

# 3D-gedrucktes Streuexperiment à la Rutherford

Julia Woithe

## 1. Einleitung

Streuexperimente stellen einen wichtigen Typus von Experimenten in der Hochenergiephysik dar. Mit der Hilfe von Streuexperimenten untersuchen Wissenschaftler\*innen die innere Struktur von Teilchensystemen, wie zum Beispiel Atomen oder Protonen, oder die Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Teilchen. Dabei wird ein Strahl einer bestimmten Teilchensorte auf ein Streuobjekt gerichtet. Durch die Wechselwirkung zwischen den sogenannten Projektil-Teilchen und den Teilchen innerhalb des Streuobjektes kommt es dann zu Richtungsänderungen (elastische Streuung) oder Teilchenumwandlungen (inelastische Streuung), die mit der Hilfe von Detektoren aufgezeichnet werden. Je kleiner die zu untersuchenden Streuobjekte, desto höheren Energien benötigt man, um diese Strukturen aufzulösen. Daher wurden in der Vergangenheit immer bessere Teilchenbeschleuniger entwickelt, die hochenergetische Projektil-Teilchen für verschiedenste Streuexperimente zur Verfügung stellen. Eine detaillierte Beschreibung zur Physik von Streuexperimenten in der Hochenergiephysik findet sich zum Beispiel in [1].

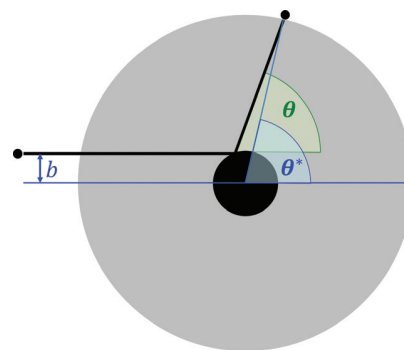
Eines der berühmtesten Beispiele eines elastischen Streuexperimentes ist das sogenannte Goldfolien-Experiment. Geiger, Marsden und Rutherford untersuchten 1909 die Streuung von Heliumkernen an sehr dünnen Goldfolien. Dabei analysierten sie die Winkelverteilung der gestreuten Heliumkerne und Rutherford modellierte daraufhin die elektrische Ladungsverteilung im Atom. Die Beobachtungen widerlegten die Annahme, dass die positiven Ladungen im gesamten Volumen des Atoms gleichmäßig verteilt seien. Stattdessen ließen sich insbesondere große Streuwinkel besser mit einem kompakten zentralen Coulomb-Feld modellieren [2]. Die Erklärung ihrer Beobachtungen trug damit wesentlich zur Entwicklung des Rutherford'schen und später des Bohr'schen Atommodells bei.

Das Goldfolien-Experiment stellt damit nicht nur einen Meilenstein der Atomphysik dar, sondern auch ein eindrucksvolles Beispiel der Modellbildung. Nicht zuletzt aus diesen Gründen wird das Goldfolienexperiment in gängigen Physiklehrbüchern erklärt und sogar die Verteilung der gestreuten Projektil-Teilchen interpretiert [3, 4]. Es ist leider relativ aufwändig und kostenintensiv, das Experiment real nachzustellen. Der Versuchsaufbau von LD Didactic beinhaltet zum Beispiel eine Vakuumpumpe sowie ein 330 kBq Americium-Präparat [5]. Allerdings lassen sich die Grundprinzipien einfach anhand eines mechanischen Modellversuchs nachvollziehen.

## 2. Mechanisches Modell und physikalische Konzepte

In mechanischen Modellen stellen oft Stahlkugeln oder Murmeln die Projektil-Teilchen dar, die an verschiedenartigen Streuobjekten (mechanischen Potentialen) gestreut werden. Die Form der Streuobjekte reicht dabei üblicherweise von Prismen über Zylinder zu rotationssymmetrischen „Potentialhügeln“. Insbesondere spezielle Potentialhügel sind hier interessant, weil deren zugrundeliegenden physikalischen Zusammenhänge sehr ähnlich zu den Grundlagen der Coulomb-Streuung sind. Die Höhe solcher Potentialhügel ändert sich dabei in der Regel umgekehrt proportional zum Radius. Mit Hilfe der Gravitation bieten diese mechanischen Potentiale damit für die Kugeln ein ähnliches  $1/r$  Potential, wie das Coulomb-Potential eines Atomkerns für elektrisch geladene Projektil-Teilchen. Ein solches Modellexperiment mit einem Potentialhügel aus Aluminium wurde von Heptin and Fromme vorgestellt, die auch die zugrundeliegenden physikalischen Konzepte detailliert erläuterten und Beispielmessungen zeigten [6, 7]. Daher werden im Folgenden die wichtigsten Konzepte nur kurz zusammengefasst basierend auf der entsprechenden Darstellung in [7]. Auf eine mathematische Herleitung wird an dieser Stelle verzichtet, diese lässt sich aber im Rahmen der Masterarbeit von Heptin [6] nachlesen und ist zum Teil auch für interessierte Jugendliche zugänglich.

Die folgenden Zusammenhänge beziehen sich jeweils auf den Stoßparameter  $b$  eines Projektil-Teilchens und den zugehörigen Ablenkwinkel  $\theta$ . Diese beiden Parameter sind in Abbildung 1 am Beispiel der Streuung einer Kugel an einem Kreiszyylinder veranschaulicht. In der Abbildung ist neben Winkel  $\theta$  auch ein Winkel  $\theta^*$  eingezeichnet sowie ein großer graugefärbter Kreis, der das Streuobjekt umgibt. Diese Darstellung bezieht sich auf den 3D-gedruckten Versuchsaufbau, der später vorgestellt wird. Dort wird vereinfacht der Winkel immer



**Abbildung 1:** Stoßparameter eines Projektil-Teilchens und zugehöriger Ablenkwinkel bei der Streuung einer Kugel an einem Kreiszyylinder. Der Winkel relativ zum Auftreffpunkt auf das Streuobjekt  $\theta$  und der Winkel relativ zum Zentrum des Streuobjektes  $\theta^*$  sind eingezeichnet.

relativ zum Streuzentrum gemessen ( $\theta$ ), und nicht relativ zum Auftreffpunkt auf das Streuobjekt ( $\theta^*$ ). Diese Vereinfachung stört bei halbquantitativen Messungen nicht und macht das Ablesen der Winkel deutlich einfacher. Beim Vergleich von quantitativen Zusammenhänge müsste dies allerdings strenggenommen korrigiert werden, da der Unterschied zwischen  $\theta$  und  $\theta^*$  durch die relativ kleinen Abmaße der Streu-Apparatur nicht vernachlässigbar ist.

## 2.1 Streuung am 1/r-abhängiges Coulomb-Potential

Für Heliumkerne, die am 1/r-abhängigen Coulomb-Potential eines Atomkerns gestreut werden, gilt:

$b = \frac{Z \cdot e^2}{4\pi\epsilon_0 \cdot E_{kin,\alpha}} \cdot \cot \frac{\theta}{2}$ <p>(Herleitung in [6, S. 13-16])</p>	<p><math>b</math> ... Stoßparameter</p> <p><math>Z</math> ... Kernladungszahl des Streuatoms</p> <p><math>e</math> ... Elementarladung</p> <p><math>\epsilon_0</math> ... elektrische Feldkonstante</p> <p><math>E_{kin,\alpha}</math> ... kinetische Energie des Heliumkerns</p> <p><math>\theta</math> ... Streuwinkel relativ zur Strahlrichtung</p>
--	---

## 2.2 Streuung am 1/r-abhängiger mechanischer Potentialhügel

Für Kugeln, die an einem rotationssymmetrischen 1/r-abhängigen mechanischen Potentialhügel gestreut werden, gelten folgende Zusammenhänge für das Potential  $E_{pot,Modell}$  des Potentialhügels sowie den Stoßparameter  $b$ :

$E_{pot,Modell} = m \cdot g \cdot h = m \cdot g \cdot \frac{k}{r}$ $b = \frac{m \cdot g \cdot k}{2 \cdot E_{kin,P}} \cdot \cot \frac{\theta}{2} \text{ (für } b \leq R)$ <p>(Herleitung in [6, S. 17-19])</p>	<p><math>m</math> ... Masse der Kugel (Projektil)</p> <p><math>g</math> ... Gravitationskonstante</p> <p><math>h</math> ... Höhe des Potentialhügels</p> <p><math>k</math> ... Konstante der gewählten Potentialhügelform</p> <p><math>r</math> ... Radius des Potentialhügels (abhängig von Höhe)</p> <p><math>b</math> ... Stoßparameter</p> <p><math>E_{kin,P}</math> ... kinetische Energie der Kugel (Projektil)</p> <p><math>\theta</math> ... Streuwinkel relativ zur Strahlrichtung</p> <p><math>R</math> ... Maximaler Radius des Potentialhügels</p>
--	--

Dabei bewegen sich die Kugeln auf annähernd Hyperbelförmige Bahnkurven. Für  $b > R$  gilt allerdings  $\theta = 0^\circ$ , denn die Kugel rollt ungehindert am mechanischen Potentialhügel vorbei. Insgesamt sollte man folgende Grenzen des Modells beachten: Die Reichweite des mechanischen Modells ist im Gegensatz zum Coulomb-Potential endlich und hängt vom maximalen Radius des Potentialhügels ab. Außerdem tritt Reibung auf und die Bahn der Kugel hängt auch von der Beschaffenheit der Streu-Apparatur ab. Außerdem besitzen die Kugeln zusätzlich Rotationsenergie und das mechanische Potential besitzt im Vergleich zum Coulomb-Potential eine Raumdimension weniger. Im Gegensatz zu einem Heliumkern, der am kugelsymmetrischen Coulomb-Potentials eines Atomkerns in alle drei Raumrichtungen gestreut werden kann, bewegen sich die Kugeln auf einer zweidimensionalen Oberfläche.

## 2.3 Streuung am Kreiszyylinder

Für Kugeln, die an einem festen Hindernis mit kreisförmigem Querschnitt (Kreiszyylinder) gestreut werden, gilt:

$b = R \cdot \cos \frac{\theta}{2} \text{ (für } b \leq R)$ <p>(Herleitung in [6, S. 7])</p>	<p><math>b</math> ... Stoßparameter</p> <p><math>R</math> ... Radius des Hindernisses mit kreisförmigem Querschnitt</p> <p><math>\theta</math> ... Streuwinkel relativ zur Strahlrichtung</p>
--	---

Für  $b > R$  gilt wieder  $\theta = 0^\circ$ , denn die Kugel rollt ungehindert am Hindernis vorbei. Bei diesem Streuobjekt gilt Einfallswinkel = Ausfallswinkel und der Streuwinkel hängt nicht von der kinetischen Energie der Kugel ab.

## 2.4 Andere Streuobjekte

Zusätzlich kann man Kugeln an einem Dreiecksprisma streuen, wobei eine Spitze der Dreiecksgrundfläche in Richtung der Kugelrampe zeigt. Hier gilt ebenfalls Einfallswinkel = Ausfallswinkel aber der Einfallswinkel bleibt konstant und hängt nur vom Design und der Ausrichtung des Streukörpers zur Kugelrampe ab.

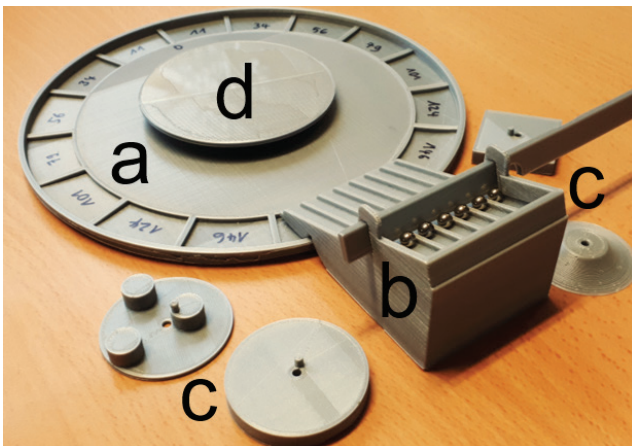
Auch kompliziertere Streukörper mit einer inneren Struktur (z. B. drei sehr kleine Streuzentren nebeneinander) sind denkbar. Bei solchen Objekten würden viele Kugeln mit unterschiedlichen Stoßparametern unbehindert durch das Streuobjekt hindurchrollen. Einige Kugel würden allerdings stark abgelenkt werden.

## 3. 3D-gedrucktes Streuexperiment

Auch wenn sich mechanische Potentiale auf verschiedensten Arten fertigen lassen, bieten 3D-Design und 3D-Druck hier interessante Möglichkeiten. Insbesondere wird die Fertigung deutlich weniger aufwändig, sodass sich das Experiment vom Demonstrationsexperiment zum Lernendenexperiment entwickeln lässt. Dabei lässt sich die Größe des Modells einfach variieren und Details, wie zum Beispiel winkelabhängige Auffangtaschen für abgelenkte Kugeln, lassen sich einfach einarbeiten. Auch die Form der Streuobjekte kann man problemlos modifizieren. Es ist sogar denkbar, dass Jugendliche ihren eigenen Streukörper entwerfen und dann 3D drucken und im Streuexperiment testen. Im Rahmen des Teilchenphysik-Lernlabors S'Cool LAB am CERN [8] wurde ein 3D-gedrucktes Streuexperiment entwickelt. Das Modell besteht aus den folgenden Komponenten, siehe auch Abbildung 2.

**a) Grundplatte:** Die kreisförmige Grundplatte hat einen Durchmesser von 18 cm und beinhaltet 16 Auffangtaschen für die abgelenkten Stahlkugeln, womit sich das Ablesen der Streuwinkel vereinfacht. Jede Auffangtasche deckt  $22,5^\circ$  des Streuwinkels ab. Zwei Taschen werden allerdings von der Kugelrampe überdeckt. Somit können Ablenkungswinkel von  $0^\circ$  bis  $\pm 157,5^\circ$  gemessen werden.

- b) **Kugelrampe:** Die Rampe ist für Stahlkugeln mit 5 mm Durchmesser ausgelegt und beinhaltet sieben Startplätze im Abstand von jeweils 7 mm, die ein zügiges Experimentieren mit verschiedenen Stoßparametern erleichtern. In einer zusätzlichen Version der Rampe lässt sich der jeweilige Startpunkt auf drei verschiedene Höhen adjustieren, sodass die kinetische Energie der Kugeln variiert werden kann.
- c) **Streuobjekte:** Die Streuobjekte können auf die Grundplatte gesteckt werden. Die folgenden Formen wurden gestaltet: Kreiszyylinder (Durchmesser: 4 cm), Dreiecksprisma (Seitenlängen der gleichseitigen Grundfläche: 3,5 cm), 1/r Potentialhügel (maximaler Radius: 3,5 cm), Quader (Seitenlänge der quadratischen Grundfläche: 3 cm) und ein Objekt mit Substruktur (3 kleine Kreiszyylinder mit je 1 cm Durchmesser).
- d) **Deckel:** Der Deckel kann auf die Streuobjekte gesteckt werden, um sie damit zu verbergen.
- e) **Stahlkugeln:** Die Stahlkugeln (Durchmesser: 5 mm) müssen separat gekauft werden. Passende Stahlkugeln finden sich in diversen Online-Shops, insbesondere im Zusammenhang mit Kugellagern.



**Abbildung 2:** Überblick über das 3D-gedruckte Streuexperiment mit den Komponenten a) Grundplatte, b) Kugelrampe, c) verschiedene Streuobjekte und d) Deckel.

Die 3D-Druck-Komponenten wurden mit der 3D-Design Software Fusion 360 entwickelt. Für die meisten Komponenten konnte auf Kombinationen aus Standardformen zurückgegriffen werden. Nur das Design der 1/r-Potentials war etwas umständlicher. Tatsächlich besteht der Potentialhügel aus aufeinandergesetzten Kreiszyindern mit jeweils einer Höhe vom 0,2 mm, die einer Lage PLA Material entspricht, und einem Radius, der umgekehrt proportional zur Höhe schrittweise abnimmt (hier war eine Excel-Tabelle nützlich). Alle 3D-Designs dieser Komponenten sind auf Thingiverse frei verfügbar [9]. Die Designs wurden mit einem 3D-Drucker der Marke Ultimaker (Modell 2+) mit PLA Material in ca. 20 Stunden gedruckt, dabei betrug die Schichtdicke 0,2 mm und die Füllichte 20%. Nach Abschluss des jeweiligen Drucks müssen die Oberflächen nicht nachbearbeitet werden. Es kann allerdings hilfreich sein, die Grundplatte mit Sandpapier

etwas zu glätten. Sonst werden manchmal die Kugeln nicht von Streuobjekt abgelenkt, sondern von den Rillen, die durch den 3D-Druck entstehen. Alternativ eignen sich diese Rillen vorzüglich für eine Fehlerbetrachtung.

## 4. Mögliche didaktische Strukturierung

Es bieten sich verschiedene Möglichkeiten und Schwierigkeitsstufen, ein solches Streuexperiment im Unterricht einzusetzen. Der Grad der Mathematisierung kann dabei flexibel an die jeweilige Gruppe von Lernenden angepasst werden.

### 4.1 Qualitativ

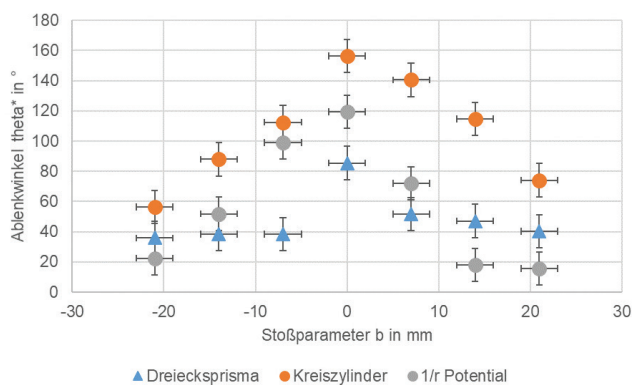
Im einfachsten Fall werden die Streumuster verschiedener Streuobjekte nur qualitativ interpretiert. Die Jugendlichen können sich ggf. die verschiedenen Streuobjekte vorher anschauen, und verstecken dann gegenseitig ein Objekt unter dem Deckel. Nachdem sie einige Kugeln gestreut haben, versuchen sie zu erraten, welches Objekt sich unter dem Deckel verbirgt. Damit lässt sich beispielsweise verdeutlichen, dass die Physik oft auf indirekte Beobachtungen angewiesen ist. Im echten Leben haben wir allerdings keine Möglichkeit, die Streuobjekte vorher anzuschauen oder den Deckel zu lüften. Hier kann man auch die Bedeutung von Modellen und die Natur der Naturwissenschaften besprechen.

Bei dieser Variante kann man auch zunächst auf den 1/r-abhängigen Potentialhügel verzichten. Erst später fügt man den Potentialhügel hinzu und kann dies zum Anlass nehmen, den Unterschied zwischen mechanischen Streuobjekten und realen Coulomb-Streupotentialen zu diskutieren.

### 4.2 Semiquantitativ

Das Experiment lässt sich erweitern, indem die Jugendlichen systematisch Daten aufnehmen und die gemessenen Streuwinkel über mehrere Messungen mitteln. Damit lassen sich die verschiedenen Streumuster in einem Diagramm vergleichen. Abbildung 3 zeigt drei Streumuster, bei denen der durchschnittliche Ablenkwinkel für zehn Messungen mit jeweils sieben Stoßparametern dargestellt ist. Als Streuobjekte dienten der Kreiszyylinder, der 1/r-abhängige Potentialhügel und das Dreiecksprisma. Als Winkel wurden hier jeweils die Zentren der Winkelintervalle aufgetragen, die mit der jeweiligen Auffangtasche gemessen werden konnten. Damit beziehen sich die Winkel jeweils auf das Zentrum des Streukörpers.

Dabei müssen für die Interpretation der Streumuster keine Formeln herangezogen werden. Stattdessen kann man argumentieren, dass der Streuwinkel beim Dreiecksprisma konstant sein sollte, da der Einfallswinkel nur vom Design der Grundfläche des Prismas und deren Ausrichtung abhängt. Dann gilt Einfallswinkel = Ausfallwinkel. Nur wenn die Kugel auf die Spitze des Prismas trifft (Stoßparameter  $b = 0$  mm), wird sie sehr stark abgelenkt.



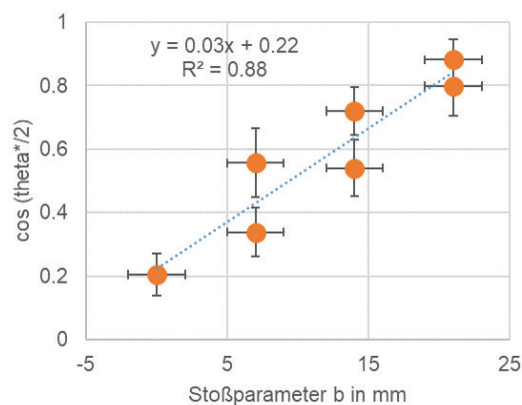
**Abbildung 3:** Messung mit drei verschiedenen Streuobjekten und jeweils zehn mal sieben Stahlkugeln. Dargestellt sind die mittleren Ablenkwinkel für die sieben verschiedenen Stoßparameter. Die Fehlerbalken spiegeln die systematischen Ablese-Unsicherheiten der Winkelabschnitte dar ( $\pm 11^\circ$  wegen der Größe der Winkeltaschen) sowie die systematische Adjustier- Ungenauigkeit der Kugelrampe relativ zum Streuobjekt (ca.  $\pm 2\text{mm}$ )

Auch beim Kreiszyylinder gilt Einfallswinkel = Ausfallswinkel, aber der Einfallswinkel hängt vom Stoßparameter ab. Je weiter entfernt vom Zentrum des Kreiszyinders eine Kugel auftrifft, desto weniger stark wird sie abgelenkt.

Beim  $1/r$ -abhängigen Potentialhügel ist die Betrachtung zunächst ähnlich zum Kreiszyylinder. Allerdings sollte es für Jugendliche verständlich sein, dass der effektive Radius des Potentialhügels etwas kleiner ist, als der maximale Radius. Deshalb ist das Streumuster etwas schmaler. Außerdem kommt die Energieabhängigkeit dazu: Kugeln mit höherer potentieller Energie am Startpunkt treffen mit höherer kinetischer Energie auf das Streuobjekt. Schnellere Kugeln rollen dabei höher auf den Potentialhügel hinauf und treffen dort effektiv auf ein „kleineres“ Streuobjekt, weil der Radius des Potentialhügels mit der Höhe abnimmt. Hier lässt sich auch die Bedeutung der Teilchenenergien in der Hochenergiephysik thematisieren: Möchte man zum Beispiel die Substrukturen von Atomkernen auflösen, dann muss das Projektil-Teilchen genug Energie besitzen, um das Coulomb-Potential des Kerns zu überwinden. Erst dann gelangt das Projektil-Teilchen in den Bereich der starken Kernkräfte.

### 4.3 Quantitativ

Das Experiment lässt sich noch weiter erweitern, indem man die theoretisch erwarteten Zusammenhänge mit den empirischen Daten vergleicht. Jugendliche können zum Beispiel überprüfen, ob sich beim Kreiszyylinder der Zusammenhang zwischen Stoßparameter und Ablenkwinkel  $b \sim \cos \frac{\theta}{2}$  ergibt. Hier stellt man nicht den Ablenkwinkel sondern den Kosinus des halben Ablenkwinkels zusammen mit dem jeweiligen Stoßparameter dar und überprüft einen linearen Zusammenhang, siehe Abbildung 4. In der Tat reichen schon zehn Messungen mit jeweils sieben Kugeln aus, um einen linearen Zusammenhang nachzuweisen.



**Abbildung 4:** Messung mit Kreiszyylinder als Streuobjekt mit zehn mal sieben Stahlkugeln. Dargestellt ist der Kosinus des halben mittleren Ablenkwinkels für den Betrag des jeweiligen Stoßparameters der sieben verschiedenen Kugelrampenpositionen. Die Fehlerbalken spiegeln die systematischen Ablese-Unsicherheiten der Winkelabschnitte dar ( $\pm 11^\circ$  wegen der Größe der Winkeltaschen) sowie die systematische Adjustier- Ungenauigkeit der Kugelrampe relativ zum Streuobjekt (ca.  $\pm 2\text{mm}$ ). Ein linearer Zusammenhang ist mit Hilfe einer Trendlinie visualisiert.

Analog kann man den  $1/r$ -abhängigen Potentialhügel untersuchen und sogar mit dem Zusammenhang für einen Heliumkern, der am Coloumb-Potential eines Atomkerns gestreut wird, vergleichen. Auch die Energieabhängigkeit der Streuung können Jugendliche quantitativ untersuchen. In jedem Fall sollte eine Fehlerbetrachtung durchgeführt werden, insbesondere um die oben erwähnten Grenzen des mechanischen Modells zu thematisieren.

Die mathematische Herleitung der theoretisch erwarteten Zusammenhänge ist für den Kreiszyylinder (analog zu [6, S. 7]) und das Dreiecksprisma einfach möglich. Zusätzlich lässt sich am  $1/r$ -abhängigen Potentialhügel Rutherfords Abschätzung einer oberen Schranke des Atomradius nachvollziehen (siehe auch hierzu [6, S. 52-53]). Auch die Hyperbelform der Kugelbahnen kann man untersuchen. Beispielsweise lassen sich mit Smartphone Apps wie Motion Shot Bahnkurven aufnehmen und visualisieren [10]. Dafür könnten interessierte Jugendliche eine Smartphone-Halterung designen und drucken, sodass das Smartphone direkt über dem Streuobjekt angebracht werden kann.

## 5. Zusammenfassung

Moderne Physik macht es Lehrpersonen nicht immer leicht, Experimente im Unterricht durchzuführen. Ziel dieses Beitrags war es, ein 3D-druckbares Modell vorzustellen, mit dessen Hilfe Jugendliche mehr über die Grundprinzipien von Streuexperimente lernen können. Mit Hilfe von 3D-Druckern wird es insbesondere leichter, einen  $1/r$ -abhängigen Potentialhügel zu drucken. Dadurch wird der Vergleich zu einem der berühmtesten Streuexperiment, dem Goldfolien-Experiment von Geiger, Marsden und Rutherford, erleichtert. Zusätzlich eröffnet der Einsatz des 3D-druckbaren Streuexperimentes als Lernendenexperiment vielfältige Möglichkeiten

mit unterschiedlichen Schwierigkeitsgraden. Falls Jugendliche selbst Zugang zu einem 3D-Drucker haben, können sie das Experiment leicht modifizieren und zum Beispiel neuartige Streuobjekte entwerfen und testen.

---

Dr. Julia Woithe *leitet seit 2014 das Teilchenphysik-Lernlabor S'Cool LAB am CERN in Genf.*

## Literatur

- [1] Povh, B., et al., Teilchen und Kerne: eine Einführung in die physikalischen Konzepte. 2013: Springer-Verlag.
- [2] Rutherford, E., LXXIX. The scattering of  $\alpha$  and  $\beta$  particles by matter and the structure of the atom. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1911. 21(125): p. 669-688.
- [3] Dorn, F. and F. Bader, Physik—Gymnasium Sek. II. 2010: Schroedel-Verlag, Hannover.
- [4] Diehl, B., R. Erb, and H. Heise, Physik Oberstufe. 2010: Cornelsen.
- [5] LD Didactic. Rutherford-Streuung: Messung der Streurate in Abhängigkeit vom Streuwinkel und von der Kernladungszahl P6.5.2.1. Available from: <https://www.leybold-shop.de/physik/versuche-sek-ii-universitaet/atom-und-kernphysik/kernphysik/rutherford-streuung/rutherford-streuung-messung-der-streureate-in-abhaengigkeit-vom-streuwinkel-und-von-der-kernladungszahl/vp6-5-2-1.html>.
- [6] Heptin, V., Demonstrationsversuch zur Rutherfordstreuung. 2013, Masterarbeit, Universität Bielefeld. <https://www.physik.uni-bielefeld.de/didaktik/Examensarbeiten/MasterarbeitHeptin.pdf>
- [7] Heptin, V. and B. Fromme, Mechanisches Modell zur Rutherfordstreuung. Praxis der Naturwissenschaften-Physik in der Schule, 2016. 65(5).
- [8] [cern.ch/scoollab](http://cern.ch/scoollab)
- [9] [www.thingiverse.com/thing:3136549](http://www.thingiverse.com/thing:3136549)
- [10] Kostenlos für Android und iOS, <http://x-application.sony.net/motionshot>