

V16

Rutherford-Streuung

Nicole Schulte
nicole.schulte@udo.edu

Hendrik Bökenkamp
hendrik.boekenkamp@udo.edu

Durchführung: 10.01.2018

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Ziel	3
2	Theorie	3
2.1	Alphastrahlung	3
2.1.1	Wechselwirkung mit Materie	3
2.2	Die Rutherford-Streuung	3
2.2.1	Konsequenzen des Streuversuches	4
2.3	²⁴¹ Americium als Alphastrahler	4
3	Durchführung	4
4	Bestimmung des Bremsvermögens von Alphateilchen in Luft	5
5	Auswertung	5
5.1	Vorverstärkte Pulse auf dem Oszilloskop	5
5.2	Bestimmung der Goldfoliendicke	7
5.3	Bestimmung des differentiellen Wirkungsquerschnitts	10
5.4	Untersuchung des Einflusses der Mehrfachstreuung	14
5.5	Ordnungszahl-Abhängigkeit des Wirkungsquerschnittes	14
6	Diskussion	15
	Literatur	15

1 Ziel

Ziel des Versuches ist die Untersuchung des Rutherford'schen Streuexperimentes, also die Streuung von Alpha-Teilchen an einer Goldfolie.

2 Theorie

2.1 Alphastrahlung

Der Begriff der Strahlung wird in Teilchen- und Wellenstrahlung unterteilt. Dabei wird die Alphastrahlung der Teilchenstrahlung zugeordnet, da der zerfallende Kern ein Helium-4-Atomkern absondert. Dieser Prozess ist durch den quantenmechanischen Tunneffekt zu erklären. Alphateilchen sind positiv geladen und verfügen über eine schwere Masse, die die Abschirmung vereinfacht. [1]

2.1.1 Wechselwirkung mit Materie

Durchläuft ein Alphateilchen eine Materieschicht so erfährt es durch Wechselwirkung mit den Hüllenelektronen der Atome einen Energieverlust. Dieser Energieverlust kommt durch Ionisation oder Anregung auf Grund von inelastischen Stößen zustande. Die Flugrichtung der Alphateilchen erfährt dadurch keine Änderung. Die Bethe-Bloch Gleichung (1) beschreibt dabei den Energieverlust pro Wegstrecke des Alphateilchens.

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

Die verwendeten Parameter sind die Teilchendichte n , die Kernladungszahl Z , die Geschwindigkeit v des Ions, die mittlere Ionisationsenergie I und die Ruhemasse eines Elektrons m_0 . Gleichung (1) ist eine genäherte Version der Bethe-Bloch-Gleichung und gilt für sehr kleine Teilchengeschwindigkeiten. Sie kann unter einigen Annahmen aufgestellt werden. Eine davon lautet, dass ein geladenes, schweres Teilchen an einem Elektron des Absorbermaterials in einem Abstand vorbei laufen muss. Das Elektron ist dabei frei und bewegt sich kaum während der Wechselwirkung mit dem Teilchen. Weiterhin gilt, dass die Masse des Teilchens sehr viel größer als die Masse eines Elektrons sein muss.

Eine weitere Wechselwirkung mit der Materie ist die durch Rutherford beschriebene Streuung, die Hauptbestandteil dieses Experiments sein soll.

2.2 Die Rutherford-Streuung

Das Rutherford'sche Streuexperiment beschreibt die Ablenkung eines Alphateilchens an Goldfolie. Diese Ablenkung kann zu einem durch einen elastischen Stoß mit dem Kern des Absorbermaterials als auch durch das Coulombpotential von diesem entstehen. Die Rutherford'sche Streuformel(2) beschreibt diese Streuung.

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

Der differentielle Wirkungsquerschnitt $\frac{d\sigma}{d\Omega}(\Theta)$ beschreibt den Winkel des gestreuten Teilchens pro Raumwinkelement. Neben den bei der Bethe-Bloch-Gleichung genannten Parametern

wird hier zwischen der Kernladung z des Alphateilchens und der Kernladung Z des Atoms unterschieden. Weitere Parameter sind die mittlere kinetische Energie E_α des Alphateilchens in MeV und der Winkel Θ zwischen einfallendem und gestreutem Alphateilchen.

2.2.1 Konsequenzen des Streuversuches

Die Entdeckung der Rutherford-Streuung hat große Auswirkung auf das damalige Verständnis des Atommodells. Das damalige Modell, das Thomsonsche Atommodell oder auch Rosinenkuchenmodell genannt, besagte, dass die Elektronen in einem positiv geladenen Atom eingebettet sind. Aus dem Rutherfordschen Streuexperiment lässt sich jedoch die Schlussfolgerung ziehen, dass ein Atom einen positiven Kern besitzt, auf dem sich fast die komplette Masse des Atoms konzentriert. Der Kernradius muss zudem klein im Vergleich zum Atomradius sein. Somit wurde auf Grund der Entdeckung von Rutherford ein neues Atommodell aufgestellt.

2.3 241-Americium als Alphastrahler

Der in diesem Versuch verwendete Alphastrahler ist 241-Americium. Er hat eine Halbwertszeit von 432 a und eine Kernladungszahl von 95. Das Tochternuklid ist 237-Neptunium. Es gibt fünf verschiedene Möglichkeiten, wie 241-Americium in sein Tochternuklid zerfallen kann [1].

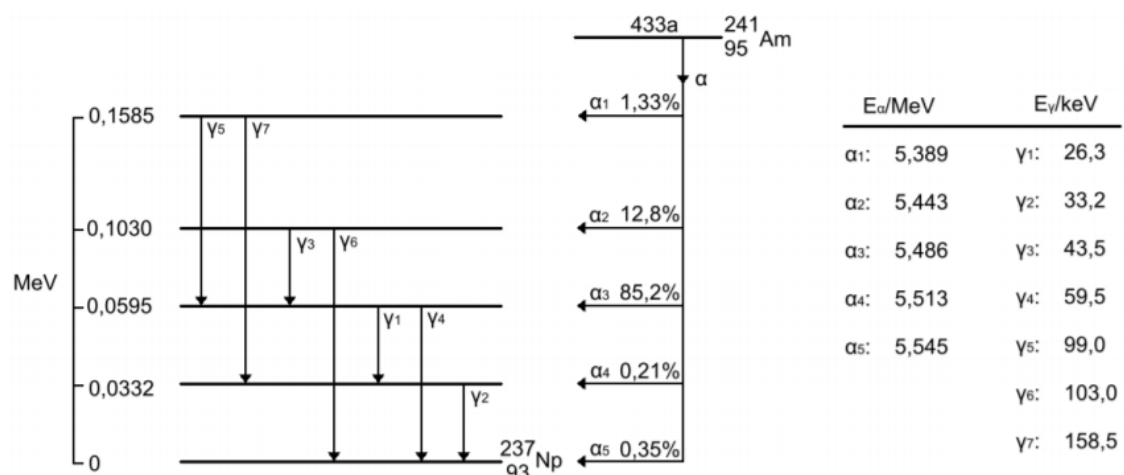


Abbildung 1: Zerfallsmöglichkeiten von 241-Am [1].

Es ist zu erkennen, dass α_3 der Wahrscheinlichste Zerfall ist. Der Zerfall von Neptunium ist in diesem Fall nicht mehr relevant, da dessen Halbwertszeit sehr groß im Vergleich zu Americium ist.

3 Durchführung

In diesem Versuch werden drei Messungen durchgeführt. Zu Beginn wird mit Hilfe eines Oszilloskops eine Energieverlustmessung beim senkrechten Durchgang durch die Folie durchgeführt. Dafür werden zwei Messungen benötigt. Dazu werden die Pulshöhen der Detektorimpulse, die vorher mit Hilfe eines Amplifiers verstärkt werden, als Funktion des Kammerdrucks einmal

mit und einmal ohne Streufolie gemessen. Zum Evakuieren der Streukammer wird eine Drehschieberpumpe verwendet. Dadurch kann die Reichweite der Alphateilchen und die Foliendicke bestimmt werden. Für eine genauere Messung wird am Oszilloskop das Nachleuten der Signale eingestellt.

Der zweite Teil des Versuches ist eine Streuwinkelmessung. Dazu wird bei evakuiertem Behälter der Winkel des Detektors von 0 bis 20° geändert und die Zählrate gemessen. Dadurch kann der differentielle Wirkungsquerschnitt berechnet werden.

Im letzten Teil des Experimentes werden Folien aus Bismut und Aluminium und eine weitere Goldfolie ausgemessen. Diese Messung finden bei einem festen Winkel statt. Bei einem großen Winkel werden die anderen beiden Materialien ausgemessen und die Zählrate aufgenommen. Bei der zweiten Goldfolie wird ein kleinerer Winkel gewählt und auch die Zählrate aufgenommen. Indem die beiden Goldfolien miteinander verglichen werden, kann der Einfluss der Mehrfachstreuung ermittelt werden. Der Vergleich mit den anderen Materialien liefert Informationen über die Ordnungszahlabhängigkeit der Rutherford Streuung.

4 Bestimmung des Bremsvermögens von Alphateilchen in Luft

Die Reichweite von Luft kann mit der Formel (1) bestimmt werden. Im Folgenden wird angenommen, dass die Luft aus 80% Stickstoff und 20% Sauerstoff besteht. Die Geschwindigkeit des α -Teilchens beträgt $v_\alpha = 1,625 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ (siehe Abschnitt 5.2). Die Teilchendichte lässt sich über den Zusammenhang

$$n = \rho/m$$

berechnen. Dabei ist die Luftdichte $\rho_{\text{Luft}} = 1,204 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ [2] und die gemittelte Masse $m = 14,4 \text{ u}$ [3]. Damit ist die Teilchendichte von Luft $n_{\text{Luft}} = 2,4 \cdot 10^{-26} \text{ m}^{-3}$. Die mittlere Ionisierungsenergie von Luft ist $\bar{I}_{\text{Luft}} = 14,32 \text{ eV}$ [3]. Die Kernladungszahl der α -Teilchen ist $z = 2$ und die effektive Kernladungszahl von Luft beträgt $Z_{\text{eff}} = 7,2$. Mit diesen Daten lässt sich das Bremsvermögen berechnen. Dieses beträgt

$$-\frac{dE}{dx} =$$

5 Auswertung

5.1 Vorverstärkte Pulse auf dem Oszilloskop

Die Pulse des Surface-Barrier Detektors werden vorverstärkt und einmal mit und einmal ohne Amplifier auf dem Oszilloskop dargestellt. In den Abbildungen 2 und 3 werden die Pulse gegen die Zeit aufgetragen.

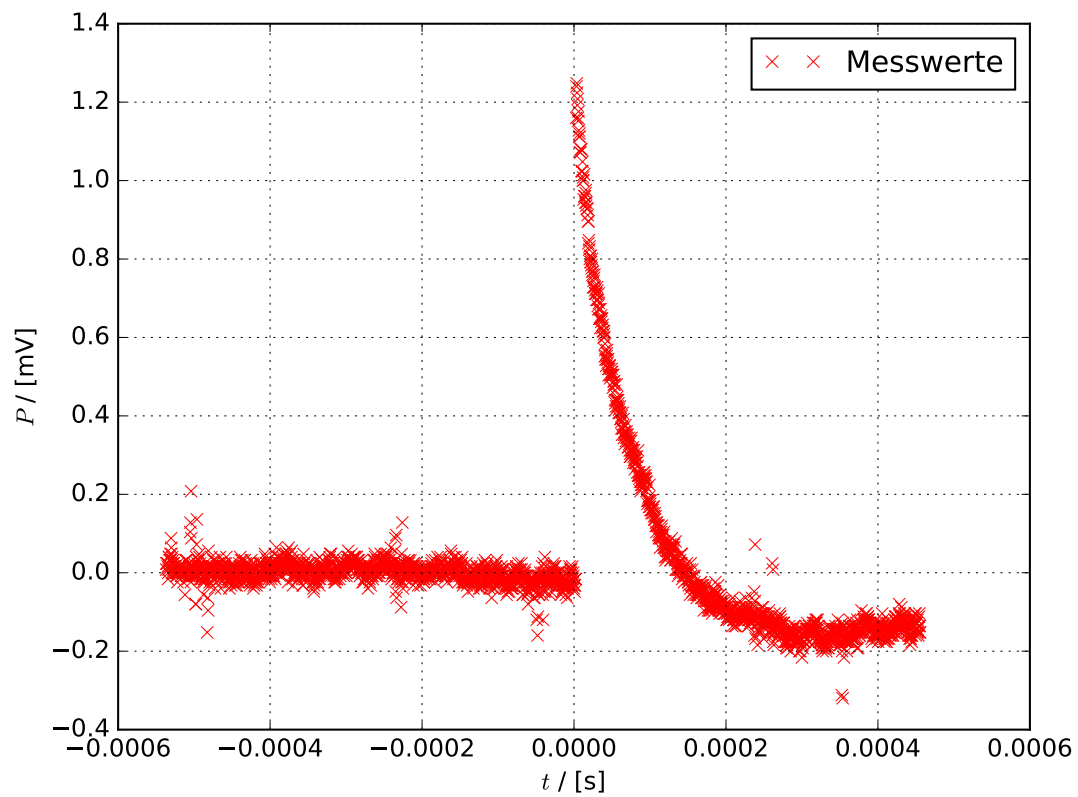


Abbildung 2: Pulse in Abhängigkeit von der Zeit ohne angeschlossenen Amplifier.

Ohne angeschlossenen Amplifier schwankt der Wert vor dem Puls um 0 V. Danach steigt der Puls mit einer Anstiegszeit von $0 \mu s$ auf ca. 1,25 mV. Mit einem "Überschwinger" pendelt sich der Wert wieder auf ca. 0 V ein.

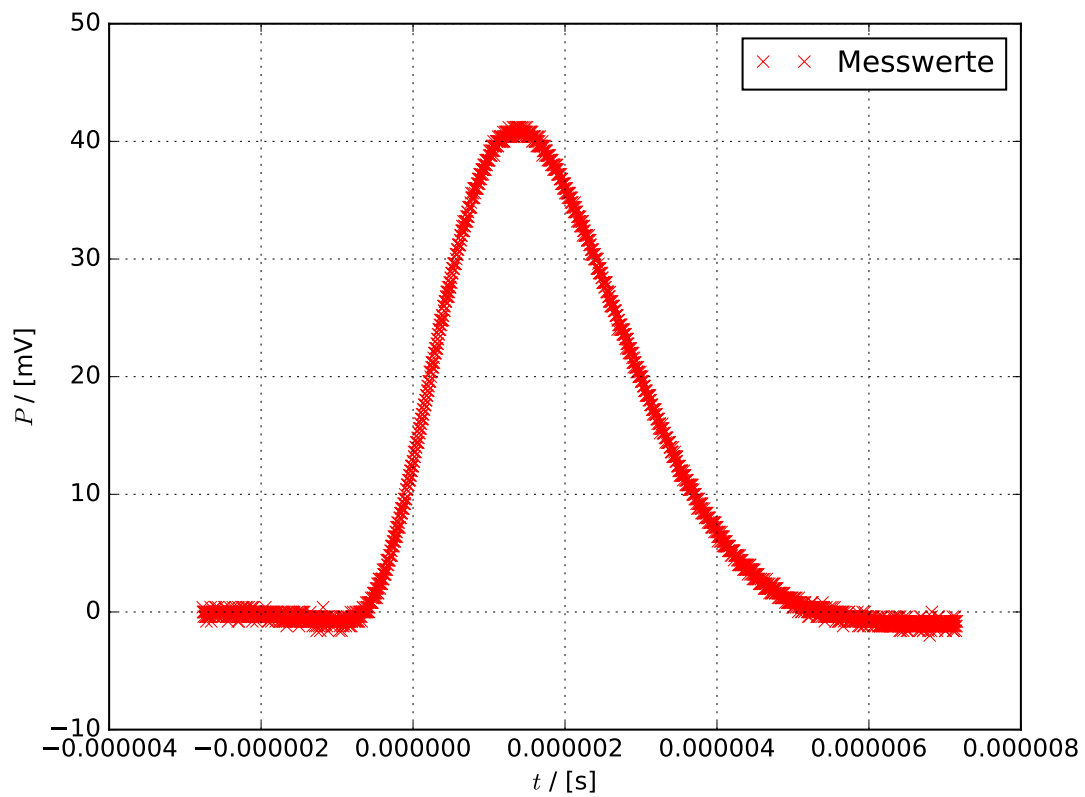


Abbildung 3: Pulse in Abhängigkeit von der Zeit mit angeschlossenem Amplifier.

Die Anstiegszeit mit angeschlossenem Amplifier beträgt ca. $8\mu\text{s}$. Der Puls steigt von 0 mV auf ca. 41 mV und fällt wieder auf seinen Ursprungswert ab.

5.2 Bestimmung der Goldfoliendicke

In Tabelle 1 sind die Messwerte für die Pulshöhen des Detektors in Abhängigkeit vom Kammerdruck zu entnehmen.

Mit Goldfolie		Ohne Goldfolie	
Pulshöhe [V]	Druck [mbar]	Pulshöhe [V]	Druck [mbar]
1.020	0.025	1.310	0.075
0.936	0.639	1.260	0.290
0.896	7.900	1.210	51.20
0.832	18.30	1.140	84.90
0.752	38.00	1.050	110.5
0.632	61.10	0.928	126.6
0.512	109.1	0.856	141.6
0.680	95.70	0.728	157.5
0.800	75.60	0.672	174.6
0.840	57.20	0.904	136.9
0.984	45.00	1.010	116.0
1.000	21.50	1.120	93.30
1.090	1.500	1.180	74.00

Tabelle 1: Puls in Abhängigkeit vom Kammerdruck.

In Abbildung 4 sind die Pulse in Abhängigkeit vom Kammerdruck aufgetragen. Außerdem wird eine Ausgleichsrechnung der Form $y = ax + b$ durchgeführt.

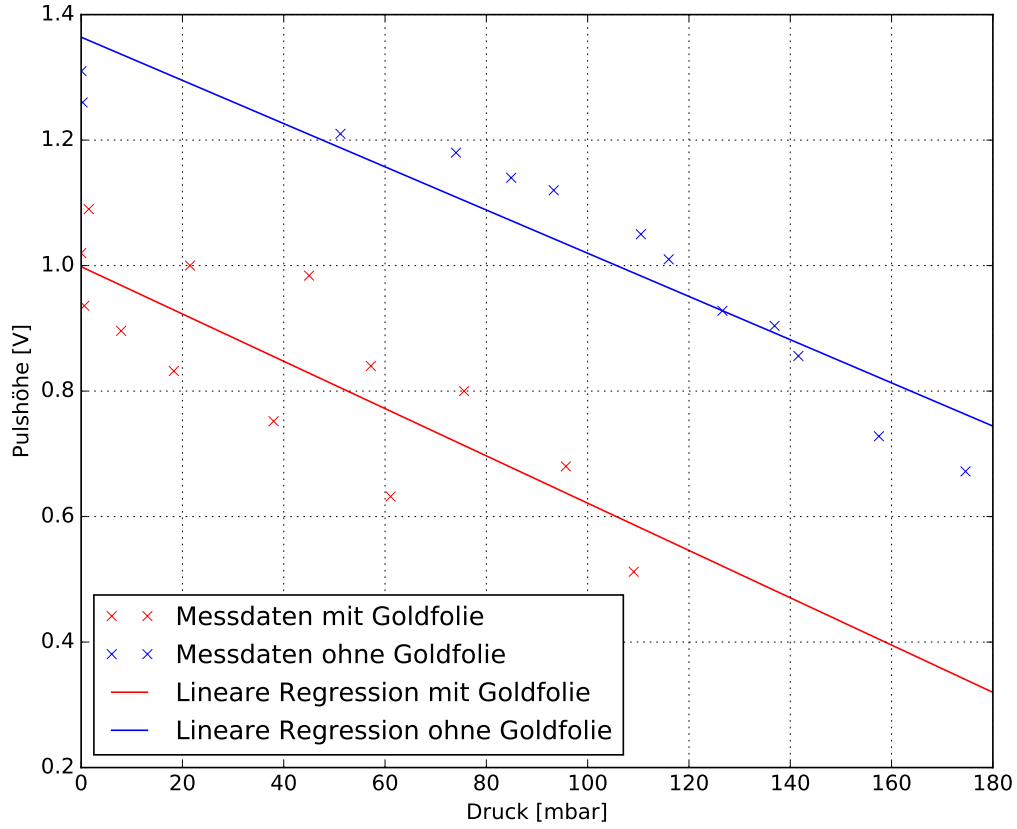


Abbildung 4: Pulse in Abhängigkeit vom Druck mit und ohne Goldfolie und lineare Regression beider Messreihen.

Für die Parameter folgt

$$\begin{aligned}
 a_1 &= (-0,0038 \pm 0,0008) \frac{\text{V}}{\text{mbar}}, \\
 b_1 &= (1,00 \pm 0,04) \text{ V}, \\
 a_2 &= (0,0034 \pm 0,0004) \frac{\text{V}}{\text{mbar}}, \\
 b_2 &= (1,36 \pm 0,04) \text{ V}.
 \end{aligned}$$

Der y -Achsenabschnitt b_2 der Messreihe ohne Goldfolie gibt an, wie hoch die Energie eines Alphateilchens im Vakuum ist. Der Abbildung 1 kann entnommen werden, dass die mittlere kinetische Energie des α -Teilchens $E_\alpha = 5,48 \text{ MeV}$ beträgt. Somit entspricht die Pulshöhe der mittleren kinetischen Energie des α -Teilchens:

$$b_2 = 1,36 \propto E_\alpha = 5,48 \text{ MeV}. \quad (3)$$

Mit diesem Wissen kann der Energieverlust berechnet werden. Der Pulsverlust ist gegeben durch

$$\Delta P = b_2 - b_1. \quad (4)$$

Der Fehler beträgt unter Berücksichtigung der Gaußschen Fehlerfortpflanzung

$$\Delta(\Delta P) = \sqrt{(\Delta b_2)^2 + (\Delta b_1)^2}. \quad (5)$$

Somit ist ergibt sich

$$\Delta P \pm \Delta(\Delta P) = (0,36 \pm 0,06) \text{ V}$$

Durch den proportionalen Zusammenhang (3) ergibt sich aus dem Pulsverlust der Energieverlust

$$\Delta E = \frac{E_\alpha}{b_2} \cdot \Delta P = (1,45 \pm 0,25) \text{ MeV}.$$

Um die Dicke der Goldfolie zu bestimmen, wird die Bethe-Bloch-Gleichung (1) nach dx umgestellt. Für die Foliendicke ergibt sich die Formel

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

Die Geschwindigkeit des α -Teilchens lässt sich mit

$$v = v_\alpha = \sqrt{\frac{2 \cdot E_\alpha}{m_\alpha}} = 1,625 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

berechnen, wobei $m_\alpha = 4 \text{ u}$ [4] die Masse des α -Teilchens ist. Die Ionisationsenergie von Gold beträgt $I_{\text{Au}} = 9,225 \text{ eV}$ [3]. Die Ladungszahl des α -Teilchens ist $z = 2$, wobei e die Elementarladung ist. Die Kernladungszahl von Gold ist $Z = 79$ [3]. Die Teilchendichte lässt sich mit

$$n = \frac{\rho_{\text{Au}}}{m_{\text{Au}}}$$

berechnen. Die Dichte von Gold beträgt $\rho_{\text{Au}} = 19,302 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ [3] und die Masse $m_{\text{Au}} = 196,967 \text{ u}$ [3]. Es ergibt sich eine Foliendicke von

$$\Delta x = (1,55 \pm 0,27) \cdot 10^{-6} \text{ m}.$$

5.3 Bestimmung des differentiellen Wirkungsquerschnitts

In Tabelle 3 sind die Messwerte zur Bestimmung des differentiellen Wirkungsquerschnittes zu entnehmen.

Winkel θ [°]	Counts c	Zeit t [s]	Winkel θ [°]	Counts c	Zeit t [s]
0,0	916	100	1,9	1145	110
0,1	885	100	2,0	1209	110
0,2	942	100	2,1	1197	110
0,3	1058	100	2,2	1127	110
0,4	959	100	2,3	1142	110
0,5	1067	100	2,4	1100	110
0,6	1185	110	2,5	1164	110
0,7	1071	110	2,6	1164	110
0,8	1139	110	2,7	1223	110
0,9	1160	110	2,8	1103	110
1,0	1093	110	2,9	1232	110
1,1	1230	110	3,0	1107	110
1,2	1164	110	4,0	1092	110
1,3	1133	110	6,0	872	120
1,4	1143	110	8,0	1140	300
1,5	1157	110	10,0	994	450
1,6	1215	110	15,0	851	1200
1,7	1183	110	20,0	543	900
1,8	1165	110			

Tabelle 2: Messwerte der Counts pro Zeit in Abhängigkeit vom Detektorwinkel.

Die Rate c/t der Counts pro Zeit werden durch Division der Counts durch die gemessene Zeit erhalten. Der Fehler der Rate ist gegeben durch

$$\Delta \frac{c}{t} = \sqrt{\frac{c}{t}}, \quad (7)$$

da der α -Zerfall der Poissonverteilung unterliegt. Der empirische differentielle Wirkungsquerschnitt kann durch

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta) = \frac{c/t}{A \cdot N \cdot \Delta x \cdot d\Omega^2} \quad (8)$$

berechnet werden. Dabei ist $A = (15,75 \pm 3,98)$ Bq die Aktivität der verwendeten Americium-Quelle, $N = 5,9 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$ die Anzahl der Streuzentren, $\Delta x = 2 \mu\text{m}$ die Foliendicke und Ω der Raumwinkel. Der Raumwinkel ist gegeben durch

$$\Omega = 4 \arctan\left(\frac{x}{2l}\right) \arctan\left(\frac{y}{2l}\right) = 9,8 \cdot 10^{-3}, \quad (9)$$

wobei $x = 2 \text{ mm}$ und $y = 10 \text{ mm}$ die Seitenlängen der bestrahlten Blende und $l = 4,5 \text{ cm}$ der Abstand der Goldfolie zum Detektor sind. Der Fehler nach Gauß des differentiellen Wirkungsquerschnittes ist gegeben durch

$$\Delta \frac{d\sigma}{d\Omega} = \sqrt{\left(\frac{\Delta(c/t)}{A \cdot N \cdot \Delta x \cdot d\Omega^2}\right)^2 + \left(-\frac{(c/t) \cdot \Delta A}{A^2 \cdot N \cdot \Delta x \cdot d\Omega^2}\right)}. \quad (10)$$

Der theoretische Wirkungsquerschnitt lässt sich mittels der Formel (2) berechnen. In Tabelle 3 sind die berechneten Wirkungsquerschnitte zu den Winkeln aufgelistet. Der zugehörige Plot ist in Abbildung 5 einzusehen. Die theoretischen Wirkungsquerschnitte bis einschließlich dem Winkel $\theta = 1, 2^\circ$ wurden übersichtshalber herausgenommen.

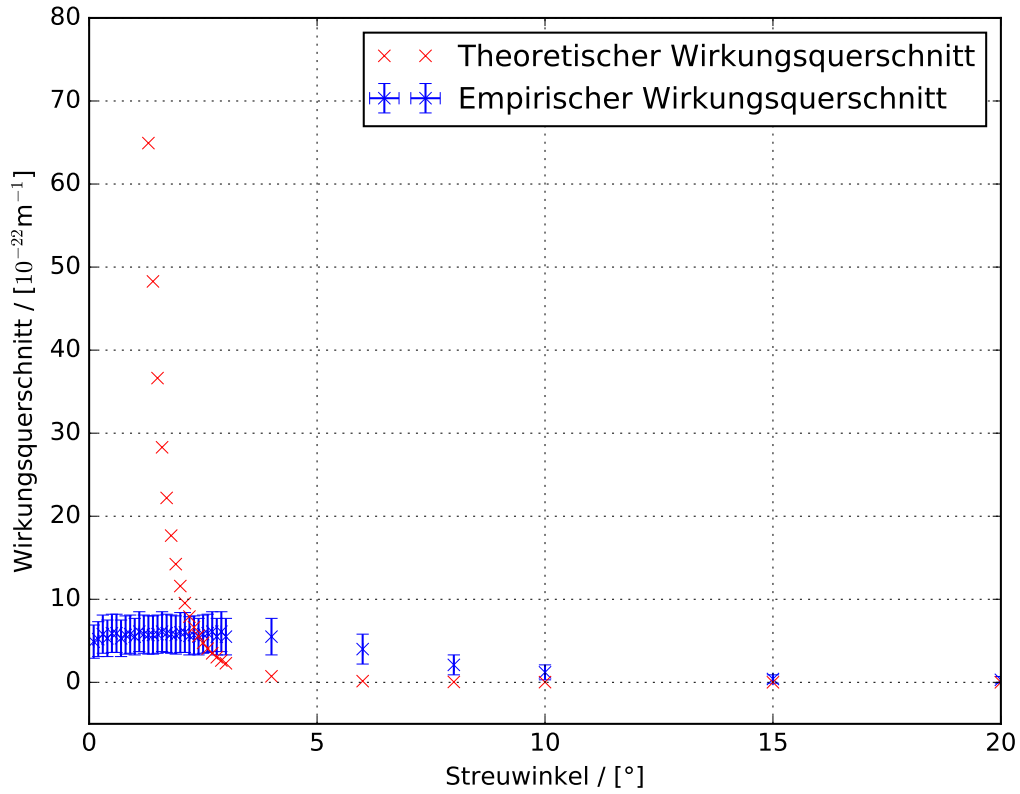


Abbildung 5: Theoretischer und empirischer Wirkungsquerschnitt in Abhängigkeit vom Winkel.

Winkel θ [°]	Wirkungsquerschnitt	
	theoretisch $\frac{d\sigma}{d\Omega}_{\text{theo}} [10^{-22} \frac{1}{\text{m}}]$	empirisch $\frac{d\sigma}{d\Omega}_{\text{emp}} [10^{-22} \frac{1}{\text{m}}]$
0.1	1854289,3	$(4,9 \pm 2,0)$
0.2	115893,26	$(5,2 \pm 2,1)$
0.3	22892,554	$(5,8 \pm 2,3)$
0.4	7243,3729	$(5,3 \pm 2,2)$
0.5	2966,8991	$(5,9 \pm 2,3)$
0.6	1430,8042	$(5,9 \pm 2,3)$
0.7	772,31759	$(5,3 \pm 2,2)$
0.8	452,72183	$(5,7 \pm 2,3)$
0.9	282,63445	$(5,8 \pm 2,3)$
1.0	185,43825	$(5,5 \pm 2,2)$
1.1	126,65817	$(6,1 \pm 2,4)$
1.2	89,430168	$(5,8 \pm 2,3)$
1.3	64,929362	$(5,7 \pm 2,3)$
1.4	48,273451	$(5,7 \pm 2,3)$
1.5	36,632103	$(5,8 \pm 2,3)$
1.6	28,297873	$(6,1 \pm 2,4)$
1.7	22,204720	$(5,9 \pm 2,3)$
1.8	17,666832	$(5,8 \pm 2,3)$
1.9	14,231231	$(5,7 \pm 2,3)$
2.0	11,591656	$(6,0 \pm 2,4)$
2.1	9,5366828	$(6,0 \pm 2,4)$
2.2	7,9175948	$(5,6 \pm 2,3)$
2.3	6,6280012	$(5,7 \pm 2,3)$
2.4	5,5906115	$(5,5 \pm 2,2)$
2.5	4,7484848	$(5,8 \pm 2,3)$
2.6	4,0591298	$(5,9 \pm 2,3)$
2.7	3,4904624	$(6,1 \pm 2,4)$
2.8	3,0179915	$(5,5 \pm 2,2)$
2.9	2,6228335	$(6,1 \pm 2,4)$
3.0	2,2902912	$(5,5 \pm 2,2)$
4.0	0,7249200	$(5,5 \pm 2,2)$
6.0	0,1433395	$(4,0 \pm 1,8)$
8.0	0,0454180	$(2,1 \pm 1,2)$
10.0	0,0186372	$(1,2 \pm 0,9)$
15.0	0,0037048	$(0,4 \pm 0,5)$
20.0	0,0011827	$(0,3 \pm 0,4)$

Tabelle 3: Theoretische und empirische Wirkungsquerschnitte in Abhängigkeit von den Winkeln.

5.4 Untersuchung des Einflusses der Mehrfachstreuung

In folgender Tabelle 4 sind die Messwerte der Zählrate zweier verschieden dicker Goldfolien einzusehen.

Dicke [μm]	Zählrate [$\frac{1}{\text{s}}$]
2	$(10,06 \pm 3,17)$
4	$(0,85 \pm 0,92)$

Tabelle 4: Zählrate zweier Goldfolien verschiedener Dicke.

5.5 Ordnungszahl-Abhängigkeit des Wirkungsquerschnittes

Analog zum Abschnitt 5.3 wird der Wirkungsquerschnitt verschiedener Materialien bei einem festen Winkel von $\theta = 3^\circ$ berechnet. In Tabelle 5 sind die relevanten Stoffeigenschaften der verschiedenen Teilchen und die berechneten Wirkungsquerschnitte aufgelistet.

Dicke	Ordnungszahl	Teilchendichte	Count rate	Theoretischer Wirkungsquerschnitt	Empirischer Wirkungsquerschnitt
Δx [μm]	Z	N [10^{28}m^{-3}]	R [s^{-1}]	$\frac{d\sigma}{d\Omega_{theo}}$ [10^{-22}m^{-1}]	$\frac{d\sigma}{d\Omega_{emp}}$ [10^{-22}m^{-1}]
2	79	5.9	10.06 ± 3.17	2.29	5.50 ± 2.20
3	13	6.2	0.94 ± 0.97	0.06	0.33 ± 0.35
1	83	2.9	0.52 ± 0.72	2.50	1.20 ± 1.60

Tabelle 5: Relevante Stoffeigenschaften [3] und Wirkungsquerschnitte.

In Abbildung 6 werden die theoretischen und empirischen Wirkungsquerschnitte aufgetragen.

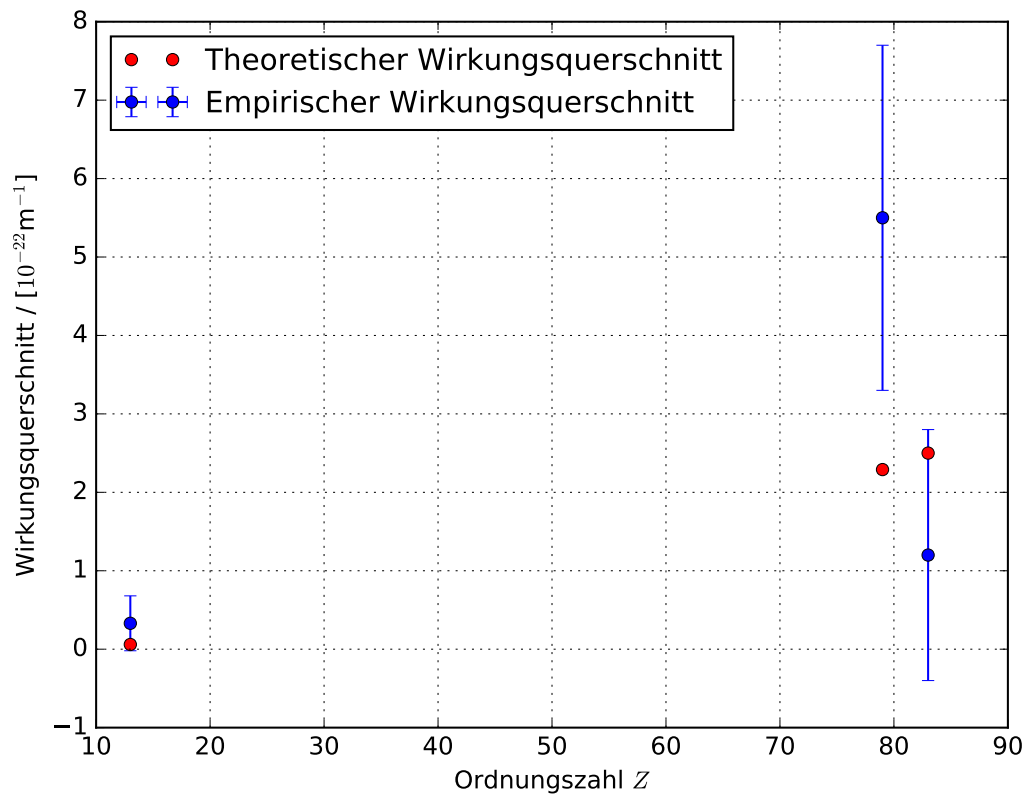


Abbildung 6: Theoretische und empirische Wirkungsquerschnitte von Gold, Aluminium und Bismut in Abhängigkeit derer Ordnungszahl.

6 Diskussion

Literatur

- (1) K. Burchard, T. Götzke, O. Nagel, T. Papke, J. Petereid und M. Quade, *Kernpraktikum 2010, Energie und Reichweite von Strahlung*, http://www.uni-potsdam.de/u/phys_gprakt/html/projekte/kernstrahlung/kernstrahlung_20.pdf (besucht am 2018-01-10).
- (2) <http://www.chemie.de/lexikon/Luftdichte.html> (besucht am 2018-01-28).
- (3) A. Hoppe, *Das interaktive Periodensystem der Elemente*, http://www.periodensystem.info/elemente/gold/?cc_yes=1&cc_time=1516306769 (besucht am 2018-01-18).
- (4) <http://www.chemie.de/lexikon/Alphastrahlung.html> (besucht am 2018-01-18).
- (5) T. Dortmund, *Versuch V16: Rutherford Streuexperiment*, <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/FP/SKRIPT/Rutherford.pdf> (besucht am 2017-12-29).
- (6) C. Thiel, *Wechselwirkung von Strahlung mit Materie*, <http://www.physik.uni-mainz.de/F-Praktikum/SS2010/ChristopherThiel.pdf> (besucht am 2018-01-10).