

Durchführung: 14.11.2018
Abgabe: 26.11.2018

PRAKTIKUMSPROTOKOLL V16

RUTHERFORD STREUEXPERIMENT

Carolin Harkort¹,
Jacqueline Schlingmann²

¹carolin.harkort@tu-dortmund.de

²jacqueline.schlingmann@tu-dortmund.de

1 Zielsetzung

Ziel dieses Versuchs ist es die Streuung von α -Teilchen an einer Goldfolie zu bestimmen. Dafür wird der differentielle Wirkungsquerschnitt der Streuung und die Abhängigkeit der Kernladungszahl Z des Targetmaterials untersucht.

Aus der Streuung kann zusätzlich durch die Energieverlustmessung der α -Teilchen auch die Foliendicke bestimmt werden.

2 Theorie

Beim Durchlauf von positiv geladenen α -Teilchen durch Materie kann es zu zwei unterschiedlichen Wechselwirkungen kommen. Die erste Wechselwirkung findet mit negativ geladenen Hüllenelektronen statt und die zweite mit dem positiven Atomkern.

Bei der Wechselwirkung zwischen α -Teilchen und dem Hüllenelektronen kommt es durch Anregungs- und Ionisationsprozessen zur Energieabgabe des α -Teilchens an das Hüllenelektron. Es wird angenommen, dass es aufgrund der größeren Masse der α -Teilchen gegenüber der Elektronenmasse zu keiner Ablenkung der α -Teilchen kommt.

Die Bethe-Bloch-Gleichung beschreibt den Energieverlust

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

der α -Teilchen beim Durchgang durch die Materie. Hierbei gibt N die Atomdichte, m_0 die Ruhemasse des Hüllenelektrons, Z die Kernladungszahl und I die mittlere Ionisationsenergie des Targetmaterials an.

Bei der Streuung der α -Teilchen am Atomkern kommt es durch die Coulombkraft zu einer Richtungsänderung um den Streuwinkel Θ . Es wird nach der 1. Born'schen Näherung davon ausgegangen, dass die Mehrfachstreuung der α -Teilchen vernachlässigt werden kann.

Dieser Streuwinkel lässt sich mit der Rutherford-Streuformel berechnen

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

E_α beschreibt dabei die mittlere kinetische Energie der α -Teilchen. Der differentielle Wirkungsquerschnitt $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ beschreibt gerade die Intensitätsverteilung der gestreuten α -Teilchen in den Raumwinkel Θ .

3 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 1 dargestellt.

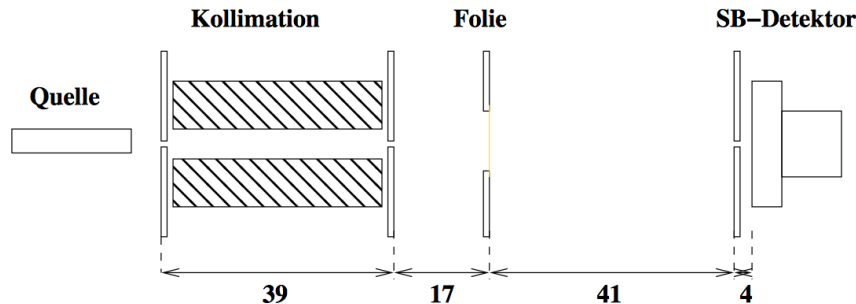


Abbildung 1: Darstellung des Versuchsaufbaus mit Abmessungen in mm.

Der Versuch findet im Vakuum statt, da die α -Strahlung in Luft nur eine sehr geringe Reichweite hat. Als α -Strahler dient ein ^{241}Am -Präparat, welches in ^{237}Np zerfällt. Die aus der Quelle austretenden Teilchen mit einer Energie von $E_\alpha = 5,486 \text{ MeV}$ werden mithilfe von zwei 2 mm Schlitzblenden kollimiert, damit diese senkrecht auf die Goldfolie treffen. An dieser Folie werden die Teilchen um den Winkel Θ gestreut und von einem Detektor aufgenommen. Bei diesem Detektor handelt es sich um einen Surface-Barrier-Detektor, also einen Halbleiter Detektor, an dem die einfallenden α -Teilchen in der Sperrschicht Elektronen-Loch-Paare erzeugen und durch ihre Energieabgabe die Exzitonen in ein höheres Energieniveau anheben, wo diese frei beweglich sind. Durch ein anliegendes elektrisches Feld werden diese zur jeweiligen Elektrode beschleunigt. Dies führt zu einem messbaren Stromimpuls an den Elektroden. Um die vom Detektor erfassten Impulse besser verarbeiten zu können, wird ein Verstärker verwendet. Als Messgeräte dienen dann ein Oszilloskop zur Bestimmung des Energieverlusts und ein Zählwerk zur Bestimmung des Streuquerschnitts.

4 Durchführung

Zu Beginn des Versuches wird die Apparatur über eine Vakuumpumpe evakuiert. Um einen geraden Durchtritt der α -Teilchen zu gewährleisten, wird der Detektor justiert. Für die Bestimmung der Foliendicke wird eine Energieverlustmessung durchgeführt. Dabei werden die Pulshöhen der Detektorpulse in Abhängigkeit des Kammerdrucks aufgenommen. Durch das Feindrosselventil kann der Kammerdruck langsam erhöht werden. Zur Ermittlung der mittleren Pulshöhe wird das Oszilloskop in das Programm "Nachleuchten" gestellt, an dem dann die Pulshöhen abgelesen werden können. Diese Messung wird einmal mit und einmal ohne Goldfolie durchgeführt.. Um den differentiellen Wirkungsquerschnitt einer Goldfolie zu bestimmen, wird die

Zählrate in Abhängigkeit des Streuwinkels Θ aufgenommen. Dafür werden unterschiedliche Winkel eingestellt. Die Dauer der Messung wird durch den statistischen Fehler der Zählrate \sqrt{I} festgelegt, da der α -Zerfall poissonverteilt ist. Zur Untersuchung der Mehrfachstreuung wird die Streuung der unterschiedliche Folien gemessen. Dafür wird ein fester Winkel eingestellt. Die Aktivität wird außerdem ohne Folie für 120 s im Vakuum gemessen.

5 Auswertung

5.1 Beobachtung der vorverstärkten Pulse

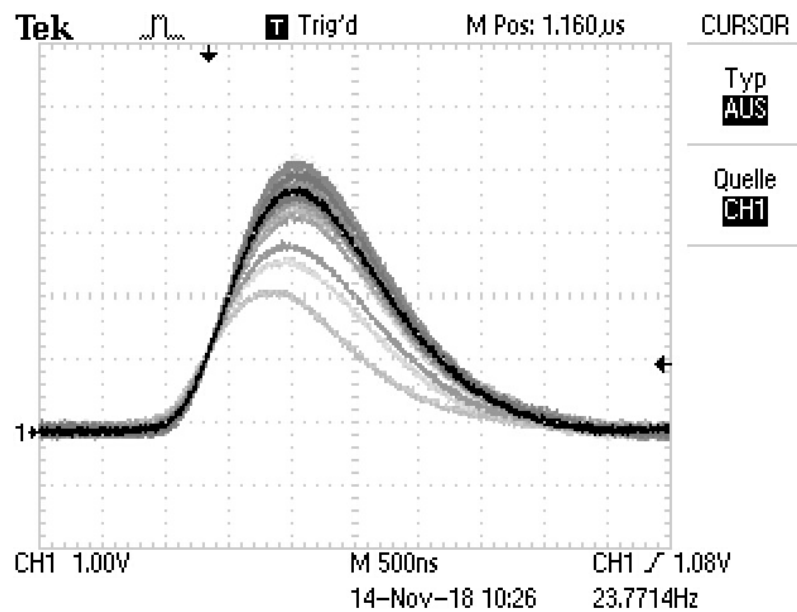


Abbildung 2: verstärkte Aufnahme

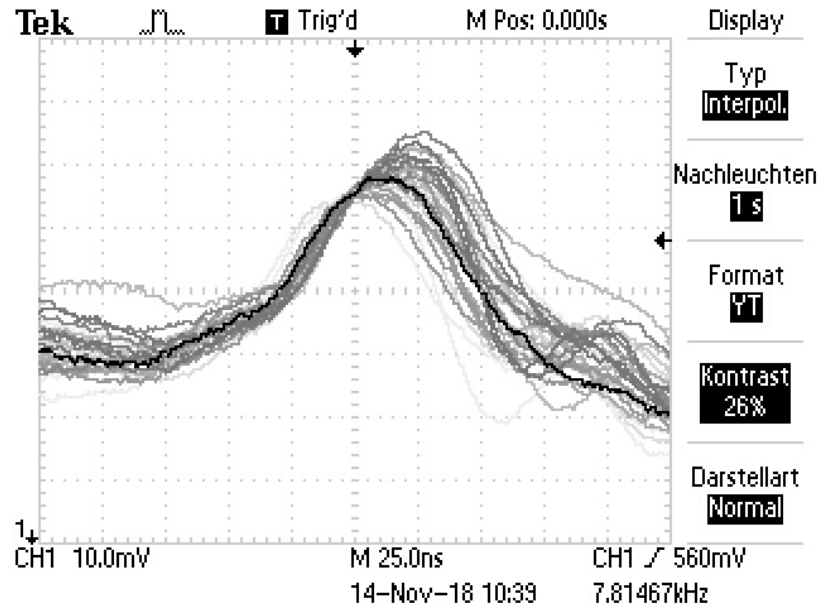


Abbildung 3: unverstärkte Aufnahme

$$t_{\text{verstärkt}} = 1,10 \mu\text{s}$$

$$t_{\text{unverstärkt}} = 0,95 \mu\text{s}$$

Es ist gut zu erkennen, dass bei den unverstärkten Pulsen mehr Störungen auftreten als bei den verstärkten. Werden die Pulshöhen betrachtet ist gut zu erkennen, dass die Höhe der unverstärkten Pulse kleiner ist.

$$h_v = 3,5 \text{ V}$$

$$h_{uv} = 30 \text{ mV}$$

5.2 Bestimmung der Foliendicke

Die gemessenen Pulshöhen und Drücke sind in Tabelle 1 zu finden.

In Abbildung 4 sind die Werte zu sehen. Die linearen Ausgleichsrechnungen wurde mit

$$I = a \cdot p + b$$

durchgeführt. Die erhaltenen Parameter lauten

$$a_{\text{oF}} = (-9,6 \pm 0,8) \frac{\text{V}}{\text{bar}} \quad b_{\text{oF}} = (4,80 \pm 0,07) \text{ V}$$

$$a_{\text{mF}} = (-5,5 \pm 1,3) \frac{\text{V}}{\text{bar}} \quad b_{\text{mF}} = (3,89 \pm 0,08) \text{ V}$$

Tabelle 1: Ladungsimpulse in Abhängigkeit des Drucks

p/ mbar	ohne Folie I / V	mit Folie I/ V
0,04	4,96	3,96
20,2	4,60	3,76
39,7	4,44	3,68
59,6	4,08	3,44
81,3	3,88	3,36
100	3,8	3,48
126,5	3,52	
139,9	3,48	
158,3	3,44	

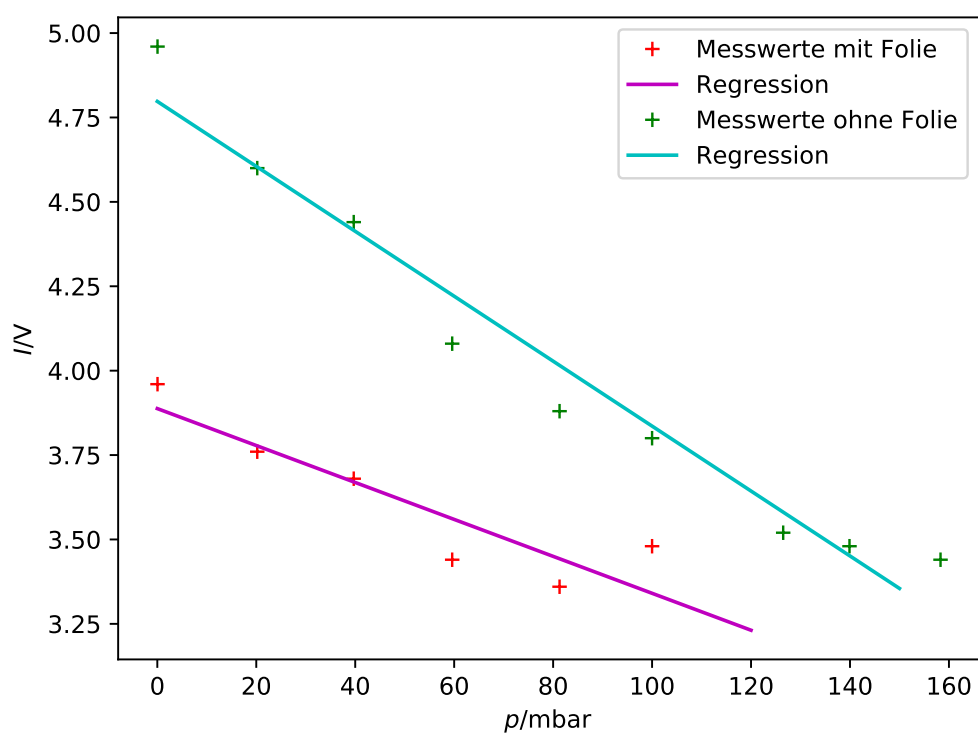


Abbildung 4: Ladungsimpulse des Druckes mit und ohne Folie

Aus der Differenz der y-Achsenabschnitte ergibt sich die Impulshöhdifferenz

$$\Delta I = (0,91 \pm 0,11) \text{ V}$$

Die Energie eines α -Teilchens beträgt $E_\alpha = 5,486 \cdot 10^6 \text{ eV}$. [3] Die Differenzenergie ergibt sich durch

$$\Delta E = \frac{b_{\text{oF}}}{\Delta I} \cdot E_\alpha \cdot \left(1 - \frac{b_{\text{mf}}}{b_{\text{of}}}\right)$$

zu

$$\Delta E = (1,04 \pm 0,11) \text{ MeV} \quad (3)$$

Die Geschwindigkeit eines α -Teilchens berechnet sich mit der Formel

$$v_\alpha = \sqrt{\frac{2E_\alpha}{m_\alpha}} = (1,548 \pm 0,009) \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Dabei ist m_α die Masse des α -Teilchens und beträgt $6,64 \cdot 10^{-6} \text{ kg}$. [6] Die Dichte beträgt $19,282 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. [8] Die Anzahl der Atome N ergibt sich über den Zusammenhang

$$N = \frac{\rho}{m_{\text{Atom}}} = 5.895 \cdot 10^{28} \frac{1}{\text{m}^3} \quad (4)$$

Mit der Bethe-Bloch-Gleichung (1) kann nun die Dicke berechnet werden.

$$dx = \frac{dEm_0v^2(4\pi\epsilon_0)^2}{4\pi e^4 z^2 N Z \cdot \ln \frac{2m_0v^2}{I}}$$

z entspricht dabei der Anzahl der Protonen von Helium und Z die Anzahl der Protonen von Gold

$$z = 2$$

$$Z = 79$$

Die experimentell bestimmte Dicke der Goldfolie beträgt somit

$$dx = (0,51 \pm 0,09) \mu\text{m} \quad (5)$$

5.3 Bestimmung der Aktivität

Die Aktivität wurde gemessen und beträgt $(2,86 \pm 0,05) \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$. Sie berechnet sich durch die Formel

$$A = \frac{C \cdot 4\pi}{d\Omega}.$$

Dabei ist C wieder die Zählrate pro Sekunde mit $c = 3231$ und $t = 120 \text{ s}$. $d\Omega$ wird mit der Formel

$$d\Omega = 4 \arctan\left(\frac{x}{2L}\right) \arctan\left(\frac{y}{2L}\right)$$

berechnet. L ist der Abstand vom Detektor zur Folie und beträgt L=4,1 mm und x·y entspricht der Fläche der Blende mit x=2 mm und y=10 mm.[1] Der Raumwinkel ergibt sich zu

$$d\Omega = 0,0118 \text{ sr}$$

Um die theoretisch zu erwartende Aktivität zu berechnen wird die Formel

$$A(t) = A_0 \exp(-\lambda t)$$

verwendet. Dabei ist A_0 die Anfangsaktivität im Jahre 1994 und beträgt 330 kBq.[1] Somit entspricht die Zeit t 24 Jahre. λ beschreibt die Zerfallskonstante und hat den Wert $5,077 \cdot 10^{-11} \text{ s}^{-1}$. [10]

$$A(t) = 317,56 \text{ kBq}$$

5.4 Untersuchung des differentiellen Wirkungsquerschnittes

Um den differentiellen Wirkungsquerschnitt zu bestimmen wird die Zählrate in Abhängigkeit des Winkels aufgenommen. Die Werte sind in Tabelle 2 zu finden.

Tabelle 2: Die Zählrate in Abhängigkeit des Winkels

$\theta / ^\circ$	c	t / s	$C = \frac{c}{t} / \text{s}^{-1}$	$\frac{d\sigma}{d\Omega}_c \cdot 10^3 / \text{b/sr}$	$\frac{d\sigma}{d\Omega}_s \cdot 10^{-23} / \text{b/sr}$
1,1	1213	300	(4,04±0,12)	(1500,40±299,64)	1266,06
1,4	1361	300	(4,54±0,12)	(1687,55±335,82)	482,53
1,6	1472	300	(4,91±0,13)	(1825,75±362,95)	282,86
1,8	1491	300	(4,97±0,13)	(1848,75±367,59)	176,59
2,0	1498	300	(4,99±0,13)	(1857,43±369,31)	115,87
2,5	1703	300	(5,68±0,14)	(2111,61±419,42)	47,47
3,0	1671	300	(5,57±0,14)	(2071,93±411,60)	22,89
4,0	1810	300	(6,03±0,14)	(2244,29±445,57)	7,25
8,0	1235	300	(4,12±0,14)	(1531,32±305,01)	0,45
10,0	630	300	(2,10±0,08)	(781,16±157,11)	0,19
15,0	176	600	(0,29±0,02)	(109,11±23,03)	0,04
20,0	62	900	(0,07±0,001)	(25,63±6,01)	0,01

Der Fehler für die Zählrate pro Sekunde ergibt sich durch

$$\Delta C = \sqrt{c}/t$$

Um den differentiellen Wirkungsquerschnitt zu bestimmen wird die Formel

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\Theta) = \frac{C V_{\text{mol}}}{A N_a G dx^2 d\Omega} \quad (6)$$

verwendet. Hier entspricht A der theoretischen Aktivität der Am-Quelle.

Der Fehler ergibt sich durch

$$\Delta \frac{d\sigma}{d\Omega}(\Theta) = \sqrt{\left(\frac{\Delta CV}{AN_a G dx^2 d\Omega}\right)^2 + \left(-\frac{\Delta dx CV}{AN_a G dx^3 d\Omega}\right)^2}$$

Die Ergebnisse für die Wirkungsquerschnitte sind in Tabelle 2 zu finden. $d\sigma/d\Omega_c$ entspricht dem mit Formel (6) und $d\sigma/d\Omega_s$ dem mit Formel (2) bestimmten Wirkungsquerschnitt.

In Abbildung 5 ist der differentielle Wirkungsquerschnitt gegen den Winkel aufgetragen zu sehen.

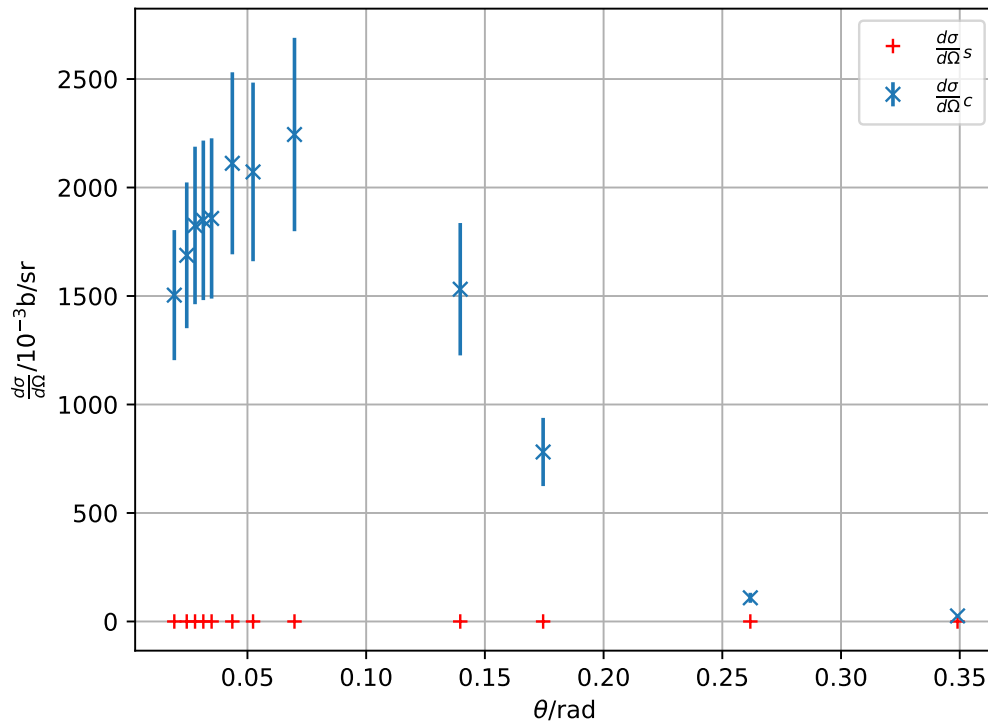


Abbildung 5: Der Wirkungsquerschnitt gegen den Winkel

5.5 Untersuchung des Einflusses der Mehrfachstreuung

Um den Einfluss der Mehrfachstreuung zu untersuchen, wird die Zählrate c für eine $4\mu\text{m}$ dicke Goldfolie aufgenommen. Dies wird für einen Winkel von 5° gemacht. Gemessen wurde $c = 9$ bei einer Messzeit von 600 s. Da für die $2\mu\text{m}$ dicke Goldfolie nicht bei

einem Winkel von 5° gemessen wurde, wird eine Regression mit Hilfe der Werte aus 2 durchgeführt. Diese ist in Abbildung 6 zu sehen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 zusammengefasst

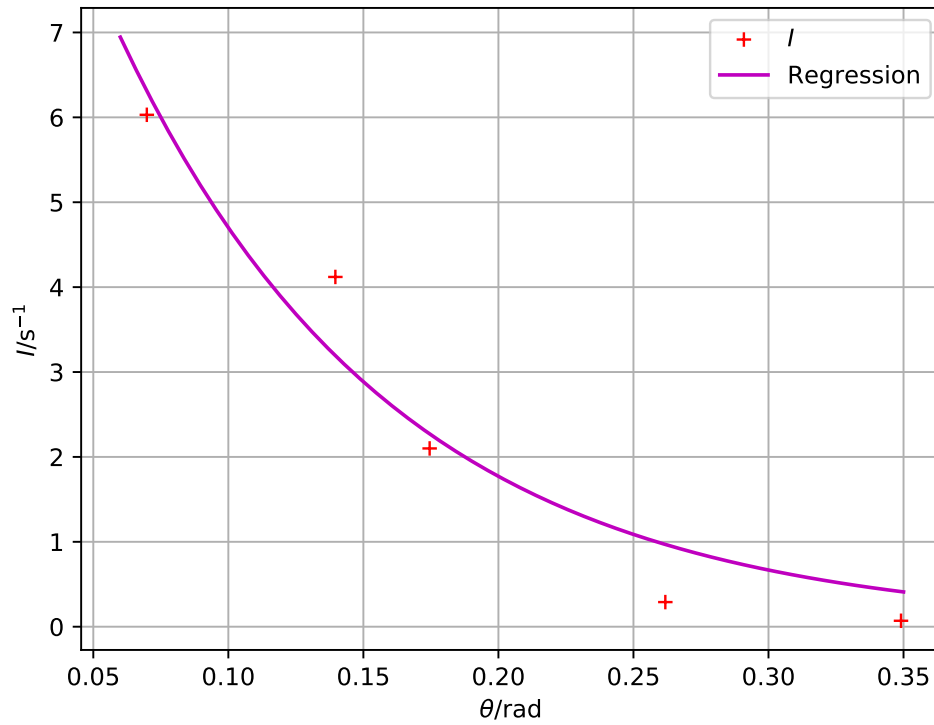


Abbildung 6: Regression mit Hilfe der Tabelle 2

Die Regression wurde mit

$$C(\Theta) = C_0 \cdot e^{a\Theta}$$

Die ermittelten Parameter lauten

$$C_0 = (12,473 \pm 0,001) \text{ s}^{-1}$$

$$a = (-9,76 \pm 0,08) \text{ 1/rad}$$

Tabelle 3: Zählrate C bei 5°

dx / m	C/ s ⁻¹	$\frac{d\sigma}{d\Omega}$ /b/sr
2	(5,320±0,040)	(2,0±0,4)10 ⁶
4	(0,015±0,005)	(5,6±2,2)10 ³

5.6 Z-Abhängigkeit unterschiedlicher Folien

In der nachfolgenden Tabelle 4 sind die Werte zur Beschreibung der Z-Abhängigkeit zusammengefasst. Das N wird mit Formel (4) berechnet.

Tabelle 4: Z-Abhängigkeit unterschiedlicher Folien

Material	d/m	Z	A	$\rho / \text{g/cm}^3$	c / s ⁻¹	N · 10 ¹⁰ / m ⁻³	$\frac{C}{Ndx} \cdot 10^{-24} / \text{m}^2 \text{s}^{-1}$
Gold	2	79	197	19,282	(5,07±0,96)	47,155	(89,774±16,950)
Bismut	1	83	209	9,807	(0,35±0,05)	2,826	(1,077±0,154)
Aluminium	3	13	27	2,698	(0,68±0,06)	16,248	(0,721±0,064)

In Abbildung 7 ist c/Ndx gegen die Kernladungszahl Z aufgetragen.

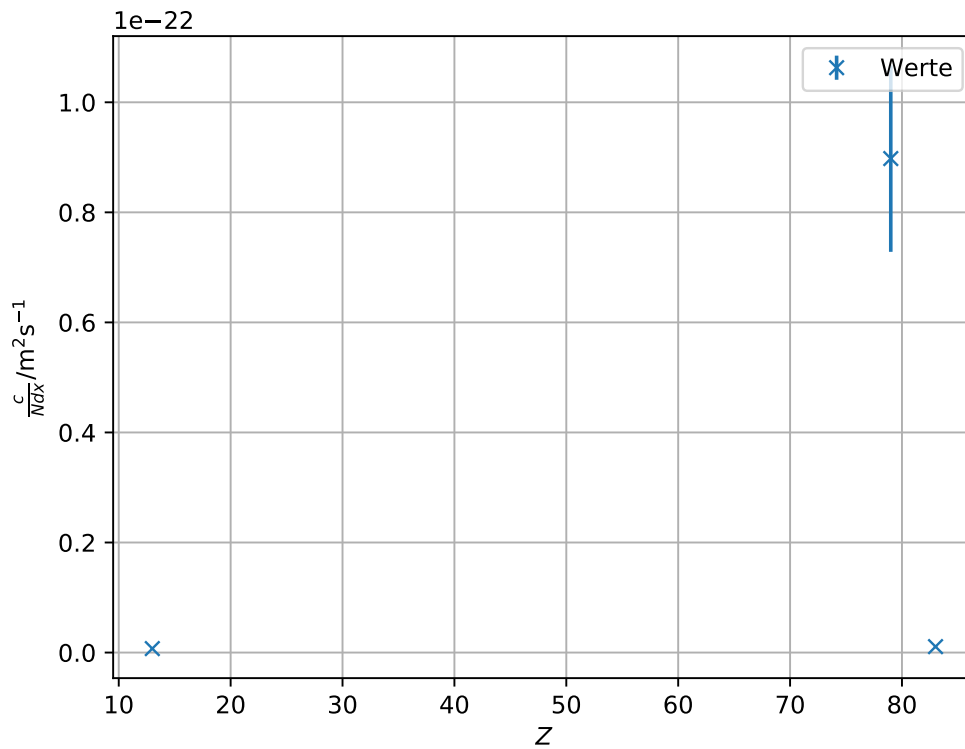


Abbildung 7: Z-Abhängigkeit der Zählrate

6 Bremsvermögen von α -Teilchen in Luft

Der Energieverlust der α -Teilchen kann mit der Bethe-Bloch-Gleichung 1 berechnet werden. Dafür wird nur berücksichtigt, dass Luft aus 20% Stickstoff und 78% Sauerstoff besteht.

Tabelle 5: Eigenschaften von luft [2]

Material	Z	A	I/eV
Sauerstoff	8	16	13,62
Stickstoff	7	14	14,53
Mittelwert	(7,50 \pm 0,35)	(15,0 \pm 0,7)	(14,07 \pm 0,32)

Die restlichen zur Berechnung benötigten werte werden aus Kapitel 4.2 genommen. Die Berechnung von N erfolgt nach Formel (4). Die Dichte vn Luft beträgt

$$\rho_{\text{Luft}} = 1,293 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

[**dichte**] Der Energieverlust ergibt sich zu

$$\frac{dE}{dx} = (5,266 \pm 0,026) \frac{\text{J}}{\text{m}}$$

Mit dem idealen Gasgesetz

$$p = \frac{\rho RT}{M}$$

ergibt sich für den Druck ein Wert von 0,109 kPa R beschreibt dabei die ideale Gas-konstante, T die Temperatur bei 20°C und M = 28,96 g/mol die Molmasse von Luft. [7]

7 Diskussion

Bei dem Vergleich der Pulse wurden die Anstiegszeiten per Augenmaß abgelesen. Das ist eine Fehlerquelle des Versuchs. Eine weitere Fehlerquelle verbirgt sich in den äußeren Einflüssen wie der Beleuchtung oder in Fehlern bei der Aufnahme der Bilder.

Die experimentell bestimmte Foliendicke (5) weicht um ca. 74,3% von dem zu erwartenden Wert von 2 μm ab.. Zusätzlich ist nicht gewährleistet, dass die α -Teilchen nicht schräg auf die Folie treffen, da die Einstellung nur per Augenmaß möglich war. Da die Abweichung aber so groß ist, kann auch nicht ausgeschlossen werden, dass ein Berechnungsfehler vor liegt.

Die theoretischen und experimentell bestimmten Wirkungsquerschnitte weisen große Unterschiede auf. Vorallem im Bereich der kleineren Winkel kommt es zu sehr großen Abweichungen. Einen Einfluss auf diese Abweichungen könnte die Mehrfachstreuung haben. Wenn das Teilchen in einem kleinen Winkel streut, steht es im Einfluss der Coulombabstoßung mehrerer Atome. In diesem Fall gilt die Rutherfordsche Streuformel nicht mehr. Geht der Winkel gegen 0° , geht der Wirkungsquerschnitt gegen unendlich. Dies ist in der Realität nicht möglich.

Im nächsten Teil konnte kein guter Vergleich zwischen den beiden Foliendicken getroffen werden, da nicht bei gleichen Winkeln gemessen wurde. Es kann aber gesagt werden, dass die erhaltenen Werte eher abwegig sind. Dies war aber schon zu erwarten, da die gemessene Zählrate von 9 viel zu niedrig ist.

Da auf die im letzten Versuchsteil bestimmte Zählrate zurückgegriffen wird, scheint auch das Ergebnis dieses Teils nicht ganz stimmig. da die Kernladungszahl quadratisch in den Wirkungsquerschnitt eingeht ist ein parabelförmiger Zusammenhang zu erwarten. Dies kann aus den drei vorhandenen Werten allerdings nicht abgelesen werden.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuchsanleitung V16*. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/FP/SKRIPT/Rutherford.pdf> (besucht am 18.11.2018).
- [2] *Eigenschaften Luft*. URL: <http://www.periodensystem.info/elemente/sauerstoff> (besucht am 08.01.2019).
- [3] *Energie Alpha Teilchen*. URL: <https://www.phywe.de/de/alpha-und-photodetektor.html> (besucht am 21.11.2018).
- [4] *Halbleiterdetektoren*. URL: <https://web-docs.gsi.de/~wolle/Schuelerlabor/TALKS/DETEKTOREN/VO-4-Halbleiterdetektoren.pdf> (besucht am 18.11.2018).
- [5] *Ionisationsenergie*. URL: http://www.unitertra.de/rutherford/tab_iong.htm (besucht am 20.11.2018).
- [6] *Masse Alpha Teilchen*. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/alphastrahlung/393> (besucht am 21.11.2018).
- [7] *Molmasse Luft*.
- [8] *periodensystem Au*. URL: <http://www.periodensystem.info/elemente/gold/> (besucht am 21.11.2018).
- [9] *periodensystem He*. URL: <http://www.periodensystem.info/elemente/helium/> (besucht am 21.11.2018).
- [10] *Zerfallskonstate Am*. URL: <http://www.periodensystem-online.de/index.php?id=isotope&el=95&mz=241&show=nuklid> (besucht am 27.12.2018).