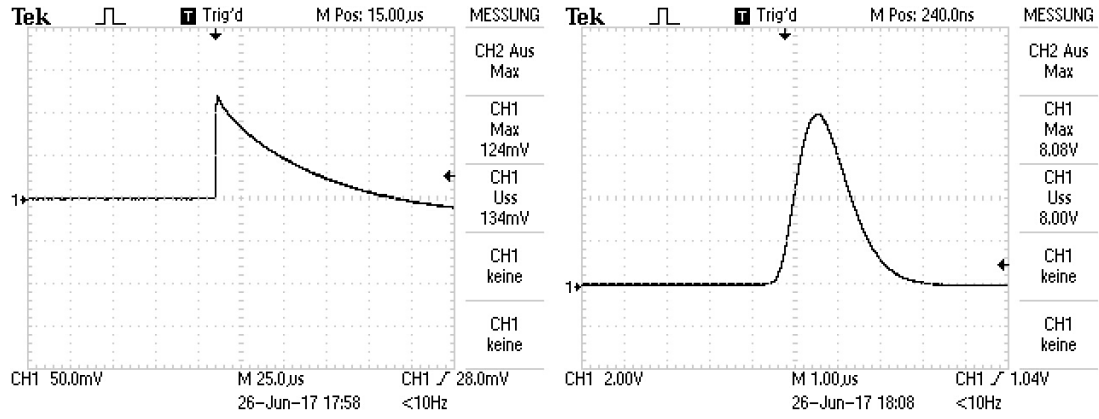
$$t_{\text{mit}} = 1050 \text{ ns}.$$

In Abbildung 3a ist der Puls ohne Verstärkung dargestellt, in Abbildung 3b zum Vergleich der Puls mit Verstärkung.

4.4 Aktivität

Zunächst wird die Aktivität des α -Strahlers ^{241}Am bei einem Winkel von 0° ohne Folie in einem Vakuum vom 0.054 mbar gemessen. Im Zeitintervall von $\Delta t = 200 \text{ s}$ werden 2318 Counts detektiert. Damit ergibt sich eine Aktivität von

$$A = (11.6 \pm 0.2) \text{ Bq}.$$



(a) Puls ohne Verstärkung.

(b) Puls mit Verstärkung.

Abb. 3: Bilder der mit dem Oszilloskop dargestellten Pulse mit und ohne Verstärkung.

4.5 Foliendicke

Es wird die Pulshöhe der Detektorpulse als Funktion des Kammerdrucks zunächst ohne Folie und dann mit einer Goldfolie bei einem Winkel von 0° gemessen. Die Messwerte sind in Tabelle 1 aufgeführt und in Abbildung 4 grafisch dargestellt. Dabei sind die angegebenen Pulshöhen jeweils die mittleren Pulshöhen bei einer Mittlung über 16 Pulse. Mit einer linearen Ausgleichsrechnung der Form

$$E(p) = a_i \cdot p + b_i, \quad i = 1, 2$$

werden die y-Achsenabschnitte bestimmt. Es ergeben sich die Werte

$$\begin{aligned} a_1 &= (-0.0264 \pm 0.0005) \frac{\text{V}}{\text{mbar}} \\ b_1 &= (8.39 \pm 0.08) \text{ V} \\ a_2 &= (-0.0278 \pm 0.0007) \frac{\text{V}}{\text{mbar}} \\ b_2 &= (5.91 \pm 0.08) \text{ V}. \end{aligned}$$

Damit lässt sich der Energieverlust

$$\Delta E_\alpha = E_\alpha \left(1 - \frac{b_2}{b_1} \right) = (2.6 \pm 0.1) \cdot 10^{-13} \text{ J} \quad (5)$$

berechnen. Mit den Werten, die in Abschnitt 4.2 angegeben sind und den Werten

$$\begin{aligned} N_{\text{Gold}} &= 5.9 \cdot 10^{28} \frac{1}{\text{m}^2} \\ Z_{\text{Gold}} &= 79 \\ I_{\text{Gold}} &= 790 \text{ eV} \end{aligned}$$

für Gold, ergibt sich mit der Gleichung

$$d = \Delta x = \frac{m_0 v^2 4\pi\epsilon_0^2}{e^4 N z^2 Z} \frac{1}{\ln\left(\frac{2m_0 v^2}{I}\right)} \cdot \Delta E \quad (6)$$

eine Foliendicke von $d = (3.8 \pm 0.1) \mu\text{m}$.

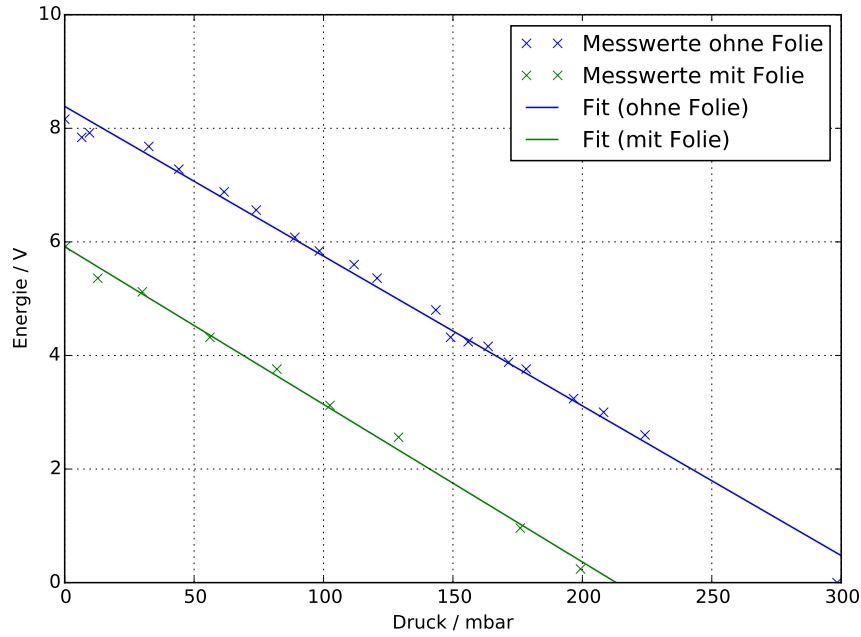


Abb. 4: Pulshöhe der Detektorpulse in Abhängigkeit des Kammerdruckes mit und ohne Folie, sowie Ausgleichsgeraden zur Bestimmung der y-Achsenabschnitte mit und ohne Folie.

4.6 Differentieller Streuquerschnitt

Zur Untersuchung des differentiellen Wirkungsquerschnitts $\frac{d\sigma}{d\Omega}(\Theta)$ wird die Zählrate N für verschiedene Streuwinkel gemessen unter Verwendung einer $2 \mu\text{m}$ dicken Goldfolie. Die Messwerte sind in Tabelle 2 dargestellt. Aus den Zählraten kann der differentiellen Wirkungsquerschnitt bestimmt werden, indem der Wirkungsquerschnitt

$$\sigma = \frac{N_{\text{Reaktionen}}}{N_{\text{Projekteile}}} \frac{F}{N_T} \quad (7)$$

mit der Anzahl stattfindender Reaktionen $N_{\text{Reaktionen}}$, welche der Zählrate entspricht, der Anzahl einlaufender Projektile $N_{\text{Projekteile}}$, welche der Aktivität der Probe entspricht, der bestrahlten Targetfläche $F = 2 \text{ mm} \cdot 10 \text{ mm} = 20 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ und der Anzahl Goldteilchen

ohne Folie		mit Folie	
Druck in mbar	Pulshöhe in V	Druck in mbar	Pulshöhe in V
0.043	8.16	0.34	5.92
6.6	7.84	12.8	5.36
9.6	7.92	30.0	5.12
32.5	7.68	56.1	4.32
44.1	7.28	82.0	3.76
61.6	6.88	102.5	3.12
74.0	6.56	129.0	2.56
88.9	6.08	176.0	0.96
98.4	5.84	199.3	0.24
111.8	5.60		
120.7	5.36		
143.4	4.80		
149.1	4.32		
155.9	4.24		
163.6	4.16		
171.5	3.88		
178.3	3.76		
196.6	3.24		
208.2	3.00		
224.2	2.60		
298.4	0		

Tabelle 1: Messwerte der Energieverlustmessung ohne und mit Folie zur Bestimmung der Foliendicke.

Streuwinkel Θ in $^\circ$	Zählrate N in $\frac{1}{s}$	diff. WQ $\frac{d\sigma}{d\Omega}(\Theta)$ in $\frac{b}{sr}$
-0.2	7.2 ± 0.2	$(5.9 \pm 0.2) \cdot 10^8$
-0.1	7.8 ± 0.3	$(6.4 \pm 0.2) \cdot 10^8$
0.0	10.4 ± 0.3	$(8.7 \pm 0.3) \cdot 10^8$
0.1	7.9 ± 0.3	$(6.6 \pm 0.2) \cdot 10^8$
0.2	8.3 ± 0.3	$(6.9 \pm 0.2) \cdot 10^8$
0.3	8.5 ± 0.3	$(7.1 \pm 0.3) \cdot 10^8$
0.4	8.2 ± 0.3	$(6.8 \pm 0.3) \cdot 10^8$
0.5	9.3 ± 0.3	$(7.7 \pm 0.3) \cdot 10^8$
0.7	9.0 ± 0.3	$(7.5 \pm 0.3) \cdot 10^8$
1.0	9.3 ± 0.3	$(7.7 \pm 0.3) \cdot 10^8$
1.5	9.6 ± 0.3	$(8.0 \pm 0.3) \cdot 10^8$
2.0	9.5 ± 0.3	$(7.9 \pm 0.3) \cdot 10^8$
3.0	9.9 ± 0.3	$(8.2 \pm 0.3) \cdot 10^8$
4.0	9.4 ± 0.3	$(7.8 \pm 0.3) \cdot 10^8$
5.0	7.9 ± 0.3	$(6.6 \pm 0.3) \cdot 10^8$
10.0	1.88 ± 0.05	$(1.56 \pm 0.05) \cdot 10^8$
15.0	0.58 ± 0.02	$(0.48 \pm 0.02) \cdot 10^8$
20.0	0.062 ± 0.009	$(0.052 \pm 0.007) \cdot 10^8$

Tabelle 2: Gemessene Zählraten N bei verschiedenen Winkeln Θ unter Verwendung einer 2 μm dicken Goldfolie und daraus berechnete differentielle Wirkungsquerschnitte.

$N_T = 3.03 \cdot 10^{14}$, welche sich in der Fläche F befinden, berechnet wird. Dieser muss dann noch durch den Raumwinkel

$$d\Omega = 4 \tan\left(\frac{x}{2l}\right) \tan\left(\frac{y}{2l}\right) = 0.012 \text{ rad} = 0.69^\circ \quad (8)$$

mit $x = 2 \text{ mm}$, $y = 10 \text{ mm}$ und $l = 41 \text{ mm}$, geteilt werden, um den differentiellen Wirkungsquerschnitt $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ zu erhalten. Die berechneten Werte für den differentiellen Wirkungsquerschnitt sind ebenfalls in Tabelle 2 aufgeführt und in Abbildung 5 graphisch dargestellt.

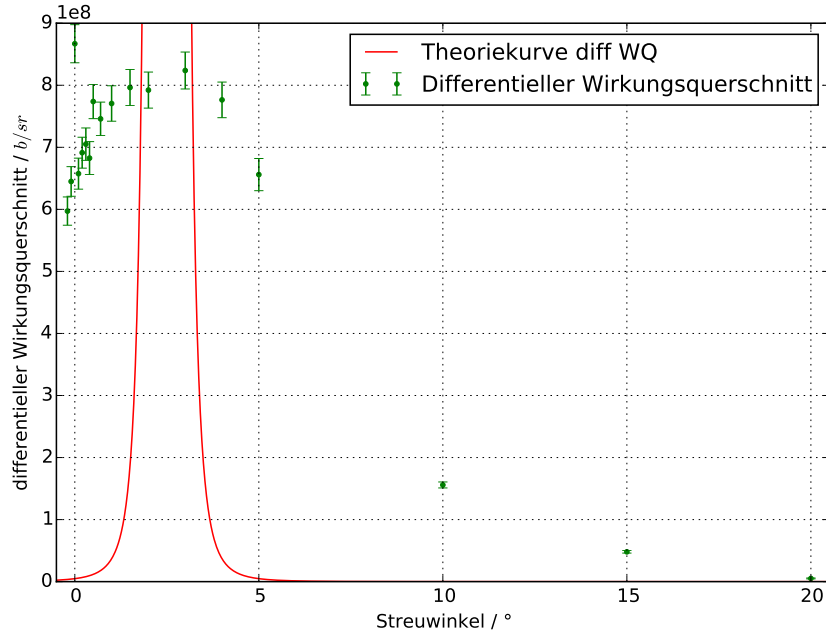


Abb. 5: Differentieller Wirkungsquerschnitt $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ in Abhängigkeit vom Streuwinkel Θ und um $\Theta = 2.5^\circ$ nach rechts verschobene Theoriekurve.

4.7 Mehrfachstreuung

Um den Effekt der Mehrfachstreuung zu untersuchen, werden die Zählraten für zwei verschiedenen dicke Goldfolien bei zwei verschiedenen Winkeln gemessen. Die erste Goldfolie hat eine Dicke von $d_1 = 2 \mu\text{m}$, die zweite Goldfolie hat eine Dicke von $d_2 = 4 \mu\text{m}$. Die Ergebnisse der Messung sind in Tabelle 3 dargestellt.

4.8 Z-Abhängigkeit

Für die Untersuchung der Z-Abhängigkeit (also der Abhängigkeit des differentiellen Wirkungsquerschnitts von der Ordnungszahl Z) der Rutherfordschen Streuformel (2) werden

Streuwinkel Θ in $^\circ$	Zählrate N in $\frac{1}{s}$	
	Folie 1: $d_1 = 2 \mu\text{m}$	Folie 2: $d_2 = 4 \mu\text{m}$
0.5	9.3 ± 0.3	3.8 ± 0.1
10.0	1.88 ± 0.05	2.43 ± 0.09

Tabelle 3: Gemessene Zählraten für die Goldfolien 1 und 2 bei zwei verschiedenen Winkeln zur Untersuchung der Mehrfachstreuung.

die Intensitäten (welche den Zählraten entsprechen) für drei verschiedene Folien bei einem Streuwinkel von $\Theta = 10^\circ$ gemessen. Die Messwerte sind in Tabelle 4 aufgeführt. Es wird die dünne Goldfolie ausgewählt, um den Effekt der Mehrfachstreuung zu minimieren. Um die Messwerte untereinander vergleichen zu können, wird die normierte Intensität

$$I = \frac{N}{nd} \quad (9)$$

mit der Zählrate N , der Anzahl n der Streuzentren pro Targetvolumen und der Foliendicke d eingeführt. Dabei wird die Anzahl der Streuzentren mit

$$n = \frac{N_A V_{\text{Target}}}{V_M} \quad (10)$$

berechnet, wobei N_A die Avogadrokonstante, V_{Target} das bestrahlte Volumen der Folie und V_M das molare Volumen der jeweiligen Folie ist. Die Werte zur Berechnung von n und das Ergebnis sind in Tabelle 5 aufgeführt. Mit den berechneten Anzahlen an Streuzentren ergeben sich für die normierten Intensitäten nach Gleichung (9) die Werte

$$\begin{aligned} I_{\text{Gold}} &= (4.0 \pm 0.1) \cdot 10^{-7} \frac{1}{s} \\ I_{\text{Bismut}} &= (5.8 \pm 0.5) \cdot 10^{-7} \frac{1}{s} \\ I_{\text{Aluminium}} &= (2.0 \pm 0.5) \cdot 10^{-9} \frac{1}{s}. \end{aligned}$$

Diese Werte sind in Abbildung 6 dargestellt. Es wurde eine Ausgleichsrechnung der Form

$$I(Z) = a_3 \cdot Z^2 \quad (11)$$

Folien-Material	Ordnungszahl Z	Zählrate N in $\frac{1}{s}$
Gold	79	1.88 ± 0.05
Bismut	83	0.33 ± 0.03
Aluminium	13	0.022 ± 0.005

Tabelle 4: Gemessene Zählraten N bei einem Streuwinkel von $\Theta = 10^\circ$ für die Folien: Gold ($d = 2 \mu\text{m}$), Bismut ($d = 1 \mu\text{m}$) und Aluminium ($d = 3 \mu\text{m}$).

Material	Molares Volumen M_V in $\frac{1}{\text{mol}}$	Foliendicke d in m	Anzahl Streuzentren
Gold	$10.21 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$2.36 \cdot 10^{12}$
Bismut	$21.31 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$0.57 \cdot 10^{12}$
Aluminium	$10.00 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$3.61 \cdot 10^{12}$

Tabelle 5: Werte zur Berechnung der Anzahl n der Streuzentren im Targetvolumen der verwendeten Folien und nach Gleichung (10) berechnete Ergebnisse.

durchgeführt, welche den Parameter

$$a_3 = (7.5 \pm 0.7) \cdot 10^{-11} \frac{1}{\text{s}}$$

liefert.

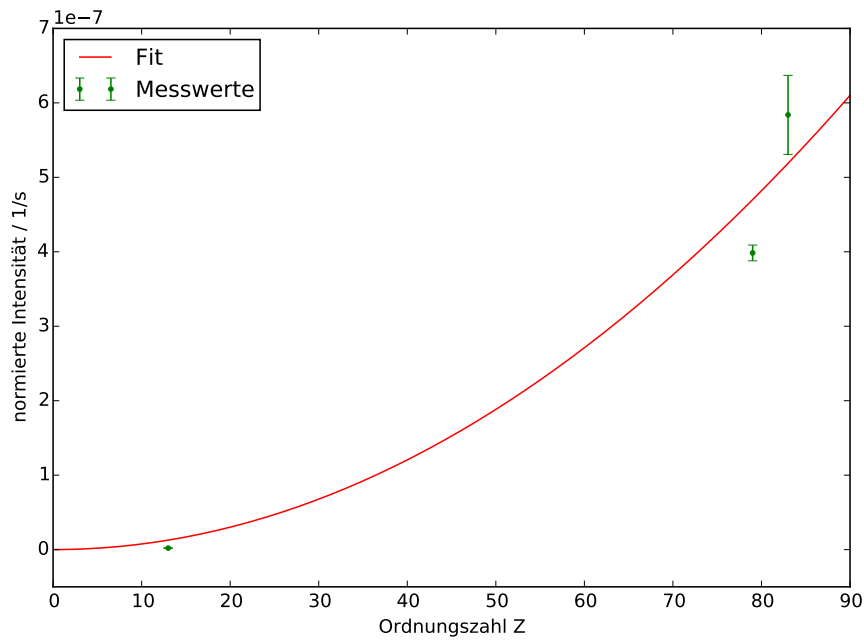


Abb. 6: Normierte Intensitäten I in Abhängigkeit der Ordnungszahl Z der verwendeten Materialien.

5 Diskussion

Im folgenden Abschnitt werden die in der Auswertung berechneten Werte diskutiert und falls möglich mit Theoriewerten verglichen.

5.1 Pulshöhe und Anstiegszeit

Es wird eine Verstärkung des Pulses durch den Amplifier um den Faktor 68.5 festgestellt. Durch den Einbau eines weiteren Bauteils wird auch die Anstiegszeit um den Faktor 1.8 erhöht.

5.2 Aktivität

Gemessen wurde eine Aktivität von $A = (11.6 \pm 0.2)$ Bq. In der Versuchsanleitung ist für Oktober 1994 eine Aktivität von $A_{1994} = 330$ kBq angegeben. Mit einer Halbwertszeit von $T_{1/2} = 432.2$ a, der Zerfallskonstante $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$ und der seither vergangenen Zeit von $t = 21.67$ a, sowie dem exponentiellen Zerfallsgesetz, ergibt sich daraus der theoretische Wert von

$$A_{2017} = A_{1994} \cdot e^{-\frac{\lambda}{t}} = 319 \text{ kBq.} \quad (12)$$

Dieser Wert bezieht sich auf den gesamten Raumwinkel. Relevant ist jedoch die Fläche $F = 0.25\pi \text{ cm}^2$ des Detektors in 10.1 cm Abstand zur Quelle. Die theoretische Aktivität, die auf der Detektorfläche F gemessen werden sollte, beträgt $A_{F,\text{theo}} = 195.5$ Bq. Die gemessene Aktivität weicht davon sehr stark ab. Dies ist möglicherweise damit zu erklären, dass durch Verwendung des Kollimators nur wenige α -Teilchen überhaupt den Detektor erreichen. Desweiteren ist das Vakuum nicht perfekt, sodass durch Stöße der α -Teilchen mit den Luftmolekülen die Reichweite reduziert wird.

5.3 Foliendicke

Die durch die Messung des Energieverlusts berechnete Foliendicke beträgt $d = (3.8 \pm 0.1) \mu\text{m}$. Auf der Goldfolie ist ein Theoriewert von $d_{\text{Theorie}} = 2 \mu\text{m}$ angegeben. Damit ergibt sich eine relative Abweichung von $\Delta d = (87 \pm 7) \%$. Beim Ablesen der ersten zehn Messwerte ohne Folie wurde nicht abgewartet, bis der Wert der Pulshöhe über 128 Ereignisse gemittelt wurde. Die Messwerte mit Folie im Vergleich zu den Messwerten ohne Folie zeigen einen nahezu parallelen Verlauf. Dies macht deutlich, dass auch eine Mittelung über weniger als 128 Ereignisse zu vernünftigen Werten führt.

5.4 Differentieller Wirkungsquerschnitt

Das Maximum des gemessenen differentiellen Wirkungsquerschnitts liegt etwa bei $\Theta = 2.5^\circ$. Erwartet wird das Maximum jedoch bei $\Theta = 0^\circ$. Dies deutet darauf hin, dass der Versuchsaufbau nicht symmetrisch ist. Die eingezeichnete Theoriekurve wird daher um $\Theta = 2.5^\circ$ nach rechts verschoben. Die in Abbildung 5 dargestellten Werte des aus den Zählraten berechneten differentiellen Wirkungsquerschnitts entsprechen grob der Erwartung aus der Rutherford'schen Streuformel. Für große Winkel gilt $\frac{1}{\sin^4 \frac{\Theta}{2}} \rightarrow 0$. Unter Berücksichtigung des um 2.5° verschobenen Aufbaus müsste für $\Theta \rightarrow 2.5^\circ$ der differentielle Wirkungsquerschnitt gegen ∞ gehen. Dort wird ein Maximum gemessen, welches jedoch einen endlichen Wert annimmt, da keine unendlich großen Werte gemessen werden können.

5.5 Mehrfachstreuung

Bei dieser Messung können zwei Effekte beobachtet werden:

1. Bei der Messung bei dem (kleinen) Winkel $\Theta = 0.5^\circ$ ist die Zählrate bei Verwendung der dünnen Goldfolie größer, als die Zählrate bei Verwendung der dicken Goldfolie. Dies kann damit erklärt werden, dass eine größere Foliendicke mehr Reaktionspartner impliziert, und somit die α -Teilchen mehr Energie verlieren, da sie auch mehrere Male mit einem Streuzentrum wechselwirken können, bevor sie das Material verlassen, sodass insgesamt weniger α -Teilchen den Detektor erreichen können. Hier zeigt sich der Effekt der Mehrfachstreuung.
2. Bei der Messung bei dem (großen) Winkel $\Theta = 10^\circ$ ist die Zählrate bei Verwendung der dicken Goldfolie größer, als die Zählrate bei Verwendung der dünnen Goldfolie. Dies liegt daran, dass hier die durch Stöße mit den Kernen der Goldfolie eine Richtungsänderung gemäß der Rutherfordschen Streuformel hervorgerufen wird. Wiederum führen mehr Reaktionspartner in der dickeren Folie zu mehr abgelenkten Teilchen, sodass bei der dickeren Folie mehr α -Teilchen abgelenkt werden. Dieses ist jedoch eigentlich kein Effekt der Mehrfachstreuung.

5.6 Z-Abhängigkeit

Nach der Rutherfordschen Streuformel wird eine quadratische Abhängigkeit von der Ordnungszahl Z erwartet. Daher wurde für die drei berechneten Intensitäten eine in Z quadratische Ausgleichsrechnung durchgeführt, welche den Wert

$$a_3 = (5 \pm 2) \cdot 10^{-11} \frac{1}{\text{s}}$$

liefert. In der Darstellung in Abbildung 6 ist die Z^2 -Abhängigkeit ansatzweise zu erkennen, jedoch zeigt der große Fehler des Fitparameters, dass mit diesen Messwerten die Erwartung nicht sicher gezeigt werden kann. Um die Erwartung besser zu überprüfen, müsste die Messreihe mit mehr verschiedenen Materialien durchgeführt werden.

Literatur

- [1] Physikalisches Fortgeschrittenenpraktikum, TU Dortmund, Anleitung zu Versuch V16, Version vom 22.6.2017 (<http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/FP/SKRIPT/V16.pdf>)
- [2] Particle Physics Booklet, Particle Data Group, July 2014
- [3] Particle Data Group, Atomic and nuclear properties of nitrogen gas, Version vom 10.8.2017 (http://pdg.lbl.gov/2017/AtomicNuclearProperties/HTML/nitrogen_gas.html)
- [4] Particle Data Group, Atomic and nuclear properties of oxygen gas, Version vom 10.8.2017 (http://pdg.lbl.gov/2017/AtomicNuclearProperties/HTML/oxygen_gas.html)
- [5] Günter Warnecke, Meteorologie und Umwelt: Eine Einführung, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1991