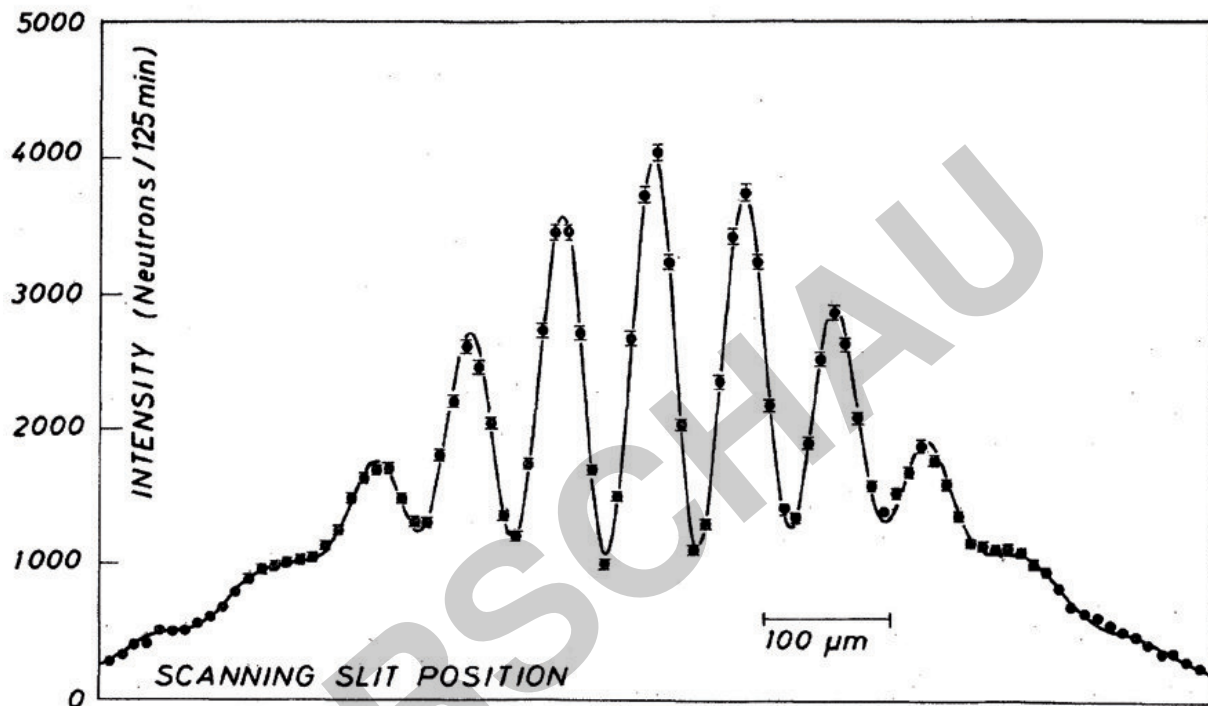


Materiewellen

Matthias Borchardt, Bonn

Illustrationen von Matthias Borchardt



Neutroneninterferenz am Doppelspalt, © Abbildung aus Zeilinger, Anton et al.: Single- and double-slit diffraction of neutrons. Review of modern physics, American Physical Society: College Park, October 1988 (DOI: 10.1103/RevModPhys.60.1067)

Materiewellen gehören zu den faszinierendsten Phänomenen der modernen Physik. Dieser Beitrag thematisiert verschiedene Experimente, welche die Hypothese des theoretischen Physikers Louis de Broglie eindrucksvoll bestätigen. Neben dem Doppelspaltversuch von Jönsson, der inzwischen Eingang in die Oberstufen-Lehrpläne gefunden hat, werden weniger bekannte, aber hochinteressante Beugungsversuche mit langsamen Neutronen vorgestellt. Somit ergeben sich für den Unterricht im Grund- und Leistungskurs vielfältige Möglichkeiten, das Thema kontextorientiert und differenziert zu bearbeiten.

Materiewellen

Oberstufe (Niveau)

Matthias Borchardt, Bonn

Illustrationen von Matthias Borchardt

Hinweise	1
M 1 Frischen Sie Ihr Wissen auf! – Wissensspeicher	4
M 2 Doppelspaltversuch mit Elektronen	6
M 3 Neutronen als Materiewelle	9
M 4 Doppelspaltversuch mit Neutronen	11
M 5 Neutronenbeugung am Kristallpulver I	14
M 6 Neutronenbeugung am Kristallpulver II – LEK	16
Lösungen	18

Die Schüler lernen:

den Doppelspaltversuch für Elektronen sowie für Neutronen kennen und erfahren, dass die Behauptung de Broglies bzgl. der Existenz von Materiewellen nicht nur für Elektronen, sondern auch für elektrisch neutrale und schwere Teilchen (Neutronen) experimentell bestätigt werden kann. Des Weiteren werden Inhalte des bekannten Versuchs mit der Elektronenbeugungsröhre auf Experimente zur Beugung von langsamen Neutronen an Kristallpulvern übertragen. Aufgrund des extrem niedrigen Neutronenflusses bei diesen Experimenten erkennen Ihre Schüler, dass Interferenz offenbar nicht vom gleichzeitigen Eintreffen vieler Teilchen an den beugenden Strukturen abhängt und daher eine Wahrscheinlichkeitsinterpretation der Vorgänge ein gutes Erklärungsmodell darstellt.

Überblick:

Legende der Abkürzungen:

Ab = Arbeitsblatt



LEK = Lernerfolgskontrolle

DA = Datenauswertung

LA = Learn-App

Thema	Material	Methode
Frischen Sie Ihr Wissen auf! – Wissensspeicher	M1	Ab, LA
Doppelspaltversuch mit Elektronen	M2	Ab, DA
Neutronen als Materiewelle	M3	Ab
Doppelspaltversuch mit Neutronen	M4	Ab, DA
Neutronenbeugung am Kristallpulver I	M5	Ab, DA
Neutronenbeugung am Kristallpulver II – LEK	M6	Ab, DA, LEK

Erklärung zu Differenzierungssymbolen

		
einfaches Niveau	mittleres Niveau	schwieriges Niveau
 LearningApps – interaktive Lernbausteine		

© RAABE 2021

Kompetenzprofil:

Inhalt: Hypothese von de Broglie bzgl. Materiewellen, Doppelspaltversuch mit bewegten Teilchen (Elektronen und Neutronen), Beugung und Interferenz am Kristallpulver (Debye-Scherrer Verfahren), Born'sche Deutung von Quantenphänomenen

Medien: Taschenrechner, Internet

Kompetenzen: Über Basiswissen verfügen (F1); Probleme lösen (F3); Wissen kontextbezogen anwenden (F4); Phänomene beschreiben (E1); Formeln anwenden (E4); Idealisierungen vornehmen (E5); Daten und Diagramme auswerten (E9)

Hinweise

Einordnung des Themas in den Unterricht

Das Thema Materiewellen ist fester Bestandteil der Lehrpläne für Grund- und Leistungskurse. Ein spannendes und didaktisch wertvolles Thema, denn die Hypothese des Physikers de Broglie über die Wellennatur bewegter Teilchen mag auf den ersten Blick doch ziemlich abwegig und unrealistisch erscheinen. Dem experimentellen Nachweis dieser Theorie kommt daher eine ganz besondere Bedeutung zu. Üblicherweise wird im Unterricht die Elektronenbeugungsröhre behandelt, die hervorragend geeignet ist, das Phänomen der Elektronenbeugung zu zeigen und quantitativ auszuwerten. Der Doppelspaltversuch von Claus Jönsson lässt sich zwar nicht im Schulversuch durchführen, seine Behandlung im Unterricht sollte aber auf keinen Fall fehlen, denn dieses Experiment zeigt in beeindruckender Weise, dass sich der Paradeversuch der Wellenoptik tatsächlich auf bewegte Elektronen übertragen lässt. Dieser berühmte Jönsson-Versuch findet daher auch seinen Platz in diesem Beitrag. Dass der Doppelspaltversuch Ende der 1980-er Jahre auch erfolgreich mit langsamen („kalten“) Neutronen durchgeführt wurde, ist dagegen weniger bekannt. Diese Beugungsversuche mit Neutronen sind aus mehreren Gründen besonders interessant. So handelt es sich bei Neutronen um Teilchen, die ungeladen sind, sich daher nicht durch Felder beschleunigen oder ablenken lassen und auch beim Durchgang durch Spaltöffnungen nicht mit den Rändern elektromagnetisch wechselwirken können. Auch weisen Neutronen eine fast 2000-mal größere Masse als Elektronen auf und stammen aus einer ganz anderen Teilchenfamilie – nämlich aus der Familie der Hadronen. Im Übrigen lohnt sich der Hinweis, dass der Neutronenfluss bei den Beugungsversuchen in der Regel so gering ist, dass lange Messzeiten vonnöten sind und man davon ausgehen kann, dass die Neutronen einzeln am Spalt oder Doppelspalt eintreffen. Um die Verteilung der Neutronen in der Detektorebene erklären zu können, kommt man daher nicht um die Einführung des Wahrscheinlichkeitsbegriffs in die Quantenphysik herum, also die sogenannte „Born'sche Deutung¹“ solcher Interferenzphänomene.

¹ Max Born, 1882–1970

Im Weiteren wird in diesem Beitrag auch die Beugung von Neutronen am Kristallpulver thematisiert, und somit werden Inhalte des Versuchs mit der Elektronenbeugungsröhre aufgegriffen und in einen neuen und sehr interessanten Kontext gestellt.

Einsatz der Materialien im Unterricht

Der Doppelspaltversuch von Jönsson (**M 2**) gehört zum Standardprogramm im Themenfeld der Quantenphysik und sollte daher auch bearbeitet werden. Der Doppelspaltversuch mit Neutronen (**M 4**) könnte sich dann idealerweise als Hausaufgabe oder aber auch als spätere Prüfungsaufgabe anbieten – vorausgesetzt, Sie haben einige Grundlagen zur Wellennatur des Neutrons zuvor behandelt (**M 3**). Je nach Zeit, Leistungsstärke oder Art des Kurses können Sie in ähnlicher Weise mit den übrigen Materialien verfahren. Behandeln Sie den historischen Versuch von Wollan und Shull (1947) zur Beugung von Neutronen am Diamantpulver (**M 5**) im Unterricht und verlagern Sie den modernen Beugungsversuch am Nickelpulver in die Hausaufgabe oder bereiten Sie ihn als Prüfungsmaterial auf. Für seine Arbeiten auf dem Gebiet der Neutronenbeugung wurde Clifford Shull übrigens erst sehr spät, nämlich 1994, mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet – da war sein Kollege Ernest Wollan bereits zehn Jahre tot. Die Tatsache, dass die Schwedische Akademie der Wissenschaften so lange mit der Auszeichnung gewartet hatte, hängt wohl mit dem schlechten Image zusammen, dass die Forschungen im Bereich der Kernspaltung damals hatten, obwohl die Arbeiten von Shull und Wollan mit diesem Gebiet der Physik rein gar nichts zu tun hatten. Es lohnt sich durchaus, im Unterricht auf diese Verflechtungen von Physik und gesellschaftspolitischen Aspekten kurz einzugehen.

Unterrichtliche Voraussetzungen

Ihre Schüler sollten mit den Grundlagen der Wellenoptik vertraut sein, also Phänomene der Beugung und Interferenz von Licht und Röntgenstrahlung am Doppelspalt bzw. Kristallstrukturen kennen. Dazu gehört die Bragg-Reflexion am Einkristall wie auch das Debye-Scherrer Verfahren zur Beugung an Kristallpulvern. Des Weiteren sollten Sie die Theorie von de Broglie bzgl. der Materiewellen im Unterricht behandelt und den Versuch mit der Elektronenbeugungsröhre durchgeführt oder zumindest theoretisch durchgesprochen haben.





Zum Einsatz der LearningApp

Die Learning App wird als erste Aufgabe bearbeitet. Die Schülerinnen und Schüler frischen hierdurch ihr Vorwissen zu wellenoptischen Grundlagen auf spielerische Art und Weise auf. Gerade im Hinblick auf die mündliche Abiturprüfung ist dies eine empfehlenswerte Übung. Falls Sie die App verändern möchten, so können Sie dies unter <https://learningapps.org/display?v=pztcmj3da21> (aufgerufen am 16.06.2021).

Quellen

Die Versuchsbeschreibungen, Daten und Diagramme, die in die Materialien dieses Beitrags eingeflossen sind, stammen aus Original-Veröffentlichungen, die im folgenden Literaturverzeichnis aufgelistet sind.

Literaturhinweise

- ▶ *Zum Doppelspaltversuch von Jönsson (M2):*
Jönsson, Claus: Elektroneninterferenzen an mehreren künstlich hergestellten Feinspalten. Zeitschrift für Physik 1961 (161), S. 454–474
- ▶ *Zum Doppelspaltversuch mit Neutronen (M4)*
Zelinger, Anton et al.: Single- and double-slit diffraction of neutrons. Review of modern physics, October 1988 (DOI: 10.1103/RevModPhys.60.1067)
- ▶ *Zur Beugung von Neutronen an Diamantpulver (M5)*
Wollan, E. O., Shull, C. G.: Diffraction of Neutrons by Crystalline Powders. Phys. Rev. 73, 830 – Published 15 April 1948 (doi.org/10.1103/PhysRev.73.830)
https://www.google.de/books/edition/The_Diffraction_of_Neutrons_by_Crystalli/bDHuLERSfEcC?hl=de&gbpv=0
- ▶ *Zur Beugung von Neutronen an Nickelpulver (M6)*
DiJulio, D.D, Hawari A.I.: Examination of reactor grade graphite using neutron powder diffraction. Journal of Nuclear Materials 392 (2009) 225–229
- ▶ *Zur Biographie der beiden amerikanischen Forscher Ernest Wollan und Clifford Shull sind die beiden Artikel, die weitere Verweise enthalten, gut geeignet*
https://en.wikipedia.org/wiki/Ernest_O._Wollan
<https://www.britannica.com/biography/Clifford-Shull>
(beide aufgerufen am 18.06.2021)