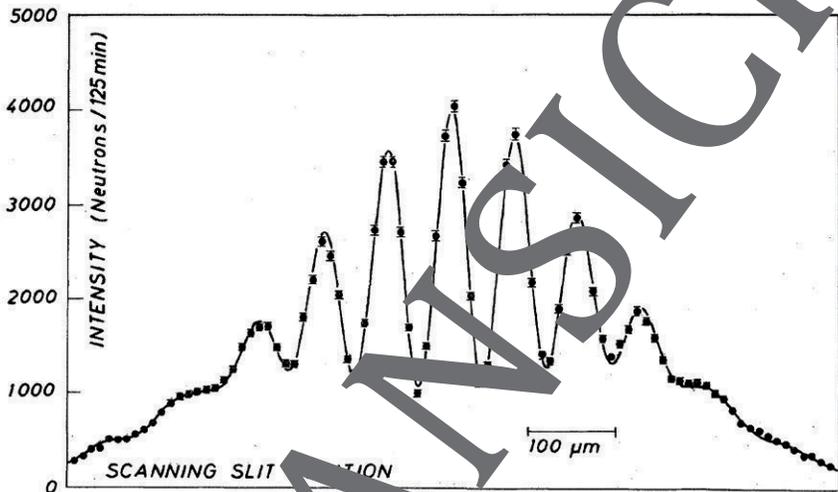


# Materiewellen

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 fasst 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

<b>Hinweise</b>	<b>1</b>
<b>M 1 Frischen Sie Ihr Wissen auf! – Wissensspeicher</b>	<b>4</b>
<b>M 2 Doppelspaltversuch mit Elektronen</b>	<b>6</b>
<b>M 3 Neutronen als Materiewelle</b>	<b>9</b>
<b>M 4 Doppelspaltversuch mit Neutronen</b>	<b>11</b>
<b>M 5 Neutronenbeugung am Kristallpulver</b>	<b>14</b>
<b>M 6 Neutronenbeugung am Kristall</b>	<b>16</b>
<b>Lösungen</b>	<b>18</b>

© RAABE 2021

### Die Schüler lernen:

den Doppelspaltversuch für Elektronen sowie für Neutronen kennen und erfahren, dass die Behauptung der gleichzeitigen 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 Elektronenbeugung auf ihre 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	Code
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)

## M 1 Frischen Sie Ihr Wissen auf! – Wissensspeicher



### Aspekte der Wellenlehre

Sie können als Ergänzung zur Wiederholung der wellenoptischen Grundlagen die folgende Learning-App verwenden:

<https://learningapps.org/watch?v=pztcmj3da21>

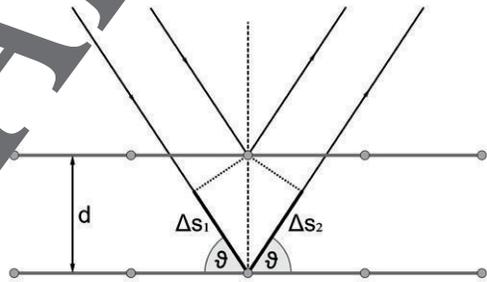


### Doppelspalt

Die Interferenz der an den beiden Spalten entstandenen Elementarwellen führt auf dem Beobachtungsschirm zu Bereichen mit minimaler und maximaler Intensität. Maxima n-ter Ordnung treten auf, wenn der Gangunterschied der beiden Wellen am Beobachtungspunkt in großem Abstand von den Spalten ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge ist (also  $\Delta s = n \cdot \lambda$  gilt). Für kleine Ablenkwinkel  $\theta$  gilt in erster Näherung für die Lage der Maxima auf dem Schirm:  $n \cdot \lambda = \frac{a_n \cdot g}{L}$ , wobei  $g$  der Abstand der Spalte,  $a_n$  der Abstand des n-ten Maximums vom Maximum nullter Ordnung und  $L$  der Abstand vom Doppelspalt zur Beobachtungsebene bedeuten.

### Bragg-Reflexion

Bei schrägem Einfall der Strahlung auf ein ebenes Reflexionsgitter entsteht das Maximum nullter Ordnung genau unter dem Winkel, der dem Reflexionsgesetz der geometrischen Optik entspricht. Es findet also immer eine Reflexion statt – unabhängig vom Einfallswinkel und der gewählten Wellenlänge.



Grafik: M. Borchardt

## M 2 Doppelspaltversuch mit Elektronen

### Das Jönsson-Experiment

Bewegte Teilchen besitzen Welleneigenschaften. Diese kühne, allein auf theoretischen Symmetriebetrachtungen beruhende Hypothese de Broglies (1924) konnte bereits ein Jahr nach ihrer Formulierung experimentell mithilfe von Beugungsversuchen (Bragg-Reflexion) an Kristallen eindrucksvoll bestätigt werden. Aber es sollten noch über drei Jahrzehnte vergehen, bis es dem deutschen Physiker Claus Jönsson gelang, auch den berühmten Doppelspaltversuch der Wellenoptik auf Elektronen zu übertragen. Warum hatte sich niemand zuvor an diesen Versuch herangewagt? Die folgenden Überlegungen mögen die Schwierigkeiten des Experiments verdeutlichen.

1. Leiten Sie her: Elektronen, die mit einer Spannung  $U$  beschleunigt wurden, weisen eine de-Broglie-Wellenlänge von

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2 \cdot e \cdot m_e \cdot U}}$$

auf.

2. Claus Jönsson verwendete für seine Interferenzversuche Elektronen, die mit einer Spannung von  $U = 50 \text{ kV}$  beschleunigt wurden. Berechnen Sie die de-Broglie-Wellenlänge dieser Elektronen.
3. Optische Gitter für Interferenzversuche mit Licht besitzen Spaltabstände, die in der Größenordnung der Wellenlänge des Lichts liegen. Überlegen Sie, welchen Abstand die Spalte eines Doppelspalts für Elektronen haben müssten, wollte man die Verhältnisse aus der Optik übernehmen. Vergleichen Sie mit dem Durchmesser von Metallatomen (z. B. Kupferatom etwa  $250 \text{ nm}$ ) und begründen Sie, warum Doppelspalte in dieser Größenordnung nicht herstellbar sind.
4. Jönsson hoffte, maßgefertigte Doppelspalte mit einem Spaltabstand im Bereich von einigen Mikrometern ( $\mu\text{m}$ ) herstellen zu können. Ihm war sehr schnell klar, dass er das Interferenzbild dann einer extremen Nachvergrößerung unterziehen müsste, um die Interferenzstreifen erkennen zu können. Begründen Sie dies mithilfe der bekannten Doppelspalt-Formel

$$\frac{a}{g} = \frac{a}{L}$$

wobei  $a$  der Spaltabstand,  $a$  der Abstand der Maxima und  $L$  die Entfernung zwischen Doppelspalt und Beobachtungsebene darstellen.

# Sie wollen mehr für Ihr Fach? Bekommen Sie: Ganz einfach zum Download im RAABE Webshop.



- ✓ **Über 4.000 Unterrichtseinheiten** sofort zum Download verfügbar
- ✓ **Sichere Zahlung** per Rechnung, PayPal & Kreditkarte
- ✓ **Exklusive Vorteile für Grundwerks-Abonent\*innen**
  - 20% Rabatt auf Unterrichtsmaterial für Ihr bereits abonniertes Fach
  - 10% Rabatt auf weitere Grundwerke

Jetzt entdecken:  
**www.raabe.de**