

Katharinen-Gymnasium Ingolstadt

Atommodelle

—

experimentelle und theoretische Meilensteine

Seminararbeit im Rahmen des W-Seminars
Physik: „Nobelpreisexperimente“

Jonas Höcht

Seminarleitung: StD Johann Winter

Qualifikationsphase 2014/2016

Atommodelle – experimentelle und theoretische Meilensteine

1 Die Vorstellung vom Unteilbaren – Ansätze der antiken Philosophie.....	4
2 Atommodelle in der neuzeitlichen Wissenschaft.....	5
2.1 J. Dalton: Das Atom als homogene Massenkugel.....	5
2.2 „Rosinenkuchenmodell“ nach J. J. Thomson.....	7
2.3 Das Rutherfordsche Kern-Hülle-Modell.....	8
2.3.1 Rutherfords Experiment.....	9
2.3.2 Versuche mit einer Leybold-Streukammer nach E. Rutherford.....	9
2.3.3 Schlussfolgerungen Rutherfords – Die Entdeckung des Atomkerns.....	14
2.4 Das Bohrsche Atommodell.....	15
2.4.1 Diskrete Energiezustände und Quantensprünge.....	15
2.4.2 Versuch zur Balmer-Serie des Wasserstoffs.....	17
2.4.3 Übergang zum Atommodell der Quantenphysik.....	18
3 Einblicke in die moderne wissenschaftliche Forschung.....	20
4 Zeitlosigkeit der Atomvorstellung und ihre Relevanz für die moderne Physik.....	21
5 Anhang.....	22
5.1 Graphen zum Streuversuch nach Rutherford (2.3.2).....	22
5.2 Spektrum des Wasserstoffs – Balmer-Serie (2.4.2).....	26

*„We each exist for but a short time,
and in that time explore but a small
part of the whole universe. But
humans are a curious species. We
wonder, we seek answers.”*

– STEPHEN HAWKING (*1942), britischer Physiker

[Hawking, S., Mlodinow L., The Grand Design, New York, Bantam Books, 2010, S. 5]

1 Die Vorstellung vom Unteilbaren – Ansätze der antiken Philosophie

Wir Menschen sind, wie der weltbekannte Physiker STEPHEN HAWKING in seinem Buch *The Grand Design* feststellt, eine von Natur aus „neugierige Spezies“ [(8), Hawking, S. 11]. So suchen wir – bewusst und unterbewusst – nach Antworten auf eine Vielzahl an Fragen, die unsere Existenz betreffen. Eine Frage, mit der sich die Menschen nachweislich schon seit weit über zweitausend Jahren beschäftigen, ist die Frage nach dem Aufbau der Materie.

Bereits der griechische Philosoph DEMOKRIT (460–370 v. Chr.) stellte Vermutungen darüber an, was passiere, wenn man ein beliebiges Objekt immer weiter zerteile. Seiner Ansicht nach ist dieser Prozess nur bis zu einer bestimmten Grenze fortsetzbar. Er behauptete, dass es Bestandteile der Materie geben müsse, die nicht mehr teilbar seien¹, und bezeichnete diese als *Atome* (altgr. *ἄτομος* = unteilbar). DEMOKRIT prägte mit seinen Überlegungen den von seinem Lehrer LEUKIPP von Milet erstmals angedachten *Atomismus*. [(9), Hoffmann, S. 32]

Die *ionische Schule*, zu der DEMOKRIT gezählt wird, schloss aufgrund der allgemeinen Gesetze (Prinzip der *Abstraktion*) und elementaren Prinzipien, auf die sich ihrer Ansicht nach alles zurückführen lasse (Prinzip der *Reduktion*), häufig jeglichen göttlichen Einfluss am Weltgeschehen aus. Das führte dazu, dass der Atomismus nach reichlich negativer Kritik u.a. durch EPIKUR (341–270 v. Chr.) und ARISTOTELES (384–322 v. Chr.), die von göttlichem Einfluss in der Natur bzw. von der Existenz einer Seele im Menschen überzeugt waren, wieder für viele Jahrhunderte in den Hintergrund trat. [(8), Hawking, S. 25 f.]

Die Philosophen der Antike hatten weder die Absicht, noch die Möglichkeiten, ihre Theorien durch empirische Beweisführung experimentell zu bestätigen. Die sich nach und nach entwickelnde Vorstellung von Gesetzen, denen die Natur gehorche, stieß gerade durch den Einfluss der katholischen Kirche auf starken Widerstand. Papst Johannes XXI. ging sogar soweit, Naturgesetze Ende des 13. Jahrhunderts verbieten zu lassen. [(8), Hawking, S. 28 f.]

¹ In diesem Zusammenhang ist auch häufig die Rede vom *körnigen Aufbau der Materie* [siehe z.B. (18), Schmidt, S. 203 f.].

Erst im 17. Jahrhundert wurde der Begriff *Naturgesetz* von RENÉ DESCARTES formuliert und nachhaltig geprägt. DESCARTES setzte die Ansicht durch, es gebe in der Natur Gesetzmäßigkeiten, die überall und jederzeit gültig und überprüfbar seien. Es wurde deshalb üblich, eine neu aufgestellte These zu verifizieren, indem Experimente mit genau festgehaltenen Anfangsbedingungen, Beobachtungen und Ergebnissen gemacht wurden. Nur sofern eine These sich durch wiederholte Nachprüfung im Experiment bewahrheitete, konnte sie sich als wissenschaftliche Theorie durchsetzen. Der Grundstein für naturwissenschaftlichen *Empirismus* war gelegt. [(8), Hawking, S. 29]

2 Atommodelle in der neuzeitlichen Wissenschaft

Durch diese Veränderung der naturwissenschaftlichen Denkweise wurde der Frage nach dem Aufbau der Materie in der neuzeitlichen Wissenschaft empirisch nachgegangen. Unter Anwendung von Reduktion und Abstraktion entwickelten sich *Modelle*, welche die in Experimenten gemachten Beobachtungen erklären und Voraussagen über das weitere Verhalten von Systemen erlauben sollten. Auf die Meilensteine in der Geschichte der *Atommodelle* wird im Folgenden näher eingegangen. Zum *RUTHERFORDSchen Kern-Hülle-Modell* und dem *BOHRschen Atommodell* wurden auch die jeweils bedeutsamen Experimente nachgestellt und ausgewertet, weshalb der Schwerpunkt dieser Arbeit auf diesen beiden Modellen liegt.

2.1 J. DALTON: Das Atom als homogene Massenkugel

Der Engländer JOHN DALTON (1766–1844) beschäftigte sich Zeit seines Lebens mit Meteorologie und machte mit einfachen Gerätschaften Experimente zum Druck von Gasen. Er konnte experimentell nachweisen, dass der Gesamtdruck p eines *idealen Gasgemisches* sich durch die Summe der Partialdrücke p_i der einzelnen Gase berechnen lässt (*DALTONSches Gesetz der Partialdrücke*, 1801) [(2), Chemgapedia]:

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + \dots = \sum_i p_i \quad (1-1)$$

Den Druck eines Gases erklärte er durch das Treffen von Atomen aufeinander bzw. auf die Gefäßwände und griff damit die bislang noch nicht bewiesene Atomvorstellung DEMOKRITS auf. Im Rahmen seiner Arbeit *New System of Chemical Philosophy* (1808–

1827) baute er sie zu einer wissenschaftlichen Theorie aus [vgl. (3), Chemheritage]. Es gelang ihm, ein Modell zu entwickeln, mit dem sich der Aufbau von Elementen und deren Verhalten bei chemischen Reaktionen erklären lässt [vgl. (16), Riedel, S. 2–4]:

1. Chemische Elemente bestehen aus winzigen, unteilbaren, elastischen, homogenen Massenkugeln, den Atomen². Die Eigenschaften der Atome (Masse, Volumen,...) sind für das jeweilige Element spezifisch.
2. Chemische Verbindungen entstehen durch Reaktionen von Elementen miteinander. Die Atome der jeweiligen Elemente verbinden sich hierbei in einfachen Zahlenverhältnissen.
3. Bei chemischen Reaktionen verbinden oder trennen sich Atome. Atome werden dadurch jedoch nicht zerstört und bilden sich nicht neu. Atome eines bestimmten Elements können sich nicht in Atome eines anderen Elements umwandeln.

Das 1785 von A. LAVOISIER aufgestellte *Gesetz der Massenerhaltung*, das eine Erhaltung der Gesamtmasse und der Anzahl der beteiligten Atome an einer Reaktion besagt, sowie das 1799 von J. PROUST formulierte *Gesetz der konstanten Massenverhältnisse*, welches ein konstantes Massenverhältnis der Elemente bei einer chemischen Verbindung voraussetzt, wurden von DALTONS Atomtheorie erstmals erklärt. Beide Gesetze wurden vor der Veröffentlichung von DALTONS Arbeit *New System of Chemical Philosophy* experimentell verifiziert. Durch seine eigenen Experimente konnte DALTON noch ein drittes Gesetz aufstellen: das *Gesetz der multiplen Massenverhältnisse*. Demnach stehen die Massen eines Elements, das mit einem anderen Element mehr als eine chemische Verbindung eingeht, im Verhältnis kleiner ganzer Zahlen zueinander. [(16), Riedel, S. 3]

Das Atommodell nach DALTON hat jedoch einen entscheidenden Nachteil: Zwischen den einzelnen Atomen in einem Feststoff wirken Anziehungskräfte, da Teilchen innerhalb eines Körpers ganz offensichtlich in einer bestimmten Struktur angeordnet sein können, aus der sie nur unter Energieaufwand zu entfernen sind. DALTONS Modell vermag aber nicht zu erklären, wie diese Kräfte zustande kommen.

² Der erste direkte Beweis für die kinetische Theorie der Materie und damit indirekt für die Existenz von Atomen gelang 1828 dem Botaniker ROBERT BROWN (1773–1858). Bei der Beobachtung von Pollen einer Nachtkerzenart unter dem Mikroskop entdeckte er die heute unter dem Namen *BROWNSche Bewegung* bekannte Molekularbewegung [vgl. (14), Meschede, S. 223]. JEAN PERRIN (1870–1942) erhielt für das Studium der BROWNSchen Bewegung 1926 den Physik-Nobelpreis.

2.2 „Rosinenkuchenmodell“ nach J. J. THOMSON

Das erste Modell, das eine Erklärung für das Zustandekommen *interatomarer* Kräfte liefert (nämlich durch *elektrostatische Wechselwirkungen*), ist das „Rosinenkuchenmodell“ nach THOMSON. Es wurde in Folge der Entdeckung des *Elektrons* entwickelt:

Im letzten Jahrzehnt des 19. Jahrhunderts befassten sich einige Physiker experimentell mit *Kathodenstrahlen*. Diese Strahlen lassen sich in Gasentladungsröhren oder Glühkathodenröhren beobachten, da sie durch Zusammenstöße mit Gasatomen eine Leuchtspur erzeugen [vgl. (20), Spektrum1]. Während wir heute wissen, dass Kathodenstrahlen aus freien Elektronen bestehen, die sich im elektrischen Feld bewegen und durch magnetische Felder ablenkbar sind, war vor 1890 die Natur der Kathodenstrahlen noch unbekannt und auch der Begriff *Elektron* war noch nicht weit verbreitet. [(13), LMU]

Der Engländer JOSEPH JOHN THOMSON (1856–1940) untersuchte zu dieser Zeit die Ablenkung von Kathodenstrahlen im elektrischen und magnetischen Feld. Er berechnete aus seinen Versuchsergebnissen die spezifische Ladung der Teilchen dieser Strahlung, also den Quotienten aus deren Ladung Q und deren Masse m . [(9), Hoffmann, S. 49 ff.]

THOMSON beobachtete, dass sich die Kathodenstrahlen in einem senkrecht zu ihrer Bewegungsrichtung herrschenden Magnetfeld auf einer Kreisbahn bewegen und erkannte, dass die zu seiner Zeit schon entdeckte LORENTZ-Kraft³ die Zentripetalkraft liefert, welche für die Kreisbahn verantwortlich ist:

$$F_{\text{Zentripetal}} = F_{\text{Lorentz}} \quad (2-1)$$

$$\frac{m \cdot v^2}{r} = Q \cdot v \cdot B, \quad (2-2)$$

wobei m die Masse der Teilchen, v deren Geschwindigkeit, r der Radius der Kreisbahn, Q die Ladung der Teilchen und B die Stärke des magnetischen Feldes ist. Es ergibt sich für die spezifische Ladung der Teilchen:

$$\frac{Q}{m} = \frac{v}{r \cdot B}. \quad (2-3)$$

³ Die LORENTZ-Kraft ist benannt nach HENRIK A. LORENTZ (1853–1928). LORENTZ-Kräfte treten auf, wenn ein geladener Körper sich im Magnetfeld bewegt. Die LORENTZ-Kraft ist proportional zur Geschwindigkeit des Körpers und steht senkrecht auf dieser [vgl. (14), Meschede, S. 296].

THOMSON gilt aufgrund seiner Erkenntnisse als Entdecker des Elektrons und erhielt im Jahr 1906 für seine Arbeiten den Nobelpreis für Physik. Er schloss aus seinen Versuchen, dass Elektronen nur aus den Atomen stammen könnten, ein elementarer Bestandteil dieser sind und unter bestimmten Bedingungen freigesetzt werden können. Aufgrund dieser Auffassung entwickelte er das erste Modell vom inneren Aufbau der Atome [vgl. (9), Hoffmann, S. 50]: Da Atome nach außen hin elektrisch neutral, Elektronen aber negativ geladen⁴ sind, muss ein Atom aus einer elektrisch positiven Masse bestehen, in die Elektronen nach einem regelmäßigen Muster eingebettet sind („Rosinenkuchenmodell“).

Elektrische Phänomene wie die *Ionisierung* von Atomen (Erzeugung von *Elektronenmangel* bzw. *Elektronenüberschuss*) oder elektrischer Strom („*Elektronenfluss*“) können mit THOMSONS Modell recht genau erklärt werden, nicht aber Lichterscheinungen von Gasen oder *radioaktive Strahlung*.

2.3 Das RUTHERFORDSche Kern-Hülle-Modell

Im Zuge einiger weiterer Versuche mit Kathodenstrahlen zeigten HEINRICH HERTZ (1857–1894) und PHILIPP LENARD (1862–1947), dass Atome keineswegs aus kompakter Materie bestehen, sondern vielmehr „leer wie das Weltall“ [(14), Meschede, S. 700] sind. Kathodenstrahlen können dünne Materie-Schichten, wie zum Beispiel dünne Metallfolien, ohne weiteres durchdringen.

LENARD untersuchte daraufhin die Abhängigkeit des Atomradius von der Geschwindigkeit der Elektronen und zog aus seinen *Streuversuchen* den Schluss, dass ein Atom einen kleinen, massiven Kern besitzen müsse, wobei der Rest des Atoms von Kraftfeldern positiver und negativer Ladungen erfüllt sei. Die Ladungen innerhalb eines Atoms sollten sich durch ihre Anordnung gegenseitig ausgleichen. LENARDS Schlüsse aus dem Jahr 1903 wurden später von ERNEST RUTHERFORD sowohl experimentell als auch theoretisch (→ *RUTHERFORDSche Streuformel*) bestätigt und quantitativ ausgebaut, was zur Entwicklung einer neuen Vorstellung vom Atom führte. [(4), Finkelburg, S. 15 f.]

⁴ Die präzise Bestimmung der heute als *Elementarladung* e bezeichneten Ladung des Elektrons gelang 1910 erstmals ROBERT A. MILLIKAN (1868–1953) mit dem als *MILLIKAN-Versuch* bekannten Experiment. MILLIKAN erhielt hierfür im Jahr 1923 den Nobelpreis für Physik. [(14), Meschede, S. 307 f.]

2.3.1 RUTHERFORDS Experiment

Im Rahmen seiner Forschungen zur radioaktiven Strahlung stieß der neuseeländische Physiker ERNEST RUTHERFORD (1871–1937) 1909 auf ein für ihn zunächst unglaubliches Phänomen: Als er die Streuung von *Alpha-Teilchen* an einer Goldfolie untersuchte, deren Dicke nur einige Atomradien betrug, machte er die Beobachtung, dass neben den vielen Alpha-Teilchen, die imstande waren, die Folie zu durchdringen, auch einige wenige von ihr zurückprallten.

RUTHERFORD gab später an, das Erlebnis sei für ihn fast so unglaublich gewesen, „als wenn einer eine 15-Zoll-Granate auf ein Stück Seidenpapier abgefeuert hätte und diese zurückgekommen wäre und ihn getroffen hätte“ [(5), Fischer, S. 49]. Er benötigte zwei Jahre intensiver Auseinandersetzung mit den Versuchsergebnissen, bis er 1911 die Arbeit *The Scattering of Alpha- and Beta-Particles by Matter and the Structure of Atoms* veröffentlichte und darin neue Thesen zum Aufbau der Atome aufstellte und mit den Daten aus seinem Streuversuch belegte.

2.3.2 Versuche mit einer *Leybold*-Streukammer nach E. RUTHERFORD⁵

In einer evakuierten Kammer befindet sich ein radioaktives Americium-241-Präparat, das Alpha-Strahlung auf eine 2 μm dicke Goldfolie aussendet. Die Strahlungsimpulse werden hierbei durch einen Halbleiterdetektor (*Alpha-Detektor*) registriert und als Spannungsimpulse über einen Diskriminator-Vorverstärker an ein Zählgerät weitergeleitet. Mit einer Handstoppuhr wird jeweils die Zeit Δt , die für eine bestimmte Anzahl ΔN an Impulsen benötigt wird, gemessen, um aus dem Quotienten der Anzahl der Impulse und der vergangenen Zeit die Zählrate n zu errechnen: $n = \frac{\Delta N}{\Delta t}$ ⁶.

Ablenkung von Alpha-Teilchen beim Durchgang durch eine Goldfolie (qualitativ)⁷

1. Zunächst wird die Strahlungsquelle senkrecht zur Goldfolie ausgerichtet. Die Strahlung wird durch einen 5 mm breiten Spalt auf einen bestimmten Bereich eingeschränkt (siehe Abb. 1, S. 14). Der Detektor befindet sich hierbei hinter der Folie und wird ebenfalls senkrecht zu dieser ausgerichtet.

⁵ Es wurde nach der Versuchsbeschreibung zur RUTHERFORD-Streukammer [(11), Leybold1] gearbeitet.

⁶ In der RUTHERFORDSchen Streuformel werden Zählraten $n = \frac{\Delta N}{\Delta t}$ später durch \dot{N} ersetzt werden.

⁷ Es wurden hier jeweils fünf Messungen über je eine Minute durchgeführt.

2. Wird die Goldfolie nun zur Seite geschwenkt, kann die Strahlung ungehindert zum Detektor gelangen. Die Zählrate ist entsprechend hoch (\emptyset 3588 Imp./min).
3. Wird der Alpha-Strahler um 15° gedreht, sinkt die Zählrate erheblich (\emptyset 85 Imp./min).
4. Bewegt man aber die Goldfolie in den Strahlengang hinein, steigt die Zählrate wieder an (\emptyset 573 Imp./min).

Beim Durchqueren der Goldfolie werden also einige Alpha-Teilchen von ihrer (geraden) Bahn ab- und zum Detektor hingelenkt.

Rückstreuung von Alpha-Teilchen (qualitativ)⁸

1. Detektor und Americium-241-Präparat befinden sich in diesem Versuch beide vor der Goldfolie und sind auf sie ausgerichtet (siehe Abb. 2, S. 14).
2. In dieser Konfiguration registriert der Detektor durchschnittlich 1–2 Alpha-Teilchen pro Minute (\emptyset 1,6 Imp./min).
3. Nach Entfernen der Goldfolie aus dem Strahlengang werden innerhalb einer Minute keine Impulse mehr verzeichnet.

Durch die Goldfolie werden also einige wenige Alpha-Teilchen zurück zum Detektor gestreut. Sie „prallen“ gewissermaßen an der Goldfolie ab.

Abhängigkeit der Streurrate n vom Streuwinkel ϑ bei der RUTHERFORD-Streuung (quantitativ)

1. Das Americium-241-Präparat wird senkrecht auf die Goldfolie und einen davor befestigten, 1 mm breiten Spalt ausgerichtet. Die Goldfolie ist am Mittelpunkt der Drehachse des Präparats befestigt (siehe Abb. 3, S. 14). Der Detektor ist an der Kammerinnenseite befestigt und nicht beweglich. Der Winkel ϑ gibt im Folgenden den Winkel an, um den die Strahlungsachse des Präparats relativ zur gemeinsamen Achse von Präparat und Detektor in der 0° -Stellung um die Goldfolie gedreht wurde.
2. Zunächst werden bei abgedeckter Kammer (wegen Lichtempfindlichkeit des Detektors) in 10° -Schritten von $\vartheta = -30^\circ$ bis $\vartheta = +30^\circ$ jeweils eine geeignete

⁸ Es wurden hier fünf Messungen über je eine Minute durchgeführt.

Anzahl $\Delta N > 10$ Impulse gezählt, die benötigte Zeit Δt vermerkt und daraus eine Zählrate $n(\vartheta)$ bestimmt.

3. Für $|\vartheta| > 30^\circ$ wird der 1 mm-Spalt wegen der langen Zeitintervalle Δt infolge geringer Zählraten $n(\vartheta)$ durch einen 5 mm-Spalt ersetzt. Alle Zählraten

$$n(|\vartheta| > 30^\circ) \text{ werden durch den Umrechnungsfaktor } k = \frac{n(30^\circ)_{5 \text{ mm-Spalt}}}{n(30^\circ)_{1 \text{ mm-Spalt}}} \text{ dividiert,}$$

um die Werte an die Zählraten bei Winkeln $|\vartheta| \leq 30^\circ$ anzupassen.

4. Nachdem bei einer Messreihe (06.05.2015) ein systematischer Messfehler auftrat, da die Goldfolie versehentlich asymmetrisch in der Halterung befestigt worden war, wurde die Messreihe am 13.05.2015 mit folgenden Ergebnissen wiederholt⁹:

ϑ	-60°	-50°	-40°	-30°	-20°	-10°	
$n(\vartheta)$ in Imp./s	$5,12 \cdot 10^{-4}$	$2,03 \cdot 10^{-3}$	$8,53 \cdot 10^{-3}$	$3,80 \cdot 10^{-2}$	$2,41 \cdot 10^{-1}$	$2,77 \cdot 10^0$	
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
	$2,50 \cdot 10^1$	$2,55 \cdot 10^0$	$2,36 \cdot 10^{-1}$	$3,77 \cdot 10^{-2}$	$8,72 \cdot 10^{-3}$	$2,07 \cdot 10^{-3}$	$5,08 \cdot 10^{-4}$

5. Messfehler sind bei diesem Versuch z.B. durch Fehlzählungen als Folge von Beeinflussung des Detektors durch Licht oder durch Netzstörungen, sowie durch Justierungsfehler bei Aufbau und Einstellung der Versuchsanordnung möglich.
6. In Graph 1 und Graph 2 (siehe Anhang, 5.1, S. 22/23) ist die Winkelabhängigkeit $n(\vartheta)$ bei der RUTHERFORD-Streuung jeweils halblogarithmisch im Intervall von $\vartheta = -30^\circ$ bis $\vartheta = +30^\circ$ (Graph 1) und im Intervall von $\vartheta = -60^\circ$ bis $\vartheta = +60^\circ$ (Graph 2) dargestellt.

Einen theoretischen Zusammenhang zwischen Streuwinkel ϑ und Streurate n liefert die Streuformel, die RUTHERFORD nach der quantitativen Auswertung seiner Experimente aufstellte. Die RUTHERFORDSche Streuformel wird mit dem *COULOMBSchen Gesetz* aus der

⁹ Hier wurden jeweils Durchschnittswerte aus den Daten von 3 Messungen von Δt für jeden Wert von ϑ gebildet. Die Darstellung als Zehnerpotenz mit Vorfaktor dient der einfacheren Wiedererkennung der Messwerte im halblogarithmisch dargestellten Graphen.

kinetischen Energie eines Alpha-Teilchens $E_\alpha = \frac{1}{2} m \cdot v^2$, seiner Ladung $Q_\alpha = +2e$ und der Ladung eines punktförmig gedachten Atomkerns $Q_Z = +Ze$ mit der Protonenzahl Z (die Masse des Atomkerns sei gegen die des Alpha-Teilchens groß), hergeleitet [vgl. (6), Gerlach, S. 33]¹⁰.

Da es sich nicht nur um ein Alpha-Teilchen und um einen Kern handelt, ist eine statistische Rechnung notwendig, die ein Ergebnis dafür liefert, wie sich die Alpha-Teilchen auf die verschiedenen Streuschichten verteilen. Es gilt [(22), TU Darmstadt]¹¹:

$$d\dot{N}(\vartheta) = \dot{N} \cdot \Delta x \cdot n \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{4Z^2 e^4}{(4\pi\epsilon_0)^2 \cdot 4E_\alpha^2} \cdot \frac{d\Omega}{\sin^4(\vartheta/2)} \quad (3-1)$$

„mit der Zahl \dot{N} der eingeschossenen Teilchen pro Zeiteinheit, der Zahl $d\dot{N}$ der unter einem Winkel ϑ in einen Raumwinkel $d\Omega$ pro Zeiteinheit gestreuten Teilchen, der Kernladungszahl Z , der Elementarladung e , der Dicke Δx der Streufolie, der Anzahl n der Folienatome pro Volumeneinheit, der absoluten Dielektrizitätskonstanten ϵ_0 und der Energie E_α des zu streuenden Teilchens“ [(22), TU Darmstadt, S.2].

Bemerkenswert ist die Definitionslücke der Funktion bei $\vartheta = 0^\circ$ (wegen $\sin^4(0) = 0$). Diese Definitionslücke rührt von der vergleichsweise langen Reichweite des COULOMB-Potentials¹² her. Auch Teilchen, die in großem Abstand das Streuzentrum passieren, erfahren so eine geringfügige Ablenkung [vgl. (21), Spektrum2]. Dadurch, dass im Experiment aber nicht mit einem exakt fokussierten Strahl Alpha-Teilchen gearbeitet wurde, ist bei $\vartheta = 0^\circ$ ein Maximum des Graphen erkennbar.

Aus der RUTHERFORDSchen Streuformel lässt sich eine indirekte Proportionalität zwischen der Zählrate $n(\vartheta)$ und $\sin^4(\vartheta/2)$ ablesen:

$$n(\vartheta) \propto \frac{1}{\sin^4(\vartheta/2)} \quad (3-2)$$

¹⁰ Auf eine ausführliche mathematische Herleitung [siehe z.B. (14), Meschede, S. 701 ff.; (6), Gerlach, S. 33 ff.] wird hier aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

¹¹ Sonst mit n bezeichnete Zählraten werden hier mit \dot{N} bezeichnet.

¹² Bei einer punktförmigen Ladung im Vakuum: $\phi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r} \Rightarrow \phi \propto \frac{1}{r}$ [vgl. (7), Hammer, S. 21].

Um zu prüfen, ob diese Proportionalität sich auch in den in Versuch 3 gesammelten Messdaten widerspiegelt, wird aus den (aufgrund hoher Zählraten mit vergleichsweise guter Statistik ermittelten) Messwerten für $\vartheta \leq 30^\circ$ der Proportionalitätsfaktor

$C = n \cdot \sin^4\left(\frac{\vartheta}{2}\right)$ ermittelt [vgl. (19), SchülerLabor, S. 19 f.]. In diesem Fall ergibt sich:

$$C = \frac{1,47 \cdot 10^{-4} + 2,15 \cdot 10^{-4} + 1,69 \cdot 10^{-4}}{3} \frac{\text{Imp.}}{\text{s}} = 1,77 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Imp.}}{\text{s}}. \quad (3-3)$$

Mit diesem werden für die jeweiligen Winkel durch den Zusammenhang

$$n(\vartheta) = C \cdot \frac{1}{\sin^4(\vartheta/2)} = 1,77 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\sin^4(\vartheta/2)} \frac{\text{Imp.}}{\text{s}} \quad (3-4)$$

aus der RUTHERFORDSchen Streuformel theoretische Werte für Streuraten bestimmt, die in Graph 3 und Graph 4 (siehe Anhang, 5.1, S. 24/25) halblogarithmisch aufgetragen sind¹³:

ϑ	-60°	-50°	-40°	-30°	-20°	-10°	
$n(\vartheta)$ in Imp./s	$2,83 \cdot 10^{-3}$	$5,55 \cdot 10^{-3}$	$1,29 \cdot 10^{-2}$	$3,94 \cdot 10^{-2}$	$1,94 \cdot 10^{-1}$	$3,06 \cdot 10^0$	

	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
	nicht def.	$3,06 \cdot 10^0$	$1,94 \cdot 10^{-1}$	$3,94 \cdot 10^{-2}$	$1,29 \cdot 10^{-2}$	$5,55 \cdot 10^{-3}$	$2,83 \cdot 10^{-3}$

Es ist zu bemerken, dass die gesammelten Messdaten dem funktionalen Zusammenhang aus der Streuformel nicht genau entsprechen. Vor allem für $n(|\vartheta| \geq 30^\circ)$ ist lediglich eine qualitative Ähnlichkeit der Graphen zu erkennen¹⁴. Die Übereinstimmung der Messwerte mit dem funktionalen Zusammenhang der Streuformel würde sich mit steigender Anzahl an gezählten Impulsen pro Messung wahrscheinlich erhöhen.

¹³ Die Darstellung als Zehnerpotenz mit Vorfaktor dient der einfacheren Wiedererkennung der Messwerte im halblogarithmisch dargestellten Graphen.

¹⁴ Es ist hierbei zu bedenken, dass der Verlauf des Graphen durch den Proportionalitätsfaktor C speziell auf die Werte $n(\vartheta \leq 30^\circ)$ angepasst wurde, da diese mit besserer Statistik gemessen wurden.

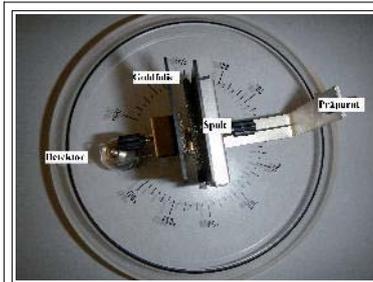
Abbildungen¹⁵

Abbildung 1:
Versuchsanordnung zur qualitativen Untersuchung der Ablenkung von Alpha-Teilchen beim Durchgang durch eine Goldfolie

[Bildquelle: eigene Aufnahme].

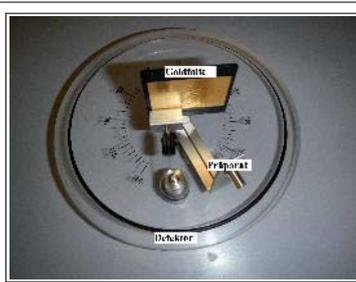


Abbildung 2:
Versuchsanordnung zum qualitativen Nachweis der Rückstreuung von Alpha-Teilchen durch eine Goldfolie

[Bildquelle: eigene Aufnahme].

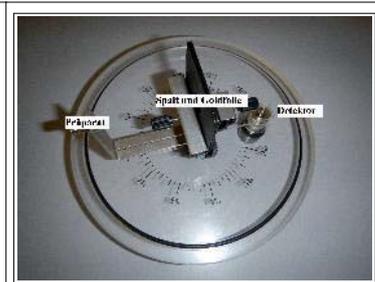


Abbildung 3:
Versuchsanordnung zur quantitativen Messung der Abhängigkeit der Streurate vom Streuwinkel bei der RUTHERFORD-Streuung

[Bildquelle: eigene Aufnahme].

2.3.3 Schlussfolgerungen RUTHERFORDS – Die Entdeckung des Atomkerns

ERNEST RUTHERFORD und seine beiden Schüler HANS GEIGER und ERNEST MARDSEN erklärten die beim Streuversuch gemachten Beobachtungen durch die Einführung eines neuen Atommodells, das heute unter dem Namen *RUTHERFORDSches Atommodell* bekannt ist. In seiner Arbeit von 1911 definiert RUTHERFORD: Ein Atom besteht „aus einer zentralen, punktförmigen konzentrierten elektrischen Ladung, die von einer gleichförmig sphärischen Ladungsverteilung des entgegengesetzten Vorzeichens und des gleichen Betrags umgeben ist“ [(5), Fischer, S.50] (→ „*Planetenmodell*“).

Im Mittelpunkt eines Atoms befindet sich demnach der vergleichsweise massereiche positiv geladene *Kern* (nach heutigen Erkenntnissen liegt sein Durchmesser in der Größenordnung von 10^{-15} m), der von der massearmen negativ geladenen *Elektronenhülle* (100 bis $400 \cdot 10^{-12}$ m, damit ca. 100.000 mal größer als der Kern) umgeben ist. Der Hauptteil des Atomvolumens wird von leerem Raum ausgefüllt. [(23), UNI TERRA]

Mit Hilfe dieses Modells lassen sich alle Beobachtungen aus dem Streuversuch erklären: Die meisten Alpha-Teilchen durchqueren die Atome aufgrund ihrer geringen Größe, einige Teilchen werden durch die Wechselwirkung mit den positiv geladenen Atomkernen um einige Grad abgelenkt. Wenige Alpha-Teilchen prallen mit Goldatomkernen zusammen und werden reflektiert.

¹⁵ Die Abbildungen zeigen jeweils die Versuchsanordnung innerhalb der evakuierten Kammer.

Das Auftreten von *Emissions-Linienspektren* konnte RUTHERFORD mit seinem Atommodell jedoch genauso wenig erklären wie die Stabilität der Atome trotz nah beieinander liegender entgegengesetzter Ladungen.

2.4 Das Bohrsche Atommodell

Die negativ geladene Elektronenhülle und der positiv geladene Atomkern ziehen sich nach dem COULOMB-Gesetz an [(7), Hammer, S.21]:

$$F_{el} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1 \cdot Q_2|}{r^2}. \quad (4-1)$$

NIELS BOHR (1885–1962) postulierte, dass sich Elektronen in Atomen auf bestimmten stabilen (Kreis-)Bahnen um den Kern bewegen. Durch die kinetische Energie der Elektronen wird die Kreisbahn aufrecht erhalten, was dazu führt, dass sie nicht in den Kern „stürzen“.

2.4.1 Diskrete Energiezustände und Quantensprünge

BOHR leitete die Eigenschaften der erlaubten Elektronenbahnen mit Hilfe der *Quantentheorie* von MAX PLANCK (1858–1947) und der *Lichtquantenhypothese* von ALBERT EINSTEIN (1879–1955) her¹⁶ (*BOHRsche Postulate*):

1. „Ein Elektron kann sich nur auf bestimmten Bahnen um den Atomkern bewegen (den sog. Quantenbahnen) [...]. Diese Bahnen durchläuft das Elektron strahlungsfrei (verlustfrei). Jeder Quantenbahn entspricht eine bestimmte Energiestufe, d. h. auf jeder möglichen Bahn hat das Elektron eine bestimmte Gesamtenergie“ [(9), Hoffmann, S. 59].

Diese *diskreten* Energiestufen (auch *Energieniveaus* genannt) werden mit E_n bezeichnet, wobei man den Index n ($n \in \mathbb{N}$) *Hauptquantenzahl* nennt.

¹⁶ PLANCK fand im Jahr 1900 bei seinen Überlegungen zur *Schwarzkörperstrahlung* heraus, dass die von einem Körper in Form von Licht emittierte Energie (genauer: das Produkt aus Energie und Zeit, die sog. *Wirkung* [vgl. (5), Fischer, S. 24]) *quantisiert* ist. Die Energie eines *Lichtquants* ist das Produkt aus der Lichtfrequenz f und der *PLANCK-Konstante* h [vgl. (17), Scharf, S. 47].

ALBERT EINSTEIN erklärte 1905 (*annus mirabilis*) den *photoelektrischen Effekt* durch die Aufstellung der *Lichtquantenhypothese*, welche die *Quantentheorie des Lichts* in das physikalische Weltbild als notwendige Ergänzung miteinbezieht (*Welle-Teilchen-Dualismus*) [vgl. (5), Fischer, S. 68 ff.]. EINSTEIN erhielt für seine Erklärung des photoelektrischen Effekts im Jahr 1922 den Nobelpreis für Physik 1921.

Hierbei repräsentiert das Energieniveau E_1 den größten negativen¹⁷ Energiewert (nahe am Kern). Die Energie eines weit vom Kern entfernten Elektrons geht gegen 0.

2. „ E_n, E_k seien Energiestufen mit $n > k$ und $n, k = 1, 2, 3, \dots$ [...]. Ein Elektron kann von k nach n springen, wenn es die Energie $E_n - E_k$ aufgenommen hat. Umgekehrt wird es beim Übergang von E_n auf die kernnähere Stufe E_k die aufgenommene Energie als elektromagnetischer Wellenzug (Photon) wieder abgeben“ [(9), Hoffmann, S. 60] (*Quantensprünge*, siehe Abb. 4, rechts).

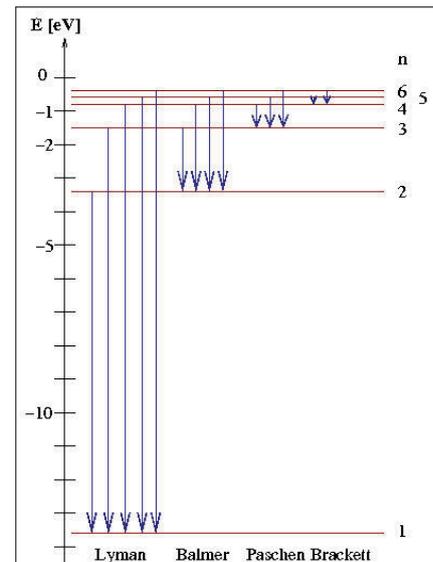


Abbildung 4: Mögliche Übergänge zwischen Energieniveaus im Wasserstoffatom

[Bildquelle: <http://www.peterjunglas.de/fh/vorlesungen/physik2/imagenes/bild16.png>].

Mit seinen Postulaten konnte BOHR die von J. J. BALMER 1885 empirisch aufgestellte Formel (*BALMER-Formel*)

$$f_n = R \cdot \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n: 3, 4, 5, \dots \quad (4-2)$$

erklären, welche die Frequenzen des von angeregtem atomarem Wasserstoff emittierten (sichtbaren) Lichts exakt vorhersagt. R ist die sog. *RYDBERG-Frequenz*¹⁸ mit einem Wert von rund $3,2899 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}$ [vgl. (12), Leybold2, S. 1].

¹⁷ Die potentielle Energie ist hier als Bindungsenergie zwischen Elektronen und Kern definiert. Der Energie-Nullpunkt liegt deshalb bei den getrennt vorliegenden Bindungspartnern, weswegen die Energiewerte E_n hier negativ sind [vgl. (4), Finkelburg, S. 70].

¹⁸ Die RYDBERG-Frequenz ist das Produkt aus der Lichtgeschwindigkeit c und der RYDBERG-Konstante R_∞ [vgl. (14), Meschede, S. 734; (4), Finkelburg, S. 70–73]. Die RYDBERG-Konstante ist eine vom schwedischen Physiker JOHANNES RYDBERG (1854–1919) eingeführte *sekundäre Naturkonstante*, d.h. sie setzt sich aus anderen, fundamentalen Größen zusammen. Aufgrund der umfassenden Untersuchungen zum Wasserstoffatom ist sie die am genauesten bekannte physikalische Konstante (Stand: 2005). Der Index ∞ weist darauf hin, dass die Konstante nur für unendlich schwere Atomkerne gilt und für Atomkerne mit endlicher Masse entsprechend abgeändert werden muss. [(14), Meschede, S. 734]

2.4.2 Versuch zur *BALMER-Serie* des Wasserstoffs¹⁹

Im Folgenden sollen die Wellenlängen des von einer *BALMER-Lampe*²⁰ emittierten sichtbaren Lichts experimentell bestimmt werden (zum Versuchsaufbau siehe Abb. 5, S. 18). Durch ein *optisches Gitter* (*ROWLAND-Gitter*; Gitterkonstante $g = 600 \text{ mm}^{-1}$) wird das Licht in einzelne *Spektrallinien* „aufgebrochen“, da das Licht je nach Frequenz unterschiedlich stark gebeugt wird. Die Wellenlängen des Lichts dreier dieser Linien liegen im sichtbaren Spektralbereich. Sie gehören der *BALMER-Serie* an (siehe Abb. 4, S. 16).

Die Wellenlängen bzw. Frequenzen lassen sich in der ersten Beugungsordnung wie folgt berechnen:

$$\lambda = \frac{1}{g} \cdot \sin \vartheta = \frac{1}{g} \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}} ; f = \frac{c}{\lambda} = c \cdot g \cdot \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{b}, \quad (4-3)$$

wobei g die Gitterkonstante, ϑ der Beobachtungswinkel, b der (mittlere) Abstand zwischen der zu beobachtenden Linie und der 0-ten Beugungsordnung, a der Abstand zwischen optischem Gitter und Ende des Schirms und $c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [vgl. (7), Hammer, S. 42] die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist.

Im Experiment am 15.10.2015 ergaben sich mit $a = 101 \text{ mm}$ folgende Werte (vgl. Anhang, 5.2, S. 26):

Farbe	Linie	n	$\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}$	$\frac{b}{10^{-3} \text{ m}}$	$\frac{\lambda}{10^{-9} \text{ m}}$	$\frac{f}{10^{12} \text{ Hz}}$
rot	H _{α}	3	0,1389	435	659	455
türkis	H _{β}	4	0,1875	315	496	604
blau	H _{γ}	5	0,2100	275	438	685

Trägt man die Frequenzen des Lichts gegen $\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}$ auf, so liegen die entstehenden Punkte auf einer Ursprungsgerade mit der Steigung $3,21 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1} \approx R$ (siehe Anhang, 5.2, S. 26). Die gemessenen Frequenzen der *BALMER-Serie* des Wasserstoffs stimmen also sehr gut mit der der *BALMER-Formel* überein. Durch das *BOHRSCHE* Atommodell wird die Frequenz des emittierten Lichts über den Zusammenhang $E_n - E_k = h \cdot f$ erklärt.

¹⁹ Es wurde nach der Versuchsbeschreibung zur *BALMER-Serie* [(12), Leybold2] gearbeitet.

²⁰ In einer *BALMER-Lampe* werden durch elektrische Entladung Wassermoleküle (H₂O) in angeregten atomaren Wasserstoff (H_{nasc.}) und eine Hydroxy-Gruppe (OH) aufgespalten [vgl. (12), Leybold2, S.1].

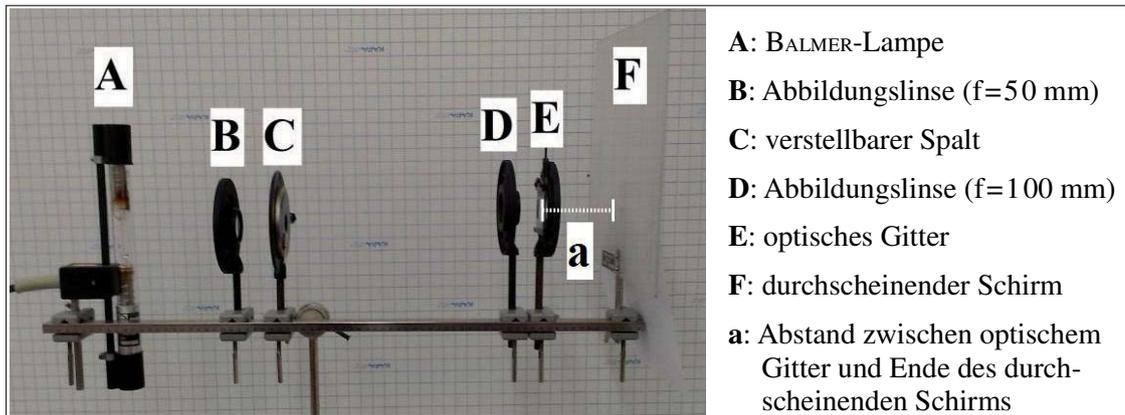


Abbildung 5: Versuchsaufbau zur BALMER-Serie des Wasserstoffs

[Bildquelle: eigene Aufnahme].

2.4.3 Übergang zum Atommodell der Quantenphysik

Versucht man aber, das BOHRsche Atommodell auf Atome mit mehr als einem Elektron (z.B. Helium) anzuwenden, stellt man fest, dass die von BOHR vorhergesagten Frequenzen des Emissionsspektrums nicht mit denen übereinstimmen, die experimentell zu messen sind [vgl. (24), Universität Ulm]. ARNOLD SOMMERFELD (1868–1951) entwickelte das Modell BOHRs durch die Einführung zusätzlicher Quantenzahlen zur Beschreibung der Zustände der Elektronen daraufhin weiter [vgl. (5), Fischer, S. 36].

WOLFGANG PAULI (1900–1958) führte 1924 unter Berufung auf die von OTTO STERN (1888–1969) und WALTHER GERLACH (1889–1979) in ihrem heute als *STERN-GERLACH-Versuch* bekannten Experiment gemachten Beobachtungen eine vierte Quantenzahl ein und formulierte ein Jahr später das nach ihm benannte *PAULI-Ausschlussprinzip*, nach dem sich Elektronen immer in mindestens einer Quantenzahl unterscheiden müssen. Er erhielt hierfür im Jahr 1945 den Physik-Nobelpreis. [(17), Scharf, S. 70 f.]

1926 leitete WERNER HEISENBERG (1901–1976) aus der Quantentheorie die *Unbestimmtheitsrelation* her, welche die für das BOHRsche Atommodell grundlegende Annahme widerlegt, mit dem Bahnradius eines Elektrons wäre auch dessen Geschwindigkeit exakt bekannt. Die darauf begründete *Quantenmechanik* wurde von den meisten Physikern zunächst als „zu abstrakt“ [(17), Scharf, S. 71] abgelehnt. [(5), Fischer, S. 171 ff.]

Unter anderem ausgehend von den Erkenntnissen von LOUIS DE BROGLIE (1892–1987), der in seiner Doktorarbeit 1924 postulierte, dass jedem Materieteilchen eine *Materiewelle* mit der Wellenlänge

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m \cdot v} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{m \cdot v} \quad (4-4)$$

zugeordnet werden kann²¹ (Nobelpreis für Physik 1929) [vgl. (5), Fischer, S. 146 ff.], stellte ERWIN SCHRÖDINGER die heute nach ihm benannte Differentialgleichung zur Beschreibung des Zustandes von Elektronen im Atom auf (hier: *zeitunabhängige SCHRÖDINGER-Gleichung*²²) [(1), Atkins, S. 303]:

$$\hat{H} \psi = E \psi. \quad (4-5)$$

\hat{H} ist der sog. HAMILTON-Operator, ψ die von den drei Ortskoordinaten x , y und z abhängige, eindeutige, stetige und normierbare Zustandsfunktion des betreffenden Elektrons, deren Betragsquadrat $|\psi|^2$ anschaulich die Aufenthaltswahrscheinlichkeitsdichte²³ für dieses Elektron in einem Volumenelement angibt, E ist die Energie des Elektrons. Werden an die Zustandsfunktion ψ spezielle Randbedingungen gestellt, ergeben sich bestimmte, diskrete Energiewerte (*Eigenwerte*) mit dazugehörigen *Eigenfunktionen*²⁴. [(15), Reinhold, S. 20 ff.]

Über die Wellenfunktion ψ und deren Betragsquadrat können im Atom Bereiche definiert werden, in denen sich einzelne Elektronen mit hoher Wahrscheinlichkeit aufhalten. Diese Vorstellung ist Grundlage des *Orbitalmodells* (siehe Abb. 6, rechts), das heute trotz seiner geringen Anschaulichkeit allgemein anerkannt und verwendet wird.

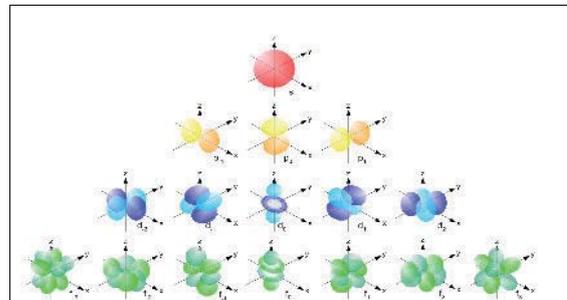


Abbildung 6: Atomorbitale

[Bildquelle:

http://cmapspublic2.ihmc.us/rid=1KZYVGS6R-1QT1NG2-1D2P/Single_electron_orbitals.jpg].

²¹ Die Annahme der *Dualität der Materie* ist gewissermaßen als Umkehrschluss zum 1905 von EINSTEIN begründeten Welle-Teilchen-Dualismus zu verstehen.

²² SCHRÖDINGER erhielt für seine Beiträge zur Atomtheorie 1933 den Nobelpreis für Physik. Auf die Herleitung der SCHRÖDINGER-Gleichung [siehe z.B. (15), Reinhold, S. 20 ff.] wird hier verzichtet.

²³ Dies geht auf die *statistische Interpretation der Quantenmechanik* nach MAX BORN (1882–1970) zurück [vgl. (5), Fischer, S. 94ff.].

²⁴ Zur Erklärung dieses Prinzips wird häufig die Modellvorstellung des *Teilchens im eindimensionalen Potentialekasten mit unendlich hohen Wänden* verwendet [siehe z.B. (15), Reinhold, S. 24 ff.].

3 Einblicke in die moderne wissenschaftliche Forschung

Nach der Einführung des Atommodells der Quantenmechanik war die Erforschung der Atome jedoch noch lange nicht abgeschlossen. Am Ende des 20. Jahrhunderts wurde nach einer langen Serie von neuen Erkenntnissen und Modellen zum Atomkern und den verschiedenen Elementarteilchen das sog. *Standardmodell der Elementarteilchenphysik* vervollständigt. Bis zu diesem Zeitpunkt hatte man herausgefunden, dass der Atomkern seinerseits aus *Protonen* und *Neutronen* (den sog. *Nukleonen*) besteht, die ihrerseits wieder aus *Quarks*²⁵ aufgebaut sind und durch *Kernkräfte* zusammengehalten werden. Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik, das die *elektroschwache Theorie* und die *Quantenchromodynamik (QCD)* beinhaltet, beschreibt die Wechselwirkung zwischen Elementarteilchen und vereinheitlicht *elektroschwache Wechselwirkung* und *starke Wechselwirkung*, zwei der physikalischen Grundkräfte, in einer mathematischen Theorie [vgl. (17), Scharf, S. 175 ff.]. Von einem Atommodell im ursprünglichen Sinne kann hier nicht mehr gesprochen werden.

Aktuell versuchen Physiker, auch noch die *Gravitationstheorie* EINSTEINS mit der Quantentheorie zu vereinigen. Ein möglicher Ansatz hierfür ist die *Superstringtheorie*, die von der Vorstellung winziger „Fäden“ (engl. *strings*) ausgeht, die in unterschiedlichen Modi schwingen. Jeder Modus steht für ein bestimmtes Elementarteilchen. Obwohl die Stringtheorie noch nicht experimentell bestätigt ist, lässt ihre mathematische Symmetrie sie überaus „attraktiv“ erscheinen. [(10), Kaku, S. 244 f.]

Wie viele seiner Kollegen träumt auch STEPHEN HAWKING von einer *Theorie von Allem*, die alle physikalischen Grundkräfte in sich vereint und den Aufbau der Materie erklärt. Er sieht die sog. *M-Theorie*, eine fundamentale supersymmetrische Gravitationstheorie als einzigen Kandidat hierfür an. [(8), Hawking, S. 177]

²⁵ Den Namen Quarks entnahm MURRAY GELL-MANN (*1929), der oft als „Schöpfer der Quarks“ bezeichnet wird, einem Wortspiel aus dem Roman *Finnegans Wake* von James Joyce, in dem es heißt: „Three quarks for Muster Mark“. Proton und Neutron sind jeweils aus drei Quarks aufgebaut, weshalb GELL-MANN für die Bestandteile der Nukleonen diesen Namen wählte. GELL-MANN erhielt für seine Beiträge zur Elementarteilchenphysik 1969 den Physik-Nobelpreis. [(5), Fischer, S. 310 f.]

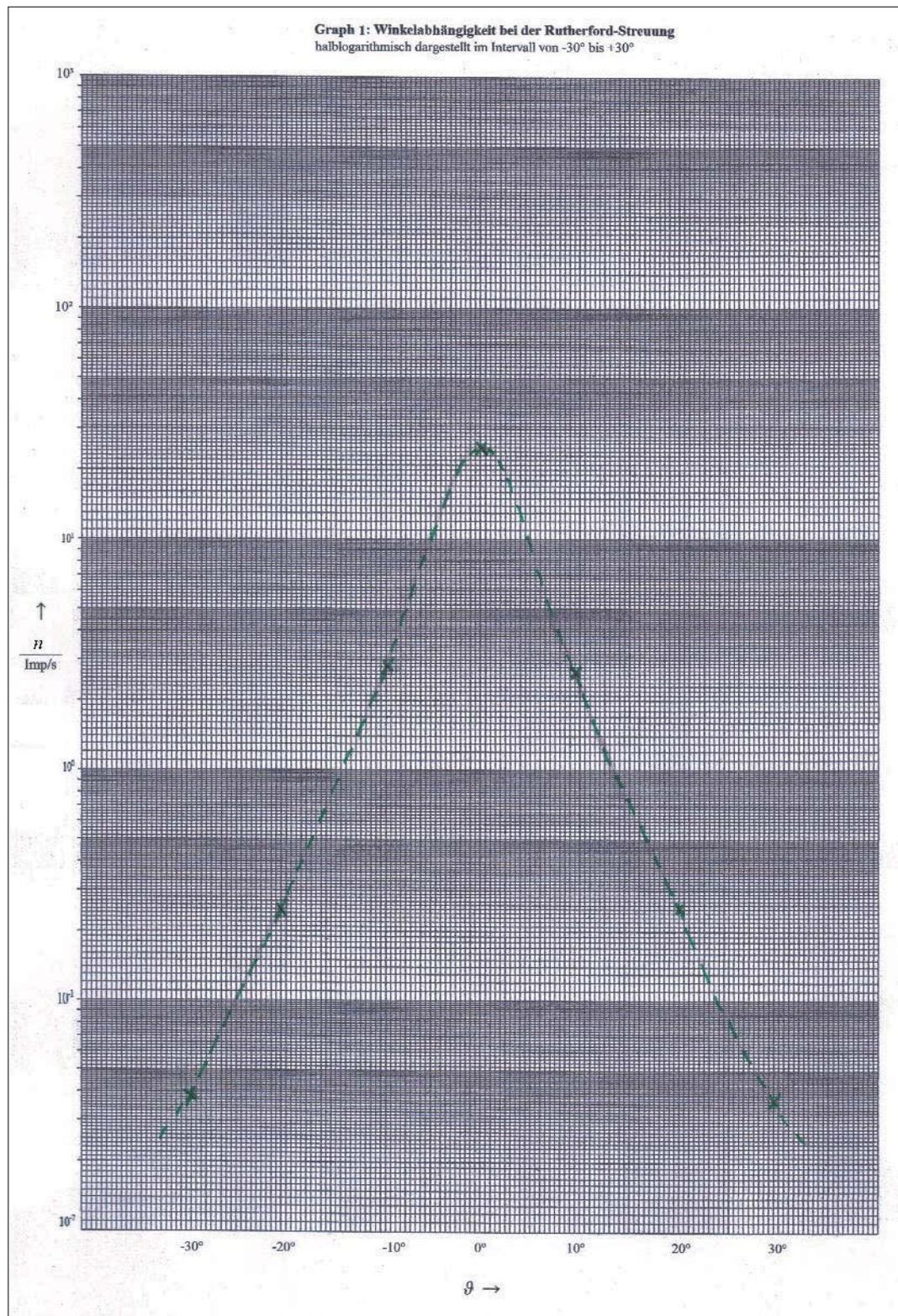
4 Zeitlosigkeit der Atomvorstellung und ihre Relevanz für die moderne Physik

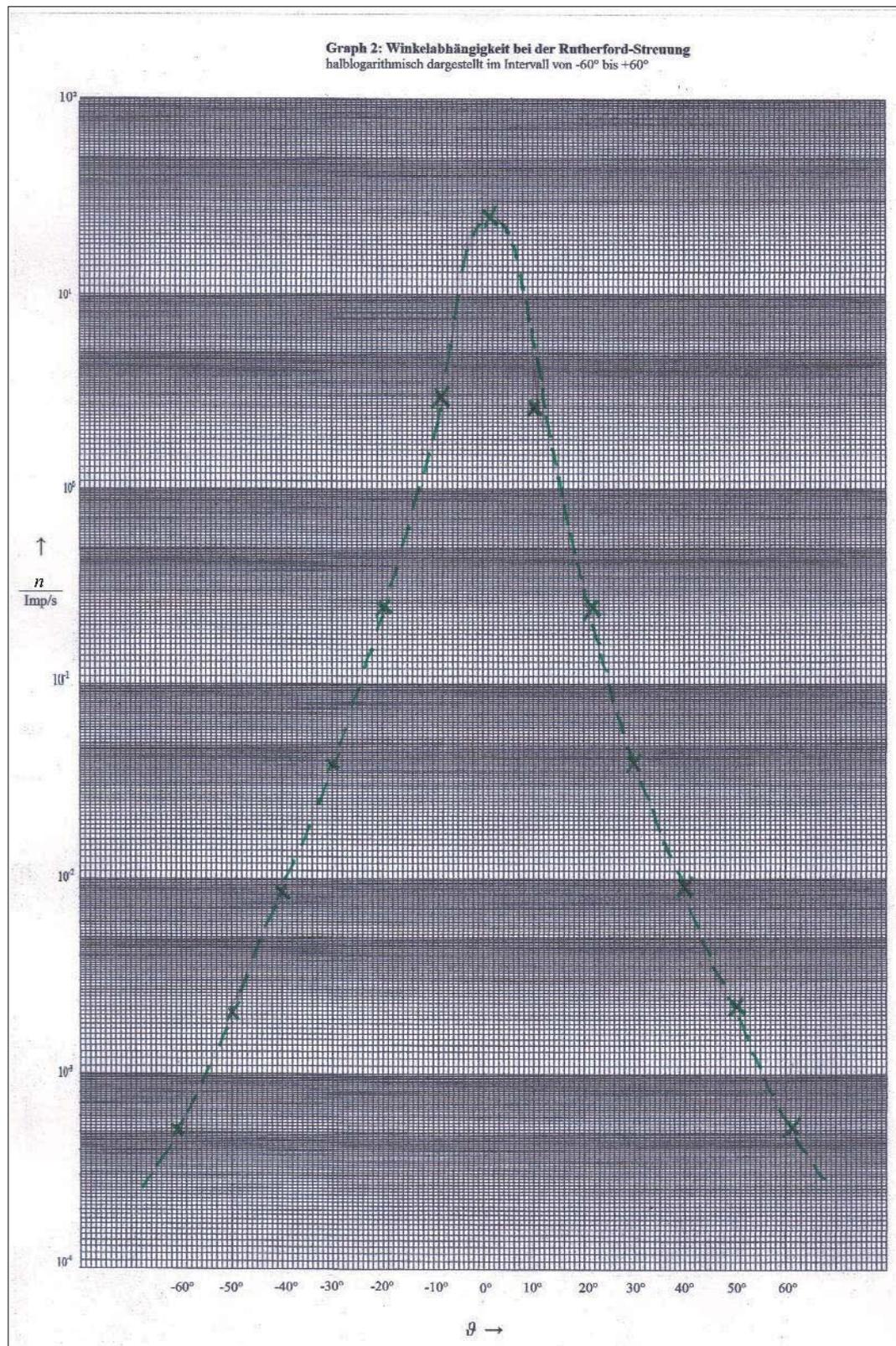
In Zeiten der modernen Physik ist die Vorstellung vom Unteilbaren so aktuell wie nie zuvor: Die Physik sucht nach einer fundamentalen Theorie zur Beschreibung des Aufbaus der Materie und des Universums, nach etwas Zentralem, etwas Unteilbarem, auf das alles zurückzuführen ist. Ob die in der Superstringtheorie postulierten Strings im Sinne von DEMOKRITS *ἄτομος* tatsächlich unteilbar sind, bleibt fraglich.

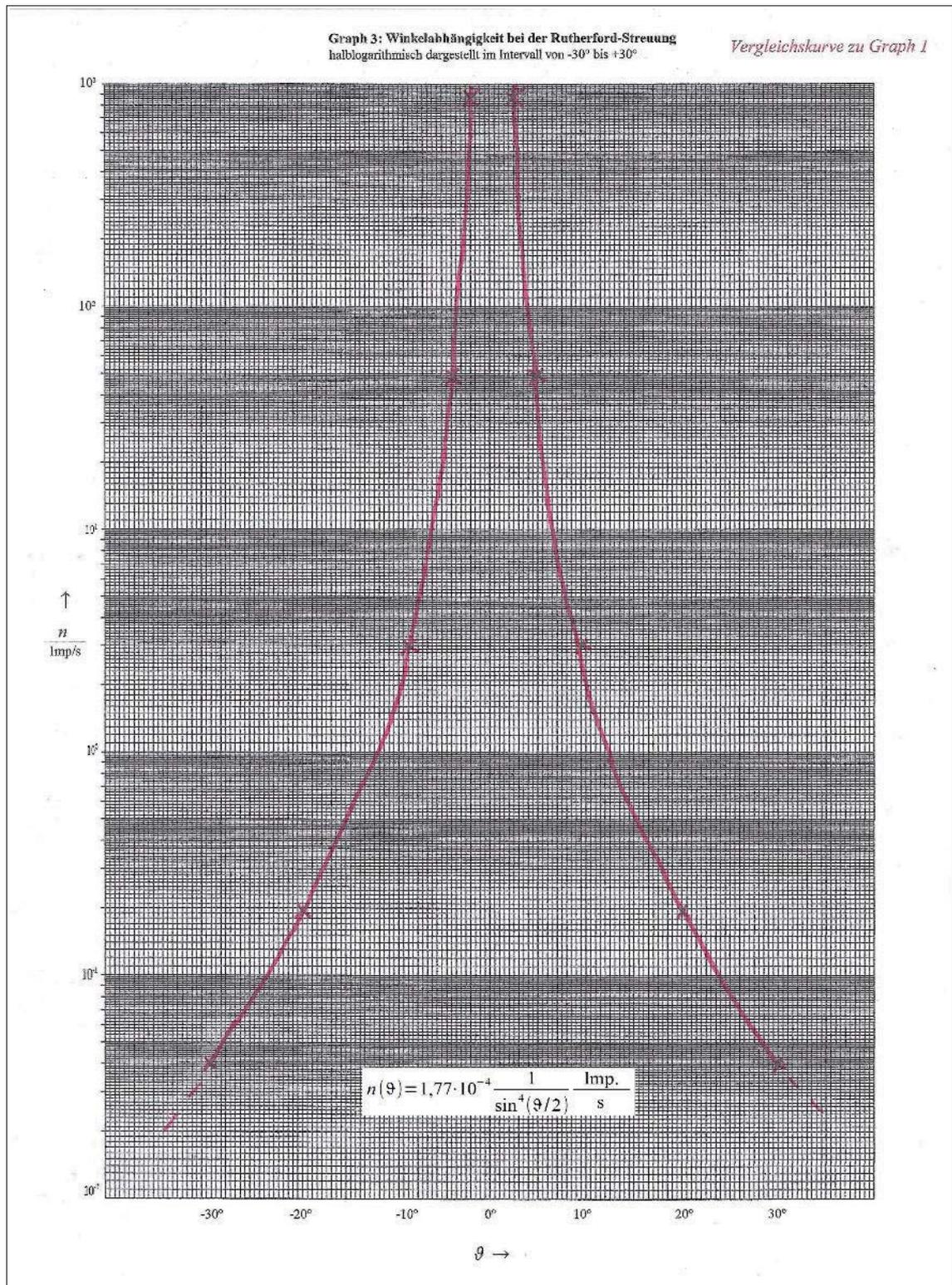
Sicher ist jedoch – und das macht die Geschichte der Atommodelle besonders deutlich: Bei all diesen Ansätzen handelt es sich um Modelle, um Sinnbilder zur Beschreibung einer für uns Menschen nicht voll fassbaren Wirklichkeit. Wir können die Modelle immer weiter optimieren, immer weiter Fragen stellen und nach Antworten suchen. Das Ziel, die Wirklichkeit zu erklären, wird aber immer bestehen bleiben und nie vollständig erreicht werden, denn jedes Modell – so gut es auch sein mag – hat seine Grenzen.

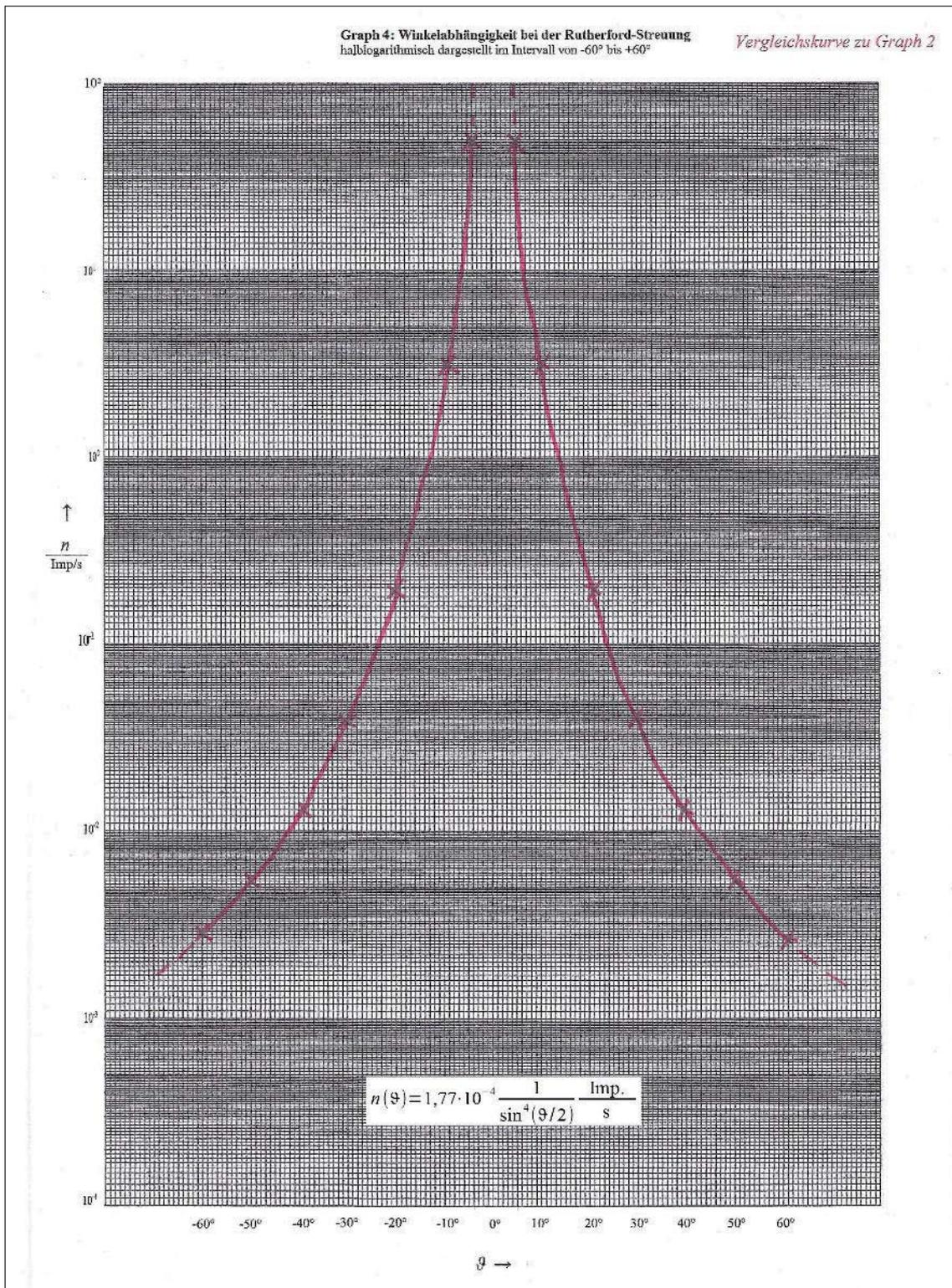
5 Anhang

5.1 Graphen zum Streuversuch nach RUTHERFORD (2.3.2)









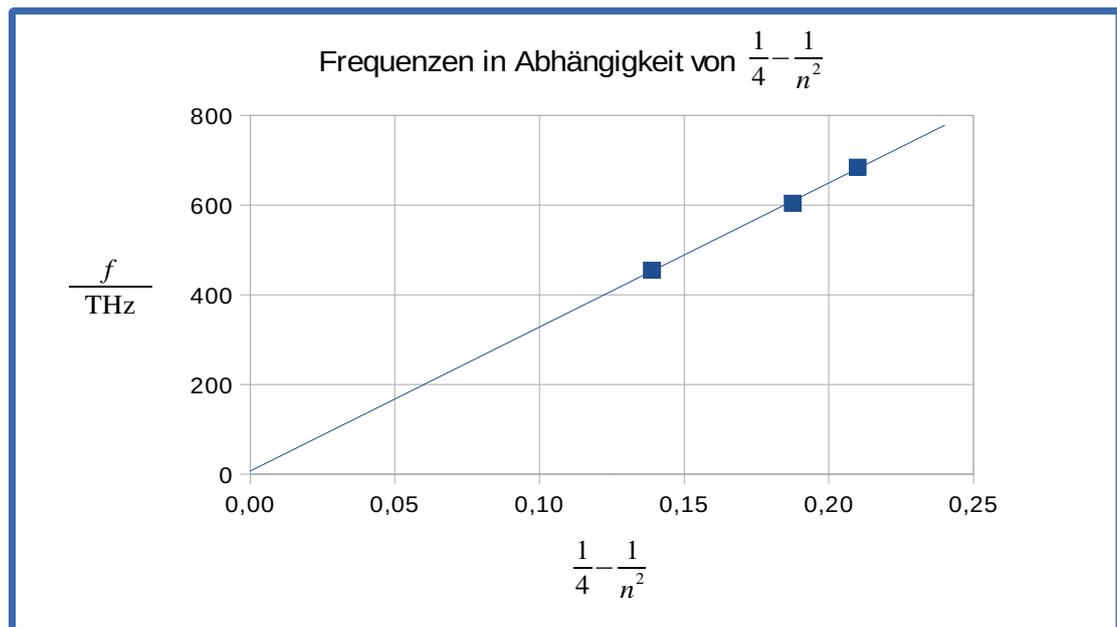
5.2 Spektrum des Wasserstoffs – BALMER-Serie (2.4.2)

Spektrum des Wasserstoffs – Balmer-Serie

Gitterkonstante g :	600,00 mm ⁻¹
Gitterabstand a :	101,00 mm
Lichtgeschwindigkeit c :	299792458,00 m·s ⁻¹

Farbe	Linie	n	$b(\text{rechts})$ in 10 ⁻³ m	$b(\text{links})$ in 10 ⁻³ m	$b(\varnothing)$ in m
rot	H _α	3	43	44	0,0435
türkis	H _β	4	31	32	0,0315
blau	H _γ	5	28	27	0,0275

Farbe	Linie	n	$1/4 - 1/n^2$	λ in 10 ⁻⁹ m	f in 10 ¹² Hz
rot	H _α	3	0,1389	659	455
türkis	H _β	4	0,1875	496	604
blau	H _γ	5	0,2100	438	685



Steigung des Graphen:	$3,21 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}$	Relativer Fehler:	2,43%
Rydberg-Frequenz R :	$3,29 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}$		

Literaturverzeichnis

- (1) Atkins, Peter W., de Paula, Julio, Physikalisch Chemie, o.O., WILEY-VCH Verlag, 5. Auflage, 2013;
- (2) Chemgapedia: Das Partialdruckgesetz von DALTON –
http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/13/vlu/thermodyn/einfuehrung/ideales_gas.vlu/Page/vsc/de/ch/13/pc/thermodyn/einfuehrung/partialdruck.vscml.html (02.11.2015);
- (3) Chemical Heritage Foundation: JOHN DALTON –
<http://www.chemheritage.org/discover/online-resources/chemistry-in-history/themes/the-path-to-the-periodic-table/dalton.aspx> (02.11.2015);
- (4) Finkelburg, W., Einführung in die Atomphysik, Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer-Verlag, 9. und 10. ergänzte und neubearbeitete Auflage, 1964;
- (5) Fischer, E. P., Die Hintertreppe zum Quantensprung, Frankfurt am Main, S. Fischer Verlag GmbH, 2012;
- (6) Gerlach, W. (Hrsg.), Das Fischer Lexikon Physik, Frankfurt am Main, Fischer Bücherei, 1960;
- (7) Hammer, H., Hammer, C., Formeln und Tabellen aus Physik, Chemie, Mathematik, München, J. Lindauer Verlag, 2. Fassung, 1. Auflage, 2013;
- (8) Hawking, S., Mlodinow L., Der große Entwurf, Reinbek bei Hamburg, Rowohlt Taschenbuch Verlag, 2011;
- (9) Hoffmann, M., Gärtner, H. et al., Chemie – Formeln, Gesetze und Fachbegriffe, München, Compact Verlag GmbH, 2010;
- (10) Kaku, Michio, Die Physik der unsichtbaren Dimensionen, Reinbek bei Hamburg, Rowohlt Taschenbuch Verlag, 2013;
- (11) Leybold Didactic GmbH, Gebrauchsanweisung 55956/54/52 mit Versuchsbeschreibung – Streukammer nach RUTHERFORD, 12/1988;
- (12) Leybold Didactic, Handblätter Physik: Atom und Kernphysik – BALMER-Serie des Wasserstoff – http://www.ld-didactic.de/literatur/hb/d/p6/p6211_d.pdf (02.11.2015)²⁶;

²⁶ In Quelle (12), Leybold2, S. 1 wird die RYDBERG-Frequenz als RYDBERG-Konstante R_∞ bezeichnet. Dies widerspricht der Definition in den Quellen (14), Meschede, S. 734 und (4), Finkelburg, S. 70–73. Aufgrund der Quellenlage wurde die weiter verbreitete Definition nach (14), Meschede, S. 734 gewählt und somit die RYDBERG-Frequenz R als Produkt der RYDBERG-Konstante R_∞ und der Lichtgeschwindigkeit c angesehen (siehe S. 16).

- (13) LMU München – Didaktik: Auf der Suche nach der spezifischen Ladung von Elektronen – <http://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/elektronenbahnen/b-feld/e-m-bestimmung/historie.php> (02.11.2015);
- (14) Meschede, D. (Hrsg.), Gerthsen Physik, Berlin/Heidelberg, Springer Verlag, 23. Auflage, 2006;
- (15) Reinhold, J., Quantentheorie der Moleküle, Wiesbaden, Springer Fachmedien, 4. Auflage, 2013;
- (16) Riedel, E., Meyer, H.-J., Allgemeine und Anorganische Chemie, Berlin/Boston, Walter de Gruyter GmbH, 10. Auflage, 2010;
- (17) Scharf, R., Ausgezeichnete Physik, Regensburg, Verlag Bückle&Böhm, 2., erweiterte und korrigierte Auflage, 2014;
- (18) Schmidt, E. A., Eine Studie zum dynamischen Atomismus der Antike mit einem Beitrag von Hans Günter Dosch: Spontaneität in der Atomphysik des 20. Jahrhunderts, Heidelberg, Universitätsverlag Winter GmbH, 2007;
- (19) SchülerLabor: RUTHERFORD-Streuversuch – <https://www-alt.gsi.de/documents/DOC-2007-Feb-53-1.pdf> (02.11.2015);
- (20) Spektrum – Lexikon der Physik: Kathodenstrahlen – <http://www.spektrum.de/lexikon/physik/kathodenstrahlen/7832> (02.11.2015);
- (21) Spektrum – Lexikon der Physik: RUTHERFORDSche Streuformel – <http://www.spektrum.de/lexikon/physik/rutherfordische-streuformel/12656> (02.11.2015);
- (22) Technische Universität Darmstadt: K8 – Physikalisches Grundpraktikum Abteilung Kernphysik – RUTHERFORD-Streuung, 02/2015 – http://www.physik.tu-darmstadt.de/media/fachbereich_physik/phys_studium/phys_studium_bachelor/phys_studium_bsc_praktika/phys_studium_bsc_praktika_gp/phys_studium_bsc_praktika_gp_kernphysik/k8/k8neu.pdf (02.11.2015);
- (23) UNI TERRA – Kindler & Glied GbR Germany, Berlin: Atommodelle – RUTHERFORDSches Atommodell – <http://www.unitererra.de/rutherford/kap009.htm> (02.11.2015);
- (24) Universität Ulm: Quantenchemie – BOHRsches Atommodell – http://www.uni-ulm.de/fileadmin/website_uni_ulm/nawi.inst.251/Didactics/quantenchemie/html/bohrAtom.html (02.11.2015);