

Rutherford-Streuung als Remotely Controlled Laboratory (RCL)

S. Gröber, M. Vetter, B. Eckert, H. J. Jodl

1 Bedeutung und Auswahl des Versuchs als RCL

In den Jahren um 1910 entwickelten Rutherford und seine Mitarbeiter aus dem Zusammenwirken theoretischer Überlegungen (Rutherfordsche Streuformel) und der Untersuchung der Streuung von Alpha-Teilchen (Rutherfordscher Streuversuch) das Rutherfordsche Atommodell. Seither ist der Rutherfordsche Streuversuch von zentraler Bedeutung bei der Erarbeitung von Atommodellen in der Lehre von Physik und Chemie: Im Physik-Grundstudium wird meist zuerst die Rutherfordsche Streuformel hergeleitet (differentieller Ansatz mit Drehimpulserhaltungssatz führt auf Streuwinkel-Stoßparameter-Beziehung, Streuung an differentiellm Kreisring um Atomkern und Integration führt auf Rutherfordsche Streuformel) und der Versuch als Bestätigungsexperiment (Winkelabhängigkeit der Streurrate, Abhängigkeit der Streurrate von der Kernladungszahl des Streumaterials, Streustatistik) durchgeführt. In der Schule ist ein experimenteller Zugang zum Rutherfordschen Atommodell über den Rutherfordschen Streuversuch besonders wichtig, da die Schüler nicht über die mathematisch-physikalischen Kenntnisse zur Herleitung der Streuformel verfügen.

Der Rutherfordsche Streuversuch wird als aufbereitetes Demonstrationsexperiment von Lehrmittelfirmen (Leybold mit Messprinzip nach Rutherford, Phywe mit Messprinzip nach Chadwick) angeboten. Die folgenden Argumente erklären einerseits, warum der Versuch sowohl im Unterricht der Sekundarstufe II als auch in Vorlesungen oder im Anfängerpraktikum an der Hochschule selten durchgeführt wird. Andererseits begründen sie die Auswahl des Versuchs als RCL.

- Versuch zu teuer: Die Anschaffungskosten (Leybold: Vakuumkammer, Halbleiterdetektor und Diskriminator-Vorverstärker ca. 1200 €) sind insbesondere im Hinblick auf einen durchschnittlichen Einsatz des Versuchs von ein- bis zweimal pro Jahr zu hoch.
- Versuchsdurchführung zu zeitaufwendig: Die Aktivität des Am-241-Präparats ist aus Sicherheitsgründen auf ca. 340 kBq begrenzt, die Rutherfordsche Streuformel gilt erst für Streuwinkel größer als $\approx 8^\circ$, die Streurrate nimmt mit dem Streuwinkel sehr schnell ab, ein hinreichend kleiner statistischer Fehler erfordert eine große Anzahl gestreuter Alpha-Teilchen, und eine physikalisch korrekte Überprüfung der Rutherfordschen Streuformel erfordert Messungen über einen größeren Streuwinkelbereich. Die Folge davon sind zu lang dauernde Messreihen in der verfügbaren Unterrichtszeit. Der Versuchsaufbau nach Chadwick hat zwar den Vorteil größerer Streuraten, aber das Messprinzip ist für Schüler schwer verständlich [1].
- Schüleraktivität zu gering: Die Beteiligungsmöglichkeiten für Schüler an Lehrerdemonstrationsexperimenten sind generell gering. Beim Rutherfordschen Streuversuch beschränken sich diese auf das Ablesen und Notieren von Messwerten und der Erkenntnis, dass die Messdaten den alten Atommodellen z. B. dem von Thomson widersprechen.

2 Versuchsaufbau

Die Idee eines Remotely Controlled Laboratory (RCLs) besteht darin, einen Versuch real am Ort A aufzubauen und im Internet fortwährend bereit zu stellen. Ein Experimentator am

Ort B kann dann vom eigenen PC aus den Versuch durchführen. Der Leser findet in [2] und [3] weitere Informationen zum RCL-Projekt und zu einzelnen RCLs.

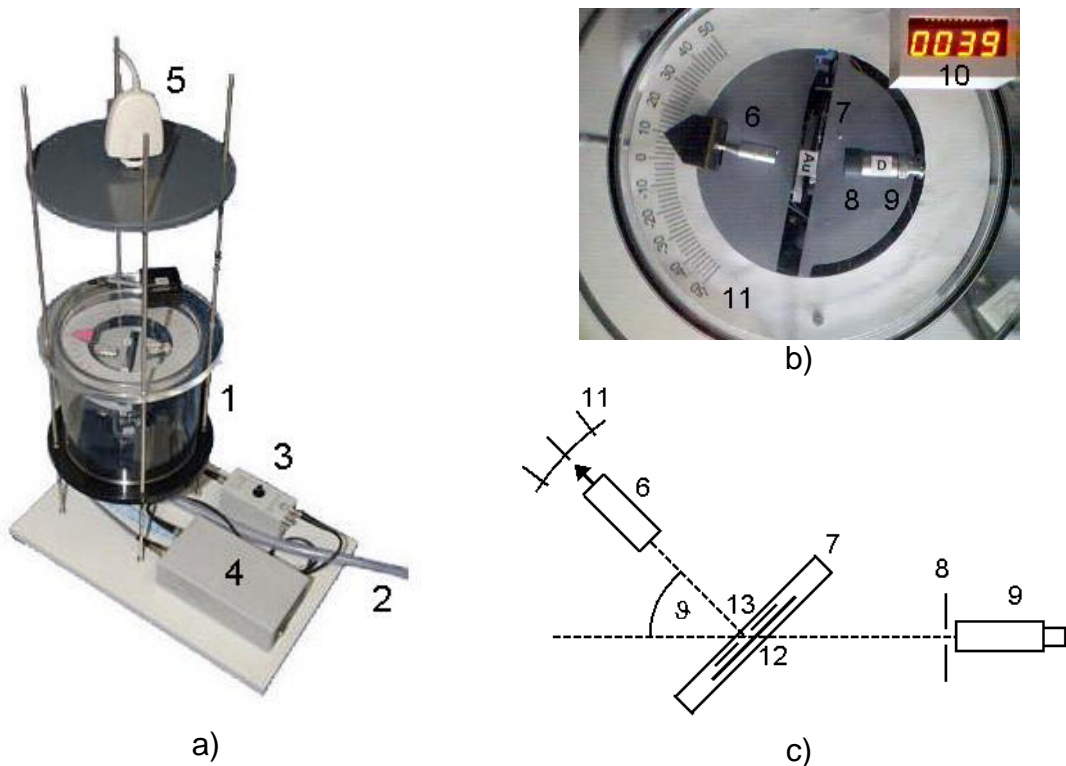


Abb. 1: a) Versuchsaufbau, b) Sicht der Webcam von oben auf die Vakuumkammer, c) Messprinzip. Vakuumkammer (1), Schlauch zur (nicht dargestellten) Vakuumpumpe (2), Diskriminator-Vorverstärker (3), Interface (4), Webcam (5), Alphastrahler (6), Probenrad mit Metallfolien und Streublenden (7), Detektorblende (8), Halbleiterdetektor (9), Zähler-Display (10), Winkelskala (11), Metallfolien aus Aluminium / Gold oder Streublende (12), Streublende (13).

Für eine zeitsparende Realisation des RCLs wurden Komponenten der Firma Leybold [4] verwendet. Abb. 1 zeigt den Versuchsaufbau (a), das Webcambild (b) und das Messprinzip (c). Eine Vakuumkammer (1) wird fortwährend von einer Drehschieber-Vakuumpumpe auf einen Druck kleiner als 0,1 mbar evakuiert. In dieser befindet sich ein Schrittmotor, um den Alphastrahler (6) und das Probenrad (7) mit den Metallfolien auf Streuwinkel ϑ zwischen -50° und $+50^\circ$ gegenüber dem feststehenden Halbleiterdetektor (9) einzustellen zu können. Die Einstellgenauigkeit ist besser als $0,5^\circ$ und zur visuellen Rückmeldung kann der Streuwinkel an einer Winkelskala (11) abgelesen werden. Streufolien aus Aluminium oder Gold (12) und eine Schlitzeblende auf dem Probenrad (7) können vom Experimentator mit einem zweiten Schrittmotor in den Strahlengang gedreht werden. Die Streublende (13) vor den Metallfolien und die Detektorblende (8) vor dem Halbleiterdetektor (9) erhöhen die Winkelauflösung. Das von den gestreuten Alpha-Teilchen erzeugte Ausgangssignal des Halbleiterdetektors (9) wird von einem Diskriminator-Vorverstärker (3) verstärkt, die Anzahl der Impulse mit einer Messelektronik im Interface (4) gezählt und diese mit einem Zähler-Display (10) im Bild der Webcam (5) angezeigt. Ein Mikrocontroller im Interface (4) steuert die Datenströme zwischen dem Webserver und den Versuchskomponenten (Schrittmotoren, Halbleiterdetektor, Zähler-Display)

Abb. 2 zeigt die Laborseite des Versuchs auf dem RCL-Portal [5]. Um eine Messung durchzuführen, wählt der Experimentator im Bedienfeld (Abb. 2, rechts) zunächst das Streuobjekt (Goldfolie, Aluminiumfolie oder Schlitzeblende) und den Streuwinkel (-50° bis $+50^\circ$) aus. Die Einstellungen können im Webcambild (Abb. 2, mittig) mitverfolgt werden. Nach Wahl der Messdauer (0 s bis 300 s) und dem Starten der Messung wird vom Zähler-

Display im Webcambild die Messdauer heruntergezählt und anschließend die Anzahl der registrierten Alpha-Teilchen angezeigt.



Abb. 2: Laborseite des Versuchs mit Versuchsmenü (links), Webcambild (mittig) und Bedienfeld (rechts).

Mit dem Button „Experiment neu ausrichten“ werden bei einer eventuell auftretenden Dejustierung des Versuchs die beiden Schrittmotoren wieder in eine eindeutige Anfangsstellung gefahren.

3 Messergebnisse

Abb. 3 zeigt die graphische Darstellung der Anzahl N registrierter Alpha-Teilchen in Abhängigkeit vom Streuwinkel ϑ für Gold (rautenförmige Messpunkte) und Aluminium (quadratische Messpunkte). Die Verteilung für Aluminium ist aufgrund der Streugeometrie und der beweglichen Versuchskomponenten um einen Winkel ϑ_0 verschoben. Dies ist eine typische Laborsituation, die wir aus Lerngründen nicht durch einen höheren technischen Aufwand vermeiden wollten. Der Winkel ϑ_0 lässt sich gut durch Anpassen der Messwerte mit einer Gaußverteilung zu $1,5^\circ$ bestimmen.

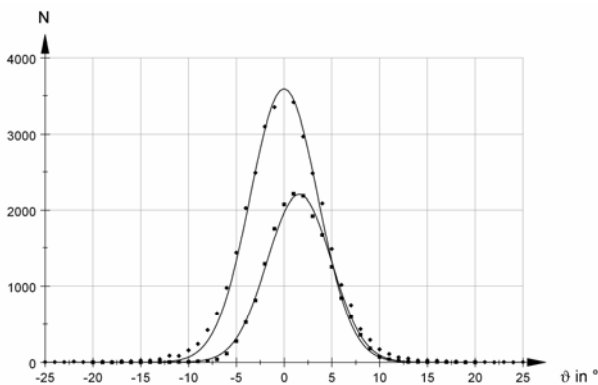


Abb. 3: Anzahl N der an Gold und Aluminium gestreuten Alpha-Teilchen für Streuwinkel $|\vartheta| < 25^\circ$, $\Delta\vartheta = 1^\circ$ und Messdauer $t = 300$ s.

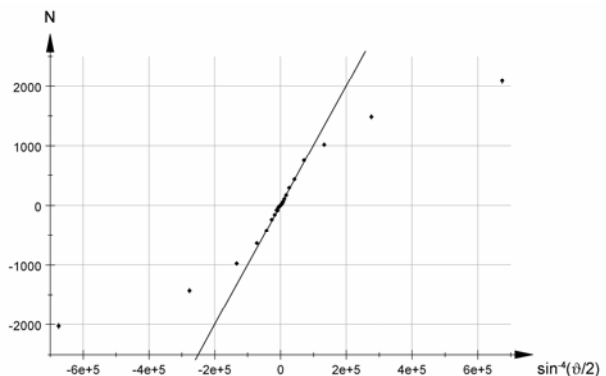


Abb. 4: Anzahl N der an Gold gestreuten Alpha-Teilchen aus Abb. 3 über $\sin^4(\vartheta/2)$ in linearisierter Darstellung. Zur einfacheren Auswertung ist N für $\vartheta < 0$ negiert.

In Abb. 4 wurde zum Vergleich mit der Rutherford'schen Streuformel die Anzahl N der an Gold gestreuten Alpha-Teilchen über $\sin^{-4}(\vartheta/2)$ aufgetragen. Für $|\sin^{-4}(\vartheta/2)| > \approx 50000$ oder $|\vartheta| < \approx 8^\circ$ liegen die Messpunkte nicht mehr auf einer Geraden durch den Ursprung. Die Mehrzahl der Alpha-Teilchen wird an vielen Atomkernen gestreut (Mehrfachstreuung), was theoretisch durch eine Gaußverteilung beschrieben wird (vgl. Abb. 3 und [1]). Für $|\vartheta| > \approx 8^\circ$ hingegen wird die Mehrzahl der Alpha-Teilchen an einem einzelnen Atomkern gestreut (Einzelstreuung) und es liegt Rutherford-Streuung vor.

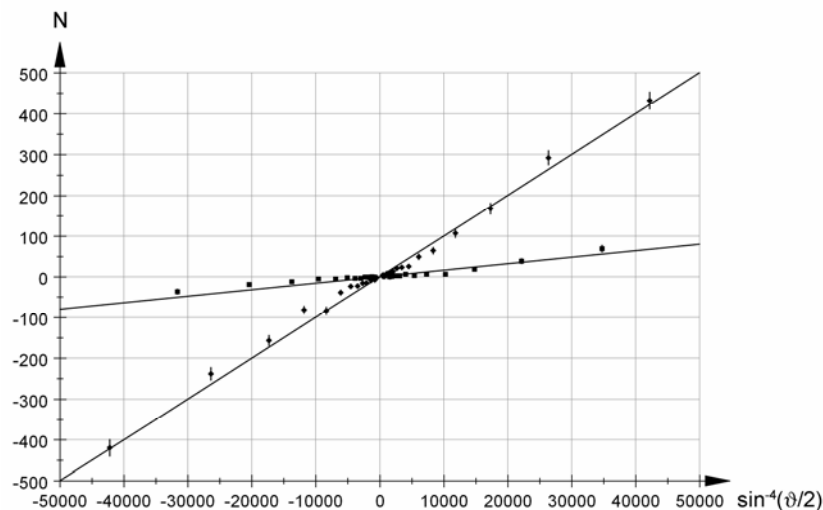


Abb. 5: Anzahl N der an Gold und Aluminium gestreuten Alpha-Teilchen aus Abb. 3 über $\sin^{-4}(\vartheta/2)$ mit $|\vartheta| > \approx 8^\circ$ in linearisierter Darstellung. Zur einfacheren Auswertung ist N für $\vartheta < 0$ negiert.

Abb. 5 zeigt, dass in diesem Fall die Rutherford'sche Streuformel die Winkelabhängigkeit der Streurrate für Gold und Aluminium innerhalb der statistischen Fehlergrenzen (Fehlerbalken) recht gut beschreibt. Ursache der systematischen Abweichung der Messpunkte von den Ausgleichsgeraden für $|\sin^{-4}(\vartheta/2)| < \approx 15000$ ist vermutlich, dass die Drehachse des Schrittmotors nicht exakt durch den Auftreffpunkt der Alpha-Teilchen auf den Metallfolien geht.

Mit der Rutherford'schen Streuformel und den Versuchsparametern [6] lassen sich aus den Steigungen $k_{Au} = 0,01$ und $k_{Al} = 0,0016$ der beiden Ausgleichsgeraden die Kernladungszahlen von Gold und Aluminium zu $Z_{Au} = 89,7$ (13 % zu groß gegenüber $Z_{Au} = 79$) und $Z_{Al} = 17,3$ (33 % zu groß gegenüber $Z_{Al} = 13$). Die hohe Abweichung vom wahren Wert ist auf die Vielzahl und Ungenauigkeit der eingehenden Größen zurückzuführen und bietet Anlass zu physikalischen Diskussionen.

4 Lernumgebung des RCLs

Die Laborseite des Versuchs ist wie die jedes anderen RCLs auf dem RCL-Portal Teil einer stets nach den gleichen Menüpunkten strukturierten Lernumgebung (siehe Abb. 2, Menüleiste links). Man findet unter

- Einstieg: Einordnung des Versuchs in den historischen Kontext, Ziel des Versuchs
- Aufbau: Beschreibung des Versuchsaufbaus, Versuchsdaten
- Theorie: Erklärung der Versuchsergebnisse des historischen Streuversuchs auf dem damaligen Kenntnisstand über Atome, qualitative Diskussion der Rutherford'schen Streuformel für Schüler und mathematische Herleitung für Studenten, alle notwendigen Kenntnisse und Informationen zur Durchführung des Versuchs

- Aufgaben: Qualitative und quantitative experimentelle Aufträge zur Messung der Winkelabhängigkeit der Streuung an den Streuobjekten und zur Bestimmung von Kernladungszahlen
- Auswertung: Exemplarische Messung und Auswertung mit Fehlerdiskussion
- Diskussion: Verständnisfragen zur Theorie, zur Messwertaufnahme, zur Auswertung und zur Bewertung und Vertiefung
- Material: Beschreibung aller Versuchskomponenten durch Firmenmanuale, didaktisches Material und hilfreiche Literaturzitate.

Unter Material findet man auch eine umfangreiche Sammlung von 16 Aufgaben zur Theorie, zum Versuchsaufbau sowie zur Versuchsdurchführung und -auswertung des Rutherford'schen Streuversuchs. Es werden Tips zum Einsatz der Aufgaben im Unterricht gegeben und es stehen detailliert ausgearbeitete Lösungen zur Verfügung.

5 Fazit - Mehrwert des RCLs und neue Lehr-Lernformen

Durch die Auswahl des Versuchs und die Realisierung als RCL ergibt sich ein Mehrwert des RCLs gegenüber dem traditionellen Versuch. In unmittelbarem Zusammenhang dazu eröffnen sich für Lehrkräfte Möglichkeiten den Unterricht durch neue Lehr-Lernformen zu bereichern:

- Schulen, denen der Versuch fehlt, steht dieser kostenlos auf dem RCL-Portal zur Verfügung
- Schüler und Studenten können selbständig zuhause eigene Messreihen planen (z. B. um mit möglichst wenig Messungen zu aussagekräftigen Versuchsergebnissen zu gelangen), durchführen und auswerten
- Die Lehrkraft hat nicht nur die Möglichkeit experimentelle Hausaufgaben zu geben, sondern auch die Schüler so zu organisieren, dass diese in Gruppen und in elektronischer Form umfangreiches Messdatenmaterial zusammentragen
- Schüler können Experimentalvorträge mit dem RCL halten, wie sie sonst nur in eingeschränkter Form möglich wären
- Denkbar sind auch vom Unterricht losgelöste Projekte, in denen sich eine Schülergruppe möglichst eigenständig in den Versuch unter der Moderation des Lehrers für eine größere Präsentation (z. B. Tag der offenen Tür) vorbereitet
- Die Lernumgebung stellt Lehrkräften vielfältiges Unterrichtsmaterial und Schülern alle notwendigen Informationen zum Verständnis des Versuchs bereit.

Der Leser findet unter [7] eine umfangreiche Unterrichtseinheit zum Einsatz des RCLs im Physikunterricht der Oberstufe sowie vielfältiges Unterrichtsmaterial zum Download.

Wir danken Frau T. Knecht für ihr großes Engagement bei der Realisierung des RCLs während ihrer Staatsexamensarbeit für das Lehramt an Gymnasien. Den Sponsoren der BMW-Eberhard von Kuenheim-Stiftung (Frau Grammes), vom Arbeitgeberverband Gesamtmetall (Herr Gollub) und von Intel (Herr Ensle) danken wir sehr herzlich für die Unterstützung des RCL-Gesamtprojekts.

5 Literatur

- [1] Kuhn, W. (Hrsg.) (2001): Handbuch der Experimentalphysik – Sekundarbereich II. Band 10 – Kerne und Teilchen II, Aulis, S. 19 und 14.

- [2] Altherr, S., Eckert, B., Vetter, M. & Jodl, H. J. (2005): Experimentieren aus der Ferne - Ferngesteuertes Labor im Internet (Remotely Controlled Laboratory – RCL), PdN-PhiS 6/54, S. 40 - 46.
- [3] Vetter, M., Gröber, S. Eckert, B. & Jodl, H. J. (2006): Neues vom Remote Controlled Lab Projekt, in: Nordmeier, V. & Oberländer, A. (Hrsg.): DPG Frühjahrstagung - Didaktik der Physik, Kassel 2006, Lehmanns Media.
- [4] Leybold Didaktik GmbH: Halbleiterdetektor (Nr. 55992), Diskriminator-Vorverstärker (Nr. 55993), Goldfolie in Fassung (Nr. 55954), Aluminiumfolie in Fassung (Nr. 55952), Am-241-Präparat (Nr. 55982).
- [5] <http://rcl.physik.uni-kl.de> unter Labs/Rutherfordscher Streuversuch/Labor
- [6] <http://rcl.physik.uni-kl.de> unter Labs/Rutherfordscher Streuversuch in Theorie 3.2 und Aufbau 2..
- [7] Gröber, S. (2008): Der Rutherfordsche Streuversuch als RCL, <http://www.lehrer-online.de/rutherfordscher-streuversuch.php?sid=19994877819416756721489338933290>

Anschrift der Verfasser

Stellvertretend für die Arbeitsgruppe: Sebastian Gröber, Fachbereich Physik, Technische Universität Kaiserslautern, Erwin-Schrödinger-Str., 67663 Kaiserslautern.
E-Mail: groeber@physik.uni-kl.de

Kurzfassung

Der Rutherfordsche Streuversuch ist von zentraler Bedeutung bei der Entwicklung der Atommodelle. Allerdings wird der Versuch aus den verschiedensten Gründen selten als Demonstrations- oder als Praktikumsversuch durchgeführt. Aus diesem Grund haben wir diesen Versuch als Remotely Controlled Laboratory (RCL) realisiert. Schüler können zeit- und ortsungebunden über das Internet auf das Realexperiment zugreifen und ihre eigenen Messungen durchführen. Für Lehrkräfte eröffnen sich neue Möglichkeiten der Einbindung des Versuchs in den Physikunterricht.