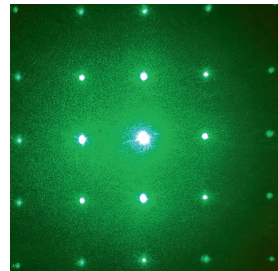


1 Elektronen

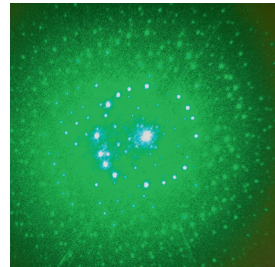
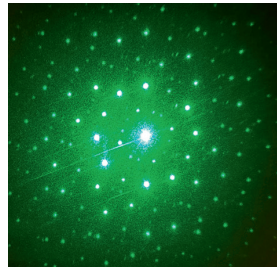
Versuche und Materialien zu Kapitel 1.1

► M1 Einstieg: Experimente mit Kreuzgittern

In der 12. Klasse haben Sie Interferenzexperimente durchgeführt, bei denen Licht durch nicht nur zwei Spalte, sondern durch sehr viele Spalte lief – ein (optisches) Gitter. Während solche Bauteile wegen der kleinen Abstände der Linien früher sehr schwierig herzustellen waren, sind sie heute sehr preiswert zu beschaffen. Grund ist, dass die Linien nicht mehr in Glas geritzt werden müssen, sondern dass große Kunststofffolien mit der entsprechenden Struktur direkt produziert werden können. Eine Variante solcher Gitter stellen Folien mit Kreuzgittern dar. Bei ihnen sind zwei Gitterstrukturen eingeprägt, die gegeneinander um 90° gedreht sind. Die nebenstehende Abbildung zeigt das Bild eines Laserstrahls nach dem Durchgang durch ein solches Kreuzgitter. Man erkennt die typische Intensitätsverteilung eines Interferenzbildes, allerdings nun eben in zwei senkrecht aufeinander stehenden Richtungen.



Lässt man den Laserstrahl nicht nur durch ein Kreuzgitter, sondern durch mehrere, gegeneinander verdrehte Kreuzgitter laufen, so beobachtet man Schirmbilder wie in den folgenden beiden Abbildungen:



Arbeitsauftrag

- a) Wenn Sie Zugang zu einer Serie von Kreuzgittern haben, testen Sie selbst, wie sich das Bild eines Laserpointers auf dem Beobachtungsschirm bei sukzessivem Hinzufügen von neuen, gedrehten Kreuzgittern ändert. Achten Sie dabei auf die Sicherheitsbestimmungen im Umgang mit Laserpointern!

Tipp: Kreuzgitter finden sich oft auch als Geschenkartikel oder auf Weihnachtsmärkten.

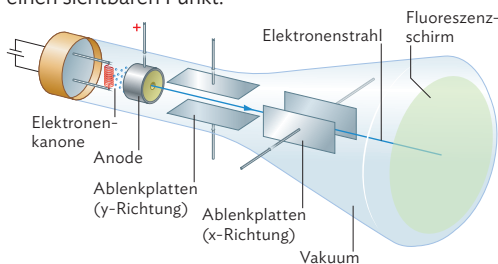
- b) Geben Sie jeweils die Anzahl von Kreuzgittern an, die für die Abbildungen oben verwendet wurden.
- c) Beschreiben und skizzieren Sie das Bild auf dem Beobachtungsschirm, das Sie bei sehr vielen, gegeneinander gedrehten Kreuzgittern erwarten.



► M2 Lernaufgabe: Elektronenbeugungsröhre

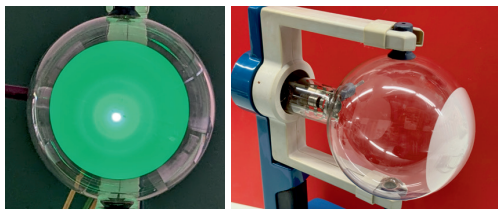
Elektronen-Ablenkröhre

Bisher haben Sie Elektronen als Bausteine von Atomen kennengelernt, sowie ihr Verhalten als geladene Teilchen in elektrischen und magnetischen Feldern untersucht. Ein typisches Bauteil dafür ist die Elektronen-Ablenkröhre, wie sie z. B. in einem Oszilloskop eingesetzt wird und wie sie auch (etwas abgewandelt) in früheren Röhrenfernsehern verwendet wurde. Der Elektronenstrahl wird hier durch die elektrischen Felder der beiden Plattenpaare abgelenkt und erzeugt beim Auftreffen auf den Leuchtschirm an dieser Stelle einen sichtbaren Punkt.



Elektronenbeugungsröhre

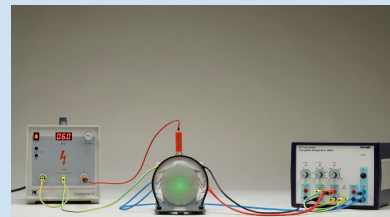
Bei einer Variante dieser Röhre, der Elektronenbeugungsröhre, wird ebenfalls ein Elektronenstrahl erzeugt. Dieser wird dann aber nicht mithilfe von Ablenkplatten gezielt abgelenkt, sondern durch eine dünne Graphitschicht geschossen. Auf dem Leuchtschirm ist auch hier wieder ein heller Punkt in der Mitte sichtbar. Zusätzlich sind, im Gegensatz zur Elektronen-Ablenkröhre, jedoch noch weitere helle Bereiche auf dem Schirm vorhanden, die sich kreisförmig um die Mitte anordnen.



Dieses Experiment wurde zuerst 1928 vom britischen Physiker Sir George Paget Thomson durchgeführt, wofür er im Jahr 1937 den Nobelpreis erhielt. Es führte (zusammen mit anderen ähnlichen Versuchen) dazu, dass sich unsere Vorstellung vom Objekt „Elektron“ drastisch wandelte.

Arbeitsauftrag

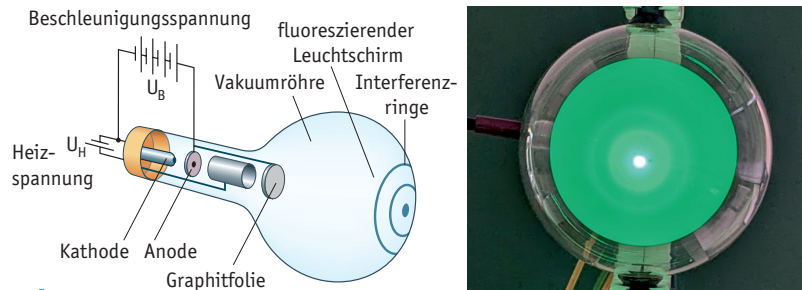
- Vergleichen Sie den Aufbau der beiden Röhren, und schließen Sie daraus auf das Bauteil, das für das unerwartete Schirmbild der zweiten Röhre verantwortlich ist.
- Der Mediacode führt auf ein interaktives Bildschirmexperiment zur Elektronenbeugungsröhre. Machen Sie sich mit dem Aufbau vertraut und verändern Sie die Hochspannung, mit der die Elektronen beschleunigt werden. Beschreiben Sie die Änderungen des Schirmbilds.



- Sammeln Sie zur Interpretation des Schirmbilds Situationen in der Physik, in denen Sie bereits ähnliche Beobachtungen wie bei diesem Experiment gemacht haben. Beschreiben Sie genau die Voraussetzungen, die dabei vorgelegen haben müssen.
- Formulieren Sie Hypothesen (vgl. Methode S. 216), die das Aussehen des Schirmbilds erklären könnten. Orientieren Sie sich dabei an den Situationen aus c) und beachten Sie dabei auch die Beschreibungen und die Schirmbilder von Kreuzgittern aus M1.
- Um zu genaueren Erkenntnissen zu gelangen, müssen die Hypothesen überprüfbar sein. Dazu dienen in der Physik weitere Experimente. Geben Sie Experimente an, die Sie bereits in der Schule kennengelernt haben und die zu einer der Hypothesen aus d) passen. Beschreiben Sie Abänderungen in deren Versuchsaufbau, sodass sie mit Elektronen durchgeführt werden könnten.

Schirmbild einer Elektronenbeugungsröhre

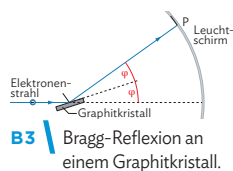
Eine Elektronenbeugungsröhre ist vom Aufbau sehr ähnlich wie eine Elektronen-Ablenkröhre (vgl. B1): Elektronen werden aus einer Glühkathode gelöst und dann mithilfe eines elektrischen Feldes beschleunigt. Bei der Beugungsröhre treffen die Elektronen dann auf eine dünne Folie, die aus kleinen Kristallen (z. B. aus Graphit) besteht. Auf dem fluoreszierenden Leuchtschirm dahinter zeigt sich ein Bild mit konzentrischen hellen und dunklen Ringen, vgl. B1 und M2. Die Intensität und die Lage der einzelnen Ringe kann mithilfe der Beschleunigungsspannung beeinflusst werden.



B1 Aufbau und ringförmiges Muster der Elektronenbeugungsröhre.

Das Ringmuster ist zunächst verwunderlich – schließlich sollten die Elektronen von der Graphitfolie in alle möglichen Richtungen abgelenkt werden können. Die Kristalle in der Folie wirken sicherlich auch nicht wie eine Art Spiegel, bei dem nur bestimmte Reflexionswinkel auftreten, denn in der Folie befinden sich sehr viele Einzelkristalle, die willkürlich in allen möglichen Richtungen orientiert sind.

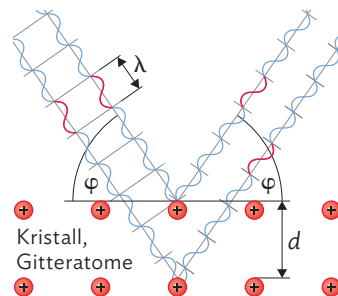
Nachdem also die Analogie zu Lichtstrahlen nicht hilfreich ist, um das Schirmbild zu erklären, lässt sich an einen Vergleich mit Lichtwellen denken. Denn genauso wie optische Gitter bestehen Kristalle aus regelmäßig angeordneten Strukturen; man spricht deshalb auch von einem Kristallgitter. Allerdings ist ein solches Kristallgitter eine dreidimensionale Struktur, an der Interferenzen auf eine besondere Art und Weise zustande kommen.



B3 Bragg-Reflexion an einem Graphitkristall.

Exkurs: Bragg-Reflexion

Wellen können in einen Kristall eindringen, zumindest in die obersten Schichten. Dabei tritt an jedem Gitteratom Beugung auf; das Atom wirkt also als Ausgangspunkt einer Elementarwelle. In der Situation von B2 können sich somit die beiden eingezeichneten Wellenzüge überlagern. Sie werden an verschiedenen Ebenen reflektiert und legen unterschiedlich lange Wege zurück. Der Wegunterschied hängt nach den Gesetzen der Trigonometrie vom Einfallswinkel φ ab. Ein Interferenzmaximum entsteht, wenn die reflektierten Wellenzüge Wegunterschied zwischen ihnen ein Vielfaches ganz bestimmten Einfallswinkeln φ der Fall.

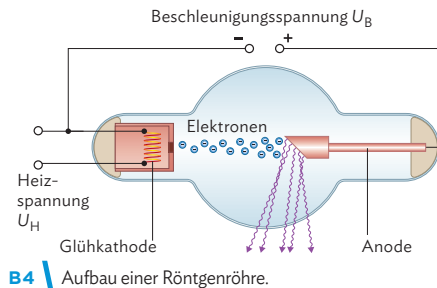


B2 | Schematische Darstellung der Bragg-Reflexion.

entsteht, wenn die reflektierten Wellenzüge sich in gleicher Phase befinden, also der Wegunterschied zwischen ihnen ein Vielfaches der Wellenlänge beträgt. Das ist nur bei ganz bestimmten Einfallswinkeln φ der Fall.

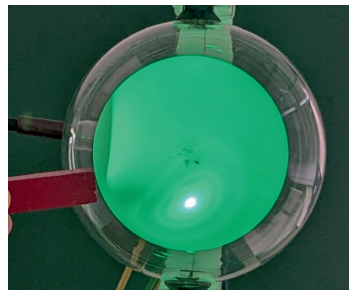
Art der Wellen

Die bisherigen Überlegungen machen plausibel, dass am Zustandekommen des Schirmbilds Wellenphänomene beteiligt sind. Es ist aber noch nicht klar, von welcher Art diese Wellen sind. Man könnte nämlich an Experimente denken, die Sie in der 12. Klasse mit einer Röntgenröhre ausgeführt haben. Auch ihr Aufbau weist starke Ähnlichkeiten mit der Elektronenbeugungsröhre auf (vgl. B4): Elektronen werden durch eine Hochspannung beschleunigt und treffen auf die Metalloberfläche der Anode. Dort werden die Elektronen abgebremst und geben Energie ab, die in Form von Röntgenstrahlung ausgesendet wird.



Eine Hypothese zur Interpretation des Schirmbilds in B1 könnte also lauten: An der Oberfläche der Graphitschicht entsteht eine elektromagnetische Welle, die dann beim weiteren Durchlaufen des Graphits am Kristallgitter gebeugt wird und interferiert.

Dies lässt sich leicht mithilfe eines Magneten widerlegen, der an die Röhre gehalten wird: Durch sein Magnetfeld wirkt auf bewegte Elektronen eine Lorentzkraft, wodurch sie auf ihrer Bahn abgelenkt werden. Auf elektromagnetische Wellen hat das Magnetfeld aber keinen Einfluss. Das Experiment zeigt: Das Bild aus den Ringen auf dem Schirm der Elektronenbeugungsröhre wird durch Anwesenheit eines Magneten verzerrt, das Muster aus hellen und dunklen Zonen bleibt aber bestehen (vgl. B5). Die Hypothese muss also verworfen werden: Für das Zustandekommen des Schirmbilds sind nur Elektronen verantwortlich, keine elektromagnetischen Wellen.



B5 Durch Magnetfeld verzerrtes Bild.

Interpretation der Versuchsergebnisse

Die experimentellen Ergebnisse und Überlegungen legen nahe, dass Elektronen in der Beugungsröhre Wellencharakter zeigen, sich jedoch grundlegend von elektromagnetischen Wellen unterscheiden. Auch gibt es Bereiche, in denen Elektronen keinen Wellencharakter zeigen, sondern sich wie klassische Teilchen verhalten, z.B. bei der Beschleunigung im elektrischen Längsfeld. Fasst man all diese Aspekte zusammen, kann man vorerst folgende Hypothese formulieren:

Eigenschaften von Elektronen lassen sich bei bestimmten Versuchen mit dem Wellenmodell interpretieren.

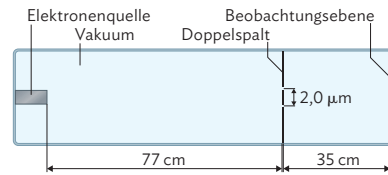
Um diese getroffene Hypothese zu untermauern, zu präzisieren oder doch noch zu widerlegen und zu verwerfen, sind natürlich weitere Experimente nötig. Dabei ist es möglich, bekannte Experimente auf ihren Einklang mit der Hypothese zu untersuchen oder neue Experimente auf Basis der Hypothese zu entwerfen.

1.1 Versuche mit der Elektronenbeugungsröhre

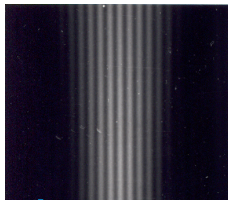
Versuch von Jönsson (1960)

Um die vermutete Welleneigenschaft der Elektronen weiter zu untersuchen, bieten sich Experimente an, die ähnlich zu den Experimenten der Wellenoptik aufgebaut sind.

Das Naheliegendste wäre, die Entstehung eines Interferenzmusters beim Durchgang eines Elektronenstrahls durch einen Doppelspalt zu untersuchen – schließlich konnte mit einem solchen Experiment mithilfe von Laserlicht bzw. Mikrowellenstrahlung in Klasse 12 die Welleneigenschaft elektromagnetischer Strahlung gezeigt werden. Dieser Versuch ist von der Idee her eigentlich ziemlich simpel; er gelang aber erst im Jahr 1960 durch Claus Jönsson, während das Doppelspaltexperiment mit Licht schon wesentlich früher durchgeführt werden konnte. Das Problem liegt in den benötigten Abmessungen: Erst zur Zeit von Jönssons Experiment war es möglich, geeignete Spalte (500 nm Öffnung im Abstand von 2000 nm) herzustellen. Das entstehende Bild in der Beobachtungsebene kann zudem auch nur mit ausreichender Vergrößerung erkannt werden (vgl. B7; hier 1000-fach).



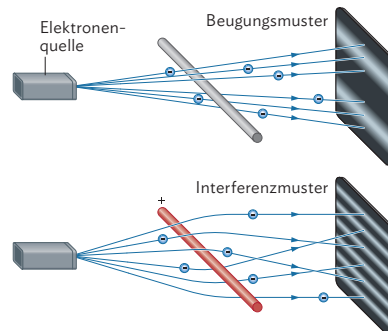
B6 Aufbau des Doppelspaltversuchs von Jönsson.



B7 Interferenzstreifen beim Doppelspaltversuch mit Elektronen.

Versuch von Möllenstedt und Düker (1955)

Beim Versuch von Gottfried Möllenstedt und Heinrich Düker wurde ein Elektronenstrahl aus einer nahezu punktförmigen Quelle auf einen dünnen, vergoldeten Quarzfaden mit Durchmesser $d = 2 \mu\text{m}$ gelenkt und dahinter das Beugungsmuster auf einem Schirm betrachtet. Im mittleren Teil ist ein dunkler Bereich, weil die Elektronen hier auf den Faden treffen – so wie auch ein Objekt, das von Licht angestrahlt wird, einen Schatten wirft. An der Grenze dieses „Schattens“ des Fadens lassen sich die von den Lichtwellen bekannten Beugungsmuster erkennen (vgl. B8 oben).



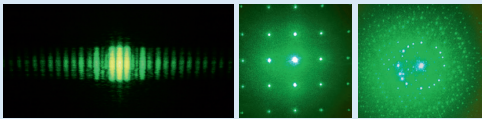
B8 Versuch von Möllenstedt und Düker.

Lädt man den Faden nun elektrisch positiv auf, so werden die Elektronen durch das elektrische Feld zum Faden hin abgelenkt und es kommt hinter dem Faden zu einer Zone, in die Elektronen von beiden Seiten des Fadens gelangen – sie werden also in den Bereich des „Schattens“ hinter dem Quarzfaden gelenkt. In diesem Bereich treten nun Interferenzerscheinungen auf (vgl. B8 unten).

Bei jedem einzelnen der vorgestellten Versuche lassen sich Details im Versuchsaufbau kritisieren und gegen die zu testende Hypothese verwenden. Ein Versuch alleine reicht also noch nicht zum Nachweis des Wellencharakters von Elektronen aus. Zusammen aber führen diese und weitere Versuche dazu, dass die Hypothese heute als gesichert gilt: Elektronen zeigen unter bestimmten Versuchsbedingungen – insbesondere bei ihrer Ausbreitung – Wellencharakter. Diese Eigenschaft ist direkt auf die Elektronen selbst zurückzuführen und entsteht nicht etwa, weil die Elektronen in irgendeiner Form elektromagnetische Strahlung erzeugen.

Musteraufgabe

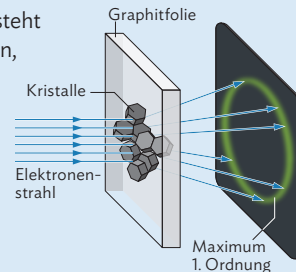
Beim Doppelspaltversuch mit Elektronen erhalten Sie ein Streifenmuster auf dem Schirm, in Analogie zum Bild eines Lasers hinter einem optischen Gitter. Bringt man jedoch zwei (wie bei einem Kreuzgitter) oder mehrere jeweils um einen bestimmten Winkel versetzte Gitter an, entstehen die dargestellten Interferenzbilder.



Erklären Sie mithilfe dieses Experiments und in Analogie zur optischen Interferenz das Schirmbild einer Elektronenbeugungsröhre.

Lösung

Die Graphitfolie besteht aus kleinen Kristallen, von denen jeweils mehrere gleichzeitig vom Elektronenstrahl getroffen werden. Es treten deshalb Gangunterschiede zwischen Teilstrahlen auf, die zu Maxima der Intensität auf dem Beobachtungsschirm führen. Weil die Anordnung rotations-symmetrisch ist, müssen auch die Maxima auf Kreislinien liegen.



Arbeitsaufträge

- 1 a) Beschreiben Sie den Aufbau einer Elektronenbeugungsröhre.
 - b) Variieren Sie in der Simulation im Mediencode den Abstand zwischen Folie und Schirm und beschreiben Sie die Veränderungen des Schirmbildes. Ziehen Sie eine Parallele zu entsprechenden Versuchen in der Wellenoptik.
 - c) Formulieren Sie einen qualitativen Zusammenhang zwischen der Beschleunigungsspannung der Röhre und dem Radius der Ringe.
 - d) Die Parallele zur Wellenoptik legt nahe, dass sich auch hier den Elektronen eine Wellenlänge zuordnen lässt. Stellen Sie eine physikalisch begründete, qualitative Vermutung für den Zusammenhang zwischen der Wellenlänge der Elektronen und dem Radius der Ringe (und damit der Beschleunigungsspannung) auf. Überprüfen Sie die Vermutung mithilfe der Simulation, Sie können sich die Wellenlänge dort anzeigen lassen.
- 2 Ein Kritiker an der Interpretation des Wellencharakters von Elektronen erwidert Jönsson: „Die Elektronen laufen nicht nur durch die Spalte hindurch, sondern sie können auch auf den Rand der Spalte treffen und dabei ihre Bewegungsrichtung ändern.“
 - a) Begründen Sie, ob dieses Argument stichhaltig ist.
 - b) Nehmen Sie an, dass der Kritiker mit seiner Behauptung Recht hätte. Beurteilen Sie die Konsequenzen, die das dann für die Interpretation hät-

te, dass Elektronen in manchen Situationen Wellencharakter zeigen.

- 3 a) Begründen Sie, dass sich Versuche wie der von Jönsson nur im Vakuum durchführen lassen. Beschreiben Sie dazu die Auswirkungen, die Fremdatome auf das Interferenzmuster hätten.
- b) Die Elektronenquellen in B6 und B8 bestehen im Wesentlichen aus ausgedehnten Glühwendeln. Erstellen Sie eine Skizze mit den Interferenzmustern, die von zwei Elektronen an entgegengesetzten Rändern der Glühwende stammen. Beschreiben Sie das Schirmbild, das sich aus der Überlagerung dieser beiden Muster ergibt.
- c) Für Elektronen gilt (vgl. Kap. 1.3): Je größer ihre Geschwindigkeit ist, desto kleiner ist ihre zugeordnete Wellenlänge. Begründen Sie, dass Elektronen, die die Elektronenquelle verlassen, stets unterschiedliche Geschwindigkeiten besitzen.
- d) Erklären Sie, dass die Geschwindigkeitsunterschiede aus c) bei kleinen Elektronengeschwindigkeiten stärkere Auswirkungen auf das beobachtbare Schirmbild haben.
- e) Formulieren Sie aus den Erkenntnissen, die Sie in den Aufgaben a) bis d) gewonnen haben, Anforderungen an den experimentellen Aufbau eines entsprechenden Experiments. Gehen Sie dabei auch auf die geeignete Dimensionierung des Spaltabstands ein.

weitere passende Aufgaben:
S. 50, Nr. 2



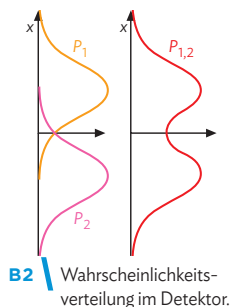
1.2 Simulation des Doppelspaltexperiments

Simulation des Doppelspaltversuchs

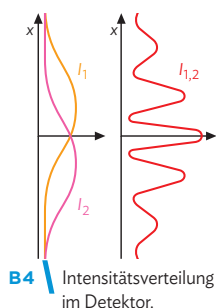
Im vorherigen Abschnitt haben Sie festgestellt, dass Elektronen nicht immer ein Verhalten zeigen, dass mit dem bisherigen Teilchenbild vereinbar ist. Es gibt auch Versuchsbedingungen, die nur mit Vorstellungen aus dem Bereich der Wellen interpretierbar sind. Um diese unterschiedlichen Zugänge besser verstehen zu können, soll nun das Doppelspaltexperiment mit Elektronen genauer betrachtet werden. Es lässt sich tatsächlich im Labor durchführen (vgl. S. 16), allerdings nur mit großem Aufwand, der an der Schule nicht möglich ist. Deshalb werden wir ein Simulationsexperiment betrachten, das auch noch weitere Einstellungen zulässt.

Doppelspaltversuch mit klassischen Teilchen

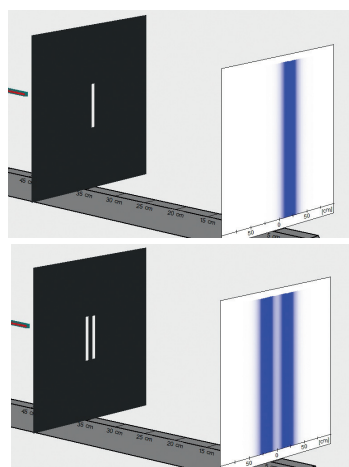
Die Breite der Öffnungen muss geringfügig größer sein als der Durchmesser der Kugeln.



Die Breite der Öffnungen muss deutlich kleiner sein als die Wellenlänge der einfallenden Welle.



Zunächst soll das Verhalten von Teilchen (in Form von festen Kugeln) untersucht werden, die in zufällige Richtungen auf die beiden Spalte abgefeuert werden. Die Teilchenquelle steht dabei genau mittig, so dass im Mittel gleich viele Kugeln auf den ersten und auf den zweiten Spalt treffen. Nach dem Durchgang wird der Auftreffort der Kugeln auf einem Beobachtungsschirm registriert. Je nachdem, ob nur Spalt 1 offen ist oder nur Spalt 2, erhält man nach Durchgang vieler Teilchen ein Schirmbild wie im oberen Teil von B1. Im unteren Teil ist das Schirmbild gezeigt, wenn beide Spalte geöffnet sind: Es ergibt sich einfach als Summe der beiden Schirmbilder der einzelnen Spalte.

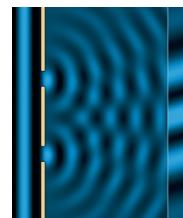


B1 Doppelspaltversuch mit Teilchen.

Etwas genauer wird dieser Zusammenhang in B2 dargestellt. Hier sind die Wahrscheinlichkeiten $P(x)$ zum Auftreffen der Kugeln in Abhängigkeit vom Auftreffort x auf dem Schirm angetragen, wieder bei Durchlässigkeit nur eines Spaltes (P_1 bzw. P_2) und bei Durchlässigkeit von beiden Spalten ($P_{1,2}$). Offensichtlich gilt $P_{1,2}(x) = P_1(x) + P_2(x)$; die resultierende Verteilungskurve $P_{1,2}$ ist die Summe der beiden Verteilungen P_1 und P_2 .

Doppelspaltversuch mit klassischen Wellen

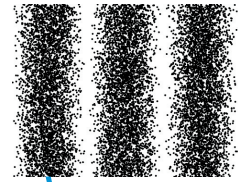
Der Doppelspaltversuch mit Wasserwellen aus Klasse 11 ist in B3 dargestellt. Ist nur einer der beiden Spalte offen, so geht von ihm eine Elementarwelle aus, die auf dem gesamten Beobachtungsschirm registriert werden kann. Wenn jedoch beide Spalte geöffnet sind, so entsteht ein Interferenzmuster, bei dem an bestimmten Stellen überhaupt keine Intensität mehr nachgewiesen werden kann. B4 zeigt die Intensitätsverteilung in Abhängigkeit vom Auftreffort x auf dem Schirm, wieder bei Durchlässigkeit nur eines Spaltes (I_1 bzw. I_2) und bei Durchlässigkeit von beiden Spalten ($I_{1,2}$). Hier dürfen die Einzelintensitäten nicht einfach addiert werden: $I_{1,2}(x) \neq I_1(x) + I_2(x)$.



B3 Doppelspaltversuch mit Wellen.

Doppelspaltversuch mit Elektronen

Mit den bisherigen Vorstellungen von Elektronen als Teilchen (Bausteine der Atomhülle), die z. B. in einem elektrischen Feld beschleunigt werden können, würde man beim Doppelspaltversuch mit Elektronen auf dem Schirm ein Bild erwarten, das dem der Kugeln in B1 entspricht. Ist nur einer der beiden Spalte geöffnet, entspricht das Ergebnis tatsächlich dieser Erwartung. Bei beiden geöffneten Spalten erhält man jedoch ein eindeutiges Interferenzmuster (vgl. B6). Es unterscheidet sich jedoch von dem z. B. der Wasserwellen aus B3: Bei sehr starker Vergrößerung zeigen die Interferenzstreifen eine „Körnung“ (vgl. B5), die darauf hinweist, dass die Elektronen einzeln an ganz genau bestimmten Stellen nachgewiesen werden – wieder wie Kugeln. Das Ergebnis scheint also weder mit der klassischen Teilchenvorstellung noch mit der klassischen Wellenvorstellung vereinbar zu sein.

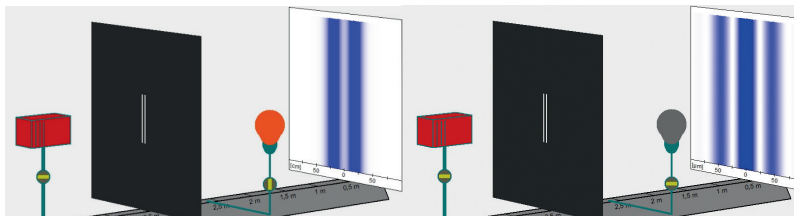


B5 Detail aus dem Schirmbild beim Doppelspaltversuch mit Elektronen.

Klassische Erklärungsversuche

Um dennoch die klassische Vorstellungsweise zu „retten“, lassen sich verschiedene Hypothesen formulieren. Zum Beispiel, dass das Elektron sich teilt, danach dann jede „Hälfte“ durch einen Spalt geht und sie sich danach wieder vereinigen; oder, dass manche Elektronen nacheinander durch beide Spalte gehen etc.

Für eine genauere Aufklärung wäre es hilfreich, wenn man den Weg der einzelnen Elektronen verfolgen könnte, man also genau wüsste, welches Elektron zu welcher Zeit durch welchen Spalt gelangt. Dies setzt voraus, dass man – zumindest für einen Moment – das Elektron als klassisches Teilchen betrachtet, dem man beim Durchgang durch den Doppelspalt eine genau festgelegte, beschreibbare Bahn zuordnet. Im Real-experiment ist dies nur mit großem Aufwand möglich, in der Simulation ist die Anordnung hingegen einfach (vgl. B6): Wir ändern den Doppelspaltversuch so ab, dass hinter den Spalten eine Lichtquelle installiert wird. Ein Photon, das an dem Elektron gestreut wird, kann von einem Detektor registriert werden. Wir können somit genau lokalisieren, durch welchen Spalt das Elektron gelaufen ist.

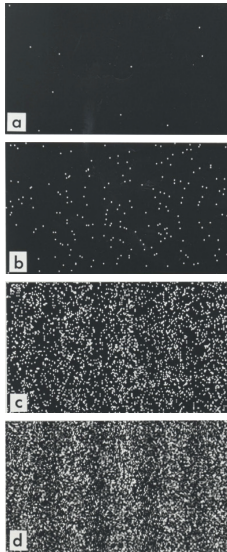


B6 Doppelspaltversuch mit Einzel-Elektronen: links mit Information über den Weg durch die Spalte (Lichtquelle an), rechts ohne Information über den Weg durch die Spalte (Lichtquelle aus).

Das Ergebnis des Experiments ist verblüffend: Sobald man Gewissheit erlangt, durch welchen Spalt die Elektronen laufen, verhalten sie sich wie klassische Teilchen. Das Interferenzmuster verschwindet, es entsteht eine Wahrscheinlichkeitsverteilung wie beim Experiment mit den Kugeln. Ist die Lichtquelle allerdings ausgeschaltet, hat man keine Information über den Weg der Elektronen und das Interferenzmuster erscheint wieder.

Der Ansatz, das Interferenzmuster beim Doppelspaltversuch durch den Weg einzelner Elektronen durch die Anordnung zu erklären, muss als gescheitert betrachtet werden. Unsere an klassischen Beispielen wie Kugeln oder Wasserwellen entwickelten physikalischen Begriffe sind nicht in der Lage, das Objekt „Elektron“ zu erfassen.

1.2 Simulation des Doppelspaltexperiments



B7 Schirmbild bei Erhöhung der Elektronenzahl.

Stochastisches Verhalten des Elektrons

Eine weitere Hypothese könnte sein, dass die Elektronen sich beim Durchgang durch die Spalte gegenseitig beeinflussen, so ihre Flugbahn ändern und deshalb das beobachtete Muster entsteht. Diese Hypothese lässt sich überprüfen, wenn man die „Elektronenrate“, also die Zahl der Elektronen, die je Zeiteinheit durch die Spalte gelangen, verringert, bis hin zu einer Rate, bei der sich immer nur einzelnes Elektron in der Apparatur befindet. Es zeigen sich zunächst nur einzelne, zufällige Stellen, an denen Elektronen registriert werden (vgl. B7, a). Lässt man das Experiment allerdings für längere Zeit laufen, bildet sich wieder das Interferenzmuster aus (B7, b-d).

Man spricht von einem stochastischen Verhalten, weil sich zwar nicht das Verhalten eines einzelnen Elektrons vorhersagen lässt, aber dafür das Verhalten einer großen Anzahl gleichartiger Objekte. Anders als beim „klassischen“ Würfeln lassen sich aber keine noch so kleinen äußeren Einflüsse für die Position des Elektrons auf dem Schirm finden. Auch mit noch so guten Messanordnungen lässt sich nicht mehr als eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Schirmposition angeben.

Quantenobjekte

Die Experimente zeigen ganz allgemein, dass sich „kleine“ Objekte, wie etwa Elektronen, weder durch das klassische Teilchenmodell noch durch das klassische Wellenmodell hinreichend vollständig beschreiben lassen. Für solche Objekte benötigen wir ein neues Modell – das Modell des Quantenobjekts.

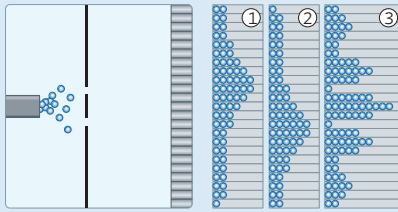
Weil hier die Anschaulichkeit versagt, kann nur eine mathematische Beschreibung angegeben werden. In ihr muss sich einerseits das stochastische Verhalten des Quantenobjekts widerspiegeln, andererseits muss es möglich sein, das Interferenzverhalten zu beschreiben. Beides leistet die Wellenfunktion $\Psi(x)$:

- Die Werte von Ψ sind vergleichbar mit den Auslenkungen bei Wasserwellen. Unmittelbar hinter dem Doppelspalt setzt sich die Wellenfunktion aus zwei Teilen Ψ_1 und Ψ_2 zusammen, die den Durchgang durch je einen der beiden Spalte beschreiben: $\Psi_{1,2} = \Psi_1 + \Psi_2$.
- Das Betragsquadrat der Wellenfunktion gibt bei einem Strahl aus sehr vielen Objekten die Intensität I an. Für ein einzelnes Objekt lässt es sich interpretieren als Wahrscheinlichkeit dafür, dass das Objekt an dem einen oder anderen Ort nachgewiesen werden kann. Weil bei Wellen die Intensität proportional zum Quadrat der Auslenkung ist, gilt auch hier: $I_{1,2} = |\Psi_{1,2}|^2 = |\Psi_1|^2 + |\Psi_2|^2 + 2 \cdot |\Psi_1| \cdot |\Psi_2| \neq I_1 + I_2$

Ein Quantenobjekt zeigt weder ein reines Teilchen- noch ein reines Wellenverhalten, sondern sein Verhalten und damit die Art seiner Wahrnehmung wird durch die konkreten Versuchsbedingungen beeinflusst. Mathematisch wird es nicht durch eine Ortsfunktion $x(t)$ beschrieben, sondern durch eine Wellenfunktion $\Psi(x)$. Diese kann nicht mehr anschaulich interpretiert werden, gibt aber Informationen über die Nachweiswahrscheinlichkeit des Quantenobjekts an einem bestimmten Ort.

Eine darüber hinausgehende, genauere Vorhersage ist nicht möglich. Diese Beschränkung ist – wie sich später in Kapitel 3 zeigen wird – eine grundsätzliche; mehr kann über das Quantenobjekt nicht gewusst werden.

Musteraufgabe



- Beschreiben Sie kurz die Abfolge und Versuchsbedingungen der Experimente ① bis ③.
- Folgern Sie aus den Ergebnissen, dass es sich bei den „blauen Kugeln“ nicht um klassische Teilchen handeln kann, sondern um Quantenobjekte, z. B. Elektronen, handeln muss.
- Beschreiben Sie das Ergebnis eines entsprechenden Versuchs mit klassischen Teilchen und erläutern Sie, unter welchen Umständen auch mit Elektronen ein solches Verhalten zu beobachten wäre.

Lösung

- Es treffen Objekte auf einen Doppelspalt. Bei ① oder ② ist jeweils nur ein Spalt geöffnet, man erhält hinter dem jeweiligen Spalt einen Maximalwert, der zur Seite hin abnimmt. Bei ③ sind beide Spalte geöffnet, es ergibt sich ein Interferenzmuster mit mehreren Maxima.
- Die Verteilungen bei ① und ② entsprechen dem, was man bei klassischen Teilchen erwarten würde. Das Öffnen beider Spalte führt dann zu einem Interferenzmuster, wie man es von Wellen kennt. Wurden im Experiment immer die gleichen Objekte auf den Spalt gesendet, kann die Kombination aus Wellen- und Teilcheneigenschaften nur bei einem Quantenobjekt beobachtbar sein.
- Bei klassischen Teilchen würden sich bei ③ die Ergebnisse von ① und ② addieren; ein Interferenzmuster wäre nicht feststellbar. Wichtig ist, dass nicht versucht wird, den Weg eines einzelnen Elektrons zu verfolgen. Dadurch würde die Interferenz zerstört werden und es würde ein Bild ähnlich wie bei klassischen Teilchen entstehen, bei dem sich ① und ② additiv zu einem Maximum in der Mitte des Detektors überlagern würden.

Arbeitsaufträge

- „Ein Elektron zeigt wellenartiges, teilchenartiges und stochastisches Verhalten.“
Erläutern Sie diese Aussage durch experimentelle Ergebnisse am Doppelspalt.
 - Im vorherigen Kapitel 1.1 haben Sie das Verhalten von Elektronen in der Elektronenbeugungsröhre untersucht. Geben Sie auch für diesen Versuch Hinweise auf wellenartiges, teilchenartiges und stochastisches Verhalten an.
- Unter geeigneten Voraussetzungen sind auch Beugungs- und Interferenzerscheinung an einem Einzelspalt beobachtbar.
 - Diskutieren Sie die erforderlichen Voraussetzungen für die Durchführung eines realen Experiments in Analogie zu Experimenten in der Wellenwanne.
 - Mit dem Mediacode gelangen Sie zu einer Bildschirmsimulation. Führen Sie diese durch, beschreiben Sie Veränderung des Schirmbildes bei Veränderung der Spaltbreite und begründen Sie diese physikalisch.
- In der klassischen Physik sah man das Elektron als Teilchen an, für dessen Radius man als Untergrenze ca. $3 \cdot 10^{-15} \text{ m}$ angeben konnte.
 - Bestimmen Sie sinnvolle Dimensionen für ein Demonstrationsexperiment, in dem die Elektronen durch Fußbälle und die Spalte durch entsprechende Öffnungen in einer Mauer realisiert werden (beim Versuch von Jönsson sind die Spalte 500 nm breit bei einem Abstand von 2000 nm).
 - Beschreiben Sie die entsprechende Versuchsdurchführung. Interpretieren Sie mögliche Versuchsergebnisse im Vergleich zu den bisher genutzten Simulationen und im Hinblick auf Eigenschaften von Quantenobjekten.
- Der Doppelspaltversuch wird mit jeweils einem Elektron 500 mal hintereinander ausgeführt.
 - Formulieren Sie je eine Aussage über die Auftrefforte eines einzelnen Elektrons sowie der Gesamtheit aller Elektronen auf dem Schirm.
 - Nun werden 500 Elektronen gleichzeitig durch den Doppelspalt geschickt. Skizzieren Sie das Schirmbild.



67053-06



1.3 de-Broglie-Beziehung für das Elektron

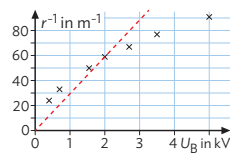
Quantitative Betrachtung der Elektronenbeugungsröhre

In Kapitel 1.1 haben Sie mit der Simulation der Elektronenbeugungsröhre oder auch mit einem realen Versuchsaufbau experimentiert. Dabei lässt sich beobachten, dass der Radius r der Ringe auf dem Fluoreszenzschirm von der Beschleunigungsspannung U_B der Elektronen abhängt. Dieser Zusammenhang soll jetzt quantitativ untersucht werden. Wir beschränken uns dabei zunächst auf Spannungswerte, mit denen die Elektronen auf Geschwindigkeiten beschleunigt werden, die deutlich unter der Lichtgeschwindigkeit liegen. Wir müssen deshalb keine relativistischen Effekte berücksichtigen.

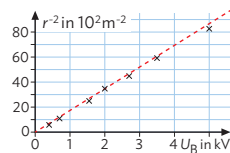
Experimentell findet man z. B. folgende Werte für die Beschleunigungsspannung U_B und den Radius r des innersten Rings des Beugungsmusters (die Betrachtung von Messunsicherheiten erfolgt erst auf der nächsten Seite):

U_B in kV	0,40	0,70	1,55	2,00	2,70	3,50	5,00
r in cm	4,1	3,0	2,0	1,7	1,5	1,3	1,1

Klassische Berechnungen sind für Geschwindigkeiten kleiner als $0,1c$ ausreichend.



In einem $U_B - \frac{1}{r}$ -Diagramm liegen die Punkte nicht auf einer Geraden. Die Größen sind also nicht indirekt proportional zueinander. Im $U_B - \frac{1}{r^2}$ -Diagramm erhält man eine Gerade:



Diese Bedingung heißt Bragg-Beziehung; sie kann aus Betrachtungen zur Streuung an verschiedenen Kristallebenen hergeleitet werden.

Wenn U_B zunimmt, dann nimmt r ab. Mathematisch wäre also eine indirekte Proportionalität denkbar. Der zugehörige Zusammenhang $U_B \sim \frac{1}{r}$ bestätigt sich jedoch nicht, vgl. die Darstellungen links. Trägt man jedoch U_B gegen $\frac{1}{r^2}$ auf, so ergibt sich eine Ursprungsgerade. Es gilt also: $U_B \sim \frac{1}{r^2}$ bzw. $r \sim \frac{1}{\sqrt{U_B}}$

Zusammenhang zwischen Wellenlänge und Ringradius

Das Auftreten von einzelnen, voneinander abgrenzbaren Ringen anstelle einer kontinuierlichen Helligkeitsverteilung auf dem Fluoreszenzschirm hat in Kapitel 1.1 zu der Schlussfolgerung geführt, dass Elektronen einen Wellencharakter aufweisen. Damit stellt sich die Frage nach der Wellenlänge. Aus den entsprechenden Experimenten mit klassischen Wellen wissen Sie, dass sich die Wellenlänge λ aus den Abständen der entsprechenden Interferenzmaxima ermitteln lässt.

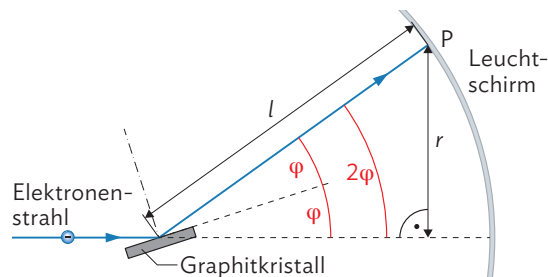
Die Situation ist bei der Elektronenbeugungsröhre allerdings komplizierter als bei den bekannten Doppelspalt- oder Gitter-Experimenten. Für die Interferenz sind kleine Graphitkristalle verantwortlich, an denen die Elektronen gestreut werden. Nur bei ganz bestimmten Winkelverhältnissen interferieren die gestreuten Wellen konstruktiv miteinander. Für die möglichen Winkel φ (siehe B1) gilt die Bedingung: $2d \cdot \sin \varphi = k \cdot \lambda$. Die Variable d bezeichnet dabei den Abstand von zwei Gitterebenen im Kristall, k ist eine natürliche Zahl. Aus der Skizze B1 kann man entnehmen: $\frac{r}{l} = \sin(2\varphi) \approx 2 \sin \varphi$

Setzt man hierin die obige Beziehung für die Winkel ein, so erhält man: $\frac{r}{l} \approx 2 \sin \varphi = \frac{k \cdot \lambda}{d}$ und schließlich (mit $k=1$, weil nur der innerste Ring untersucht wird): $\lambda = \frac{d \cdot r}{l}$

Die beiden Größen d und l sind für die jeweilige Anordnung bei allen Beschleunigungsspannungen gleich.

Die Wellenlänge hängt also nur vom Radius ab: $\lambda \sim r$. Damit gilt insgesamt:

$$\lambda \sim r \sim \frac{1}{\sqrt{U_B}}$$



B1 Geometrische Betrachtung der auf dem Schirm entstehenden Ringe.

Wellenlänge der Elektronen

Mit wachsender Beschleunigungsspannung vergrößert sich auch die Geschwindigkeit v und damit der Impuls $p = m \cdot v$ der Elektronen, da beim Beschleunigen die potentielle Energie im elektrischen Feld in kinetische Energie des Elektrons umgewandelt wird:

$$e \cdot U_B = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{p^2}{m} \quad (1)$$

Damit lässt sich $\sqrt{U_B} \sim p$ schreiben und man findet, dass die Wellenlänge der Elektronen indirekt proportional zu ihrem Impuls ist: $\lambda \sim r \sim \frac{1}{\sqrt{U_B}} \sim \frac{1}{p}$

Die Proportionalitätskonstante kann aus unseren Messdaten bestimmt werden. Dafür muss jeweils mithilfe von (1) der Impuls berechnet werden: $p = \sqrt{2 \cdot m \cdot e \cdot U_B}$. Die Wellenlänge ergibt sich aus der hergeleiteten Beziehung $\lambda = \frac{d \cdot r}{l}$.

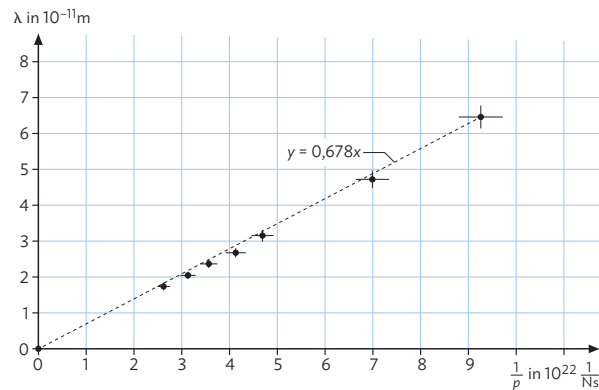
Neben der Elektronenladung e und der Elektronenmasse m werden dazu der Gitterabstand d im Graphitkristall und der Abstand l des Fluoreszenzschirms von der Graphitfolie benötigt. Bei diesem Beispielexperiment gilt: $d = 2,13 \cdot 10^{-10} \text{ m}$; $l = 0,135 \text{ m}$.

Erinnerung:

$$e = 1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$m = 9,10938 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

U_B in kV	0,40	0,70	1,55	2,00	2,70	3,50	5,00
r in cm	4,1	3,0	2,0	1,7	1,5	1,3	1,1
p in 10^{-23} Ns	1,08	1,43	2,13	2,42	2,81	3,20	3,82
$\frac{1}{p}$ in $10^{22} \frac{1}{\text{Ns}}$	9,26	6,99	4,69	4,13	3,56	3,13	2,62
λ in 10^{-11} m	6,47	4,73	3,16	2,68	2,37	2,05	1,74
$\frac{\lambda}{\frac{1}{p}}$ in 10^{-34} Js	6,99	6,77	6,74	6,49	6,66	6,55	6,64



B2 Lineare Regression im $\frac{1}{p}$ - λ -Diagramm.

Die Werte der Tabelle für $\frac{1}{p}$ und für λ tragen wir in ein Diagramm ein und führen eine lineare Regression durch. Es ergibt sich dabei in guter Näherung eine Ursprungsgerade, weshalb wir damit die oben hergeleitete Proportionalität bestätigen können. Die

Unsicherheitsbalken lassen sich aus den Ausgangsdaten bestimmen. Nehmen wir eine Messunsicherheit in der letzten Dezimale der Messgrößen an, d. h. 0,01 kV bei U_B und 0,1 cm bei r , so liegt die Unsicherheit im ungünstigsten Falle bei 9 %. Da p , $\frac{1}{p}$ und λ daraus berechnet werden, kann man die relative Unsicherheit auch für diese Größen annehmen. Streng genommen müssten hierbei auch die Unsicherheiten für d , l , m und e berücksichtigt werden. Weil sie aber mit drei oder sogar mehr gültigen Ziffern vom Hersteller bzw. in der Formelsammlung angegeben sind, wird darauf verzichtet.

Die Proportionalitätskonstante h ergibt sich direkt aus der linearen Regression:

$$h = 0,678 \cdot \frac{10^{-11} \text{ m}}{10^{22} (\text{Ns})^{-1}} = 6,78 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

Alternativ kann man auch den „Worstcase“ für ein Wertepaar betrachten:

In der letzten Tabellenspalte wäre bei einer Unsicherheit von 0,1 cm auf den Wert 1,1 cm der Minimalwert $r_{\min} = 1,0 \text{ cm}$ und der Maximalwert $r_{\max} = 1,2 \text{ cm}$. Das liefert:

$$\lambda_{\min} = 1,58 \cdot 10^{-11} \text{ m und}$$

$$\lambda_{\max} = 1,89 \cdot 10^{-11} \text{ m}$$

Also zeigt sich auch hier eine maximale Unsicherheit von 9 % für die berechnete Größe λ .

1.3 de-Broglie-Beziehung für das Elektron

Die Unsicherheit beträgt hier nur rund 4%; das ist deutlich geringer als auf S. 23 angegeben. Dies zeigt den Vorteil von mehreren Messpunkten gegenüber einer Einzelmessung.

Die Proportionalitätskonstante h

Für die Unsicherheit von h kommt es nicht nur auf die Unsicherheiten der Einzelmessungen an, sondern auf alle Messungen des Experiments. Zur Vereinfachung betrachten wir dazu nicht die lineare Regression, sondern bestimmen h stattdessen aus der letzten Zeile der Tabelle von S. 24. Es ergibt sich ein Mittelwert von $6,69 \cdot 10^{-34}$ Js. Als Abschätzung für die Unsicherheit dieses Ergebnisses lässt sich im einfachsten Fall die halbe Spannweite angeben (vgl. **Methode** S. 222): $\Delta h = \frac{1}{2} \cdot (6,99 - 6,49)$ Js = 0,25 Js.

Aus unseren Messungen erhalten wir somit als Endergebnis:

$$\lambda = h \cdot \frac{1}{p} \text{ mit } h = (6,69 \pm 0,25) \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

Die Größe h wird als „Plancksches Wirkungsquantum“ oder „Plancksche Konstante“ bezeichnet. Max Planck (1858–1947) entwickelte im Jahre 1900 ein Gesetz für die von einem Körper mit bestimmter Temperatur ausgehende Strahlung und führte dabei diese Konstante h ein. Ihr Wert ist heute als Grundlage des SI („Système International d’Unités“) festgelegt.

Mithilfe der Beugungsringe der Elektronenbeugungsröhre lässt sich die Plancksche Konstante h experimentell bestimmen. Ihr genauer Wert ist:
 $h = 6,62607015 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

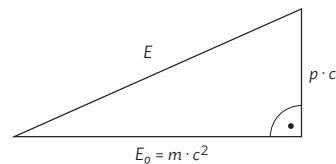
Man spricht gelegentlich auch von einer „Materiewelle“. Sie kann jedoch nicht mit einer klassischen Theorie gedeutet werden, sondern ist ein mathematisches Konzept zur Berechnung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit eines massebehafteten Objekts.

Der in den vorangehenden Abschnitten gefundene Zusammenhang zwischen Wellenlänge λ und Impuls p wurde 1923 von Louis de Broglie allgemein für alle Objekte mit von null verschiedener Masse postuliert. In ihm werden der Teilchen- und der Wellencharakter, den solche Objekte in verschiedenen experimentellen Situationen zeigen, miteinander verknüpft. Dies ist nicht mehr anschaulich, kann aber mathematisch erfolgreich beschrieben werden.

Die de-Broglie-Beziehung stellt einen Zusammenhang zwischen Wellenlänge und Impuls eines Quantenobjekts mit Masse $\neq 0$ her: $\lambda = \frac{h}{p}$
 Man spricht hier auch von der de-Broglie-Wellenlänge.

Exkurs: de-Broglie-Beziehung für relativistische Elektronen

Bisher haben wir „langsame“ Elektronen betrachtet, deren Impuls über $p = m \cdot v$ berechnet werden kann. In der Jahrgangsstufe 12 haben Sie aber bereits erfahren, dass diese Beziehung nicht mehr gültig ist, wenn sich die Geschwindigkeit der Lichtgeschwindigkeit nähert. In diesem Fall kann die Energie-Impuls-Beziehung der relativistischen Energie $E = E_0 + E_{\text{kin}}$ und des relativistischen Impulses p im Einstein-Dreieck verdeutlicht werden (vgl. B3). Damit ergibt sich: $E^2 = E_0^2 + c^2 \cdot p^2$.



B3 Anschauliche Darstellung der Energie-Impuls-Beziehung.

$$\text{Umstellen nach } p \text{ ergibt: } p = \frac{\sqrt{E^2 - E_0^2}}{c} = \frac{\sqrt{(E_0 + E_{\text{kin}})^2 - E_0^2}}{c} = \frac{\sqrt{2E_0 \cdot E_{\text{kin}} + E_{\text{kin}}^2}}{c}$$

$$\text{Das ergibt für die de-Broglie-Wellenlänge: } \lambda = h \cdot \frac{c}{\sqrt{2 \cdot E_0 \cdot E_{\text{kin}} + E_{\text{kin}}^2}}$$

$$\text{Mit } E_0 = m \cdot c^2 \text{ und } E_{\text{kin}} = e \cdot U_B \text{ folgt schließlich die relativistische Beziehung für die de-Broglie-Wellenlänge: } \lambda = \frac{h \cdot c}{\sqrt{2 \cdot e \cdot U_B \cdot m \cdot c^2 + (e \cdot U_B)^2}}$$

Musteraufgabe

- a) Berechnen Sie für die beiden Objekte Rennauto ($m = 800 \text{ kg}$) und Elektron, die sich jeweils mit $300 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ bewegen, die Wellenlänge der zugeordneten Materiewelle.
- b) Interpretieren Sie das Ergebnis im Zusammenhang.
- c) Berechnen Sie für das Elektron die erforderliche Beschleunigungsspannung U_B , durch die es in einem elektrischen Longfeld aus der Ruhe auf die Geschwindigkeit $300 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ beschleunigt werden kann.

Lösung

$$\text{a) } \lambda_{\text{Auto}} = \frac{h}{m \cdot v} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{800 \text{ kg} \cdot \left(\frac{300}{3,6} \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)} = 9,95 \cdot 10^{-39} \text{ m}$$

$$\lambda_{\text{Elektron}} = \frac{h}{m \cdot v} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot \left(\frac{300}{3,6} \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)} = 8,73 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

- b) Die Wellenlänge des Rennautos liegt um viele Zehnerpotenzen unter dem Atomradius, es werden sicher keine Beugungs- und Interferenzerscheinungen beobachtet werden können, bei Elektronen jedoch schon.

$$\text{c) } \frac{1}{2} m \cdot v^2 = e \cdot U_B \Rightarrow U_B = \frac{m \cdot v^2}{2e} = \frac{9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot \left(\frac{300}{3,6} \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}} = 1,97 \cdot 10^{-8} \text{ V}$$

Arbeitsaufträge

- 1 \ Neutronen werden in zahlreichen Experimenten zur Untersuchung von Festkörpern verwendet. Man kann ihnen ebenfalls eine de-Broglie-Wellenlänge zuordnen. Für ein Experiment verwendet man Neutronen, deren zugeordnete Wellenlänge $\lambda_n = 1,8 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ ist, was in etwa einem Atomradius entspricht. Berechnen Sie die Geschwindigkeit dieser Neutronen.

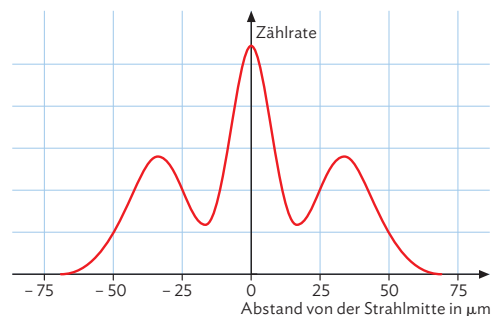
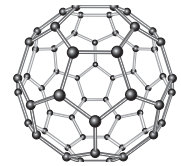
- 2 \ Zur Messung der Naturkonstanten h können Sie eine Elektronenbeugungsröhre, sofern an der Schule vorhanden, oder das Bildschirmexperiment aus Kapitel 1.1 heranziehen (vgl. Mediencode).



- a) Führen Sie zunächst eine erste Messreihe im nichtrelativistischen Bereich durch, also mit Beschleunigungsspannungen unterhalb 2,5 kV. Erstellen Sie dazu eine Tabelle, wie in diesem Kapitel beschrieben.
- b) Ermitteln Sie den Mittelwert ihrer h -Werte und die zugehörige halbe Spannweite oder Standardabweichung (vgl. Methode S. 222).
- c) Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit dem Literaturwert für h und analysieren Sie gegebenenfalls Abweichungen aus physikalischer Sicht.
- d*) Führen Sie eine Messreihe mit Auswertung im relativistischen Bereich durch.

- 3* \ Leiten Sie die Bragg-Beziehung von S. 22 her, indem Sie die dort im Text beschriebenen Schritte ausführen (beachten Sie dabei vor allem auch B1). Nutzen Sie außerdem B2 von S. 14 und verwenden Sie die Bedingung $\Delta s = k \cdot \lambda$ für konstruktive Interferenz (mit $k \in \mathbb{N}$).

- 4 \ Fullereene sind Moleküle, die in ihrer Struktur einem Fußball gleichen und aus jeweils 60 Kohlenstoffatomen bestehen. Durch Erhitzen einer Probe wird ein Strahl erzeugt, aus dem Moleküle mit einer mittleren Geschwindigkeit von $220 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ herausgefiltert werden. Die Moleküle treffen auf einen Doppelspalt mit Spaltmittenabstand 100 nm. In der Entfernung 1,25 m hinter dem Doppelspalt registriert ein Detektor den dargestellten Verlauf für die Zählrate in Abhängigkeit vom Ort.



- a) Berechnen Sie die de-Broglie-Wellenlänge eines Fulleren-Moleküls unter der Annahme, dass es sich ausschließlich um C-12 Atome handelt, die jeweils eine Masse von $1,99 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$ besitzen.
- b) Ermitteln Sie zur Bestätigung der Theorie von de Broglie, die Wellenlänge der Materiewelle mithilfe der Graphik oben.
- c) Stellen Sie eine Hypothese dafür auf, dass die Zählrate bei den Minima nicht Null beträgt.

↪ weitere passende Aufgaben:
S. 50, Nr. 1, 3



Bildnachweis Physik 13 (BN 67053) / Kapitel 1

Rainer Dietrich, Schweinfurt – S. 12 (4), 13, 17 (2); Frank Finkenberg, Würzburg – S. 13, 14, 15; Dr. Claus Jönsson / Universität Tübingen – S. 16; Jürgen Kirstein / Didaktik der Physik, Freie Universität Berlin – S. 13; Mauritius Images / Alamy Stock Photo, Well/BOT – S. 12; Klaus Muthsam – S. 18, 19 (2); Science Photo Library – S. 13; - / Degginger, E.R. – S. 11; - / GiphotoStock – S. 17; Simulation by PhET Interactive Simulations, University of Colorado Boulder, CC BY 4.0 – S. 18; www.wikimedia.org/ / Dr. Tonomura, Belsazar – S. 20.