

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 Hüllenelektron statt und die zweite mit dem positiven Atomkern.

Bei der Wechselwirkung zwischen α -Teilchen und dem Hüllenelektronen kommt es durch Anregungs- und Ionisationsprozesse zur Energieabgabe. 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 Ruheenergie 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.

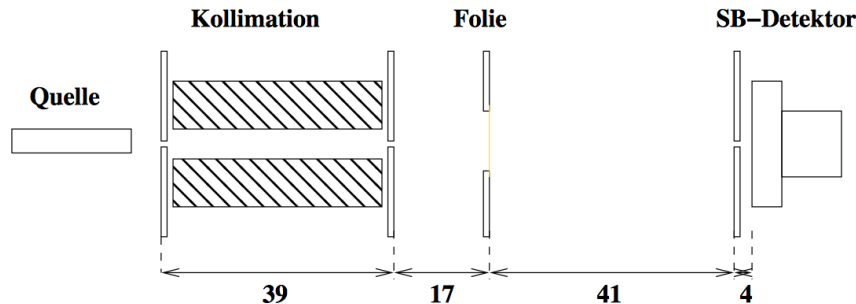


Abbildung 1: Darstellung des Versuchsaufbaus

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. Die aus der Quelle austretenden Teilchen 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. Die 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

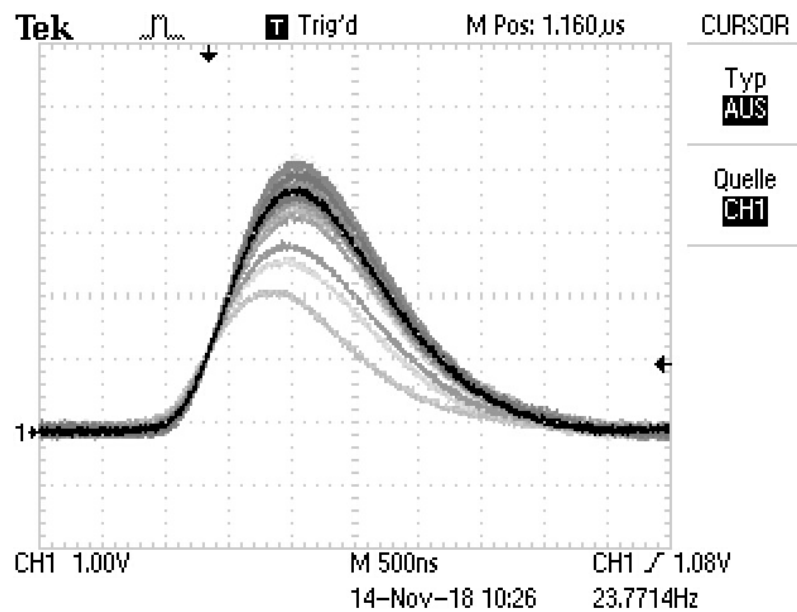


Abbildung 2: verstärkte Aufnahme

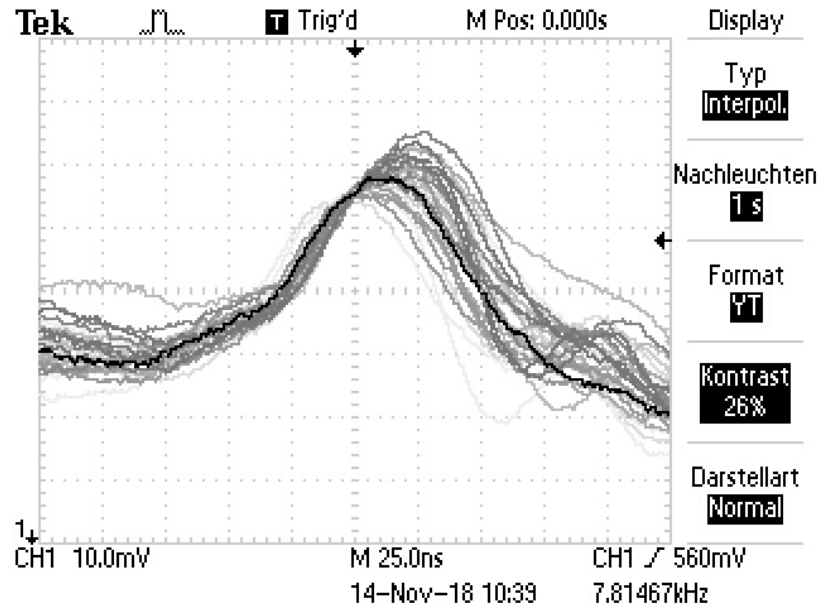


Abbildung 3: unverstärkte Aufnahme

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

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

Es ist gut zu erkennen, dass bei den unverstärkten Pulsen mehr Störungen auftreten als bei den verstärkten.

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

$$I = a \cdot p + b \quad (3)$$

durchgeführt. Die erhaltenen Parameter lauten

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

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

Aus der Differenz der y-Achsenabschnitte ergibt sich die Impulshöhendifferenz

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

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	

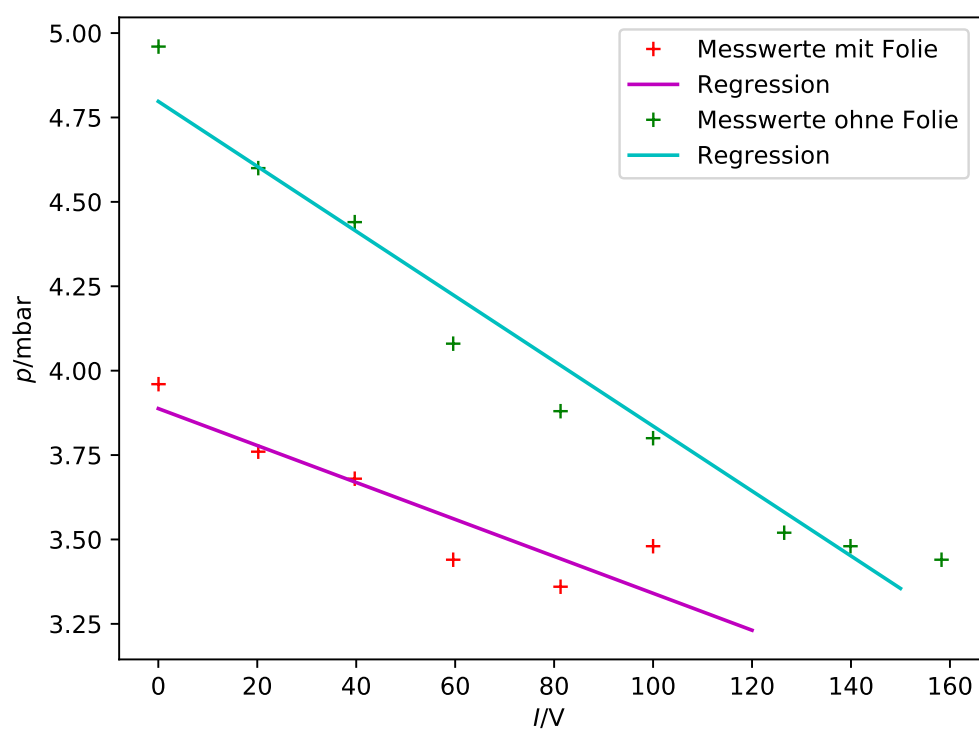


Abbildung 4: Ladungsimpulse des Druckes mit und ohne Folie

Die Energie eines α -Teilchens beträgt $E_\alpha = 5,486 \cdot 10^6$. [2] Die Differenzenergie ergibt sich durch

$$\Delta E = \frac{b_{\text{oF}}}{\Delta I} \cdot E_\alpha$$

zu

$$\Delta E = (28,9 \pm 3,1) \text{ MeV} \quad (6)$$

Die Geschwindigkeit eines α -Teilchens berechnet sich mit der Formel

$$v_\alpha = \sqrt{\frac{2E_\alpha}{m_\alpha}} = 4,519 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Dabei ist m_α die Masse des α -Teilchens und beträgt $6,64 \cdot 10^{-6} \text{ kg}$. [5]

Die Anzahl der Atome N ergibt sich über den Zusammenhang

$$N = \frac{\rho}{m_{\text{Atom}}} = 5.895 \cdot 10^{28} \frac{1}{\text{m}^3} \quad (7)$$

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

$$z = 2 \quad (8)$$

$$Z = 79 \quad (9)$$

Die experimentell bestimmte Dicke der Goldfolie beträgt somit

$$dx = (15,5 \pm 1,7) \mu\text{m} \quad (10)$$

5.3 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
1,1	1213	300
1,4	1361	300
1,6	1472	300
1,8	1491	300
2,0	1498	300
2,5	1703	300
3,0	1671	300
4,0	1810	300
8,0	1235	300
10,0	630	300
15,0	176	600
20,0	62	900

Der Fehler für die Zählrate pro sekunde ergibt sich durch

$$\Delta c = \sqrt{\frac{c}{t}}$$

Um den differentiellen Wirkungsquerschnitt zu bestimmen wird die Formel

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\Theta) = \frac{c}{ANdxd\Omega^2} \quad (11)$$

verwendet. Hier entspricht A der Aktivität der Am-Quelle. Diese wurde gemessen und beträgt $26,92 \text{ s}^{-1}$ $d\Omega$ 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 $L=4,1 \text{ mm}$ und $x \cdot y$ entspricht der Fläche der Blende mit $x=2 \text{ mm}$ und $y=10 \text{ mm}$. [1] Der Fehler ergibt sich durch

$$\Delta \frac{d\sigma}{d\Omega}(\Theta) = \sqrt{\left(\frac{\Delta c}{ANdxd\Omega^2}\right)^2}$$

Der Raumwinkel ergibt sich zu

$$d\Omega = 0,0118$$

Die Ergebnisse für die Wirkungsquerschnitte sind in Tabelle 3 zu finden. $\frac{d\sigma}{d\Omega}_c$ entspricht dem mit Formel (11) und $\frac{d\sigma}{d\Omega}_s$ dem mit Formel (2) bestimmten Wirkungsquerschnitt.

Tabelle 3: berechnete Wirkungsquerschnitte

$\theta / ^\circ$	$\frac{c}{t} / s^{-1}$	$\frac{d\sigma}{d\Omega_c} \cdot 10^{-21} / m^{-1}$	$\frac{d\sigma}{d\Omega_s} \cdot 10^{-23} / m^{-1}$
1,1	(4,04±2,01)	(48,11±5,19)	1266,06
1,4	(4,54±2,13)	(53,98±5,82)	482,53
1,6	(4,91±2,22)	(58,38±6,30)	282,86
1,8	(4,97±2,23)	(59,13±6,38)	176,59
2,0	(4,99±2,23)	(59,41±6,41)	115,87
2,5	(5,68±2,38)	(67,54±7,29)	47,47
3,0	(5,57±2,36)	(66,27±7,15)	22,89
4,0	(6,03±2,46)	(71,78±7,74)	7,25
8,0	(4,12±2,03)	(48,98±5,28)	0,45
10,0	(2,10±1,45)	(24,99±2,70)	0,19
15,0	(0,29±0,54)	(6,98±0,75)	0,04
20,0	(0,07±0,26)	(2,46±0,27)	0,01

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

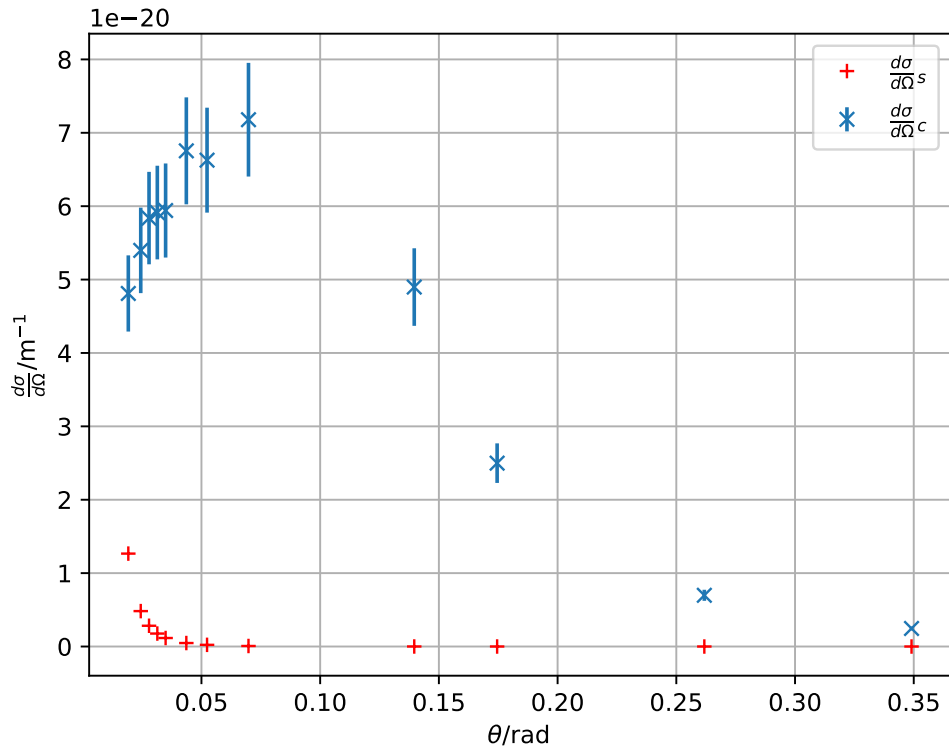


Abbildung 5: Der wirkungsquerschnitt gegen den Winkel

5.4 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 über die Messungen bei 4 und 8° gemittelt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Messwerte der Zählrate c

dx / m	c / s^{-1}
2	$(5,074 \pm 0,958)$
4	0,015

5.5 Z-Abhängigkeit unterschiedlicher Folien

In der nachfolgenden Tabelle 5 sind die Werte zur Beschreibung der Z-Abhängigkeit zusammengefasst. Das N wird mit Formel (7) berechnet.

Tabelle 5: Z-Abhängigkeit unterschiedlicher Folien

Material	Z	A	$\rho / \text{g/cm}^3$	c / s^{-1}	$N \cdot 10^{28} / \text{m}^{-3}$	$\frac{c}{Ndx} \cdot 10^{-24} / \text{m}^2 \text{s}^{-1}$
Gold	79	197	19,282	$(5,07 \pm 0,96)$	5,894	$(43,044 \pm 8,127)$
Bismut	83	209	9,807	$(0,35 \pm 0,05)$	2,826	$(6,192 \pm 0,885)$
Aluminium	13	27	2,698	$(0,68 \pm 0,06)$	6,018	$(5,650 \pm 0,499)$

In Abbildung 6 ist c/Ndx gegen die Kernladungszahl Z aufgetragen.

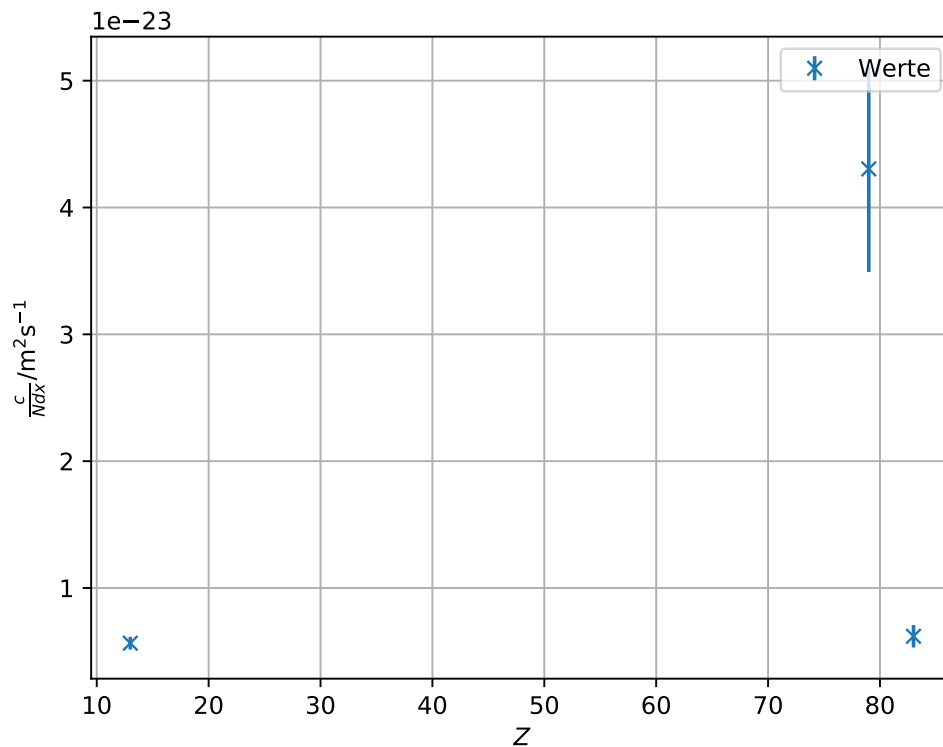


Abbildung 6: Z-Abhängigkeit der Zählrate

6 Diskussion

Bei dem Vergleich der Pulse wurden die Anstiegszeiten per Augenmaß abgelesen. Das ist eine Fehlerquelle des Versuchs. Hinzu kommt, dass die unverstärkten Pulse nicht ganz den zu erwartenden Verlauf aufweisen. Dies kann an äußeren Einflüssen wie der Beleuchtung liegen oder an einem Fehler bei der Aufnahme der Bilder.

Die experimentell bestimmte Foliendicke (10) weicht um ca. 670% von dem zu erwartenden Wert von $2 \mu\text{m}$ ab. Für die Berechnung wurde davon ausgegangen, dass die beiden Geraden aus Abbildung 4 parallel zueinander stehen. Wie zu sehen, ist dies nicht ganz der Fall. 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 Rutherford'sche Streuformel nicht mehr. Geht der Winkel gegen 0° , geht der Wirkungsquerschnitt gegen unendlich. Dies ist physikalisch unlogisch.

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.

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] *Energie Alpha Teilchen*. URL: <https://www.phywe.de/de/alpha-und-photodetektor.html> (besucht am 21.11.2018).
- [3] *Halbleiterdetektoren*. URL: <https://web-docs.gsi.de/~wolle/Schuelerlabor/TALKS/DETEKTOREN/VO-4-Halbleiterdetektoren.pdf> (besucht am 18.11.2018).
- [4] *Ionisationsenergie*. URL: http://www.unitererra.de/rutherford/tab_iiong.htm (besucht am 20.11.2018).
- [5] *Masse Alpha Teilchen*. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/alphastrahlung/393> (besucht am 21.11.2018).
- [6] *periodensystem Au*. URL: <http://www.periodensystem.info/elemente/gold/> (besucht am 21.11.2018).
- [7] *periodensystem He*. URL: <http://www.periodensystem.info/elemente/helium/> (besucht am 21.11.2018).