

FP

Rutherfordstreuung

Katharina Brägelmann
Lars Kolk

katharina.braegelmann@tu-dortmund.de, lars.kolk@tu-dortmund.de
Durchführung: 04. November 2019, Abgabe: 06. Dezember 2019

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	3
2	Theorie	3
3	Aufbau und Durchführung	5
4	Auswertung	7
4.1	Bestimmung der Aktivität	7
4.2	Bestimmung der Foliendicke mittels Energieverlustmessung	7
4.3	Untersuchung des differentiellen Wirkungsquerschnittes einer dünnen Gold- folie	10
4.4	Untersuchung des Einflusses der Mehrfachstreuung	13
4.5	Z-Abhängigkeit des Wirkungsquerschnittes	13
5	Diskussion	15
	Literatur	16

1 Zielsetzung

Die Rutherford-Streuung beschreibt die Streuung von α -Teilchen an einer Goldfolie. Dieser Versuch führte Anfang des 20. Jahrhunderts zur Formulierung des Rutherford'schen Atommodells. Dieses Modell zeichnet sich durch einen kleinen, schweren, positiv geladenen Atomkern in einer großen, leichten Hülle aus negativ geladenen Elektronen aus. Im Rahmen dieses Experiments wird unter anderem der Differenzielle Wirkungsquerschnitt der Rutherford-Streuung und die Foliendicke über die Bethe-Bloch-Gleichung untersucht.

2 Theorie

Grundlegend für Streuexperimente ist der Wirkungsquerschnitt σ . Der Wirkungsquerschnitt beschreibt die Wechselwirkungswahrscheinlichkeit eines Projektils (P) mit einem Target (T). Dabei hat σ die Dimension einer Fläche und beschreibt anschaulich eine 'Wechselwirkungsfläche' des jeweiligen Atoms im Target. Je größer die Fläche, desto

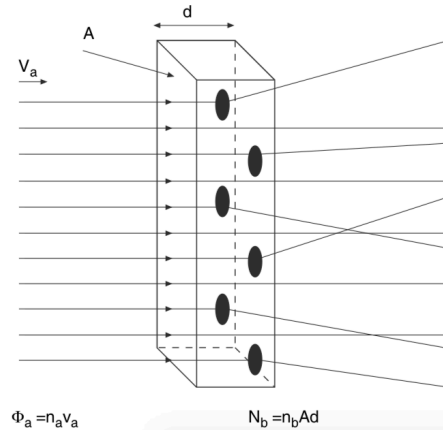


Abb. 1: Anschauliche Beschreibung des Wirkungsquerschnitts σ [1].

wahrscheinlicher die Streuung.

Die α -Teilchen, die bei der Rutherford-Streuung verwendet werden, verlieren in der Folie ihre kinetische Energie. Allgemein kann der Energieverlust von geladenen Teilchenstrahlen in Materie über verschiedene Prozesse entstehen. Bei Wechselwirkung von schweren geladenen Teilchen mit der Elektronenhülle wird die Bethe-Bloch-Gleichung (1) verwendet.

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

Hier ist e die Elementarladung, v die Geschwindigkeit des Projektils, z die Ladungszahl des Projektils, Z die Ladungszahl des Targets, N die Teilchendichte im Target und I das mittlere Ionisationspotenzial des Targets. Das mittlere Ionisationspotenzial I kann durch folgende Beziehung genähert werden:

$$I = 10 \text{ eV} \cdot Z.$$

Die Bethe-Bloch-Gleichung ist die quantenmechanische Erweiterung der klassischen Gleichung zum Energieverlust über Anregungs- und Ionisationsprozesse von Niels Bohr. Die wesentlichen Annahmen, die hierfür getroffen werden müssen sind folgende:

1. $M_T \gg m_P$: Das passierende Teilchen wird nicht abgelenkt.
2. $v_P \gg v_{e^-} \approx 0$: Die Schalelektronen bewegen sich während der Wechselwirkung nicht.

Bei hohen Projektilenergien (relativistischen Geschwindigkeiten) entsteht ein zusätzlicher Energieverlust durch Erzeugung von Bremsstrahlung. Außerdem gibt es weitere Korrekturfaktoren, wie die Dichtekorrektur und Korrekturen bei niedrigen Projektilenergien. Die Wahrscheinlichkeit der Streuung von geladenen Teilchen an den gleich geladenen Atomkernen über den Raumwinkel Ω durch die Coulomb-Abstoßung wird über die Rutherfordsche Streuformel (2) beschrieben.

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

Hierbei ist E_α die mittlere kinetische Energie des Projektils und ϑ der Winkel zwischen der Bahn der abgelenkten Teilchen und der Bahn der eingehenden Teilchen. Für die

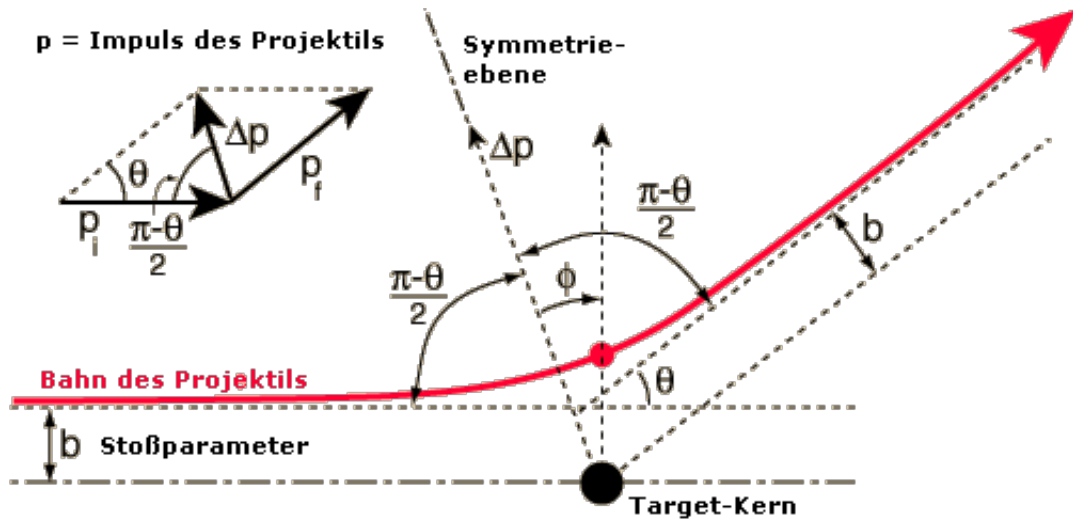


Abb. 2: Geometrie der Rutherford-Streuung [2].

Rutherfordsche Streuformel werden folgende Annahmen gemacht:

1. $M_T \gg m_P$; $v_P \gg v_T \approx 0$: Elastische Streuung, Projektil wird abgelenkt, vernachlässigbarer Impulsübertrag an das Target.
2. $E_{\text{kin}, P} \gg V_T(r)$: Streupotenzial $V_T(r)$ ist sehr klein gegen die kinetische Energie des Projektils (Störungstheorie: Bornsche Näherung 1. Ordnung).

3 Aufbau und Durchführung

Aufbau Der Aufbau gleicht weitestgehend dem Aufbau der historischen Rutherford-Streuung (Abbildung 3). Eine ^{241}Am -Quelle befindet sich in einer evakuierbaren Kammer. Der Träger für die Folien kann in den Strahlengang der Quelle gefahren werden. Der Detektor ist schwenkbar auf einer Goniometerscheibe montiert und ermöglicht das Messen der Zählraten in Abhängigkeit vom Winkel. Es liegt ein Oberflächensperrschichtzähler als Detektor vor. Das Zählwerk ist mit dem Detektor verbunden und kann mit einem Zeitgeber verwendet werden. Die entstehenden Pulse können auch mit einem Oszilloskop abgebildet werden. Für die Evakuierung steht eine Drehschieberpumpe zur Verfügung. Hiermit können Drücke bis ca. 80 mbar erreicht werden. Zur Abschirmung der äußeren Streustrahlung gibt es einen Deckel, mit dem die Apparatur abgedunkelt werden kann.

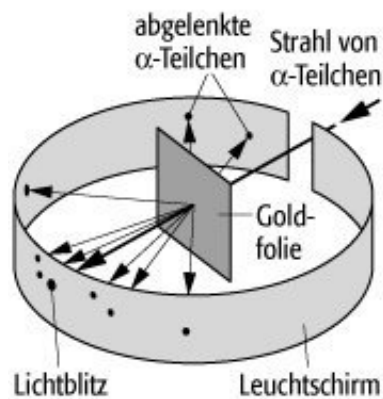


Abb. 3: Aufbau der historischen Rutherford-Streuung, modifiziert [3].

Durchführung Für eine maximale Unsicherheit von ca. 3 % wird eine Mindestzählrate von $N = 1000$ angestrebt.

Zunächst wird der Detektor gerade auf die Quelle ausgerichtet. Anschließend wird die Aktivität der Probe bestimmt, indem die Zählrate bei minimalem Kammerdruck gemessen wird.

Dann wird zur Bestimmung der Foliendicke die Pulshöhe U in V am Oszilloskop in Abhängigkeit des Kammerdrucks p gemessen. Dabei wird die Kammer evakuiert und nach und nach wird das Ventil geöffnet. Die Messung wird einmal ohne Folie und einmal mit Folie im Strahlengang durchgeführt, um auf den Energieverlust durch die Folie schließen zu können.

Zur Messung des Differenziellen Wirkungsquerschnitts $\frac{d\sigma(\vartheta)}{d\Omega}$ wird die Folie in den Strahlengang gebracht. Der Detektor wird in Schritten von $0,1^\circ - 0,5^\circ$ um das Streuzentrum gedreht. Als Messdaten werden die Zählrate N pro Messzeit T und der Winkel ϑ notiert.

Den Effekt der Mehrfachstreuung in den Folien wird mit einer Messung verschiedener

Foliendicken untersucht. Hierfür werden bei $\vartheta = -1^\circ$ zwei Goldfolien mit angegebenen Dicken von $d = 2\text{ }\mu\text{m}$ und $d = 4\text{ }\mu\text{m}$ verwendet.

Abschließend wird der Zusammenhang der Aktivität A und der Ordnungszahl Z der Folie betrachtet. Für drei Folien verschiedener Materialien werden bei einem Winkel von $\vartheta = 4,2^\circ$ die Aktivitäten gemessen. Die verwendeten Folien sind:

- Platin: $d = 2\text{ }\mu\text{m}$
- Bismut: $d = 2\text{ }\mu\text{m}$
- Gold: $d = 4\text{ }\mu\text{m}$.

4 Auswertung

4.1 Bestimmung der Aktivität

Die Aktivität der Probe wird mithilfe des Zerfallsgesetzes

$$A = A_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{\tau} t} \quad (3)$$

($A_0 \hat{=}$ Ursprüngliche Aktivität der Probe, $\tau \hat{=}$ Halbwertszeit der Probe, $t \hat{=}$ vergangene Zeit)

bestimmt. Mit der in Oktober 1994 gemessenden Aktivität $A_0 = 330 \text{ kBq}$, der Halbwertszeit von $\tau = (432,6 \pm 0,6) \text{ s}$ von ^{241}Am und der seit Oktober 1994 vergangenen Zeit $t = (7,897 \pm 0,013) \cdot 10^8 \text{ s}$ ergibt sich für die Aktivität

$$A_{\text{theo}} = (3,170 \pm 0,010) \cdot 10^5 \text{ kBq}. \quad (4)$$

Um die Aktivität experimentell zu bestimmen, wird zunächst eine Nullmessung im Vakuum von $87,7 \text{ mbar}$ durchgeführt. Dabei wurden innerhalb von $t = 68 \text{ s}$ $N = 1064(32)$ Ereignisse registriert, wobei sich die Unsicherheit σ_N aus der Poissonverteilung ergibt. Mit diesen Werten folgt für die Aktivität pro Raumwinkelement

$$\frac{\Omega}{4\pi} \cdot A_{\text{exp}} = \frac{N}{t} = (15,64 \pm 0,48) \text{ kBq}, \quad (5)$$

wobei die Unsicherheit $\sigma_{A_{\text{exp}}} = \frac{\sigma_N}{t}$ aus der Gaußschen Fehlerfortpflanzung folgt. Dies ist jedoch lediglich die Aktivität, die im Raumwinkelement $\frac{\Omega}{4\pi}$ erfasst wurde. Wenn davon ausgegangen wird, dass die auf dem Detektor aktive Fläche Teil einer Kugel mit $r = 101 \text{ mm}$ entspricht - wobei r den Abstand zwischen Detektor und Quelle darstellt. Das Verhältnis der Flächen wird aufgrund der beiden aktiven 2 mm Schlitzblenden auf

$$\frac{\Omega}{4\pi} = \frac{2 \cdot 4 \text{ mm}^2}{101^2 \text{ mm}^2 \cdot 4\pi} = 3,12 \cdot 10^{-5} \quad (6)$$

geschätzt. Somit folgt für die Aktivität

$$A_{\text{exp}} = (501 \pm 15) \text{ kBq}. \quad (7)$$

4.2 Bestimmung der Foliendicke mittels Energieverlustmessung

Die Foliendichte wird mithilfe eines Oszilloskops bestimmt. Mit diesem werden die Spannungen U einzelner Impulse bei verschiedenen Drücken p aufgenommen. Diese Messung wird einmal mit und einmal ohne eingebaute Goldfolie durchgeführt. Die Messwerte befinden sich in den Tabellen 1 und 2.

Tab. 1: Gemessene Spannungen U und Drücke p mit Goldfolie.

Druck / mbar	Pulshöhe / V
91,6	8,64
105	7,60
110	6,88
130	6,24
140	5,68
150	5,28
170	4,56
180	4,56
200	5,52
230	5,52
300	3,92
400	3,92
500	3,92

Tab. 2: Gemessene Spannungen U und Drücke p ohne Goldfolie.

Druck / mbar	Pulshöhe / V
80	11,40
100	11,40
110	11,60
120	11,30
140	9,12
150	7,90
160	8,60
180	7,04
190	6,08
200	5,36
220	3,04
240	2,80
260	3,30
280	4,40

Um von den in den Tabellen 1 und 2 auf die Foliendicke schließen zu können, wird zunächst eine Ausgleichsrechnung der Form

$$U = a \cdot p + b \quad (8)$$

durchgeführt. Daraus ergeben sich die Parameter

$$\begin{aligned}
 a_{\text{ohne}} &= (-0.050 \pm 0.006) \cdot 10^{-2} \frac{\text{V}}{\text{mbar}} \\
 b_{\text{ohne}} &= (7,421 \pm 0,575) \text{mbar} \\
 a_{\text{mit}} &= (-0.054 \pm 0.005) \cdot 10^{-2} \frac{\text{V}}{\text{mbar}} \\
 b_{\text{mit}} &= (16.143 \pm 0.948) \text{mbar}.
 \end{aligned}$$

Dabei gehören die Parameter mit dem Index **ohne** zu Versuchsreihe ohne eingesetzter Goldfolie, während die Parameter mit dem Index **mit** zu Versuchsreihe mit eingesetzter Goldfolie gehören. Die dazugehörigen Graphen befinden sich in Abbildung 4.

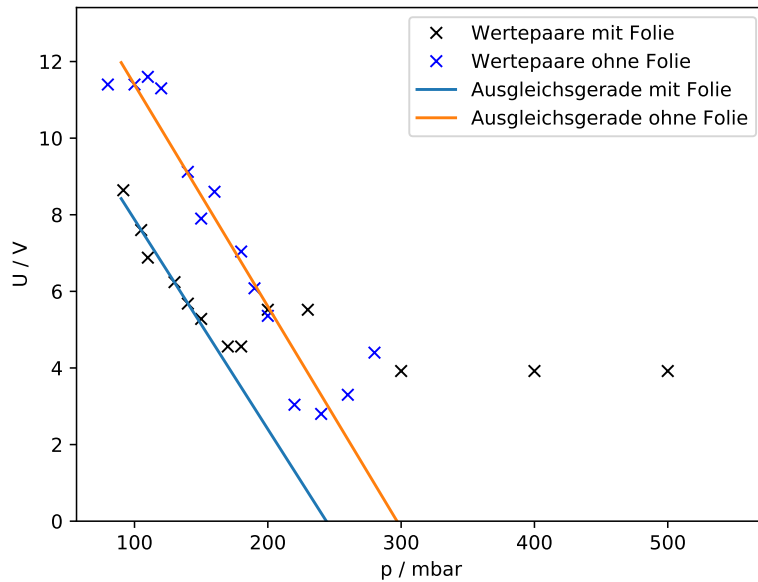


Abb. 4: Spannung U aufgetragen gegen Druck p , mit und ohne Folie.

Um nun mithilfe der Bethe-Bloch Formel (1) auf den Energieverlust schließen zu können, wird zunächst ein Umrechnungsfaktor κ von Spannung und Energie bestimmt. Die Energie der α -Teilchen ist aus der Theorie bekannt und gegeben mit $E_\alpha = 5,486 \text{ MeV}$. Damit folgt

$$\kappa = \frac{E_\alpha}{b_{\text{ohne}}} = (0,340 \pm 0,020) \frac{\text{MeV}}{\text{V}}, \quad (9)$$

wobei die Unsicherheit σ_κ aus der Gaußschen Fehlerfortpflanzung $\sigma_\kappa = \frac{E_\alpha}{b_{\text{ohne}}} \sigma_{b_{\text{ohne}}}$ folgt. Der Energieverlust beträgt somit

$$\Delta E = \kappa \cdot (b_{\text{ohne}} - b_{\text{mit}}) = (0,95 \pm 0,35) \text{ MeV} \quad (10)$$

deren Unsicherheit σ_E aus der Gaußschen Fehlerfortpflanzung

$$\sigma_E = \sqrt{(b_{\text{ohne}} - b_{\text{mit}})^2 \sigma_\kappa^2 + \kappa^2 (\sigma_{b_{\text{ohne}}}^2 + \sigma_{b_{\text{mit}}}^2)}.$$

folgt.

Zusammen mit Formel (1) und

$$v^2 = \frac{2\bar{E}}{m} = \frac{E_\alpha}{m} \left(1 + \frac{b_{\text{mit}}}{b_{\text{ohne}}} \right)$$

folgt für die Dicke d der Folie

$$d = (2,2 \pm 0,8) \mu\text{m}$$

4.3 Untersuchung des differentiellen Wirkungsquerschnittes einer dünnen Goldfolie

Im folgenden wird der differentielle Wirkungsquerschnitt einer $2 \mu\text{m}$ dünnen Goldfolie untersucht. Dieser lässt sich experimentell mit der Formel [4]

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{\text{exp}} = \frac{I}{A \cdot n \cdot d \cdot \Omega} \quad (11)$$

($n \hat{=}$ Teilchendichte, $d \hat{=}$ Dicke der Folie, $\Omega = \frac{\pi r^2}{R^2} \hat{=}$ Vom Detektor abgedeckter Raumwinkel)

bestimmen.

Dabei lässt sich die Teilchendichte n mithilfe der molaren Masse M und und Dichte ρ von Gold bestimmen:

$$n = \frac{\rho}{M} \cdot N_A \approx 5,9 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3} \quad (12)$$

($\rho = 19,3 \text{ g/cm}^3$ [5], $M = 196,97 \text{ g/mol}$ [5], $N \hat{=}$ Avogadro-Konstante)

Da der Weg der α -Teilchen durch eine Schlitzblende mit $r = 2 \text{ mm}$ führt und bis zur Goldfolie eine Strecke von $R = 4,1 \text{ cm}$ vorliegt, gilt für den Raumwinkel:

$$\Omega = \frac{\pi r^2}{R^2} = \pi \cdot \left(\frac{2}{41} \right)^2. \quad (13)$$

Mit der bereits bestimmten Zählrate $(15,64 \pm 0,48) \text{ kBq}$ pro Raumwinkelelement und einer Dicke von $2 \mu\text{m}$ ergeben sich die Werte in Tabelle 3, wobei sich die theoretischen Wert aus Gleichung (2) ergeben.

Die gemessenen und theoretischen Werte sind zusätzlich in Abbildung 5 gegenübergestellt.

Tab. 3: Die gemessenen Größen und die dazu ausgerechneten differentiellen Wirkungsquerschnitte

$\Theta / ^\circ$	N	t / s	$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{exp}} 10^{-22}\text{m}^2$	$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{theo}} 10^{-22}\text{m}^2$
-0,1	1047 ± 32	116,0	$(1,05 \pm 0,03)$	(1853518,43)
-0,2	1240 ± 35	140,0	$(1,03 \pm 0,00)$	(115845,08)
-0,3	1040 ± 32	106,0	$(1,14 \pm 0,00)$	(22883,04)
-0,4	1050 ± 32	122,0	$(0,99 \pm 0,03)$	(7240,36)
-0,5	1060 ± 33	110,0	$(1,12 \pm 0,00)$	(2965,66)
-0,6	1030 ± 32	111,0	$(1,08 \pm 0,00)$	(1430,21)
-0,7	1050 ± 32	119,0	$(1,02 \pm 0,00)$	(772,00)
-0,8	1090 ± 33	119,0	$(1,06 \pm 0,00)$	(452,53)
-0,9	1021 ± 32	125,0	$(0,95 \pm 0,03)$	(282,51)
-1,0	1226 ± 35	132,0	$(1,08 \pm 0,00)$	(185,36)
-1,2	1038 ± 32	133,0	$(0,90 \pm 0,03)$	(89,39)
-1,4	1035 ± 32	113,0	$(1,06 \pm 0,00)$	(48,25)
-1,6	1060 ± 33	131,0	$(0,94 \pm 0,03)$	(28,28)
-1,8	1000 ± 32	130,0	$(0,89 \pm 0,03)$	(17,65)
-2,0	1140 ± 34	93,0	$(1,42 \pm 0,04)$	(11,58)
-2,5	1028 ± 32	143,0	$(0,83 \pm 0,03)$	(4,75)
-3,0	1270 ± 40	206,0	$(0,71 \pm 0,02)$	(2,29)

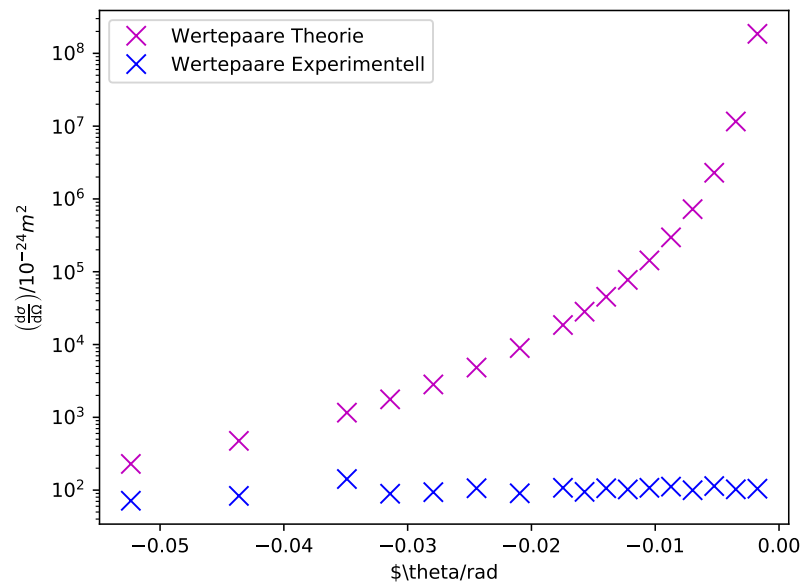


Abb. 5: Differentieller und theoretischer Wirkungsquerschnitt $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ gegen den Winkel θ aufgetragen. Die Unsicherheit ist dabei so gering, dass sie unter den Datenpunkten verschwindet.

4.4 Untersuchung des Einflusses der Mehrfachstreuung

Um zu untersuchen, ob bei dickeren Folien Mehrfachstreuung auftritt, wird die Intensität I für zwei verschieden dicke Goldfolien an einem festen Winkel $\theta = 1^\circ$ gemessen. Mit den in Tabelle 4 gemessenden Werten ergeben sich die folgenden Wirkungsquerschnitte

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{2\mu\text{m}} = (1,076 \pm 0,031) \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$$

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{4\mu\text{m}} = (5,0 \pm 1,0) \cdot 10^{-25} \text{ m}^2$$

Tab. 4: Dicke der Goldfolien in μm , Anzahl der gemessenen Ereignisse N und die gemessene Zeit t

Foliendicke / μm	Ereignisse	Zeit / s
2	1226	132
4	26	300

4.5 Z-Abhängigkeit des Wirkungsquerschnittes

Um die Z-Abhängigkeit der Intensität zu bestimmen, wird die Intensität einer Streuung an Gold, Platin und Bismut bei gleichem Winkel $\vartheta = 4,2^\circ$ bestimmt. Wie bereits in Kapitel 4.3 wird hier der differentielle Wirkungsquerschnitt $(\frac{d\sigma}{d\Omega})$ mithilfe von Gleichung 11 bestimmt. Die dazu benötigten Teilchendichten befinden sich in Tabelle 5. Die aus

Tab. 5: Sowohl Kernladungszahl Z , Dicke der Folie d , als auch die Teilchendichte n für Platin, Gold und Bismuth [5].

Element	Z	$d/\mu\text{m}$	$n/10^{28}\text{m}^{-3}$
Platin	78	3	6,6
Gold	79	2	5,9
Bismut	83	1	2,9

diesen Daten bestimmten differentiellen Wirkungsquerschnitte werden daraufhin mit den mithilfe von Gleichung (1) berechneten theoretischen differentiellen Wirkungsquerschnitte berechnet. Die Ergebnisse befinden sich in Tabelle 6 und sind nocheinmal grafisch in Abbildung 6 dargestellt.

Tab. 6: Die Anzahl der Counts N und die gemessene Zeit t bei festem Winkel θ , sowie die berechneten differentiellen Wirkungsquerschnitte.

<i>Material</i>	<i>Ereignisse</i>	<i>Zeit</i> / s	<i>Grad</i> / °	$(\frac{d\sigma}{d\Omega})_{\text{exp}}/10^{-23}\text{m}^2$	$(\frac{d\sigma}{d\Omega})_{\text{theo}}/10^{-23}\text{m}^2$
Platin	523	300	4,2	6,41	3,45
Bismut	551	300	4,2	1,06	5,96
Gold	3515	300	4,2	6,91	6,58

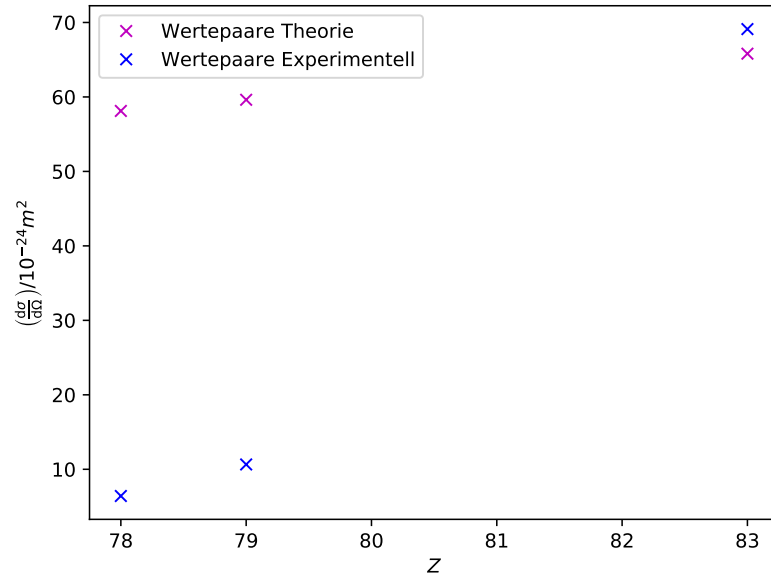


Abb. 6: Grafische Darstellung der differentiellen Wirkungsquerschnitte bei festem Winkel ϑ und verschiedenen Ordnungszahlen Z .

5 Diskussion

Die Ergebnisse dieses Versuchs weichen in einigen Stellen von den erwarteten Werten ab. Die Aktivität der Probe ergibt sich mit dem Zerfallsgesetz und dem angegebenen Wert zu

$$A_{\text{theo}} = (15,64 \pm 0,48) \text{ kBq};$$

die Messungen ergeben eine Aktivität von

$$A_{\text{exp}} = (501 \pm 15) \text{ kBq}.$$

Die relative Abweichung der beiden Werte beträgt 97 %. Im Falle der Messung der Foliendicke ergeben die ausgewerten Messwerte eine Dicke der Goldfolie von

$$d = (2,2 \pm 0,8) \mu\text{m}$$

Die Probe gibt an, dass die Folie $d_{\text{theo}} = 2 \mu\text{m}$ dick ist. Der gemessene Wert weicht um 10 % vom angegebenen Wert ab. Bei der Messung des Differenziellen Wirkungsquerschnitts zeigt sich eine starke systematische Abweichung. Als Erklärung für die fehlende Winkelabhängigkeit der Messdaten lässt sich eine möglicherweise fehlerhafte Position der Folie rekonstruieren. Es ist möglich, dass ein Teil des Trägers der Folie im Strahlengang war, statt der Folie. Dies ist jedoch während der Messung nicht explizit aufgefallen und diese Vermutung ist lediglich nachträglich aus Erinnerungen an die Versuchsdurchführung entstanden. Jedoch ist zu erwarten, dass der Differenzielle Wirkungsquerschnitt erst bei großen Ablenkungswinkeln ($> 1^\circ$) relevant wird, da die Teilchen einen längeren Weg innerhalb der Folie zurücklegen müssen. Im Versuchsteil zur Mehrfachstreuung lässt sich feststellen, dass eine Verdopplung der Foliendicke den Differenziellen Wirkungsquerschnitt um drei Größenordnungen reduziert. Der erwartete lineare Zusammenhang der Aktivität am Detektor und der Ordnungszahl des Folienmaterials kann bestätigt werden. Ein weiteres Problem im Rahmen dieses Versuchs ist, dass die Mindestzählrate von $N = 1000$ für eine maximale Unsicherheit von 3 % nicht konsequent eingehalten wurde. So sind auch deutlich größere Unsicherheiten in diesem Versuch aufgenommen worden.

Literatur

- [1] B. Povh et al. Teilchen und Kerne. Eine Einführung in die physikalischen Konzepte. Bd. 7. Heidelberg New York, 2006.
- [2] R. Nave. Rutherford-Streuformel. 2006. URL: <http://hydrogen.physik.uni-wuppertal.de/hyperphysics/hyperphysics/hbase/rutsca.html> (besucht am 01.12.2019).
- [3] Heidelberg Spektrum Akademischer Verlag. Rutherfordscher Streuversuch. 1998. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/rutherfordscher-streuversuch/12654> (besucht am 05.12.2019).
- [4] Prof. Dr. Kevin Kröniger. „Script zur Einführung in die Kern- und Elementarteilchenphysik, Kapitel 2.4.1“. In: (2018/2019).
- [5] Andy Hoppe. Elemente im Periodensystem der Elemente. URL: <http://www.periodensystem.info/elemente/> (besucht am 05.12.2019).
- [6] Particle Data Group. Passage of particles through matter. 2018. URL: <http://pdg.lbl.gov/2019/reviews/rpp2018-rev-passage-particles-matter.pdf> (besucht am 01.12.2019).