

# IIA4

Modul Atom-/Kernphysik

## Rutherford-Streuung

In diesem Versuch geht es darum, das Streuexperiment von Rutherford nachzuvollziehen. Es soll also die Ladungsverteilung in einem Atom mit Hilfe der Streuung von  $\alpha$ -Teilchen untersucht werden. Dieser Versuch hat massgeblich zum Verständnis vom Aufbau der Materie beigetragen.



## Versuch IIA4 - Rutherford-Streuung

In diesem Versuch geht es darum, das Streuexperiment von Rutherford nachzuvollziehen. Es soll also die Ladungsverteilung in einem Atom mit Hilfe der Streuung von  $\alpha$ -Teilchen untersucht werden. Dieser Versuch hat massgeblich zum Verständnis vom Aufbau der Materie beigetragen.

## 1.1 Fragen zur Vorbereitung

- Beschreibe das Streuexperiment von Rutherford in eigenen Worten.
- In diesem Experiment wird ein sogenannter Diskriminator verwendet. Was ist das und wofür wird er benötigt?
- Warum wird der Versuch in einer Vakuum-Kammer durchgeführt und nicht einfach in Luft?
- Wie funktioniert ein Oszilloskop? Welches sind seine allgemeinen Einstellungsmöglichkeiten?

## 1.2 Theorie

### 1.2.1 Entwicklung des Atommodells

Das erste Atommodell geht auf den griechischen Philosophen *Leukipp* (um 440 v.Ch.) und seinen Schüler *Demokrit* (460-370 v. Ch.) zurück. Sie glaubten, dass alle Materie aus kleinen, unteilbaren Teilchen besteht. Diese Teilchen nannte sie Atome nach dem griechischen Wort für unteilbar. Zwischen diesen Atomen befindet sich - nach ihrer Vorstellung - nur leerer Raum. Alle makroskopischen Körper und ihre Eigenschaften würden also durch die Anordnung gleichartiger oder unterschiedlicher Atome bestimmt.

Durch das ganze Mittelalter und bis zum Anfang der Neuzeit wurde diese Idee jedoch wieder verworfen, da sie der Kirche zu materialistisch war und ausserdem der Schöpfungslehre widersprach.

Ab etwa dem 17. Jahrhunderts gewann das Atommodell wieder an Bedeutung. Verschiedene Chemiker erkannten durch genaues Abwägen von Reaktanden und Reaktionsprodukten, dass sich ganzzahlige Verhältnisse in ihren Massen ergaben. Diese Massenverhältnisse konnten man durch Moleküle aus einzelnen Atomen beschreiben.

Weitere Indizien kamen aus der Entwicklung der kinetischen Gastheorie durch *Rudolf Julius Clausius* (1822-1888), *James Clerk Maxwell* (1831-1879) und *Ludwig Boltzmann* (1844-1906). Sie konnten makroskopische Eigenschaften von Gasen wie Druck, Temperatur und spezifische Wärme auf Bewegung und Stösse von Gasatomen zurückführen.

Ende des 19. Jahrhunderts konnte sich die Vorstellung, dass die Materie aus Atomen aufgebaut sei, endgültig durchsetzen. Verschiedene Experimente zeichneten ein immer genaueres Bild dieser Atome. Untersuchungen zur Leitfähigkeit verschiedener Flüssigkeiten, Experimente mit Gasentladungen und die Entdeckung der Radioaktivität zeigten, dass in Atomen positive und negative Ladungsträger vorhanden sein müssen. Das Atom war also nicht mehr "unteilbar" sondern bestand aus geladenen Komponenten. Massenspektrometrische Untersuchungen ergaben, dass die positiv geladene Anteile des Atoms eine sehr viel grössere Masse als die negativ geladenen Anteile besitzen. Auch über den Atomradius hatten thermodynamische Experimente Aufschluss gegeben.

Über einen Punkt jedoch herrschte nach wie vor Unklarheit: Wie waren die positiven und negativen Ladungen im Atom verteilt? Das favorisierte Modell war zu dieser Zeit das sogenannte *Rosinenkuchen-Modell*. Es wird nach seinem Erfinder *Joseph John Thomson* (1856-1940) auch *Thomson'sches Atommodell* genannt. Es besagt, dass die positiven und negative Ladungen gleichmässig im Atom verteilt sind. Nach aussen scheint das Atom also elektrisch neutral.

## 1.2.2 Streuexperimente

Die Frage nach der Ladungsverteilung im Atom konnte schlussendlich 1911 durch *Ernest Rutherford* (1871-1937) und seine Mitarbeiter geklärt werden. Sie nutzten die damals neuartige Technik der Streuexperimente. Dazu lässt man einen Strahl einer Teilchensorte A mit einem Volumen einer anderen Teilchensorte B wechselwirken. Danach untersucht man in welchen Raumwinkel  $d\Omega$  wie viele Teilchen der Sorte A gestreut werden. Aus solchen Experimenten kann man Rückschlüsse auf das Wechselwirkungspotential  $V(r)$  zwischen den Teilchen A und B ziehen.

Der Wichtigste Begriff bei Streuexperimenten ist der sogenannte *Wirkungsquerschnitt*. Man unterscheidet zwischen dem *totalen*  $\sigma_{tot}$  und dem *differentiellen Wirkungsquerschnitt*  $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ . Der totale Wirkungsquerschnitt ist wie folgt definiert:

$$\sigma_{tot} = \frac{\text{Zahl der Wechselwirkungen pro Zeiteinheit}}{\text{Zahl der einfallenden Teilchen pro Zeiteinheit} \times \text{Zahl der Streuzentren pro Flächeneinheit}}$$

Der Wirkungsquerschnitt hat die Einheit einer Fläche, hat aber **weder** die physikalische Dimension des Targets, **noch** die Oberfläche der jeweiligen Streuzentren. Stattdessen handelt es sich um ein Mass für die Wahrscheinlichkeit der Wechselwirkung zwischen dem einfallenden Teilchen und dem Target. Der Wirkungsquerschnitt in Verbindung mit den gestreuten Teilchen innerhalb des Raumwinkels  $d\Omega$  ist der sogenannte *differentielle Wirkungsquerschnitt*  $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ . Etwas formaler kann man den totalen Wirkungsquerschnitt  $\sigma_{tot}$  folgendermassen angeben:

$$\sigma_{tot} = \frac{N_{tot}}{F_{inc} \cdot A \cdot n \cdot t} \quad (1.1)$$

Dabei ist  $N_{tot}$  die Anzahl gestreuter Teilchen pro Sekunde,  $F_{inc}$  der Fluss der einfallenden Teilchen in  $[\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}]$ ,  $A$  die Fläche des Targets beziehungsweise die Fläche, welche durch den einfallenden Strahl abgedeckt wird in  $[\text{m}^2]$ ,  $n$  ist die Atomkonzentration des Targets in  $[\text{m}^{-3}]$  und  $t$  die Dicke des Targets. Der Wirkungsquerschnitt hängt allgemein von der Energie  $E$  der einfallenden Teilchen ab.

Der totale Wirkungsquerschnitt hat die Einheit einer Fläche. Sie wird oft in *Barn* (vom englischen Wort Scheune) angegeben. Es gilt:

$$1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ m}^2 \quad (1.2)$$

Der differentielle Wirkungsquerschnitt gibt an, wie viele Teilchen  $N_S$  in einem bestimmten Raumwinkel  $d\Omega$  gestreut werden im Verhältnis zu allen einfallenden Teilchen:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(E, \Omega) = \frac{1}{F_{inc}} \cdot \frac{dN_S}{d\Omega} \quad (1.3)$$

Wie viele Teilchen  $N_S$  in den Raumwinkel  $d\Omega$  gestreut werden wird folgendermassen beschrieben:

$$N_S(E, \Omega) = F_{inc} \cdot A \cdot n \cdot t \cdot \frac{d\sigma}{d\Omega}(E, \Omega) \quad (1.4)$$

Der Zusammenhang zwischen dem totalen und dem differentiellen Wirkungsquerschnitt ist gegeben durch:

$$\sigma_{tot} = \int \left( \frac{d\sigma}{d\Omega} \right) d\Omega = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi} \frac{d\sigma}{d\Omega} \sin \theta d\theta \quad (1.5)$$

Die zweite Gleichung erhält man durch einsetzen der Definition des differentiiellen Raumwinkels in sphärische Koordinaten, also  $d\Omega = \sin \theta d\theta d\phi$ .

### 1.2.3 Das Rutherford Experiment

Rutherford untersuchte die Ladungsverteilung im Atom mit einem Streuexperiment wie oben beschrieben. In diesem Experiment beschoss er in einer evakuierten Kammer eine sehr dünne Goldfolie mit einem Strahl aus  $\alpha$ -Teilchen, also Heliumkernen ( ${}^4_2\text{He}^{2+}$ ). Mit einem fluoreszierenden Schirm untersuchte er dann die Zählrate in unterschiedlichen Winkeln zum einfallenden Strahl. Der Einfluss der Elektronen auf die Streuung kann auf Grund ihrer kleinen Massen vernachlässigt werden. Die Ablenkung der einfallenden  $\alpha$ -Teilchen kommt also im Wesentlichen durch die Streuung an den Protonen zustande. Auf Grund des Thomson'schen Atommodell erwartete Rutherford, dass die einfallenden Teilchen nur sehr kleine Streuwinkel aufweisen würden. Eine Rückstreuung schloss dieses Modell gänzlich aus. Seine Resultate zeigten, dass die Meisten einfallenden  $\alpha$ -Teilchen die Folie einfach durchdrangen. Einige jedoch wiesen grosse Streuwinkel bis zur Rückstreuung auf. Ein solches Resultat war mit dem *Rosinenkuchen-Modell* nicht kompatibel. Die schlüssigste Erklärung war, dass die positiven Ladungen sich in einem kleinen Kern zusammenballen, den die Elektronen wie eine Wolke umgeben. Die Frage warum der Kern aus positiv geladenen Protonen nicht durch die Coulomb-Abstossung zerrissen wird, konnte erst gut 20 Jahre später durch die Entdeckung des Neutrons durch *James Chadwick* (1891-1974) beantwortet werden.

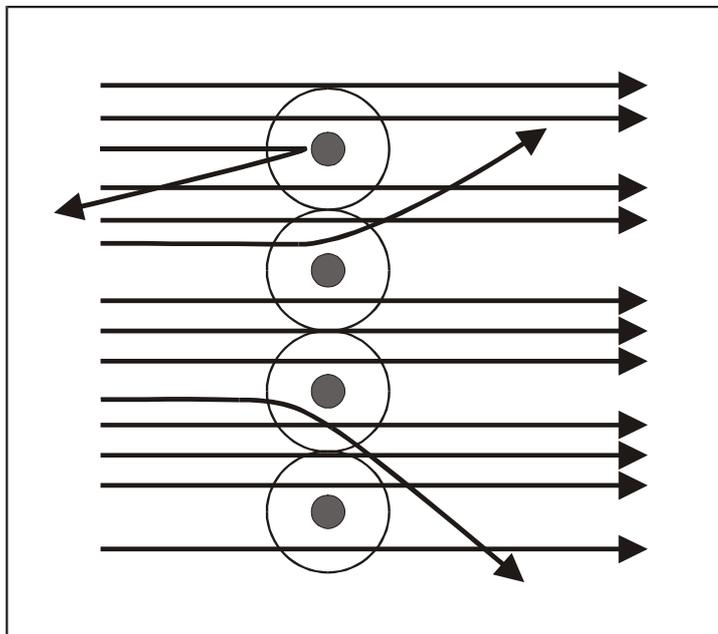


Abbildung 1.1: Streuung von  $\alpha$ -Teilchen an einer einzelnen Schicht Goldatome

Der differentielle Wirkungsquerschnitt für die Streuung von geladenen Teilchen wird somit *Rutherford-Wirkungsquerschnitt* genannt.

$$\left. \frac{d\sigma}{d\Omega} \right|_{\text{Rutherford}} = \left( \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \cdot \left( \frac{1}{4E_{kin}} \right)^2 \cdot \frac{1}{\sin^4\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (1.6)$$

Hier bezeichnet  $Q$  in [C] die Ladung vom Target,  $q$  in [C] die Ladung vom einfallenden Teilchen und  $E_{kin}$  in [J] seine Energie.  $\theta$  gibt den Winkel zwischen einfallendem Strahl und gestreutem Teilchen an. Die Permittivität des Vakuums ist  $\epsilon = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$ . Die Gleichung 1.6 erhält man für eine radialsymmetrische Konfiguration (siehe Abbildung 1.2), wobei der Raumwinkel  $d\Omega$  zur Fläche  $[\theta, \theta + d\theta]$  gehört. Damit ist die Streuung unabhängig von

$\phi$ . Für  $\alpha$ -Teilchen, die an einem Material mit der Ladungszahl  $Z$  streuen, ergibt sich unter Verwendung der Gleichungen (1.4) und (1.6) folgender Zusammenhang:

$$N_S(\theta) = N_{\text{inc}} \cdot n \cdot t \cdot \frac{Z^2 \cdot e^4}{(8\pi\epsilon_0 E_\alpha)^2} \cdot \frac{1}{\sin^4\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (1.7)$$

Wobei  $N_{\text{inc}} = F_{\text{inc}} A$  die Rate der einfallenden  $\alpha$ -Teilchen in  $[\text{s}^{-1}]$ ,  $E_\alpha$  ihre kinetische Energie und  $e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  die Elementarladung beschreibt.

$N_S(\theta)$  beschreibt die Anzahl Teilchen pro Sekunde die in einen Raumwinkel  $d\Omega$  gestreut werden. Wegen der Radialsymmetrie des Experiments entspricht dieser Raumwinkel  $d\Omega$  einem von  $\theta + d\theta$  aufgespannten Gebiet auf einer Kugel. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 1.2 dargestellt.

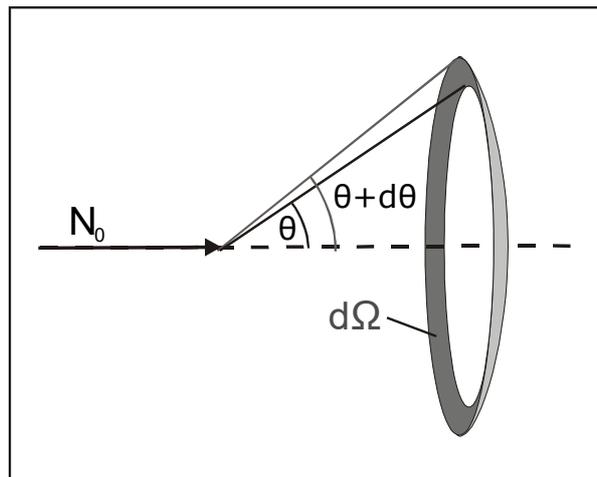


Abbildung 1.2: Raumwinkel  $d\Omega$  in Abhängigkeit von  $\theta + d\theta$

### 1.3 Experiment

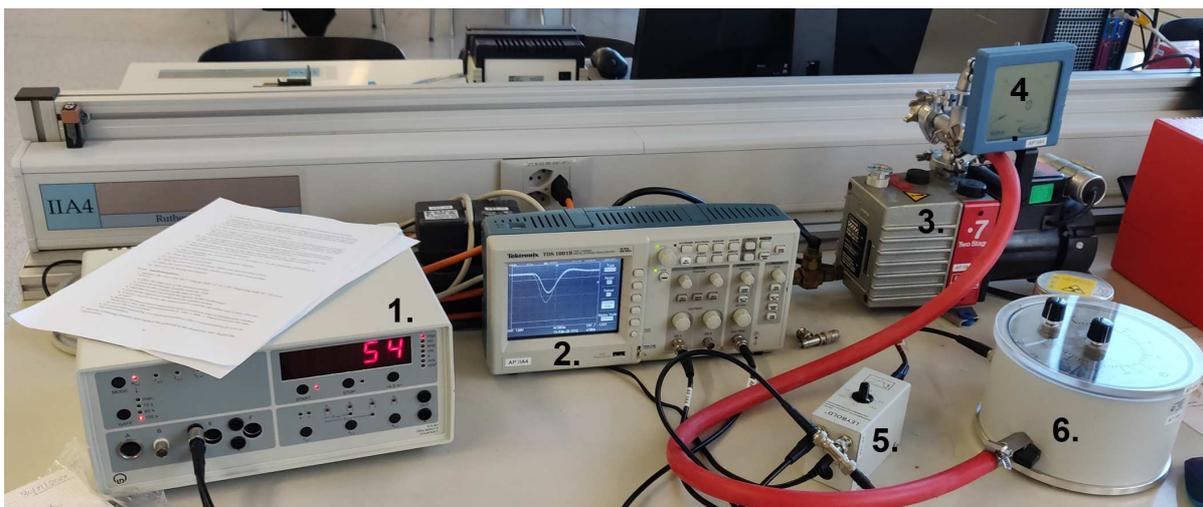


Abbildung 1.3: Versuchsaufbau für das Streuexperiment nach Rutherford: (1) Zähler, (2) Oszilloskop, (3) Vakuumpumpe, (4) Druck Sensor, (5) Diskriminator und (6) Streukammer.

In Abbildung 1.3 ist der Versuchsaufbau abgebildet. Es wird in diesem Experiment eine  $^{241}\text{Am}$  Quelle als Alphastrahler verwendet. Die Halbwertszeit von  $^{241}\text{Am}$  beträgt rund 432 Jahre und die mittlere Energie eines Alphateilchens ist 5.48 MeV. Die Quelle wird in der Streukammer vor dem Gold- bzw. Aluminium-Target platziert. Hinter dem Target wird ein Zählrohr verwendet (siehe Abbildung 1.4). Der Diskriminator und das Oszilloskop werden benutzt, um falsche Ereignisse herauszufiltern, so dass nur die  $\alpha$ -Teilchen gezählt werden, wie in Abbildung ?? zu sehen ist.

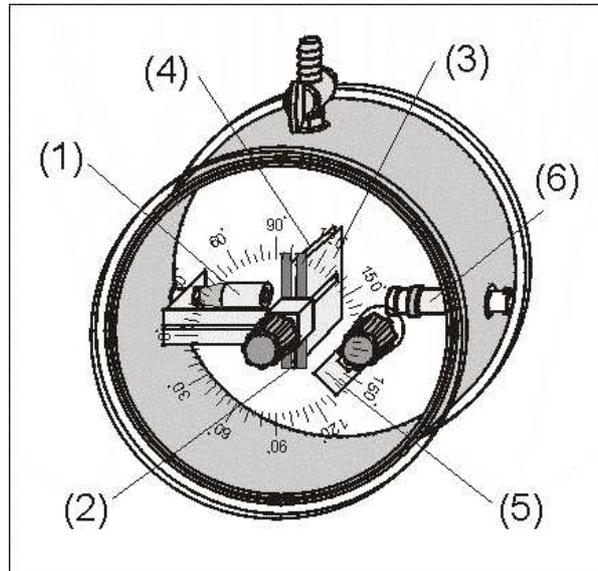


Abbildung 1.4: Streukammer nach Rutherford: (1) Probenhalter, (2) Halterung für Folie, (3) Folie, (4) Blende, (5) kleiner Gelenkar, (6) Detektor.

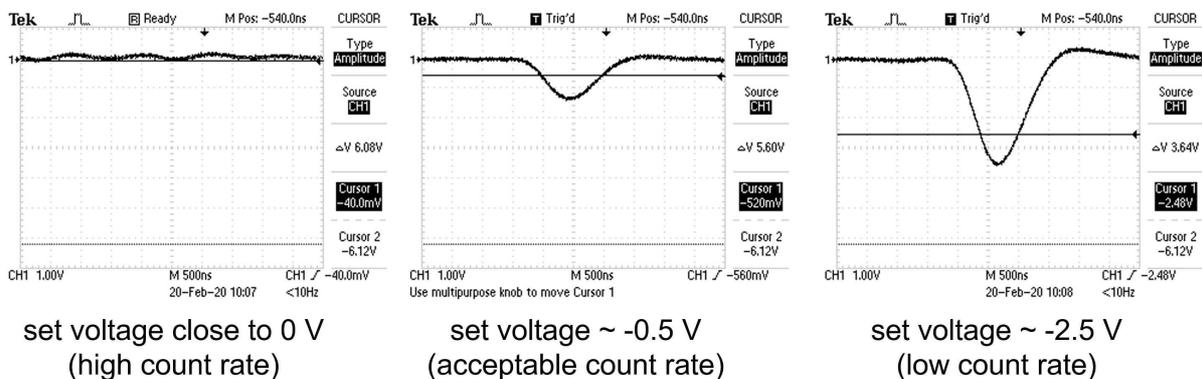


Abbildung 1.5: Beispielsignale auf dem Oszilloskop bei unterschiedlich eingestellter Schwelle (Threshold). Diese wird mit den CURSOR/TRIGGER-Funktionen eingestellt.

Es wird erwartet, dass bei variieren des Winkels  $\theta$  zwischen der Quelle bzw. dem Target und dem Zählrohr die Anzahl gestreuter Teilchen sich gemäss Gleichung 1.6 verhält. Es werden zwei Targets benutzt, eines aus Gold und eines aus Aluminium. Hauptaufgabe wird es sein, die Dicke der Goldfolie zu bestimmen.

### 1.3.1 Versuchszubehör

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über das in diesem Versuch benötigte Material:

Komponente	Anzahl
Streukammer nach Rutherford	1
Vakuum-Pumpe	1
Goldfolie mit Blende	1
Aluminiumfolie mit Blende	1
Am-241 Quelle	1
Diskriminator-Vorverstärker	1
Zähler	1
Oszilloskop	1
BNC-zu-Klinke Kabel	1
BNC Kabel kurz	1
BNC Kabel lang	2
BNC T-Stück	1
Tuch	1

### 1.3.2 Versuchsaufbau und Justage

Um bestmögliche Ergebnisse zu erreichen, gehst du vor dem Experiment die nachfolgenden Schritte durch:

1. Öffne die Streukammer und platziere die  $^{241}\text{Am}$  Quelle im Probenhalter, wie in Abbildung 1.4, (1), dargestellt. Der Schlitz hat eine Kerbe, die für die Ausrichtung verwendet werden soll: Die spaltförmigen Öffnung muss zur Quelle zeigen
2. Der Detektor hat ebenfalls einen Spaltblende, welche zur Folie hin ausgerichtet sein sollte
3. Schliesse die Kammer und drehe den kleinen Gelenkarm (Abbildung 1.4, (5)) so zur Wand, dass er während dem Experiment nicht im Weg ist
4. Öffne das Ventil an der Kammer und schliesse das Belüftungsventil an der Vakuumpumpe
5. Starte die Pumpe und warte bis der Druck in der Kammer auf 5 mbar oder weniger abgesunken ist. Lass die Pumpe danach während dem gesamten Experiment weiter laufen
6. Verbinde den Detektor mittels einem kurzen BNC-Kabel mit dem Diskriminator-Vorverstärker. Weiter muss der Signalausgang des Diskriminator-Vorverstärkers mit dem Oszilloskop verbunden werden
7. Drehe den grossen Gelenkarm mit der Quelle und der Goldfolie auf  $\theta = 0^\circ$ , d.h. alles liegt auf einer Linie. Betrachte die Signale der  $\alpha$ -Teilchen auf dem Zähler. Was beobachtest du? Bei sinkender Spannung sinkt auch die Zählrate. Warum?
8. Unter Benutzung der CURSOR- und TRIGGER-Funktionen des Oszilloskops kann die Schwelle eingestellt werden (siehe Abbildung 1.5. Nur Signale, die grösser sind als die im Diskriminator eingestellte Schwelle, werden auch gezählt. Stelle den Diskriminator so ein, dass die Anzahl der gezählten  $\alpha$ -Teilchen mit den Signalen auf dem Oszilloskop konsistent ist

Die Messungen können jetzt gemäss der in 1.3.4 beschriebenen Prozedur durchgeführt werden.

### 1.3.3 Belüften der Anlage nach dem Experiment

Nachdem das Experiment beendet ist, müssen die folgenden Schritte durchgeführt werden, um die Kammer korrekt zu belüften:

1. Schliesse das Ausgangsventil der Streukammer nach Rutherford
2. Stell die Vakuum-Pumpe ab
3. Öffne das Entlüftungsventil der Pumpe. Dabei solltest du eine Zischen hören
4. Öffne das Ventil der Streukammer langsam, bis wiederum ein Zischen zu hören ist
5. Warte, bis das Zischen nicht mehr zu hören ist.

*Wichtig:* Die Belüftung hat langsam zu erfolgen!

### 1.3.4 Durchführung

Miss die Zählrate in Schritten von  $\pm 5^\circ$  für den Bereich von  $\pm 30^\circ$  mit einem GATE von 100 Sekunden im Zähler. Gehe dabei wie folgt vor:

1. Stelle den grossen Gelenkarm auf die gewünschte Position
2. Bedecke die Streukammer mit dem Tuch
3. Setze den Zähler auf null. Beobachte die Signale auf dem Oszilloskop. Überprüfe, ob du falsche Signale entdeckst. Falls falsche Signale auftreten sollten, muss die Messung abgebrochen und wiederholt werden
4. Wiederhole die 100 Sekunden Messung so oft für die Goldfolie, bis die gesamte Anzahl Ereignisse mindestens 100 ist für  $\theta = \pm 5^\circ$  bis  $20^\circ$ . Für  $\theta = \pm 25^\circ$  sollte die Anzahl Ereignisse insgesamt 50 betragen, und für  $\theta = \pm 30^\circ$  solltest du 10 Ereignisse haben
5. Nachdem die Experimente mit dem Gold Target beendet sind, muss die Streukammer belüftet werden. Gehe dazu vor wie in 1.3.3 beschrieben
6. Entferne die Goldfolie und baue stattdessen die Aluminiumfolie ein. Wegen der kleineren Streuausbeute erwartet man weniger Ereignisse bei den Messungen mit der Aluminiumfolie. Deshalb solltest du 100 Ereignisse für  $\theta = \pm 5^\circ$ , 50 Ereignisse für  $\theta = \pm 10^\circ$ , 15 Ereignisse für  $\theta = \pm 15^\circ$  und zehn Ereignisse für sonstige Winkel messen

### 1.3.5 Aufgaben zur Auswertung

1. Berechne für die Goldfolie und die Aluminiumfolie die direkte Zählrate  $N_d$  für jeden Winkel.
2. Die so bestimmten Zählraten  $N_d$  sind in Abhängigkeit des Winkels  $\theta + d\theta$  in der Ebene berechnet worden. Um sie mit der Rutherford-Streufornel (1.7) vergleichen zu können, müssen die Raten korrigiert werden. Unter Benutzung von 1.5 kann die korrigierte Zählrate notiert werden als

$$N_S = 2\pi \sin \theta N_d \quad (1.8)$$

Berechne nun jeweils die korrigierten Raten  $N_S$  für jeden Winkel.

3. Trage die Raten  $N_S(\theta)$  gegen  $\theta$  auf. Die Datenpunkte müssen hierbei mit Fehlerbalkchen dargestellt werden, deren Grösse  $\Delta N$  von der Unsicherheit der gemessenen Zählrate abhängt. Hierfür ist eine Poisson-Statistik anzunehmen mit  $\Delta N = \sqrt{N}$ , wobei  $N$  der Anzahl gemessener Impulse entspricht. Wähle eine logarithmische Darstellung für die Achse mit den Raten und interpretiere den Plot. Was stellst du fest?
4. Füge Fehlerbalken zu deinem Plot hinzu. Verwende für die Rate den statistischen Fehler aus der Poisson-Statistik:  $\Delta N = \sqrt{N}$ . Den statistischen Fehler in der Zeitmessung und der Winkelmessung kannst du vernachlässigen. Für die Winkel bietet sich eine systematische Fehlerabschätzung an.
5. Fitte nun folgende Funktion an deine Messwerte:

$$f(\theta) = \frac{a}{\sin^4\left(\frac{\theta-b}{2}\right)} \quad (1.9)$$

Gib die Werte von  $a$  und  $b$  an. Welche Aussage kannst du aus ihnen ableiten?

6. Aus dem Verhältnis der Rate  $N_S, Au$  zu  $N_S, Al$ , Gold zu Aluminium, kann man mit Hilfe der Gleichung (1.7) die Dicke der Goldfolie bestimmen (der Hersteller gibt diese mit  $2\mu\text{m}$  an). Nimm dazu an, dass  $t_{Al} = 8\mu\text{m}$ . Die Anzahl und Energie der einfallenden Teilchen sowie die Flächendichte der Folien seien in beiden Fällen gleich. Die Ladungszahl von Gold und Aluminium kann mittels Periodensystem herausgefunden werden. Berechne für alle gemeinsamen Winkel  $\theta$  die Dicke der Goldfolie. Bilde danach den Mittelwert und gib den statistischen Fehler an.
7. Vergleiche dein Ergebnis mit der Herstellerangabe.

## 1.4 Literatur

- Povh, Rith, Scholz & Zetsche, *Teilchen und Kerne*, Springer
- Wolfgang Demtröder, *Experimentalphysik 3: Kern-, Teilchen- und Astrophysik*, Springer
- William R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer
- LD Didactic GmbH, Rutherford scattering: measuring the scattering rate as a function of the scattering angle and the atomic number, stand 03.03.2020, erhältlich unter <https://bit.ly/2vzpiik>