

Physik 13



kostenfreie
LESEPROBE



Gymnasium
Bayern gA

Inhalt

Vorwort 3

Physik – Gymnasium Bayern Sek II

Die Lehr- und Lernwelt von **Physik 13** 4

Physik 13

Inhaltsverzeichnis **Physik 13** 6

Kapitel 1: Elektronen 10

Formelsammlung

Mathematisch-naturwissenschaftliche Formelsammlung – Bayern 24

Digitaler Unterricht mit click & teach und click & study

Digitale Lehr- und Lernwelt von **Physik 13** 26

Unser WebSeminar-Angebot

Gebietsaufteilung Schulberatung

Bildnachweis

AdobeStock / Zaleman – S. 2, 3; AdobeStock / WoGi – S. 4, 5, 24, 25, 29; 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; LMU / Lehrstuhl für Didaktik der Physik, Doppelspalt, Screenshot – S. 18, 19, 20; Mauritius Images / Alamy Stock Photo, Well/BOT – S. 12; Simulation by PhET Interactive Simulations, University of Colorado Boulder, licensed under CC-BY-4.0 (<https://phet.colorado.edu>) – S. 18; Science Photo Library – S. 13; - / AURA / NSF, N.A.Sharp, NOIRLab – Cover; - / Giphotostock – S. 17; - / Science Source – Cover; www.wikimedia.org / Dr. Tonomura, Belsazar – S. 19; AdobeStock / Photographee.eu, shutterstock / tanatat, shutterstock / Andrey Mertsalov, shutterstock / artjazz, shutterstock / Valentina Razumova, shutterstock / Natalie Board, shutterstock / Popel Arseniy, shutterstock / Studio KIWI – S. 26, 27; shutterstock / freepik / freepik – S. 30.



Liebe Lehrerinnen und Lehrer,

2025 bieten wir Ihnen mit **Physik 13** die Fortsetzung und somit auch den Abschluss unserer erfolgreichen Physik-Reihe für die gymnasiale Oberstufe in Bayern. Ergänzend zum Schülerband wird auch ein Vertiefungsheft mit den wichtigsten Inhalten für das erhöhte Anforderungsniveau erscheinen.

Unser digitales Lehrermaterial click & teach unterstützt Sie optimal bei der Gestaltung Ihres Unterrichts. Selbstverständlich erscheint **Physik 13** auch als digitale Ausgabe click & study für Ihre Schülerinnen und Schüler.

Kennen Sie bereits unsere neue **Mathematisch-naturwissenschaftliche Formelsammlung – Bayern**? Diese wurde exakt nach den Vorgaben des IQB entwickelt und eignet sich perfekt für den Einsatz im Unterricht und dem schriftlichen Abitur. Weitere Informationen hierzu finden Sie auf den Seiten 24 und 25 dieser Leseprobe.

Wenn Sie mehr über **Physik 13** und unsere **Mathematisch-naturwissenschaftliche Formelsammlung – Bayern** erfahren möchten, kontaktieren Sie uns!

Wir beraten Sie gern.

Ihr Schulberatungsteam für Bayern



Dr. Katrin Brogl

Mobil: 0178 6012379

E-Mail: k.brogl@ccbuchner.de



Annette Goldscheider

Mobil: 0171 6012371

E-Mail: goldscheider@ccbuchner.de



Kilian Jacob

Mobil: 0171 6012375

E-Mail: jacob@ccbuchner.de

Entdecken Sie die Lehr- und Lernwelt von...

Physik – Gymnasium Bayern Sek II

Physik 13

gA

Herausgegeben von Rainer Dietrich, Frank Finkenberg und Rüdiger Janner

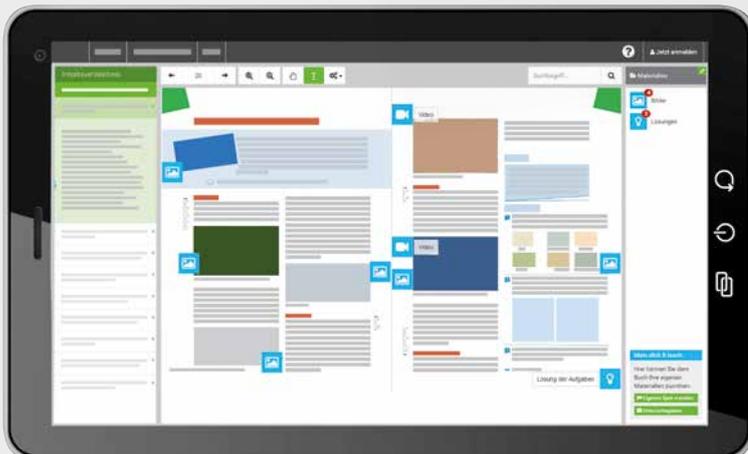
Unsere Physik-Reihe für die Oberstufe ermöglicht einen praxisorientierten und strukturierten Unterricht. Mit progressiv aufeinander aufbauenden Fachmethoden sowie speziellen, abiturähnlichen Aufgaben legt Band 13 den Grundstein für die Abiturvorbereitung.

Physik 13 ermöglicht eine klare Trennung der Anforderungsniveaus. Die Materialien für gA und eA sind voneinander entkoppelt.



Mehr Infos:
www.ccbuchner.de/bn/67053

digitales Zusatzmaterial auch via QR- oder Mediacodes direkt in der Print-Ausgabe **kostenfrei** verfügbar



click & teach

click & study

Ideal für den digitalen Materialaustausch

Die **digitale Ausgabe des Schülerbands click & study** und das **digitale Lehrermaterial click & teach** bilden zusammen die ideale digitale Lernumgebung.

Zusätzlich im digitalen Lehrermaterial **click & teach** sind auch die Lösungen und Arbeitsblätter zum erhöhten Anforderungsniveau enthalten.

Mehr Infos finden Sie auf den Seiten 26 bis 29 und auf www.click-and-study.de und www.click-and-teach.de.



Demo **click & teach**
Band 12

Für das grundlegende Anforderungsniveau

Für das grundlegende Anforderungsniveau (gA) bieten wir unser bewährtes Schulbuch – mit all seinen Vorzügen.

Für das erhöhte Anforderungsniveau

Für das **erhöhte Anforderungsniveau (eA)** bieten wir Ihnen Arbeitsblätter, auf die Ihre Schülerinnen und Schüler bequem über QR- und Mediacodes in **Physik 13** zugreifen können – natürlich mit umfangreichen Aufgaben (inklusive Lösungen im click & teach). Zudem stellen wir Ihnen diese wichtigsten Inhalte für das erhöhte Anforderungsniveau auch als zusätzliches **Vertiefungsheft** zur Verfügung.



Digital: Die eA-Materialien können nach der Genehmigung durch das Bayerische Staatsministerium für Unterricht und Kultus aus dem Buch heraus aufgerufen werden.



Gedruckt: Nach der Genehmigung werden die eA-Materialien auch gebündelt in einem zusätzlichen Vertiefungsheft erhältlich sein!



Hier finden Sie kostenfrei zum Herunterladen eine Vorabversion unserer eA-Materialien zu **Physik 12!**



Profitieren Sie bei Bestellungen von **click & study** im Schulkonto vom **3-fach-Rabatt** oder erwerben Sie bei Einführung der Print-Ausgabe die **Print-Plus-Lizenz** ab 2,10 € pro Titel und Jahr.

Innovatives EVA-Konzept

Das eigenverantwortliche Arbeiten stellt eine große Herausforderung dar, weshalb wir Sie dabei bestmöglich unterstützen möchten: Die entsprechenden Buchkapitel sind mit zahlreichen Fachmethoden und zielgerichteten Arbeitsaufträgen so konzipiert, dass Ihre Schülerinnen und Schüler vollkommen eigenständig die notwendigen Kompetenzen erarbeiten können.

Inhalt

Materialien zu Teilaspekten
des **erhöhten Anforderungs-**
niveaus (eA) von Kapitel A:



MC P67053-86

Sicher experimentieren in Physik	8
A Grundideen der Quantenphysik	10
1 Elektronen	
Versuche und Materialien	12
1.1 Versuche mit der Elektronenbeugungsröhre	14
1.2 Simulation des Doppelspaltexperiments	18
1.3 de-Broglie-Beziehung für das Elektron	22
2 Photonen	
Versuche und Materialien	26
2.1 Photon: Welle oder Teilchen?	28
2.2 Energie des Photons	32
2.3 Impuls des Photons	36
3 Einblick in die Welt der Quantenphysik	
Versuche und Materialien	38
3.1 Wellenfunktionen und Nachweiswahrscheinlichkeit	40
3.2 Superposition und Determiniertheit	42
3.3 Komplementarität	44
3.4 Messungen in der Quantenphysik	46
Methode: Fachsprache in der Quantenphysik	
Vermischte Aufgaben	50
Abiturvorbereitung	52
Selbsttest	54
Zusammenfassung	56

Die in den **lila** gekennzeichneten Mediacodes im Inhaltsverzeichnis hinterlegten Materialien decken Teilaspekte des **erhöhten Anforderungsniveaus (eA)** ab und sind NICHT Bestandteil des grundlegenden Anforderungsniveaus (gA)!

Inhalt

B Atommodelle in der Quantenphysik ... 58

4 Potentiale und Wellenfunktionen

Versuche und Materialien 60

4.1 Eindimensionaler Potentialtopf 62

4.2 Wellenfunktionen für weitere Potentiale 66

Methode: Simulation von Wellenfunktionen in Potentialen

5 Wasserstoffatom

Versuche und Materialien 70

5.1 Eigenschaften des Wasserstoffatoms 72

5.2 Orbitale des Wasserstoffatoms 76

6 Energiespektren, Franck-Hertz-Versuch

Versuche und Materialien 78

6.1 Energieniveauschema 80

6.2 Charakteristisches Röntgenspektrum 84

6.3 Franck-Hertz-Versuch 86

Vermischte Aufgaben	90
Abiturvorbereitung	92
Selbsttest	96
Zusammenfassung	98

Materialien zu Teilaspekten
des erhöhten Anforderungs-
niveaus (eA) von Kapitel B:



MC P67053-87

Inhalt

Materialien zu Teilaspekten
des erhöhten Anforderungs-
niveaus (eA) von Kapitel C:



MC P67053-88

C Kernphysik und Aufbau der Materie	102
7 EVA: Strukturuntersuchungen und Standardmodell	
Fahrplan für dieses Kapitel	104
7.1 Methoden zur Strukturuntersuchung	106
7.2 Standardmodell der Teilchenphysik	110
<i>Methode:</i> Hinweise und Tipps zur Recherche mithilfe eines KI-Tools	
<i>Methode:</i> Analyse von Quellen	
7.3 Gesellschaftlicher Nutzen von Grundlagenforschung	114
8 Kernmodelle	
Versuche und Materialien	120
8.1 Massendefekt und Bindungsenergie	122
8.2 Energiebilanz bei Kernreaktionen	124
8.3 Potentialtopfmodell des Kerns	126
9 Strahlungsarten	
Versuche und Materialien	130
9.1 Entstehung von α -, β -, und γ -Strahlung	132
9.2 Energiebilanzen und -spektren	136
10 Radioaktiver Zerfall	
Versuche und Materialien	140
10.1 Ionisierende Wirkung und Nachweis radioaktiver Strahlung	142
10.2 Mathematische Beschreibung des radioaktiven Zerfalls	146
10.3 Anwendung des radioaktiven Zerfalls	150

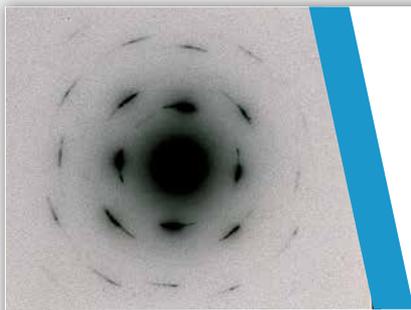
Inhalt**11 Strahlenschutz**

11.1 Energiedosis und Äquivalentdosis	152
11.2 Strahlenbelastung des Menschen	154
11.3 Maßnahmen zum Strahlenschutz	156

12 Kernenergietechnik

Versuche und Materialien	160
12.1 Kernenergietechnik	162
12.2 Chancen und Risiken der Kernenergienutzung	166

Vermischte Aufgaben	170
Abiturvorbereitung	172
Selbsttest	174
Zusammenfassung	176



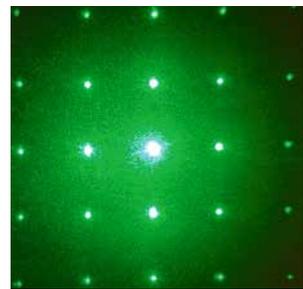
1

Elektronen

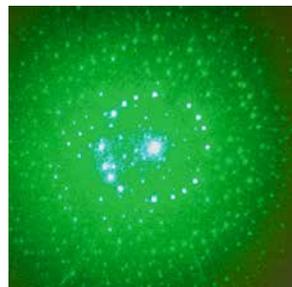
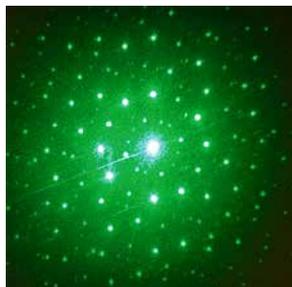
Versuche und Materialien zu Kapitel 1.1

► 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!

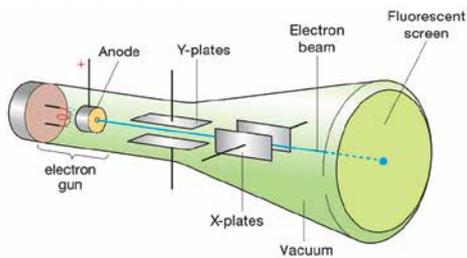


- Tipp:* Kreuzgitter finden sich oft als Geschenkartikel oder auf Weihnachtsmärkten.
- b) Geben Sie jeweils die Anzahl von Kreuzgittern an, die für die Abbildungen oben verwendet wurden.
- c) Beschreiben und skizzieren Sie das Bild auf dem Beobachtungsschirm, das Sie bei sehr vielen, gegeneinander gedrehten Kreuzgittern erwarten.

► M2 Lernaufgabe: Elektronenbeugungsröhre

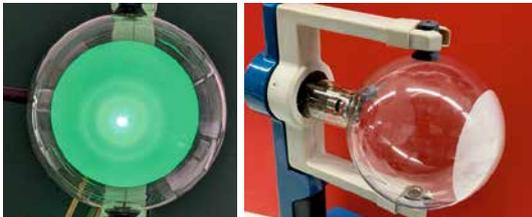
Elektronen-Ablenkröhre

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

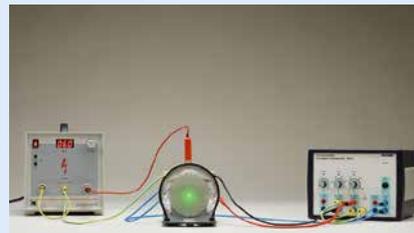
Bei einer Variante dieser Röhre, der Elektronenbeugungsröhre, wird ebenfalls ein Elektronenstrahl erzeugt. Dieser wird dann aber nicht mithilfe von Ablenkungsplatten gezielt abgelenkt, sondern durch eine dünne Graphitschicht geschossen. Auf dem Leuchtschirm ist auch hier wieder ein heller Punkt in der 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.

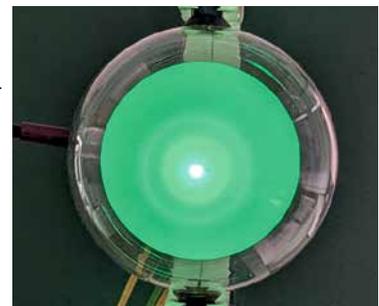
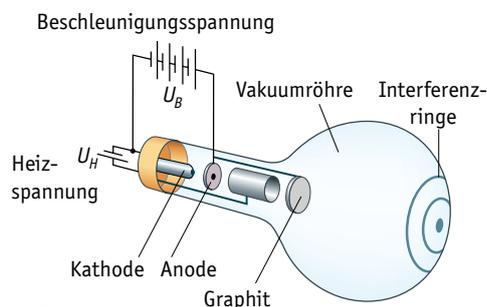


- Sammeln Sie zur Interpretation des Schirmbilds Situationen in der Physik, in denen Sie bereits ähnliche Beobachtungen wie bei diesem Experiment gemacht haben. Beschreiben Sie genau die Voraussetzungen, die dabei vorgelegen haben müssen.
- Formulieren Sie Hypothesen (vgl. Methode S. 190), die das Aussehen des Schirmbilds erklären könnten. Orientieren Sie sich dabei an den Situationen aus c) und übertragen Sie möglichst genau die Voraussetzungen auf das Experiment mit den Elektronen.
- 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.

1.1 Versuche mit der Elektronenbeugungsröhre

Schirmbild einer Elektronenbeugungsröhre

Eine Elektronenbeugungsröhre ist vom Aufbau her sehr ähnlich wie eine Elektronen-Ablenkrohr (vgl. B1): Elektronen werden aus einer Glühkathode gelöst und dann mithilfe eines elektrischen Feldes beschleunigt. Bei der Beugungsröhre treffen die Elektronen dann auf ein Kristallgitter, z. B. auf eine dünne Folie aus polykristallinem Graphit. 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.



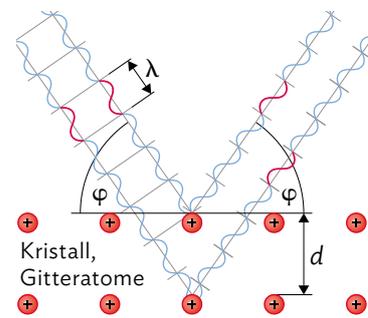
B1 Aufbau und ringförmiges Muster der Elektronenbeugungsröhre.

Das Ringmuster ist zunächst verwunderlich – schließlich sollten die Elektronen von der Graphitschicht in alle möglichen Richtungen abgelenkt werden können. Die Graphitkristalle 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.

Wenn also eine Analogie zu Lichtstrahlen nicht hilfreich ist, so scheint ein Vergleich mit Lichtwellen besser geeignet, das Schirmbild zu erklären. 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.

Exkurs: Bragg-Reflexion

Wellen können in einen Kristall eindringen, zumindest in die obersten Schichten. Dabei tritt an jedem Gitteratom eine 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



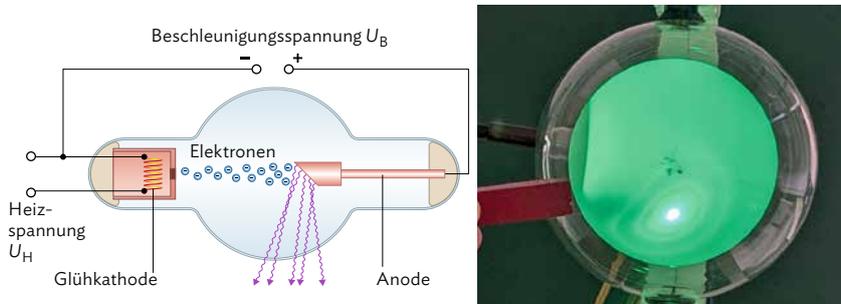
B2 Schematische Darstellung der Bragg-Reflexion.

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. B3): 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.



B3 Aufbau einer Röntgenröhre.

B4 Durch Magnetfeld verzerrtes Bild.

Dies lässt sich leicht mithilfe eines Magneten nachprüfen, der an die Röhre gehalten wird: Durch sein Magnetfeld wirkt auf 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. B4). Die Hypothese muss also verworfen werden: Für das Zustandekommen des Schirmbilds sind nur Elektronen verantwortlich, keine elektromagnetischen Wellen.

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:

Elektronen zeigen unter bestimmten Versuchsbedingungen Wellencharakter.

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)

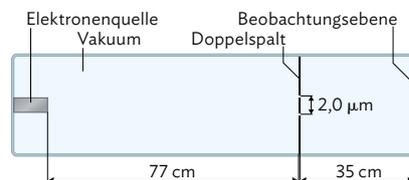
Um die vermutete Welleneigenschaft der Elektronen weiter zu untersuchen, bieten sich Experimente an, die ähnlich zu den Experimenten der Wellenoptik aufgebaut sind.

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. B6; hier 1000-fach).



B6 Interferenzstreifen beim Doppelspaltversuch mit Elektronen.



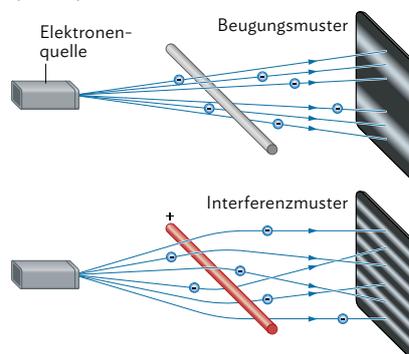
B5 Aufbau des Doppelspaltversuchs von Jönsson.

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. B7 oben).

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. B7 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 Wellencharakter. Diese Eigenschaft ist direkt auf die Elektronen selbst zurückzuführen und entsteht nicht etwa, weil die Elektronen in irgendeiner Form elektromagnetische Strahlung erzeugen.

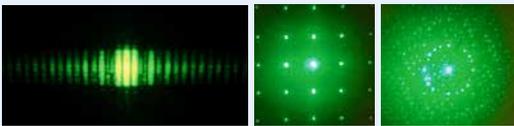


B7 Versuch von Möllenstedt und Düker.

A \ Grundideen der Quantenphysik

Musteraufgabe

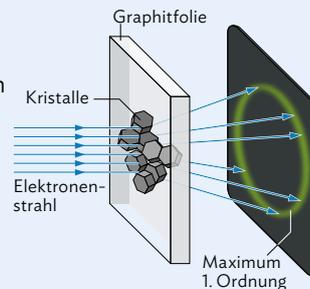
Beim Doppelspaltversuch mit Elektronen erhalten Sie ein Streifenmuster auf dem Schirm, in Analogie zum Bild eines Lasers hinter einem optischen Gitter. Bringt man jedoch zwei (wie bei einem Kreuzgitter) oder mehrere jeweils um einen bestimmten Winkel versetzte Gitter an, entstehen die dargestellten Interferenzbilder.



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

Lösung

Die Graphitschicht besteht aus Mikrokristallen, von denen jeweils mehrere gleichzeitig vom Elektronenstrahl getroffen werden. Das geschieht auch unter bestimmten Winkeln, bei denen Interferenzeffekte möglich sind. Die Elektronen verlassen also den Kristall auf dem Mantel eines Kegels, dessen Schnitt mit dem Leuchtschirm kreisförmig ist.



Arbeitsaufträge

- 1 | Mit dem Mediacode gelangen Sie zu einer weiteren Simulation des Experiments mit der Elektronenbeugungsröhre.

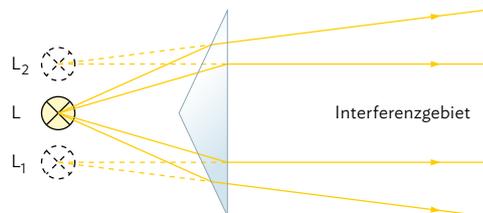


ME P67053-02

- Beschreiben Sie den Aufbau einer Elektronenbeugungsröhre.
 - Variieren Sie den Abstand zwischen Folie und Schirm und beschreiben Sie die Veränderungen des Schirmbildes. Ziehen Sie eine Parallele zu entsprechenden Versuchen in der Wellenoptik.
 - Stellen Sie eine physikalisch begründete, qualitative Aussage zum Zusammenhang zwischen Wellenlänge der Elektronen und Radius der Ringe auf.
 - Formulieren Sie einen qualitativen Zusammenhang zwischen der Beschleunigungsspannung der Röhre und dem Radius der Ringe.
 - Stellen Sie einen qualitative Zusammenhang zwischen Spannung und Wellenlänge her.
- 2 | Ein Kritiker an der Hypothese 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.“ Begründen Sie, ob dieses Argument stichhaltig ist. Nehmen Sie an, dass der Kritiker mit seiner Behauptung Recht hätte. Beurteilen Sie die Konsequenzen, die das dann für die Hypothese hätte, dass Elektronen in manchen Situationen Welleneigenschaften besitzen.

- 3 | Beim Nachweis der Welleneigenschaften von Elektronen eignen sich besonders Versuche, die analog zu Experimenten in der Wellenoptik aufgebaut sind.

- Recherchieren Sie Versuchsaufbau, Durchführung und Ergebnisse des Biprismaversuchs von Fresnel.



- Stellen Sie dar, wie der Versuch auf Elektronen übertragen werden kann. Erläutern Sie die Parallelen, die sich zum Versuch von Möllenstedt und Düker ergeben.
- Beim Versuch von Möllenstedt und Düker beeinflusst das Potential des Drahtes das Interferenzmuster. Begründen Sie, wie dies beim Biprismaversuch umgesetzt werden könnte.
- Beschreiben Sie eine Abänderung des Versuchs von Möllenstedt und Düker, um damit auch die Welleneigenschaft von Protonen zeigen zu können.
- Begründen Sie, ob die vorgestellten Versuche geeignet sind, um auch die Welleneigenschaft von Neutronen zu zeigen.

↳ weitere passende Aufgaben:
S. 50, Nr. 1

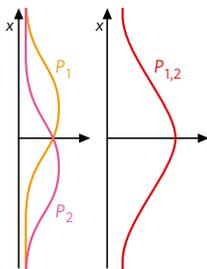
1.2 Simulation des Doppelspaltexperiments

Die Simulation lässt sich über den Mediacode herunterladen und installieren.



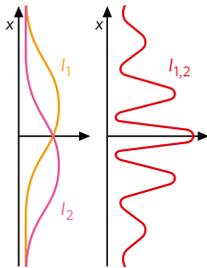
P67053-03

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



B2 Wahrscheinlichkeitsverteilung im Detektor.

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



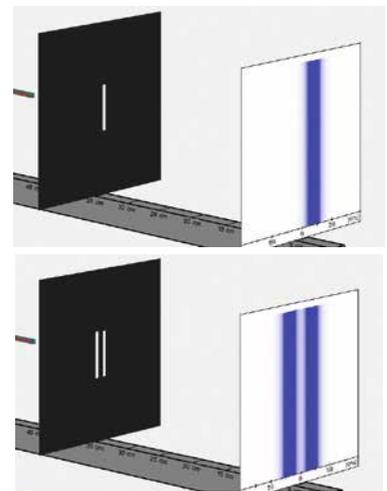
B4 Intensitätsverteilung im Detektor.

Simulation des Doppelspaltversuchs

Im vorherigen Abschnitt haben Sie festgestellt, dass Elektronen nicht immer ein Verhalten zeigen, das 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

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, sodass 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.

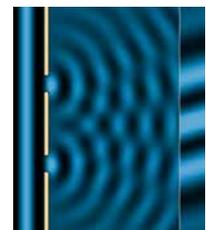


B1 Doppelspaltversuch mit Teilchen.

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

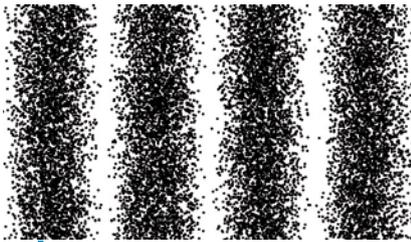
Der Doppelspaltversuch mit Wasserwellen aus Klasse 11 ist in B3 dargestellt. Ist nur einer der beiden Spalte offen, so geht von ihm eine Elementarwelle aus, die auf dem gesamten Beobachtungsschirm registriert werden kann. Wenn jedoch beide Spalte geöffnet sind, so entsteht ein Interferenzmuster, bei 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

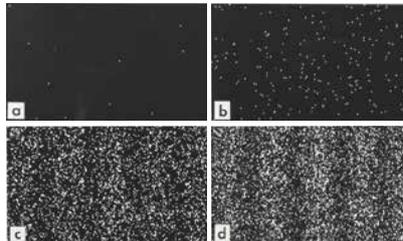
Mit den bisherigen Vorstellungen von Elektronen als Teilchen (Bausteine der Atomhülle), die z. B. in einem elektrischen Feld beschleunigt werden können, würde man beim Doppelspaltversuch mit Elektronen auf dem Schirm ein Bild erwarten, das dem der Kugeln in B1 entspricht. Ist nur einer der beiden Spalte geöffnet, entspricht das Ergebnis tatsächlich dieser Erwartung.



B5 Detail aus dem Schirmbild beim Doppelspaltversuch mit Elektronen.

Bei beiden geöffneten Spalten erhält man allerdings ein Interferenzmuster (vgl. B7 auf S. 20). Es unterscheidet sich jedoch von dem z. B. der Wasserwellen aus B3: Bei starker Vergrößerung zeigen die Interferenzstreifen eine „Körnung“, die darauf hinweist, dass die Elektronen einzeln an genau bestimmten Stellen nachgewiesen werden – wieder wie Kugeln (vgl. B5). Das Ergebnis scheint also weder mit der klassischen Teilchenvorstellung noch mit der klassischen Wellenvorstellung vereinbar zu sein!

Eine naheliegende Erklärung 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. B6, a). Lässt man das Experiment allerdings für längere Zeit laufen, bildet sich wieder das Interferenzmuster aus (B6, b-d).



B6 Schirmbild bei Erhöhung der Elektronenzahl.

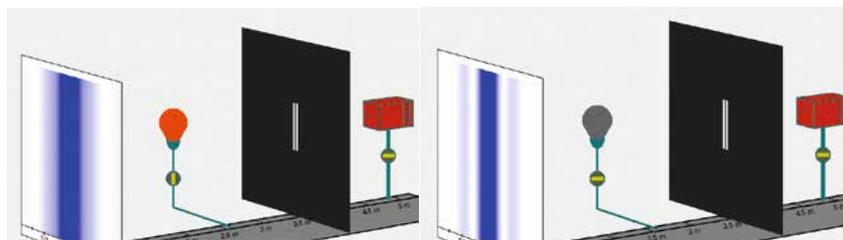
Elektronen zeigen beim Doppelspaltversuch sowohl Teilchen- als auch Welleneigenschaften.

Genauere Betrachtung

Es lassen sich noch weitere Hypothesen zur Erklärung formulieren, z. B., dass das Elektron sich teilt, jede Hälfte durch einen Spalt geht und sich danach wieder vereinigt. 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 kurzzeitig – das Elektron als klassisches Teilchen betrachtet, dem man beim Durchgang durch den Doppelspalt eine genau festgelegte, beschreibbare Bahn zuordnet. Im Realexperiment ist dies nur mit großem Aufwand möglich, in der Simulation ist die Anordnung einfach: Wir ändern den Doppelspaltversuch so ab, dass hinter den Spalten eine Lichtquelle installiert wird. Trifft nun ein Photon daraus auf ein Elektron, sehen wir einen Lichtblitz und wir können genau lokalisieren, durch welchen Spalt das Elektron gelaufen ist.

1.2 Simulation des Doppelspaltexperiments



B7 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 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.

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.

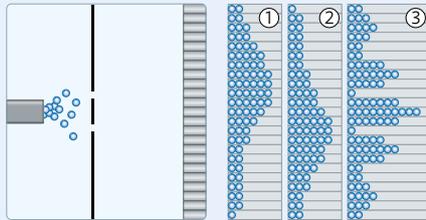
Ein Quantenobjekt zeigt weder ein reines Teilchen- noch ein reines Wellenverhalten, sondern sein Verhalten und damit die Art seiner Wahrnehmung wird durch die konkreten Versuchsbedingungen beeinflusst. Mathematisch wird es durch eine sogenannte Wellenfunktion $\Psi(x,t)$ beschrieben.

Die Werte von Ψ beim Quantenobjekt Elektron sind vergleichbar mit den Auslenkungen bei Wasserwellen. Unmittelbar hinter dem Doppelspalt setzt sich die Wellenfunktion aus zwei Teilen zusammen, die dem Durchgang durch je einen der beiden Spalte beschreiben: $\Psi_{12} = \Psi_1 + \Psi_2$. Weil bei Wellen die Intensität proportional zum Quadrat der Auslenkung ist, gilt auch hier: $I_{12} = |\Psi_{12}|^2 = |\Psi_1|^2 + |\Psi_2|^2 + 2 \cdot |\Psi_1| \cdot |\Psi_2| \neq I_1 + I_2$

Der letzte Summand ist für die Interferenz entscheidend, denn er verhindert, dass die Einzel-Intensitäten einfach addiert werden können.

Wichtig ist jedoch, dass – anders als bei einer Wasserwelle – die Wellenfunktion Ψ nicht mehr anschaulich interpretiert werden kann. Sie kann aber dazu herangezogen werden, um die Wahrscheinlichkeit dafür zu bestimmen, dass ein Quantenobjekt an dem einen oder anderen Ort nachgewiesen werden kann. Eine genauere Vorhersage ist allerdings nicht möglich. Diese Beschränkung ist – wie sich später in Kapitel 3 zeigen wird – eine grundsätzliche; mehr kann über das Quantenobjekt nicht gewusst werden. Man spricht deshalb auch von einem stochastischen Verhalten.

Musteraufgabe



- Beschreiben Sie kurz die Abfolge und Versuchsbedingungen der Experimente ① bis ③.
- Folgern Sie aus den Ergebnissen, dass es sich bei den „grünen 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

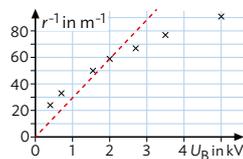
- Es treffen Objekte auf einen Doppelspalt. Bei ① oder ② ist jeweils nur ein Spalt geöffnet, man erhält hinter dem jeweiligen Spalt einen Maximalwert, der zur Seite hin abnimmt. Bei ③ sind beide Spalte geöffnet, es ergibt sich ein Interferenzmuster mit mehreren Maxima.
- Die Verteilungen bei ① und ② entsprechen dem, was man bei klassischen Teilchen erwarten würde. Das Öffnen beider Spalte führt dann zu einem Interferenzmuster, wie man es von Wellen kennt. Würden 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 klassischen Teilchen entstehen, bei dem sich ① und ② additiv zu einem Maximum in der Mitte des Detektors überlagern würden.

Arbeitsaufträge

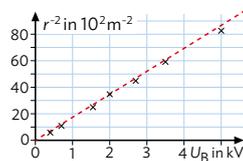
- „Ein Elektron zeigt wellenartiges, teilchenartiges und stochastisches Verhalten.“
Erläutern Sie diese Aussage durch experimentelle Ergebnisse am Doppelspalt.
 - Im vorherigen Kapitel 1.1 haben sie das Verhalten von Elektronen in der Elektronenbeugungsröhre untersucht. Geben Sie auch für diesen Versuch 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.  P67053-04
- In der klassischen Physik sah man das Elektron als Teilchen an, dem man einen Radius von ca. $3 \cdot 10^{-15}$ m zuordnen konnte.
 - Planen und beschreiben Sie 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).
 - Skizzieren Sie einen entsprechenden Versuchsaufbau. 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.
 - Treffen Sie Vorhersagen über den Auftreffort eines einzelnen Elektrons auf dem Schirm.
 - Treffen Sie Vorhersagen über die Auftrefforte der Gesamtheit aller Elektronen auf dem Schirm.
 - Nun werden 500 Elektronen gleichzeitig durch den Doppelspalt geschickt. Skizzieren Sie das Schirmbild.

1.3 de-Broglie-Beziehung für das Elektron

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



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



Zur Herleitung dieser Beziehung siehe Aufgabe 3.

Die mit „ \approx “ ange deutete Näherung entspricht der schon aus vorherigen Jahren bekannten Kleinwinkelnäherung.

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	3,5	5,0
r in cm	4,1	3,0	2,0	1,7	1,5	1,3	1,1

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

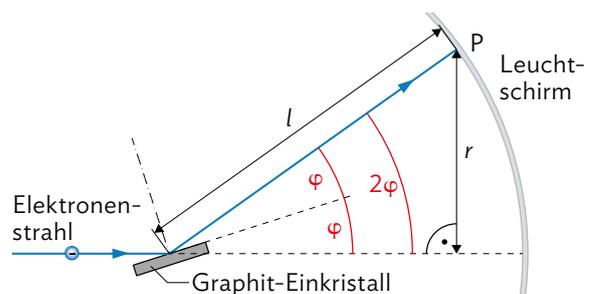
Zusammenhang zwischen Wellenlänge und Ringradius

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. Dies ist auch bei der Elektronenbeugungsröhre möglich.

Die Situation ist bei der Elektronenbeugungsröhre allerdings komplizierter als bei den bekannten Doppelspalt- oder Gitter-Experimenten. Für die Interferenz sind kleine Graphit-Kristalle verantwortlich, die nur unter ganz bestimmten Winkeln die einfallende Welle reflektieren. Für die möglichen Reflexionswinkel φ gilt die sogenannte Bragg-Beziehung: $2d \cdot \sin \varphi = k \cdot \lambda$. Die Variable d bezeichnet dabei den Abstand von zwei Gitterebenen im Kristall.

Aus der Skizze B1 kann man entnehmen: $\frac{r}{l} = \sin(2\varphi) \approx 2 \sin \varphi$
Setzt man hierin die Bragg-Beziehung 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 für alle Ringe 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:

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

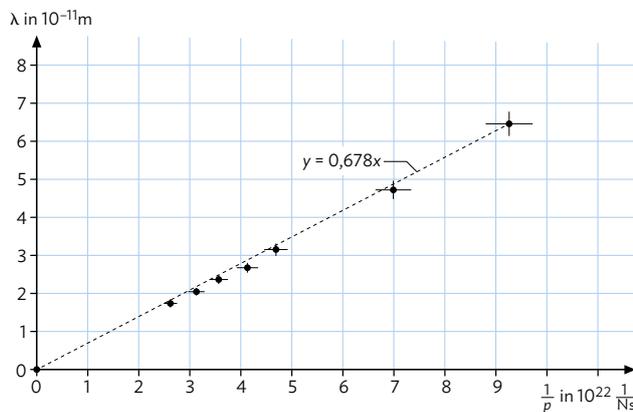
Damit lässt sich $\sqrt{U_B} \sim p$ schreiben und man findet, dass die Wellenlänge der Elektronen indirekt proportional zu ihrem Impuls ist: $\lambda \sim r \sim \frac{1}{\sqrt{U_B}} \sim \frac{1}{p}$

Die Proportionalitätskonstante kann aus unseren Messdaten bestimmt werden. Dafür muss jeweils mithilfe von $\textcircled{1}$ 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 Beispielerperiment 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	3,5	5,0
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 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 5%. Da p , $1/p$ 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, die für diese Beispielrechnung aber vernachlässigt wurden.

Die Proportionalitätskonstante h ergibt sich direkt aus der linearen Regression. Dabei müssen auch die Skalierungen der Achsen passend berücksichtigt werden:

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

Die Werte der Tabelle für $1/p$ 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 vermutete Proportionalität bestätigen können.

Alternativ kann man auch den „Worstcase“ für ein Wertepaar betrachten:
 $U_B = 0,69 \text{ kV}$, $r = 0,029 \text{ m}$
 liefert $h = 6,48 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

$U_B = 0,71 \text{ kV}$, $r = 0,031 \text{ m}$
 liefert $h = 7,05 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

Also zeigt sich auch hier eine maximale Abweichung von 5% für h .

1.3 de-Broglie-Beziehung für das Elektron

Die Proportionalitätskonstante h

Statt über die lineare Regression kann h alternativ auch aus der letzten Zeile der Tabelle bestimmt werden. Es ergibt sich ein Mittelwert von $6,69 \cdot 10^{-34}$ Js. Um die Unsicherheit dieser Angabe abzuschätzen, lässt sich im einfachsten Fall die halbe Spannweite angeben: $\Delta h = \frac{1}{2} \cdot (6,99 - 6,49) \text{ Js} = 0,25 \text{ Js}$.

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-Systems festgelegt.

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

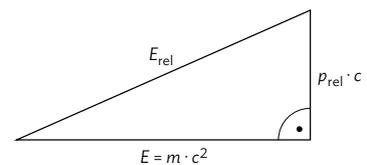
Materiewellen

Der in den vorangehenden Abschnitten gefundene Zusammenhang zwischen Wellenlänge λ und Impuls p wurde 1923 von Louis de Broglie allgemein für alle Objekte mit null verschiedener Masse postuliert. Man spricht von Materiewellen, worin sowohl die Teilchen- als auch die Welleneigenschaften der Objekte zum Ausdruck kommen sollen. Die Materiewelle kann jedoch nicht mit einer klassischen Theorie gedeutet werden, sondern ist ein mathematisches Konzept zur Berechnung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit eines massebehafteten Objekts.

Die de-Broglie-Beziehung stellt einen Zusammenhang zwischen Wellenlänge und Impuls eines massereichen Objekts her: $\lambda = \frac{h}{p}$

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 $E_{\text{rel}} = E_0 + E_{\text{kin}}$ und des relativistischen Impulses p_{rel} im Einstein-Dreieck verdeutlicht werden (vgl. B3). Damit ergibt sich: $E_{\text{rel}}^2 = E_0^2 + c^2 \cdot p_{\text{rel}}^2$.



B3 Anschauliche Darstellung der Energie-Impuls-Beziehung.

$$\text{Umgestellt nach } p_{\text{rel}} \text{ ergibt: } p_{\text{rel}} = \frac{\sqrt{E_{\text{rel}}^2 - E_0^2}}{c} = \frac{\sqrt{(E_0 + E_{\text{kin}})^2 - E_0^2}}{c} = \frac{\sqrt{2E_0 \cdot E_{\text{kin}} + E_{\text{kin}}^2}}{c}$$

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

Mit $E_0 = m \cdot c^2$ und $E_{\text{kin}} = e \cdot U_B$ folgt schließlich die relativistische Beziehung für die

$$\text{de-Broglie-Wellenlänge: } \lambda = \frac{h \cdot c}{\sqrt{2 \cdot e \cdot U_B \cdot m \cdot c^2 + (e \cdot U_B)^2}}$$

A \ Grundideen der Quantenphysik

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 auch die erforderliche Beschleunigungsspannung U_B .

Lösung

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

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

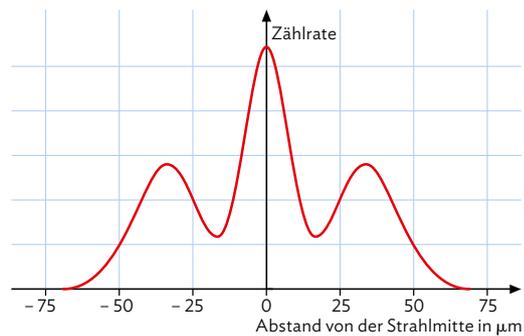
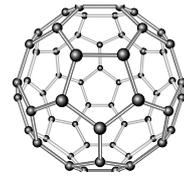
- b) Die Wellenlänge des Rennautos liegt um viele Zehnerpotenzen unter dem Atomradius, es werden sicher keine Beugungs- und Interferenzerscheinungen beobachtet werden können, bei Elektronen jedoch schon.

$$\text{c) } \frac{1}{2} m \cdot v^2 = e \cdot U_B \Rightarrow U_B = \frac{m \cdot v^2}{2e} = \frac{9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot \left(\frac{300}{3,6}\right)^2}{2 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}} = 2,62 \cdot 10^{-7} \text{ V}$$

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 mit einer Wellenlänge von $\lambda_n = 1,8 \cdot 10^{-10} \text{ m}$, was in etwa dem 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. 197).
- 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 die mithilfe von B1 durchgeführten geometrischen Betrachtungen). Nutzen Sie außerdem B2 von S. 14 und verwenden Sie die Bedingung $\Delta s = k \cdot \lambda$ für konstruktive Interferenz.

- 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 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 die Wellenlänge der Materiewelle mithilfe der Graphik oben.
- c) Begründen Sie, dass die Zählrate bei den Minima nicht Null beträgt.

↳ weitere passende Aufgaben:
S. 50, Nr. 2, 3, 5

Mathematisch-naturwissenschaftliche Formelsammlung – Bayern

nach den Vorgaben des IQB

Unsere genehmigte mathematisch-naturwissenschaftliche Formelsammlung ist exakt nach den Vorgaben des IQB in Berlin konzipiert und kann als Hilfsmittel für die Bearbeitung der Aufgaben in den Fächern Mathematik, Chemie und Physik in Abiturprüfungen verwendet werden.

Zulassungsnummer: 77/24-G+



Mehr Infos:
www.ccbuchner.de/bn/67001

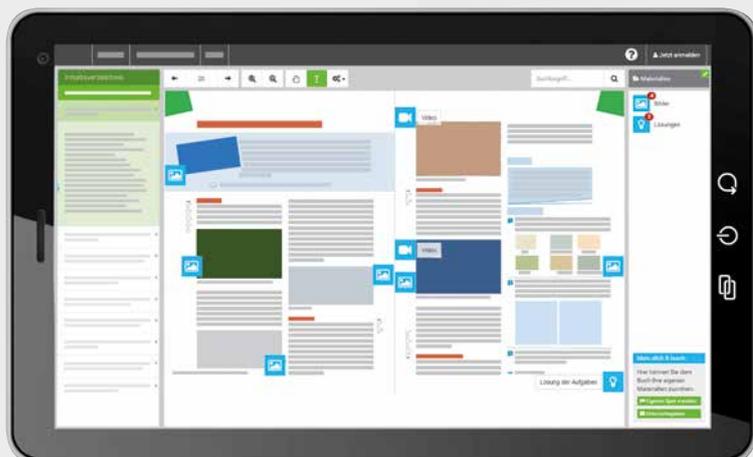


In der gedruckten Formelsammlung ist die **digitale Ausgabe click & study (6-Jahres-Lizenz)** inkludiert.

click &
study

Inklusive click & study

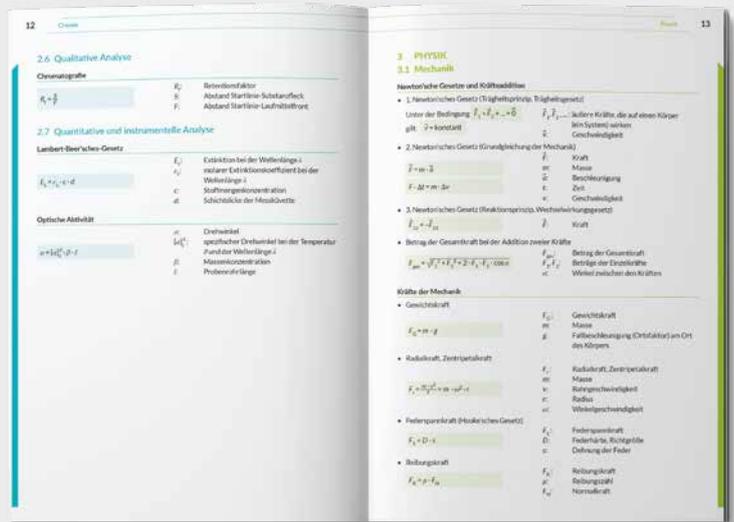
Jedes gedruckte Exemplar der Formelsammlung enthält einen **kostenfreien Code (6-Jahres-Lizenz)** für die **digitale Ausgabe click & study**. Somit kann die Formelsammlung auch digital im Unterricht oder zuhause via Tablet genutzt werden. Mehr Infos finden Sie auf den Seiten 26 bis 29 und auf www.click-and-study.de.



Mehr Infos
 zur digitalen Ausgabe

Optimal für den Einsatz in Prüfungssituationen

Der übersichtliche Aufbau der Formelsammlung hilft den Schülerinnen und Schülern dabei, sich insbesondere in Prüfungssituationen möglichst schnell zurechtzufinden.

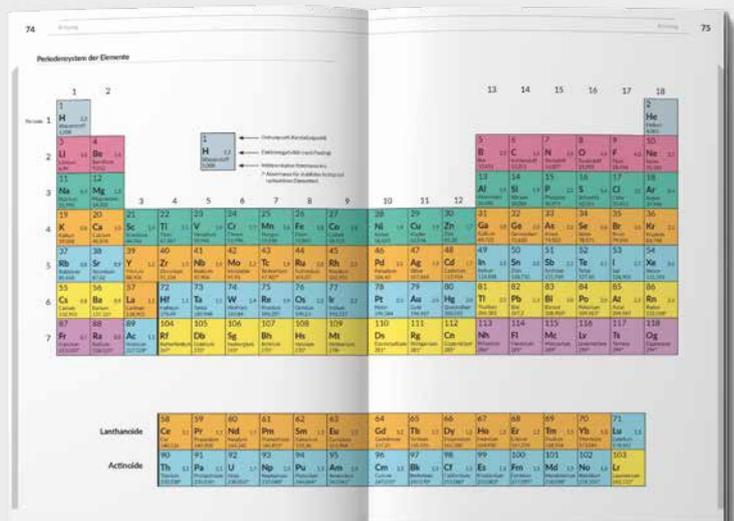


(Musterdoppelseite aus „Mathematisch-naturwissenschaftliche Formelsammlung – Bayern“)



Format und Bindung optimiert

Durch das gewählte Format sind das Periodensystem der Elemente und die Nuklidkarte problemlos lesbar. Dank der praktischen Bindung bleibt die Formelsammlung aufgeschlagen auf der gewünschten Seite offen. Beides erleichtert ein unkompliziertes Nachschlagen und Arbeiten.



(Musterdoppelseite aus „Mathematisch-naturwissenschaftliche Formelsammlung – Bayern“)



click & study

Digitale Ausgabe des Schülerbands



Digitaler Unterricht mit C.C.Buchner

Mit der digitalen Ausgabe des Schülerbands click & study und dem digitalen Lehrermaterial click & teach wird die Unterrichtsgestaltung und Vorbereitung einfacher als je zuvor.

Einfach in der Navigation:

Im Mittelpunkt steht immer die digitale Ausgabe des Schülerbands, um die sich alle Zusatzmaterialien und Funktionen gruppieren. So finden sich alle Inhalte dort, wo sie benötigt werden.

Einfach in der Bedienung:

click & study und click & teach bieten eine Fülle an nützlichen Funktionen. Die Gestaltung und die Bedienelemente sind dennoch nicht überladen und bleiben selbsterklärend.

Einfach im Zugriff:

Mit einem Internetbrowser können Sie mit jedem Endgerät auf click & study und click & teach zugreifen. Alternativ nutzen Sie die kostenfreie Tablet-App – so können Sie auch offline arbeiten. click & study kann zudem via www.bildungslogin.de verwendet werden.

Einfach für alle:

click & study und click & teach können miteinander verknüpft werden. So funktioniert der Unterricht bei Bedarf komplett digital – ideal für Tablet-Klassen und den digitalen Materialaustausch zwischen Lehrenden und Lernenden.

Weitere Informationen, kostenfreie Demoverversionen und Erklärvideos
auf www.click-and-study.de und www.click-and-teach.de

click & teach

Digitales Lehrermaterial



Das und vieles mehr bieten click & study und click & teach:



Digitale Arbeitsseiten

Durch das Einfügen digitaler Arbeitsseiten besteht die Möglichkeit, auf einer zusätzlichen leeren Seite eigene Texte, Bilder, Links und Freihandzeichnungen zu hinterlegen.



Umfangreiches Lehrermaterial (nur in click & teach)

click & teach bietet umfangreiches digitales Zusatzmaterial wie zum Beispiel Lösungen, didaktische Hinweise, weitere digitale Lernanwendungen, Animationen, Arbeitsblätter, Kopiervorlagen, Tafelbilder und vieles mehr.



Lerngruppenfunktionen

Als Lehrkraft haben Sie in click & teach die Möglichkeit, Materialien in click & study freizuschalten. Im Aufgabenpool und im Forum können Lernende Aufgaben digital empfangen, wieder abgeben und sich austauschen.



Lizenzmodelle für jeden Bedarf

Egal ob nur für Sie, das Kollegium oder die ganze Schule – wir haben für jeden Bedarf ein passendes Angebot. Bestellen können Sie ausschließlich auf www.ccbuchner.de.

Lizenzmodelle click & teach

für Lehrkräfte

	Kollegiums- lizenz	Einzellizenz flex	Einzellizenz
Inhalt	Digitale Ausgabe + Lehrermaterial	Digitale Ausgabe + Lehrermaterial	Digitale Ausgabe + Lehrermaterial
Preis	ab 130,- €	ab 37,- €	ab 24,50 €
Laufzeit	solange das gedruckte Lehrwerk erhältlich ist	solange das gedruckte Lehrwerk erhältlich ist	solange das gedruckte Lehrwerk erhältlich ist
Lizenzanzahl	beliebige Anzahl für das komplette Fachkollegium inkl. Referendare	1	1
Weitergabe	übertragbar	übertragbar	nicht übertragbar
Zugang	direkte Freischaltung im Schulkonto	direkte Freischaltung im Schulkonto	digitaler Freischaltcode per E-Mail
Verfügbarkeit	im verknüpften Schulkonto	im verknüpften Schulkonto	im persönlichen Konto

Stand: 01.01.2025

Einfache Verwaltung im Schulkonto

Für Lehrmittelverantwortliche, IT-Kräfte und Lehrkräfte bieten wir das C.C.Buchner-Schulkonto an. Damit können die digitalen Lehr- und Lernmittel click & teach und click & study an einem zentralen Ort erworben, verwaltet und dem Kollegium oder der Schülerschaft zur Verfügung gestellt werden.

▶ Lizenzen erwerben

Einfach Kollegiumslizenzen sowie Einzellizenzen flex per Rechnung bestellen.



▶ Lizenzen verwalten und übertragen

Zuordnung und Übertragung der Lizenzen zu Mitgliedern des Kollegiums einsehen und verwalten.

▶ Zugriffsrechte verwalten

Den verknüpften Lehrkräften die Rechte (kaufen, verwalten, bearbeiten) individuell vergeben.

▶ Lizenzen erwerben

Schulkonto- oder PrintPlus-Lizenzen per Rechnung in wenigen Schritten bestellen.



▶ Schulstrukturen anlegen und verwalten

Nach Anlage der Schulstruktur Daten der Schülerschaft manuell pflegen oder importieren.

▶ Lizenzen zuweisen

click & study je nach Bedarf einer ganzen Jahrgangsstufe, einer Klasse oder auch Einzelpersonen zuordnen.

Lizenzmodelle click & study

für Schülerinnen und Schüler

Bestellen Sie click & study
im Schulkonto und profitieren
Sie vom 3-fach-Rabatt!

click & study	Testlizenz	Einzellizenz	Schulkonto PrintPlus Lizenz	Schulkonto Lizenz
Inhalt	Digitale Ausgabe + Zusatzmaterial	Digitale Ausgabe + Zusatzmaterial	Digitale Ausgabe + Zusatzmaterial	Digitale Ausgabe + Zusatzmaterial
Preis	kostenfrei nur für Lehrkräfte	Standardpreis ab 6,90 €	ab 2,10 € bei Einführung des Schulbuchs	Standardpreis abzgl. Schulkonto-, Laufzeit- und Mengenrabatt
Laufzeit	100 Tage	12 + 1 Monat ab Freischaltung	12 + 1 Monat ab Freischaltung	wählbar 1–6 Jahre (+ 1 Monat) ab Freischaltung
Lizenzanzahl	1 – 30	1	1 pro eingeführtem Schulbuch	beliebige Anzahl für die Schülerschaft
Weitergabe	nicht übertragbar	nicht übertragbar	nicht übertragbar	übertragbar
Zugang	digitaler Freischaltcode per E-Mail	digitaler Freischaltcode per E-Mail	direkte Freischaltung im Schulkonto	direkte Freischaltung im Schulkonto
Verfügbarkeit	im persönlichen Konto	im persönlichen Konto	im verknüpften Schulkonto	im verknüpften Schulkonto

Stand: 01.01.2025

Sie haben Fragen? Wir helfen Ihnen gern!

Unsere Schulberatung und unsere Digitalberatung stehen Ihnen mit Rat und Tat zur Seite.

E-Mail: click-and-teach@ccbuchner.de | click-and-study@ccbuchner.de

Telefon: +49 951 16098333

Weitere Informationen, Schritt-für-Schritt-Anleitungen und Erklärvideos:

- ▶ www.click-and-study.de
- ▶ www.click-and-teach.de
- ▶ www.ccbuchner.de/schulkonto



Unsere WebSeminare für Bayern

Wir unterstützen und begleiten Sie beim Umsetzen des aktuellen LehrplanPLUS – und das nicht nur mit unseren neuen Lehrwerken. Wir möchten Ihnen Anregungen bieten, Materialien vorstellen und Gelegenheit zum Gedankenaustausch geben.

Deshalb bieten wir Ihnen WebSeminare an, für die Sie auch eine Teilnahmebestätigung erhalten.

Natürlich finden Sie uns ebenfalls auf überregionalen Messen und Kongressen.



Detaillierte Informationen und Termine finden Sie auf www.ccbuchner.de/veranstaltungen.

Wir freuen uns auf spannende Veranstaltungen, auf gute Gespräche und vor allem auf Sie!



Nichts mehr verpassen:
Unser Newsletter
mit allen aktuellen Terminen

Abonnieren Sie jetzt unseren Veranstaltungsnewsletter!
Damit sind Sie fächerübergreifend immer über die aktuellen Termine von C.C.Buchner informiert und können sich Ihren Platz sichern.

Ihr Schulberatungsteam in Bayern



Dr. Katrin Brogl

Mobil: 0178 6012379

E-Mail: k.brogl@ccbuchner.de

Zuständigkeitsbereiche

- ▶ Mittelfranken PLZ-Bereiche 914-972
- ▶ Unterfranken



Kilian Jacob

Mobil: 0171 6012375

E-Mail: jacob@ccbuchner.de

Zuständigkeitsbereiche

- ▶ Mittelfranken PLZ-Bereich 90-913
- ▶ Niederbayern
- ▶ Oberbayern ohne PLZ-Bereiche 82, 836/837, 850/52, 86
- ▶ Oberfranken
- ▶ Oberpfalz

Tagungsstätten:

Gars, Wasserburg



Annette Goldscheider

Mobil: 0171 6012371

E-Mail: goldscheider@ccbuchner.de

Zuständigkeitsbereiche

- ▶ Schwaben
- ▶ Oberbayern PLZ-Bereiche 82, 836/837, 850/52, 86

Tagungsstätten:

Akademie Dillingen und Tutzing



Sie wünschen persönliche Beratung?
Unser Schulberatungsteam für Bayern ist für Sie da
– vor Ort, telefonisch und online:



Dr. Katrin Brogl

Mobil: 0178 6012379

E-Mail: k.brogl@ccbuchner.de



Annette Goldscheider

Mobil: 0171 6012371

E-Mail: goldscheider@ccbuchner.de



Kilian Jacob

Mobil: 0171 6012375

E-Mail: jacob@ccbuchner.de

Sie benötigen weitere Exemplare dieser Leseprobe* für Ihre Fachkonferenz?

1

Geben Sie auf www.ccbuchner.de die
Bestellnummer **L67053** in die Suchleiste ein.



2

Legen Sie die kostenfreie Leseprobe
(1 Exemplar pro Person) und ggf. weitere
Produkte in Ihren **Warenkorb**.



3

Folgen Sie den weiteren Anweisungen, um
den Bestellvorgang abzuschließen.

*Nur solange der Vorrat reicht.



Oder
direkt über:



L67053

