

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 α -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 α -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* σ_{tot} und dem *differentiellen Wirkungsquerschnitt* $\frac{d\sigma}{d\Omega}$. Der totale Wirkungsquerschnitt ist wie folgt definiert:

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

Etwas formaler kann man den totalen Wirkungsquerschnitt auch folgendermassen angeben:

$$\sigma_{tot} = \frac{N_{tot}}{F \cdot A \cdot N \cdot \delta x} \quad (1.1)$$

Wobei N_{tot} die Anzahl gestreuter Teilchen, F der Fluss der einfallenden Teilchen, A die Fläche des Targets, δx seine Dicke und N die Flächendichte der Streuzentren bezeichnet. Der totale Wirkungsquerschnitt hat die Einheit einer Fläche. Sie wird oft in *Barn* (von englischen Wort Scheune) angegeben. Es gilt:

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

Diese Fläche entspricht **nicht** der Fläche des Targets und auch **nicht** der Fläche der einzelnen Streuzentren sondern ist ein Mass für die Wahrscheinlichkeit für die Wechselwirkung zwischen einfallenden Teilchen und dem Target.

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

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{F} \cdot \frac{dN_S}{d\Omega} \quad (1.3)$$

F bezeichnet hier wiederum den Fluss. Wie viele Teilchen N_S in den Raumwinkel $d\Omega$ gestreut werden wird folgendermassen beschrieben:

$$N_S = F \cdot A \cdot N \cdot \delta x \cdot \frac{d\sigma}{d\Omega} \quad (1.4)$$

Der Zusammenhang zwischen totalem und differentiellem Wirkungsquerschnitt ist gegeben durch:

$$\sigma_{tot} = \int \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right) \cdot d\Omega \quad (1.5)$$

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 α -Teilchen. 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 α -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 α -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 zerissen wird, konnte erst gut 20 Jahre später durch die Entdeckung des Neutrons durch *James Chadwick* (1891-1974) beantwortet werden.

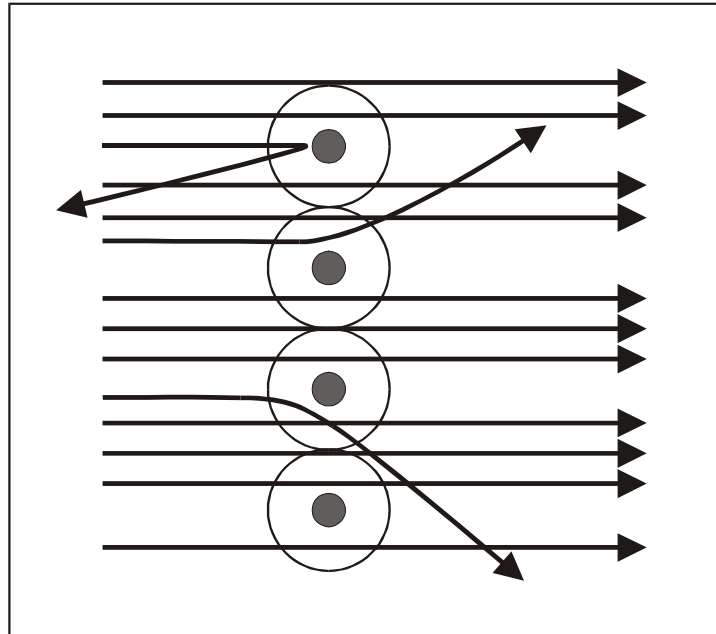


Abbildung 1.1: Streuung von α -Teilchen an einer einzelnen Schicht Goldatome

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

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

Hier bezeichnet Q die Ladung vom Target, q die Ladung vom einfallenden Teilchen und E_{kin} seine Energie. θ gibt den Winkel zwischen einfallendem Strahl und gestreutem Teilchen an. Für α -Teilchen, die an einem Material mit der Ladungszahl Z streuen, ergibt sich unter Verwendung der Gleichungen (1.4) und (1.6) folgender Zusammenhang:

$$N_S(\theta) = N_0 \cdot N \cdot \delta x \cdot \frac{Z^2 \cdot e^4}{(8\pi\epsilon_0 \cdot E_\alpha)^2} \cdot \frac{1}{\sin^4\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (1.7)$$

Wobei N_0 die Rate der einfallenden α -Teilchen, E_α ihre kinetische Energie und e 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.

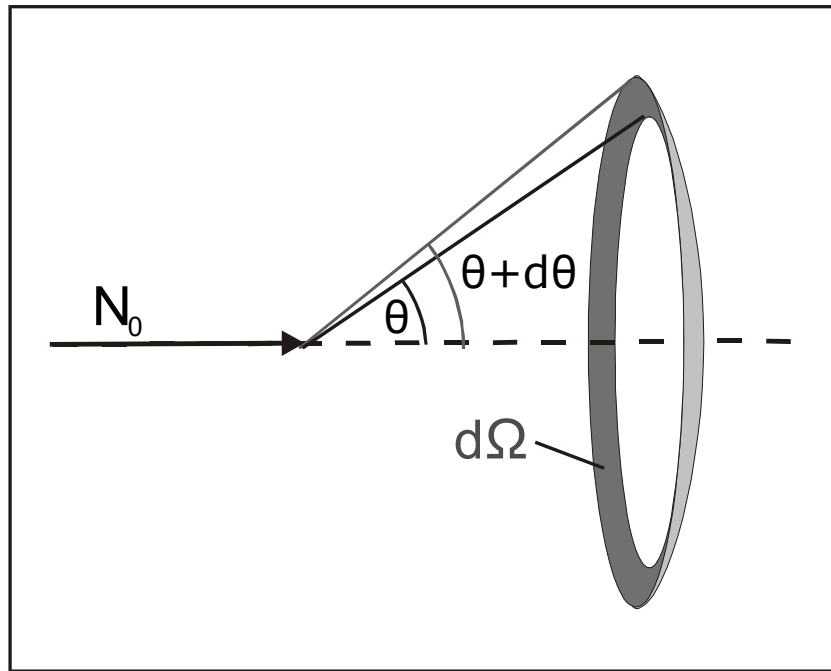


Abbildung 1.2: Raumwinkel $d\Omega$ in Abhängigkeit von $\theta + d\theta$

1.3 Experiment

1.3.1 Versuchszubehör

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

1. Öffne die Streukammer und platziere die Am-241 Quelle im Probenhalter (Abbildung 1.3, (1)) und die Goldfolie samt Blende in der entsprechenden Halterung (Abbildung 1.3, (2)). Die Blende hat auf der einen Seite eine Kerbe, die eine zentrierte Ausrichtung ermöglicht. Die Seite mit der spaltförmigen Blendenöffnung soll zur Quelle zeigen.
2. Der Detektor hat eine Spaltblende. Drehe sie so, dass ihre Markierung in einer Linie mit dem Stift auf dem Detektor liegt.

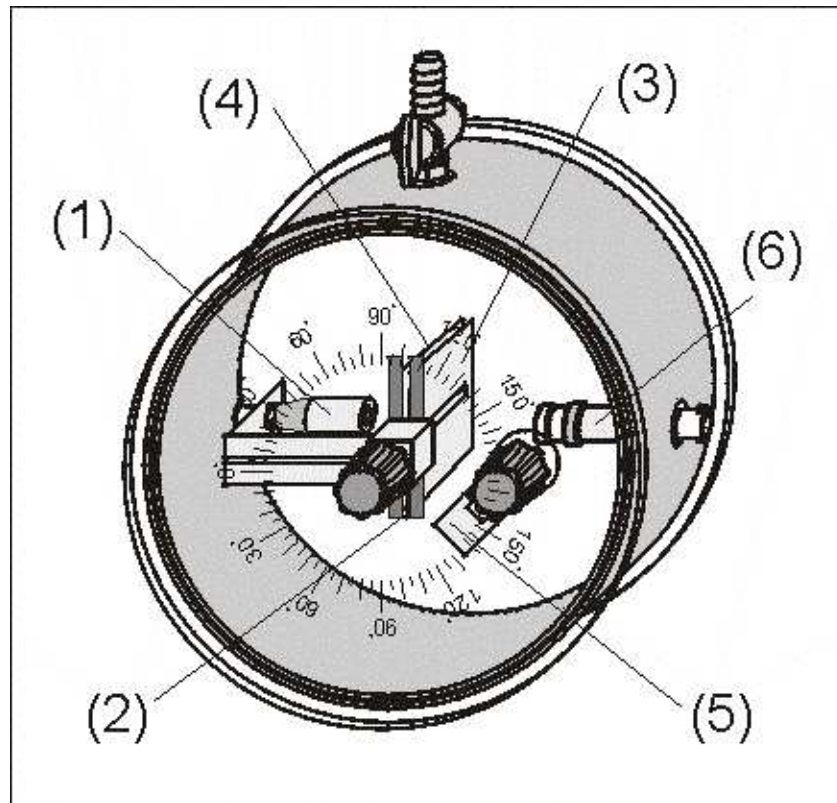


Abbildung 1.3: Streukammer nach Rutherford:

- (1) Probenhalter
- (2) Halterung für Folie
- (3) Folie
- (4) Blende
- (5) kleiner Gelenkarm
- (6) Detektor

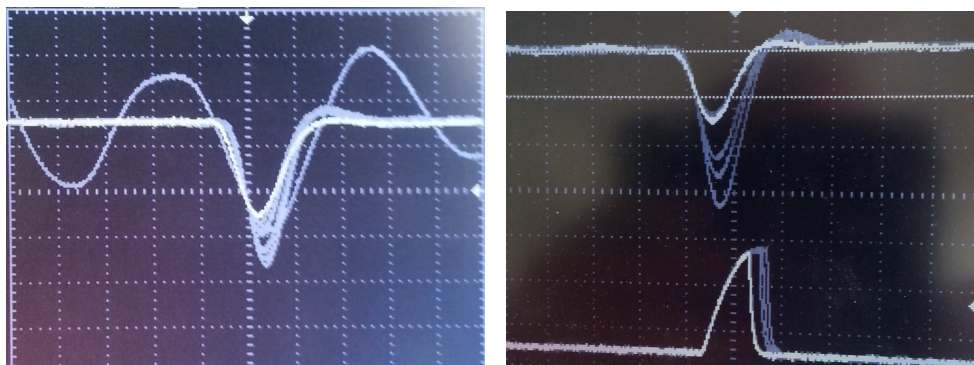


Abbildung 1.4: Links: Fehlerhafte Messung. Rechts: Gute Messung

3. Schliesse die Kammer und drehe den kleinen Gelenkarm (Abbildung 1.3, (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 mindestens 4 mBar abge-

sunken ist. Die Pumpe soll während des ganzen Versuches laufen.

6. Verbinde den Detektor mittels kurzem BNC Kabels mit dem Diskriminator-Vorverstärker.
7. Befestige das BNC T-Stück am Trigger-Ausgang (Rechteckspuls Symbol) des Diskriminator-Vorverstärkers. Führe das Trigger Signal mittels BNC-zu-Klinke Kabel an den Eingang E des Zählers (kurzes Kabel an Erdung). Verbinde nun auch noch das Oszilloskop mittels BNC Kabel mit dem Trigger-Ausgang.
8. Verbinde auch den Signal-Ausgang mit dem Oszilloskop.
9. Stelle den Trigger des Oszilloskops auf den Signal-Ausgang des Diskriminator-Vorverstärkers und drehe den grossen Gelenkarm mit der Quelle und der Goldfolie auf 0° . Betrachte die Signale der α -Teilchen und überlege dir auf welchen Wert der Diskriminator eingestellt werden sollte. Du kannst diese Position mit der Cursor-Funktion des Oszilloskops markieren.
10. Stelle jetzt den Trigger des Oszilloskops auf den Trigger-Ausgang des Diskriminator-Vorverstärkers. Justiere den Diskriminator-Pegel so, dass nur α -Teilchen detektiert werden, die über der Position liegen, die du vorher markiert hast.
11. Stelle das Oszilloskop im Display Menu auf "persist, infinity". Dadurch bleiben die alten Signale sichtbar und du kannst überprüfen ob fehlerhafte (siehe Abbildung (1.4)) Signale auftraten.
12. Jetzt können die Messungen durchgeführt werden.
13. Nach dem Beenden der Messungen: Zum belüften der Kammer muss unbedingt wie folgt vorgegangen werden:
 - (a) Schliesse das Ventil an der Rutherford-Streukammer.
 - (b) Schalte die Vakuum-Pumpe aus.
 - (c) Öffne das Belüftungsventil an der Pumpe. Achte darauf, dass du ein Zischen hörst.
 - (d) Öffne langsam das Ventil der Streukammer bis ein Zischen hörbar ist.
 - (e) Warte bis das Zischen aufgehört hat.

1.3.3 Durchführung

1. Miss die Zählrate alle 5° im Intervall von $\pm 5^\circ$ bis $\pm 30^\circ$ beginnend bei 30° . Gehe dazu wie folgt vor:
 - Stelle den grossen Gelenkarm auf die gewünschte Position.
 - Bedecke die Streukammer mit dem Tuch.
 - Wähle am Zähler eine Gate-Time von 100s.
 - Starte den Zähler und beobachte die Signale am Oszilloskop.
 - Wenn keine fehlerhaften Signale auftraten, notiere die Anzahl Treffer.
 - Wenn fehlerhafte Signale auftreten, muss die Messung verworfen werden und eine neue durchgeführt werden.
 - Wiederhole die 100s-Messung sooft, bis insgesamt mindestens 100 Treffer gezählt wurden. Falls dies jedoch nach 6 Messungen ($6 \cdot 100s = 600s = 10min$) noch nicht der Fall ist, gehe zu nächsten Position über.

- Falls du bei einer Position nach 3 Messungen noch keinen einzigen Treffer gemessen hast, gehe zur nächsten Position über.
2. Belüfte die Streukammer und ersetze dann die Goldfolie mit der Aluminiumfolie. Wiederhole nun das Experiment.

1.3.4 Aufgaben zur Auswertung

1. Berechne für die Gold- sowie die Aluminiumfolie die direkte Zählrate N_d für jeden Winkel.
2. Die so bestimmten Raten N_d sind in Abhängigkeit des Winkels $\theta + d\theta$ in der Ebene berechnet worden. Um sie mit der Rutherford-Streuformel (1.7) vergleichen zu können müssen die Raten korrigiert werden. Es gilt:

$$d\Omega(\theta, \phi) = \sin(\theta)d\theta d\phi \quad (1.8)$$

Wegen der Radialsymmetrie entfällt die ϕ Abhängigkeit und Gleichung (1.8) kann wie folgt vereinfacht werden:

$$d\Omega(\theta) = \int_0^{2\pi} d\Omega(\theta, \phi) = \sin(\theta)d\theta \int_0^{2\pi} d\phi = 2\pi \cdot \sin(\theta)d\theta \quad (1.9)$$

Die korrigierten Raten N_S ergeben sich also nach Gleichung (1.9) wie folgt:

$$N_S = 2\pi \cdot \sin(\theta) \cdot N_d \quad (1.10)$$

Berechne nun jeweils die korrigierten Raten N_S für jeden Winkel.

3. Trage die Raten $N_S(\theta)$ gegen θ auf. Wähle eine logarithmische Darstellung für die Achse mit den Raten. 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:

$$f(\theta) = \frac{a}{\sin^4\left(\frac{\theta-b}{2}\right)} \quad (1.11)$$

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

6. Aus dem Verhältnis der Raten N_S bzw. N_d von Gold und Aluminium kann man mit Hilfe der Gleichung (1.7) die Dicke der Goldfolie bestimmen. Nimm dazu an, dass die Flächendichten für beide Folien gleich sind. Die Anzahl und Energie der einfallenden Teilchen sind in beiden Fällen gleich. Die Ladungszahl von Gold und Aluminium kann mittels Periodensystem herausgefunden werden. Des weiteren gilt: $\delta x_{\text{Aluminium}} = 8\mu\text{m}$. Berechne für alle gemeinsamen Winkel θ die Dicke der Goldfolie. Bilde danach den Mittelwert und gib den statistischen Fehler an.

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