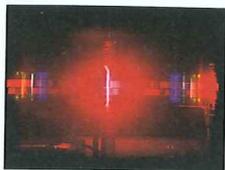
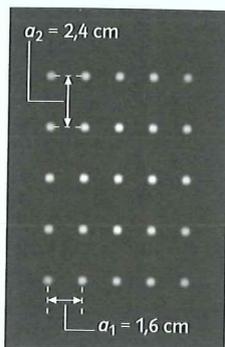


Aufgaben

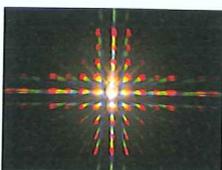
Im Vergleich zum Auge ist das Ohr ein Breitbandempfänger. Erläutern Sie diese Aussage.



B1 In der Lichtquelle leuchtet Wasserstoff. Interpretieren Sie diese Versuchsaufnahme.



B2 Zu Aufgabe 12



B3 Erläutern Sie das Zustandekommen der Kreuzgitteraufnahme mit weißem Licht.

Insekten wie Bienen orientieren sich mit Hilfe einer typischen Welleneigenschaft des Lichtes. Beschreiben Sie diese Fähigkeit genauer.

die erforderlichen Versuchsanordnungen und die Ursachen für die Farbentstehung. Worin unterscheiden sich die entstehenden Spektren? Begründen Sie die Unterschiede.

10 Auf ein Gitter mit $g = 4 \cdot 10^{-5} \text{ m}$ fällt weißes Licht mit Wellenlängen zwischen 400 nm und 780 nm.

- Berechnen Sie die Winkel für Maxima der 1., 2. und 3. Ordnung. Von welchem Winkel an werden sich Spektren verschiedener Ordnung überlagern?
- Welchen Abstand haben die Spektren 1. Ordnung gegenüber dem Hauptmaximum auf einem 3 m entfernten Schirm?

11 Paralleles Laserlicht mit $\lambda = 632 \text{ nm}$ trifft auf einen schmalen Spalt. Auf einem 5 m entfernten Schirm liegen die Minima 1. Ordnung 6,3 cm auseinander.

- Bestimmen Sie die Spaltbreite.
- Bei welcher Wellenlänge würden die Minima 7 cm auseinander liegen?

12 Bild B2 zeigt das Interferenzbild von Laserlicht, das auf zwei gekreuzte Gitter trifft.

- Deuten Sie das Schirmbild.
- Berechnen Sie die Gitterkonstanten, wenn der Abstand Gitter-Schirm $l = 3 \text{ m}$ und $\lambda = 632 \text{ nm}$ beträgt.

13 Eine Rasierklinge wird mit dem Licht einer Natriumdampflampe beleuchtet. Der Schatten zeigt am Rand helle und dunkle Streifen.

- Wie kommen diese zustande?
- Warum sind diese Streifen bei Verwendung einer Glühlampe nicht zu erkennen?

14 Aus einem Satelliten in 250 km Höhe werden Fotos von der Erde gemacht. Berechnen Sie den Durchmesser eines Objektivs, das Gegenstände mit 1 m Durchmesser noch auflösen kann ($\lambda = 750 \text{ nm}$).

15 Berechnen Sie die Entfernung bei der Sie die Scheinwerfer eines Autos noch getrennt sehen.

16 Eine im rechteckigen Rahmen senkrecht aufgestellte Seifenhaut werde mit rotem Licht ($\lambda = 650 \text{ nm}$) beleuchtet.

- Beschreiben Sie die im reflektierten Licht beobachtbaren Erscheinungen bei langsam herabsinkender Lösung.
- Bei welcher Schichtdicke zeigt sich oben im reflektierten Licht zum letzten Mal maximale Helligkeit ($n_W = \frac{4}{3}$)?

c) Warum werden die Farben bei Beleuchtung mit weißem Licht zum unteren Rand der Seifenhaut immer blasser, bis sie schließlich in Weiß übergehen?

17 Ein Luftkeil (Keillänge $l_0 = 15 \text{ cm}$, Endstärke der Luftschicht $D = 1,5 \mu\text{m}$) wird mit Licht der Wellenlängen $\lambda_1 = 400 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 500 \text{ nm}$, $\lambda_3 = 600 \text{ nm}$ beleuchtet.

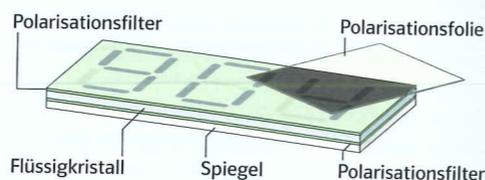
- Zeichnen Sie den Keil mit übertrieben großem Keilwinkel und kennzeichnen Sie für die verschiedenen Wellenlängen die Stellen der Minima im reflektierten Licht.
- In welchen Entfernungen von der Keilspitze liegen gemeinsame Minima für die Wellenlängen?

Polarisation

18 Diskutieren Sie einen möglichen Blendenschutz, wenn Scheinwerfer und Frontscheiben bei Autos mit Polarisationsfiltern versehen werden. Begründen Sie Ihre Antwort.

19 Sicherheitsglas für Frontscheiben von Autos steht unter innerer Spannung. Bei blauem Himmel sind manchmal farbige Muster zu erkennen. Erklären Sie dies!

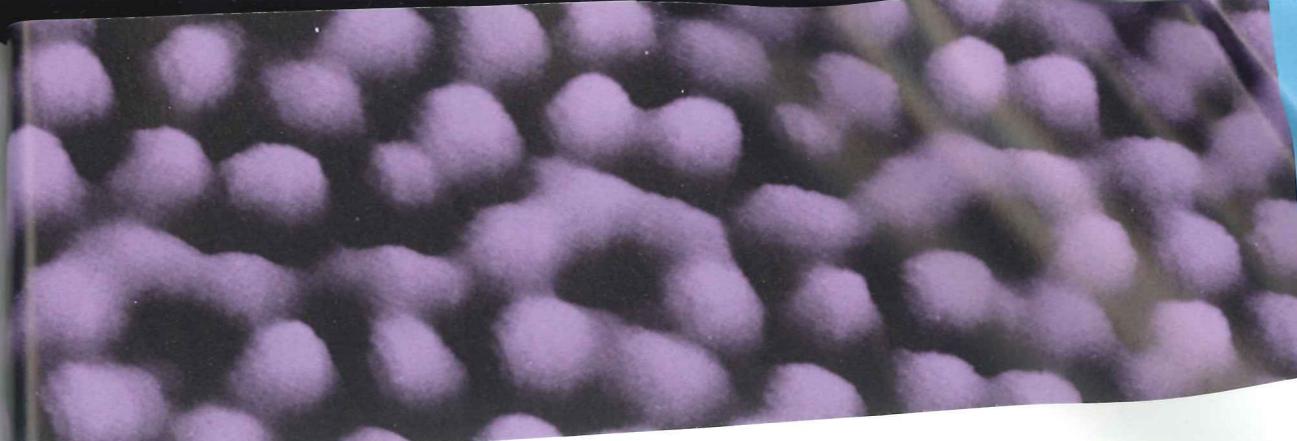
20 Bei LCD-Anzeigen kann die Polarisations Ebene von Segmenten durch eine elektrische Spannung gedreht werden. Deuten Sie die folgende Darstellung.



Röntgenstrahlung

21 Röntgenstrahlung der Wellenlänge $\lambda = 154 \text{ pm}$ trifft auf einen Lithiumfluoridkristall. Der kleinste Winkel, bei dem eine Bragg-Reflexion beobachtet wird, ist der Glanzwinkel $\vartheta = 22,5^\circ$. Leiten Sie die Bragg-Beziehung her und bestimmen Sie den Abstand der Netzebenen des Kristalls.

- Welche Eigenschaften der Röntgenstrahlung sind mit denen des Lichtes identisch?
- Wie kommt es, dass man mit Röntgenstrahlung Materie „durchleuchten“ kann?



Quantenobjekte

Grenzen der Beobachtung Ein entfernter Wald erscheint wie eine Wand, einzelne Bäume sind nicht zu unterscheiden. Das Auge kann verschiedene Objekte nur getrennt wahrnehmen, wenn ihre Bilder auf verschiedene Sehzellen der Netzhaut fallen. Mit dem Lichtmikroskop können nur Einzelheiten gesehen werden, die weiter als zwei tausendstel Millimeter voneinander entfernt sind. Weitere Vergrößerungen zeigen keine neuen Einzelheiten mehr. Durch die von der Wellenlänge des Lichtes abhängige Beugung des Lichtes an der Öffnung des Objektivs verwischt das Bild.

Viel stärkere Vergrößerungen sind mit Mikroskopen zu erzielen, die Elektronen statt Licht zur Erzeugung eines Bildes verwenden. Das Raster-Tunnel-Mikroskop etwa konstruiert ein Bild elektronisch punktweise. Dazu wird eine feine Nadel über das Objekt bewegt. Zwischen Nadel und Objekt herrscht ein starkes elek-



trisches Feld, so dass Elektronen übertreten können. Die Stromstärke ist ein Maß für die Nähe des Objektes an dieser Stelle. Die unterschiedlichen Stromstärken aller abgetasteten Stellen werden auf einem Bildschirm in Hell-Dunkel-Unterschiede umgewandelt. Die Abbildung oben zeigt ein auf diese Weise erzeugtes Bild von mehreren Molekülen des Phenols.

Grenzen der Erkenntnis Was zeigt das Bild? Mal sieht man deutlich eine junge Frau, mal eine alte Frau. Es fällt schwer, beide gleichzeitig zu erkennen. Die Abbildung entzieht sich einer eindeutigen Sichtweise.

Ähnliches gibt es auch in der Physik. Ein berühmter Gedanken(!)versuch von Erwin Schrödinger veranschaulicht das Problem: Eine lebende Katze wird in einen undurchsichtigen Kasten eingeschlossen. Ein Ereignis, das mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% eintreten kann, tötet sie in der nächsten Stunde. Lebt sie in einer Stunde noch? Wir können es erst wissen, wenn wir den Kasten öffnen. Vorher lässt sich nur feststellen: Die Katze ist entweder tot oder lebendig. Der Tatbestand entzieht sich also unserer Kenntnis, bis wir nachgeschaut haben, also gemessen haben.

Schrödinger und Heisenberg lieferten eine mathematische Theorie zur Beschreibung solcher Probleme im Mikrokosmos, die Quantenphysik.



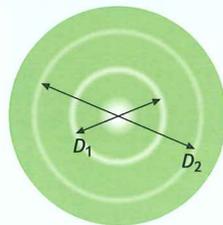
Erwin Schrödinger (1887–1961)



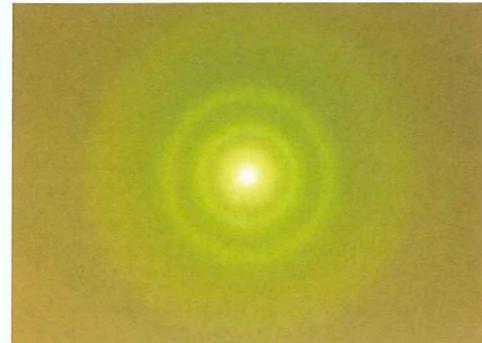
Werner Heisenberg (1901–1976)

Interferenz mit Elektronen

Brockhaus Enzyklopädie: leichtes, negativ geladenes, stabiles Elementarteilchen. Ruhemasse $9,1093897 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$, Ladung $1,60217732 \cdot 10^{-19} \text{ As}$, wichtigster Vertreter der Leptonen



B1 Elektronenbeugung



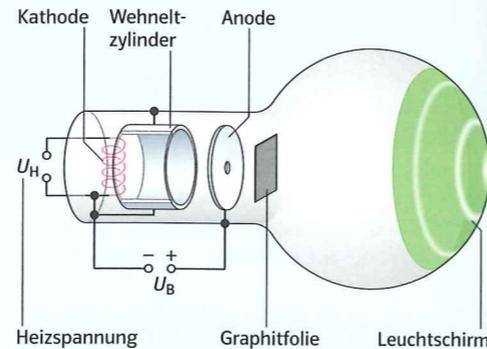
B2

■ V1 In einer Röhre wie in der Grafik B3 besteht zwischen Anode und Kathode die Spannung U_B . Elektronen, die aus der glühenden Kathode austreten, werden zur Anode hin beschleunigt, gelangen durch ein Loch in der Anode hindurch und treffen auf eine Schicht aus Graphitpulver. Sie durchdringen das Pulver und treffen auf den Leuchtschirm der Röhre.

Neue Vorstellungen über Elektronen Die Elektronenbeugungsröhre in Bild B3 erzeugt einen feinen Strahl von Elektronen, deren Geschwindigkeit durch die Anodenspannung U_B bestimmt ist. Durch ein Loch in der Anode gelangen die Elektronen auf den Leuchtschirm und erzeugen dort einen Lichtfleck. Befindet sich zwischen Anode und Leuchtschirm eine dünne Schicht aus Graphitpulver, so zeigt der Schirm zusätzlich mehrere konzentrische Kreise. Ihr Durchmesser hängt von der Anodenspannung U_B ab. Ein Magnet beeinflusst das Muster. Dies ist verständlich, denn bewegte Elektronen werden im Magnetfeld abgelenkt. Ringmuster wie das beobachtete entstehen bei der Interferenz von Röntgenstrahlung nach dem Durchgang durch Kristallpulver oder hinter einem mit Laserlicht beleuchteten, rotierenden Kreuzgitter (\rightarrow B4).

Das für Elektronen ungewöhnliche Verhalten kann nach einer Idee des französischen Physikers Louis de Broglie (1892–1987) gedeutet werden. Danach ist das Muster ein Interferenzbild.

Den Elektronen wird dabei eine von der Spannung U_B abhängige Wellenlänge λ



B3 Elektronenbeugungsröhre

Auf dem Schirm sieht man konzentrische Ringe. Ihr Durchmesser nimmt ab, wenn U_B steigt.

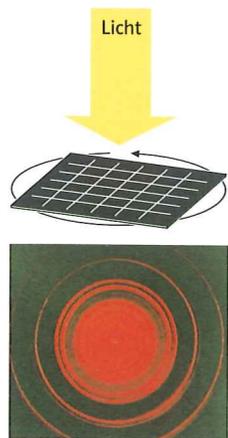
■ V2 Wird im Versuch 1 dem Leuchtschirm der Röhre der Pol eines Magneten genähert, so weicht die Ringstruktur je nach Wahl des Magnetpoles in die eine oder andere Richtung seitlich aus und wird etwas verzerrt.

zugeordnet. Unklar jedoch ist die Natur dieser Welle.

● Durchdringen Elektronen eine Graphitschicht, so erzeugen sie ein Bild wie bei einer Interferenz von Wellen.

Aus dem Interferenzbild lässt sich die Wellenlänge bestimmen. Wegen der Ähnlichkeiten der Bilder vergleicht man die Wechselwirkung der Elektronen mit der Materie versuchsweise mit der Bragg-Reflexion von Röntgenstrahlung an einem Kristallgitter. Für Graphit sind die Netzebenenabstände $a_1 = 2,13 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ und $a_2 = 1,23 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ (\rightarrow B1 auf folgender Seite). Bei Wellen liefern kleine Gitterkonstanten größere Abstände der Interferenzmaxima. Man deutet die Ringe als Maxima und ordnet a_1 dem kleineren Radius R_1 , a_2 dem größeren R_2 zu.

■ A1 Entwickeln Sie aus der Kenntnis des Interferenzbildes hinter einem Gitter das Bild, das sich bei zwei gekreuzten Gittern ergibt. Begründen Sie so das Bild des rotierenden Kreuzgitters.



B4 Interferenzbild eines rotierenden Kreuzgitters

Die Wellenlänge ergibt sich dann aus der Bragg-Bedingung.

$$2a \cdot \sin \theta = k \cdot \lambda \quad k = 0, 1, 2 \dots$$

Die Gitterkonstante a ist der Abstand der Netzebenen, k ist die Ordnung des Interferenzmaximums und θ ist der zugehörige Glanzwinkel. Mit den Bezeichnungen aus der Grafik B1 gilt: $\tan 2\theta \approx \sin 2\theta = R/l$. Mit dem so bestimmten Winkel liefert die Bragg-Bedingung für $k = 1$ die Wellenlänge:

$$\lambda = 2a \cdot \sin \theta = 2a \cdot \sin(0,5 \cdot \arcsin(R/l))$$

Die Messwerte in Tabelle B2 ergeben bei festem U_B und $k = 1$ für D_1 und D_2 gleiche Werte für λ , wie es bei der Interferenz von Wellen mit einer bestimmten Wellenlänge zu erwarten ist.

Da sich die Radien der Ringe im Interferenzmuster mit der Spannung U_B ändern, spielt vermutlich die Geschwindigkeit und damit der Impuls $p = m \cdot v$ der Elektronen eine wesentliche Rolle. Aus ihrer kinetischen Energie

$$E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = U_B \cdot e$$

$$\text{folgt: } v^2 = 2 U_B \cdot \frac{e}{m}$$

Der Impuls der Elektronen in Richtung auf den Graphitkristall beträgt also:

$$p = m \cdot v = \sqrt{2 U_B \cdot e \cdot m}$$

Mit steigenden Werten für p sinken die Werte für λ . Das Produkt $p \cdot \lambda$ ist in guter Näherung eine Konstante. Sie heißt Planck'sche Konstante h . Ihr Wert ist

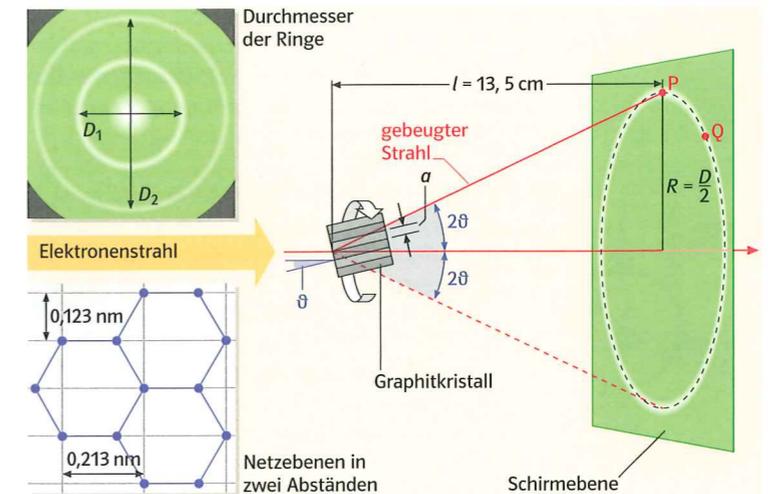
$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

Max Planck (1858–1947) entdeckte 1900 die Konstante h bei der Untersuchung der thermischen Strahlung.

Das Interferenzmuster kann also gedeutet werden, wenn man den Elektronen eine Wellenlänge zuordnet. Louis de Broglie postulierte 1924, dass für Elektronen $\lambda = h/p$ sein soll. λ heißt De-Broglie-Wellenlänge.

Elektronen im Zweifachspalt 1960 gelang es Claus Jönsson, Elektronen durch einen so feinen Zweifachspalt hindurch treten zu lassen, dass sie in der Registrierebene eines Elektronenmikroskopes ein Muster in Form von sehr feinen Streifen erzeugten (\rightarrow B3).

Die Elektronen wurden mit einer Spannung von $U_B = 50 \text{ kV}$ beschleunigt. Der Abstand der beiden Spalte betrug etwa 10^{-6} m . Das Bild erinnert stark an ein Interferenzmuster mit Licht. Insgesamt ergibt sich:



B1 Interferenz von Elektronen an einem Graphitkristall. Dreht man den Kristall um die Achse der einfallenden Elektronen, so liegt das Maximum nicht in P, sondern z.B. in Q. Im Kristallpulver des Graphits sind alle Lagen vertreten, so dass ein Ring entsteht.

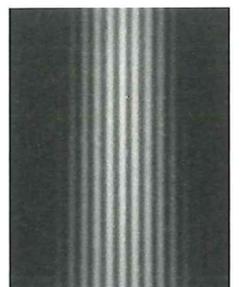
U_B in kV	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
p in 10^{-23} Ns	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8
D_1 in cm	2,9	2,6	2,5	2,3	2,2
λ in 10^{-12} m	23	21	20	18	17
$p \cdot \lambda$ in $10^{-34} \text{ Ns} \cdot \text{m}$	6,9	6,7	6,8	6,5	6,5
D_2 in cm	4,9	4,6	4,2	4,0	3,8
λ in 10^{-12} m	22	21	19	18	17
$p \cdot \lambda$ in $10^{-34} \text{ Ns} \cdot \text{m}$	6,6	6,7	6,5	6,5	6,5

B2 Bestimmung der Wellenlänge

● Treten viele Elektronen durch einen Kristall oder sehr enge Öffnungen, so ist ein Interferenzbild zu beobachten. Es entspricht einem Interferenzmuster, bei der Wellenlänge $\lambda = h/p$.

Wird die Zahl der Elektronen im Elektronenstrahl immer mehr verringert, so sind im schwächer werdenden Linienmuster unregelmäßig verteilte Punkte festzustellen. Dies erwartet man, wenn man sich Elektronen z.B., wie es im Lexikon beschrieben wird, als Teilchen vorstellt.

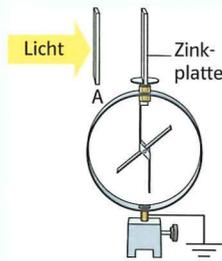
■ A1 Informieren Sie sich über das Auflösungsvermögen eines Lichtmikroskops. Begründen Sie dann nach der gerade gewonnenen Vorstellung von Elektronen das höhere Auflösungsvermögen des Elektronenmikroskops.



B3 Interferenzstreifen mit Elektronen

Licht löst Elektronen aus

„Die Beobachtungen (bei nichtelektrischen Erscheinungen) sprechen eher dafür, dass Licht Energie in Portionen zur Verfügung stellt.“ Albert Einstein, 1905



B1 Der Fotoeffekt

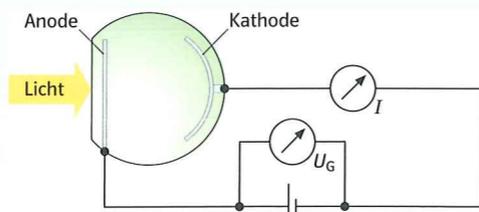


B2 Eine LED

Die LED, auch Lumineszenz-Diode oder Leuchtdiode genannt, ist ein Halbleiter, der bei angelegter Spannung Licht emittiert.

■ **V1** Eine frisch geschmirgelte Zinkplatte wird auf ein Elektroskop gesteckt, geladen und mit einer Glühlampe bzw. einer Quecksilberdampflampe beleuchtet (→ B1). Bei A können Gegenstände in den Lichtweg gebracht werden. Das Glühlampenlicht zeigt keine Wirkung. Bei Beleuchtung mit Quecksilberdampflicht wird die negativ geladene Platte entladen. Glas oder ein UV-Filter bei A verhindern auch dies.

■ **V2** In einer Vakuum-Fotозelle wie in der Grafik B3 ist die Zinkplatte durch eine Caesiumschicht ersetzt. Sie wird mit dem Minuspol einer elektrischen Quelle verbunden, ein Draht ring ihr gegenüber mit dem Pluspol. Bei Beleuchtung der Fotозelle setzt unabhängig von der Lichtquelle sofort ein Strom ein. Seine Stärke hängt von der angelegten Spannung und der Beleuchtungsstärke ab. Auch ohne



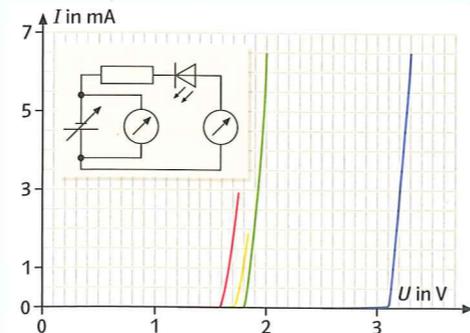
B3 Fotoeffekt in der Vakuumfotозelle

Der Fotoeffekt und Lumineszenz In Lichtschranken löst Licht elektrische Impulse aus, in einer LED (z. B. in einem Fahrradrücklicht) wird bei geeigneter Spannung Licht erzeugt, ohne dass ein Glühdraht erwärmt wird. In beiden Fällen findet eine Energieumsetzung statt (→ B5). Im ersten Fall wird Lichtenergie in elektrische umgesetzt, man spricht vom Fotoeffekt, im zweiten Fall elektrische in Lichtenergie, man spricht vom inversen Fotoeffekt oder von Lumineszenz.

Der Fotoeffekt kann im Experiment z. B. durch Beleuchten einer Metallplatte untersucht werden. Es zeigt sich: Das einfallende Licht löst aus dem Metall Elektronen aus. Man stellt fest:

- Der Fotoeffekt tritt nur ein, wenn die Frequenz des Lichtes oberhalb einer vom Metall abhängigen Grenzfrequenz liegt.

Spannung zwischen Caesiumschicht und Draht ring besteht ein Strom. Verbindet man den Draht ring mit dem Minuspol der Quelle, so wird bei einem bestimmten Wert der Spannung U_G die Stromstärke null. Bei einer größeren Frequenz des Lichtes ergibt sich ein größerer Wert der Spannung U_G .



B4 Kennlinien einer LED

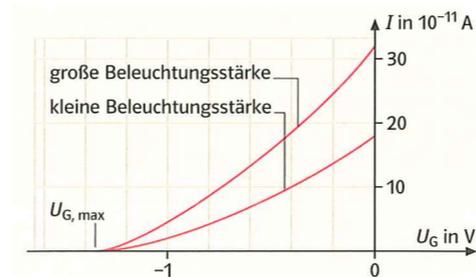
■ **V3** In der Schaltung nach Grafik B4 bestimmt man die Kennlinie einer LED (→ B2). Es zeigt sich, dass erst oberhalb einer gewissen Spannung U_S ein Strom gemessen wird. Erst bei dieser Spannung beginnt auch die LED zu leuchten. Je größer U_S ist, desto höher liegt die Frequenz des emittierten Lichtes.

Unterhalb der Grenzfrequenz tritt der Fotoeffekt auch bei hoher Beleuchtungsstärke oder langer Belichtung nicht auf, oberhalb setzt er sofort mit der Beleuchtung ein. In der Wellenvorstellung vom Licht ist unklar, warum eine erhöhte Beleuchtungsstärke, d. h. eine größere Amplitude der Welle, unterhalb der Grenzfrequenz keine Wirkung hat. Der Fotoeffekt wirft Fragen bezüglich der Wellenvorstellung vom Licht auf. Einstein erhielt für die Klärung dieser Fragen den Nobelpreis.

Bei der LED bedarf es einer bestimmten, vom Material der LED abhängigen Spannung U_S , um Licht zu erzeugen. Wenn diese Spannung erreicht ist, entsteht Licht einer bestimmten Farbe, d. h. einer bestimmten Frequenz. Beide Phänomene deuten auf einen Zusammenhang zwischen der Energie des Lichtes und dessen Frequenz hin.

Die Energiebilanz beim Fotoeffekt In einer Fotозelle werden Elektronen durch die Energie E_L des Lichtes aus einer Metallschicht herausgelöst. Sie bewegen sich von dieser Metallschicht zum gegenüberliegenden Ring (→ B4). Dies findet auch statt, wenn der Draht ring mit dem Minuspol und die Metallschicht mit dem Pluspol einer elektrischen Quelle verbunden werden. Das dadurch bestehende elektrische Feld wirkt der Bewegung der Elektronen entgegen. Gelangen sie trotzdem zum Draht ring, müssen die Elektronen nach dem Verlassen der Metallschicht kinetische Energie E_k haben.

Bei einer Gegenspannung U_G können die Elektronen den Ring nur erreichen, wenn $E_k \geq e \cdot U_G$ ist. Wird der Betrag der Spannung U_G vergrößert, so nimmt die Stärke des Elektronenstromes ab, bis sie bei $U_{G,max}$ null ist (→ B1).



B1 Stromstärke bei Gegenspannung

Bei $U_{G,max}$ reicht auch die kinetische Energie der schnellsten Elektronen nicht mehr aus, um zum Ring zu gelangen. Für sie gilt:

$$E_{k,max} = e \cdot U_{G,max}$$

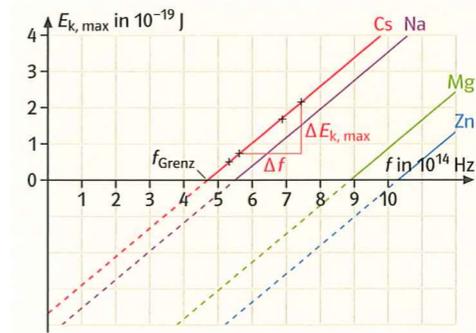
Die Graphen in der Abbildung B1 treffen sich alle in einem Punkt der U_G -Achse. Diese Grenzenergie ist also von der Beleuchtungsstärke unabhängig und nicht mit dem Wellenmodell des Lichtes zu erklären.

- Die maximale kinetische Energie der ausgelösten Elektronen hängt nicht von der Beleuchtungsstärke ab.

Licht und die Planck'sche Konstante Wird die Fotозelle mit jeweils einfarbigem Licht verschiedener Frequenzen bestrahlt, so ergeben Messungen:

f in 10^{14} Hz	5,19	5,49	6,88	7,41
$U_{G,max}$ in V	0,40	0,55	1,05	1,35
$E_{k,max}$ in 10^{-19} J	0,64	0,88	1,68	2,16

- Die beim Fotoeffekt auf ein ausgelöstes Elektron übertragene Energie wächst mit der Frequenz des Lichtes.



B2 $E_{k,max}$ bei verschiedenen Metallen

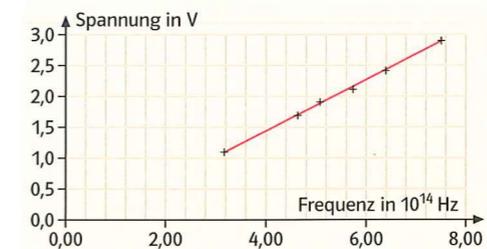
Im Diagramm B2 ergeben die Messwerte für Caesium, ergänzt um die anderer Metalle, je eine Gerade. Ihr Schnittpunkt mit der waagerechten Achse ist die Grenzfrequenz f_{Grenz} für das jeweilige Metall. Alle Geraden laufen parallel, ihre Steigungen h sind gleich, also vom Material unabhängig;

$$h = \frac{\Delta E_{k,max}}{\Delta f} = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

h ist die Planck'sche Konstante. Ein genauerer Wert ist: $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$.

Beim inversen Fotoeffekt setzt der Strom bei einer von der Frequenz f des Lichtes abhängigen Spannung U_S ein. Elektrische Energie $E_{el} = Q \cdot U_S$ wird in Lichtenergie umgesetzt. Messungen zeigen einen Zusammenhang zwischen U_S und f (→ B3).

f in 10^{14} Hz	3,16	4,62	5,08	5,73	6,38	7,50
U_S in V	1,10	1,70	1,90	2,10	2,40	2,90



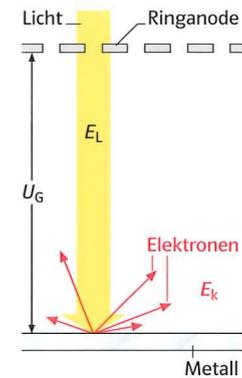
B3 Messungen beim inversen Fotoeffekt

Mit $Q = e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$ erhält man:

$$\frac{\Delta E_{k,max}}{\Delta f} = \frac{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 1,3 \text{ V}}{3,2 \cdot 10^{14} \text{ Hz}} = 6,5 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

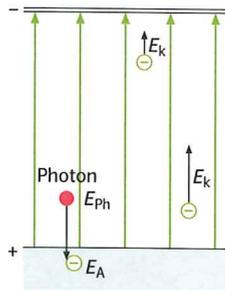
Es ergibt sich die Planck'sche Konstante h .

- Die Planck'sche Konstante h verknüpft Frequenz und Energie.

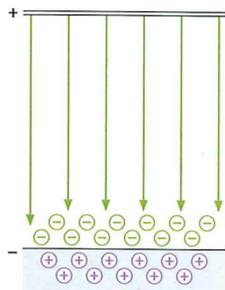


B4 Zum Fotoeffekt

Bemerkung: Die Planck'sche Konstante hat für viele Bereiche der Physik eine zentrale Bedeutung erlangt.



B1a Elektronen im Gegenfeld



B1b Elektronenwolke

Photonen Der Zusammenhang zwischen der Frequenz des Lichtes und der maximalen Energie, der beim Fotoeffekt ausgelösten Elektronen, wird durch eine Gerade im f - E -Diagramm beschrieben. Die Gleichung lautet:

$$E_{k,max} = h \cdot f - h \cdot f_{grenz} \text{ bzw.}$$

$$h \cdot f = E_{k,max} + h \cdot f_{grenz}$$

$h \cdot f$ beschreibt die vom Licht übertragene Energie, $h \cdot f_{grenz}$ den zur Herauslösung der Elektronen erforderlichen Anteil, $E_{k,max}$ die kinetische Energie der freien Elektronen:

- Die durch Licht auf ein Elektron übertragene Energie ist proportional zu f . Die Proportionalitätskonstante ist h .

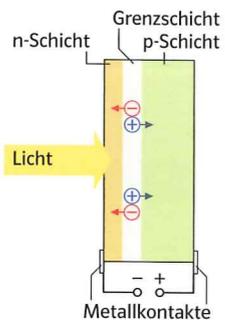
Beim inversen Fotoeffekt wird elektrische Energie in Lichtenergie umgesetzt und man findet:

- Die Energie des emittierten Lichtes kann durch $h \cdot f$ beschrieben werden.

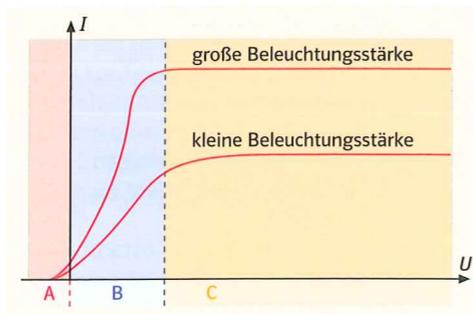
Der Fotoeffekt veranlasste Albert Einstein zu folgender Aussage: „Nach der hier ins Auge zu fassenden Annahme ist bei der Ausbreitung eines von einem Punkt ausgehenden Lichtstrahls die Energie nicht auf größer und größer werdende Räume verteilt, sondern es besteht dieselbe aus einer endlichen Zahl von in Raumpunkten lokalisierten Energiequanten, welche sich bewegen, ohne sich zu teilen und nur als Ganzes absorbiert und erzeugt werden können.“ Die Energiequanten heißen **Photonen**. Zusammen mit den Messergebnissen lässt sich sagen:

- Licht besteht aus einzelnen Photonen der Energie $E_{ph} = h \cdot f$.

Mit dieser Vorstellung muss sich der Ablauf beim Fotoeffekt erklären lassen (\rightarrow B3).



B2 Solarzelle



B3 Zusammenhänge beim Fotoeffekt

Anwendung der Einsteinschen Hypothese

A: Bei Beleuchtung bewegen sich Elektronen von der Kathode zur Anode: Photonen dringen in das Metall ein und jedes überträgt seine Energie E_{ph} auf ein Elektron, danach existiert das Photon nicht mehr. Übersteigt die Energie E_{ph} einen Wert E_A , kann das Elektron das Metall verlassen. E_A ist charakteristisch für das Metall. Die Elektronen haben noch einen Rest an kinetischer Energie, sodass einige gegen ein elektrisches Feld die Anode erreichen (\rightarrow B1a). Erst bei der Spannung $U_{G,max}$ reicht auch die Energie der schnellsten Elektronen dafür nicht aus.

B: Die Stromstärke steigt mit der Spannung U an:

Nach Auslösung von Elektronen bleibt das Metall positiv zurück. Elektronen fallen z.T. zurück, sie bilden eine Wolke um die Kathode (\rightarrow B1b). Mit zunehmender Spannung U erreichen immer mehr Elektronen aus dieser Wolke die Anode.

C: Die Stromstärke ändert sich nicht, obwohl die Spannung steigt:

Alle pro Zeiteinheit frei gesetzten Elektronen erreichen die Anode, die Stromstärke kann nicht mehr gesteigert werden. Es gibt eine Sättigungsstromstärke I_{max} .

Bei größerer Beleuchtungsstärke bleibt $U_{G,max}$ unverändert, aber in allen Bereichen ist die Stromstärke höher:

$U_{G,max}$ wird von der Energie der Photonen bestimmt und die ist allein durch die Frequenz gegeben. Höhere Beleuchtungsstärke bedeutet eine größere Photonenzahl. Damit werden mehr Elektronen ausgelöst und die Stromstärke wird größer.

- Die Lichtstärke einer Quelle und die Beleuchtungsstärke an einem Objekt werden durch die Anzahl der Photonen bestimmt.

Den inversen Fotoeffekt beobachtet man bei Halbleitern. Man spricht auch vom inneren Fotoeffekt, weil die Elektronen nur aus der Bindung, nicht aber aus dem Kristall herausgelöst werden. Bei Fotowiderständen führt der Effekt zu einer Änderung des Widerstandes bei Beleuchtung, bei Fotodioden hängt die Stärke des Stroms von der Beleuchtungsstärke ab. In Solarzellen wie in der Grafik B2 wird so Lichtenergie direkt in elektrische Energie umgesetzt.

Impuls von Photonen 1972 wurde beobachtet, wie Kunststoffteilchen durch Laserlicht in Strahlrichtung bewegt werden (\rightarrow B1). Solche Wechselwirkungen setzen einen Impuls des Lichtes voraus. Aus den Maxwell'schen Gleichungen folgt, dass elektromagnetische Wellen einen Impuls in Ausbreitungsrichtung haben müssen. Zwischen der Energie des Lichtes und seinem Impuls in Strahlrichtung besteht die folgende Beziehung:

$$E_{Licht} = c \cdot p_{Licht}$$

c bezeichnet die Lichtgeschwindigkeit. Werden nach der Modellvorstellung von den Photonen Energie und Impuls auf N Photonen aufgeteilt, so gilt sowohl

$$E_{Licht} = c \cdot p_{Licht} = c \cdot N \cdot p_{ph}$$

als auch

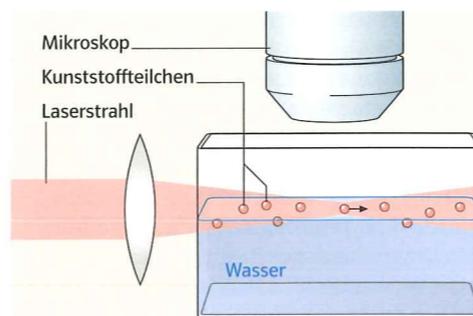
$$E_{Licht} = N \cdot E_{ph} = N \cdot h \cdot f$$

Durch Gleichsetzen erhält man:

$$p_{ph} = \frac{h \cdot f}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

Insgesamt gilt:

- Photonen bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit. Sie tragen die Energie $E = h \cdot f$ und den Impuls $p = h/\lambda$.



B1 Licht bewegt Flüssigkeiten.

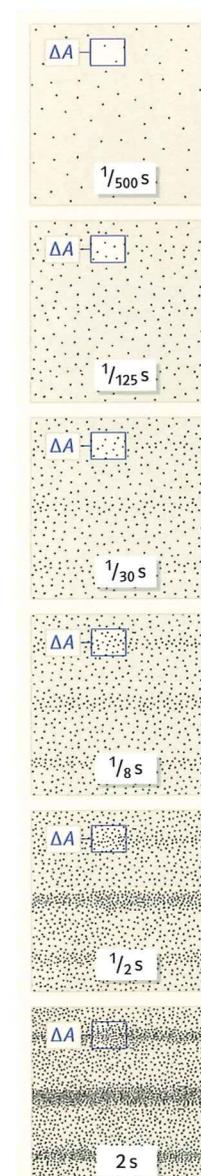
A1 Führen Sie folgendes Experiment durch und bestimmen Sie aus den Messwerten h . Ein etwa 2 cm dickes Holzbrett wird durchbohrt ($d = 5$ mm), zwei Dioden (rot, blau bzw. IR) werden von beiden Seiten in die Löcher gesteckt. Eine der vor dem Umgebungslicht geschützten Dioden dient als Lichtempfänger, die andere wird als Sender mit zwei unterschiedlichen Stromstärken betrieben. Durch Anlegen einer Gegenspannung U_G wird der in der Empfangsdiode entstehende Fotostrom I_{Foto} auf null abgeglichen und die zugehörige Spannung gemessen.

Das Taylor'sche Experiment 1909 untersuchte **Geoffrey Taylor** ein Interferenzmuster, das durch die Beugung von Licht an einer Nadelspitze entsteht. Als Schirm diente eine Fotoplatte. Taylor verringerte die Intensität des Lichtes so stark, dass sich im Mittel nur ein Photon zwischen Lichtquelle und Schirm befand. Für eine messbare Schwärzung der Fotoplatte musste er mehrere Monate lang belichten. Überraschenderweise ergab sich genau das gleiche Muster wie bei Aufnahmen mit hoher Lichtintensität und kurzer Belichtungszeit.

- Beugung und Interferenz sind nicht an eine Wechselwirkung zwischen Photonen gebunden.

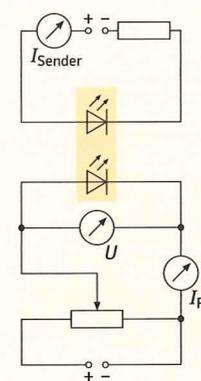
Die Schwärzung eines Kornes zeigt das Auftreffen von Photonen an (\rightarrow B2). Mit der Belichtungszeit steigt die Zahl N_A der Photonen, die auf eine Fläche ΔA des Filmes treffen. Der Quotient aus N_A und der Gesamtzahl N aller auf den Film treffenden Photonen ist für dasselbe ΔA im Rahmen statistischer Schwankungen unabhängig von der Belichtungszeit. Für die Ausprägung des Musters mit gleicher Photonenzahl N spielt es keine Rolle, in welcher Zeitspanne die Photonen den Film treffen. Für ein einzelnes Photon lässt sich der Auftreffort nicht vorhersagen. Es fügt sich nur im Ergebnis mit vielen anderen zum Interferenzmuster zusammen. Die mit dem Wellenmodell vorhersagbare Intensitätsverteilung liefert nur ein Maß für die Auftreffwahrscheinlichkeit des Photons an einer Stelle.

- Für die Auftrefforte von einzelnen Photonen lassen sich nur Wahrscheinlichkeitsaussagen machen.



B2

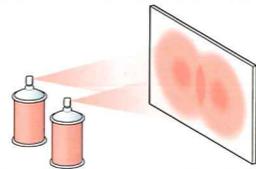
Sender mit $I = 20$ mA ($I = 10$ mA)	Empfänger U_G in V	Empfänger U_G in V		
		Blau 470 nm	Rot 628 nm	IR 950 nm
Blau 470 nm	2,11 (2,03)	1,39 (1,36)	0,62 (0,59)	
Rot 628 nm	0 (0)	1,44 (1,40)	0,62 (0,60)	
IR 950 nm	0 (0)	0 (0)	0,87 (0,83)	



Zwei-Wege-Experimente

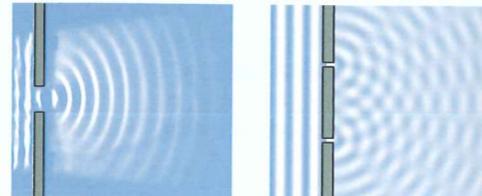
„Die mit kontinuierlichen Raumfunktionen operierende Undulationstheorie hat sich zur Darstellung der rein optischen Phänomene vortrefflich bewährt... Es ist jedoch im Auge zu behalten, dass sich die optischen Beobachtungen auf zeitliche Mittelwerte, nicht aber auf Momentanwerte beziehen ... es ist ... denkbar, dass die mit kontinuierlichen Raumfunktionen operierende Theorie des Lichts zu Widersprüchen mit der Erfahrung führt, wenn man sie auf die Erscheinungen der Lichterzeugung und Lichtverwandlung anwendet.“ Albert Einstein

■ **V1** Farbe aus zwei Spraydosen wird auf eine Wand gesprüht (→ B1). Ist nur eine Spraydose in Betrieb, gelangt die meiste Farbe genau gegenüber der Düse auf die Wand. Sind beide in Betrieb, hängt die Farbverteilung auf der Wand davon ab, wie weit die Düsen voneinander entfernt sind. Die Farbverteilung ist aber unabhängig davon, ob man die Spraydosen nacheinander oder gleichzeitig benutzt.



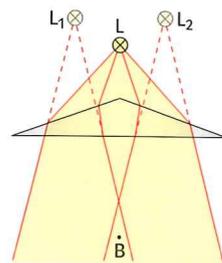
B1

■ **V2** In einer Wellenwanne trifft eine Wellenfront auf zwei kleine Öffnungen. Wenn nur eine geöffnet ist, beobachtet man hinter ihr eine Kreiswelle (→ B2a). Wenn beide gleichzeitig geöffnet sind, erkennt man ein Interferenzbild mit Maxima und Minima (→ B2b). Deren Lage hängt von der Wellenlänge und dem Abstand der Öffnungen ab.

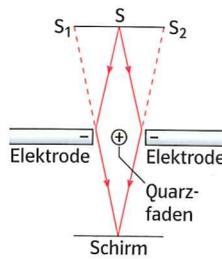


B2a

B2b



B3 Fresnel'sches Biprisma



B4 Versuch von Möllenstedt und Düker



B5 Interferenz bei Elektronen

Photonen und Elektronen Mit Hilfe eines Biprismas lässt sich Licht aus einer Quelle über verschiedene Wege so leiten, dass die Teilbündel, z. B. bei B wie in der Grafik B3, wieder zusammenkommen. Unter geeigneten Versuchsbedingungen sind im Überlappungsbereich der Bündel entsprechende der Wellenvorstellung Interferenzerscheinungen zu beobachten. In einem vergleichbaren Versuch wird ein Elektronenstrahl aus einer nahezu punktförmigen Quelle auf einen dünnen vergoldeten Quarzfaden ($d = 2 \text{ mm}$) gelenkt (→ B4). Bei einem positiv geladenen Faden werden die Elektronen zum Faden hin abgelenkt und es kommt in der Zone, in die Elektronen von beiden Seiten des Fadens gelangten, zu Erscheinungen, die denen von Licht beim Biprismaversuch vergleichbar sind. In beiden Anordnungen scheinen Licht bzw. Elektronen von zwei Quellen zu kommen. Anordnungen mit einem Zweifachspalt (Young 1895 für Licht und Jönsson 1960 für Elektronen) sind nur Abwandlungen dieses Versuchsprinzips und zeigen gleiche Ergebnisse.

● **Photonen und Elektronen zeigen in „Zwei-Wege-Experimenten“ in gleicher Weise Interferenz.**

Es ist gelungen, die Intensität der Quelle soweit zu reduzieren, dass sich nur jeweils ein Objekt (Photon, Elektron ...) in der Versuchsanordnung befindet. Mit Licht zeigen sich bei einem Zweifachspalt bei kurzer Belichtungszeit auf dem Film unregelmäßig verteilte Punkte. Detektoren weisen einzelne Elektronen nach, bei längerer Zeit bildet sich zunehmend die typische Interferenzfigur heraus. Es besteht kein Unterschied zwischen Experimenten mit geringer Intensität bei langer Belichtung und solchen mit hoher Intensität bei kurzer Belichtung. In beiden Fällen entstehen Muster wie bei Wellen.

● **Photonen und Elektronen lassen sich als Einzelobjekte nachweisen.**

In vergleichbaren Versuchen wurde das widersprüchliche Verhalten für andere Objekte nachgewiesen (1974 mit Neutronen; 1991 mit He- und Na-Atomen; 1999 mit C-60-Molekülen; 2003 mit Biomolekülen). Solche Objekte sollen Quantenobjekte genannt werden.

● **Quantenobjekte lassen sich als Einzelobjekte nachweisen. Sie zeigen in „Zwei-Wege-Experimenten“ Interferenz.**

Alltagserfahrungen Vorstellungen und Begriffe werden geprägt vom Umgang mit Dingen in der Alltagswelt. Der Begriff Teilchen verbindet sich mit etwas Kleinem, Körnigen, z. B. Weizenkörnern. Im Weizenmehl entziehen sich die Teilchen schon der unmittelbaren Wahrnehmung, es bedarf der Vorstellungskraft oder einer Erweiterung der Wahrnehmungsmöglichkeiten durch geeignete Instrumente, z. B. ein Mikroskop. Zur Teilchenvorstellung gehört, dass man mehr erhält, wenn man zwei Mengen gleichartiger Teilchen vereinigt (→ B1).

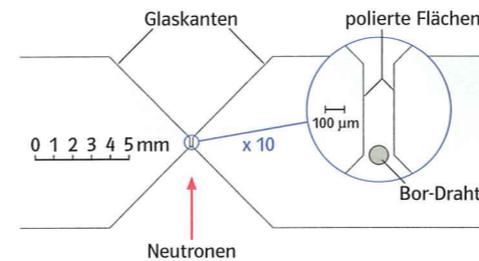
Wellen nimmt man eigentlich nur als Wasserwellen wahr, identifiziert aber meistens nicht die typische Wellenerscheinung „Interferenz“ (→ B2). Laut + laut = leise oder hell + hell = dunkel entspricht nicht den Alltagserfahrungen und wird nur in mehr oder weniger aufwendigen Versuchsanordnungen erkannt. Der Text unten beschreibt eine solche für Neutronen.

Durch den Draht einer 60-W-Glühlampe fließen pro Sekunde etwa $1,9 \cdot 10^{18}$ Elektronen und $1,5 \cdot 10^{20}$ Photonen werden ausgesandt. Mit Zahlen dieser Größenordnung lässt sich zwar problemlos rechnen, sie sprengen aber unseren Vorstellungsrahmen.

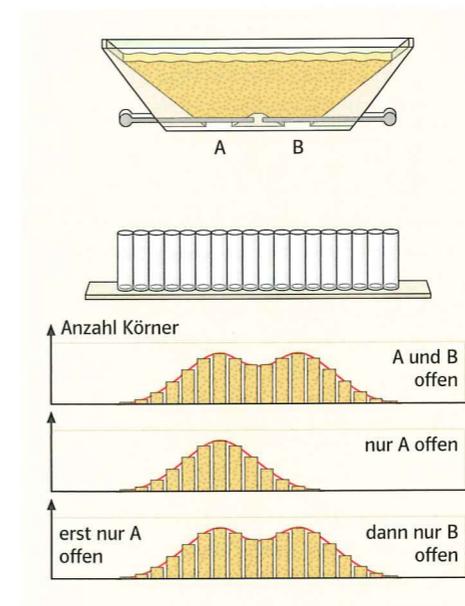
Das gilt auch schon für die Lichtgeschwindigkeit $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. Die Alltagserfahrung zeigt nicht, dass Licht Zeit braucht, um von einem Ort zum anderen zu gelangen. Dennoch gehört dieser Umstand zum heute verbreiteten Alltagswissen.

Das Doppelspaltexperiment mit Neutronen

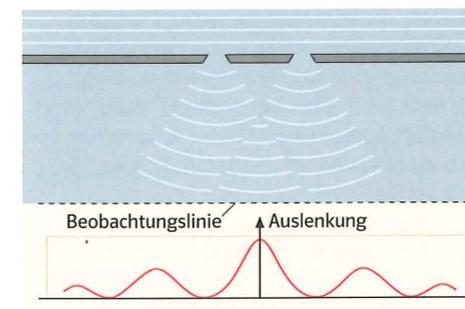
„Zur Durchführung des Doppelspaltexperimentes wurde zwischen die beiden absorbierenden Glasbacken eines breiten Einzelspaltens ein Bor-Draht von $104 \mu\text{m}$ Durchmesser montiert. [...] Die dadurch entstandene Anordnung besteht aus zwei Spalten, jeweils $22 \mu\text{m}$ und $23 \mu\text{m}$ breit, wobei die Spaltmitten voneinander einen Abstand von $127 \mu\text{m}$ besitzen (→ B3). [...]“



B3

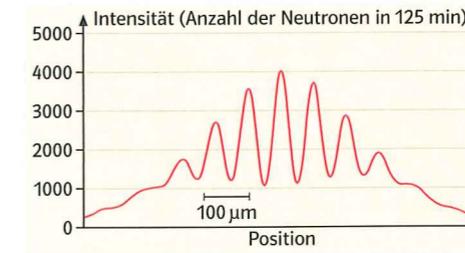


B1 Verteilung von Sand am Zweifachspalt



B2 Wasserwellen am Zweifachspalt

Vor allem ist auch hier die wichtige Feststellung zu treffen, dass die Neutronen nach wie vor einzeln auftreten. Das heißt, wieder wird nur von Zeit zu Zeit (alle paar Sekunden) ein Neutron im Detektor registriert. Die insgesamt an jedem Punkt gezählten Neutronen sind gegen die Position des Messspaltes aufgetragen (→ B4). Man erkennt ganz klar das Interferenzbild der Beugung am Doppelspalt ...“ Anton Zeillinger



B4

Quantenobjekte

„Fünfzig Jahre intensiven Nachdenkens haben mich der Antwort auf die Frage: ‚Was sind Lichtquanten?‘ nicht näher gebracht. Natürlich bildet sich heute jeder Wicht ein, er wisse die Antwort. Doch da täuscht er sich.“ Albert Einstein, 1951

■ V1 In ein Lichtbündel sind zwei Polarisationsfilter gebracht. Werden sie gegeneinander verdreht, beobachtet man auf dem Schirm je nach Winkel unterschiedliche Helligkeit. Ein Lichtsensor anstelle des Schirms liefert:

Winkel	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Intensität	1,000	0,921	0,723	0,459	0,228	0,061	0,000

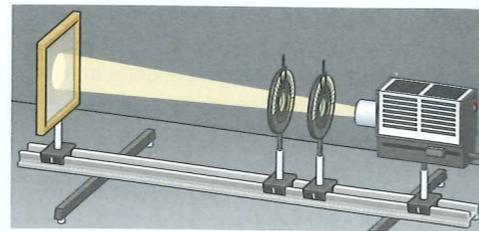
Eigenschaften von Quantenobjekten In der Grafik B3 wird ein Lichtbündel durch einen Strahlteiler z. B. eine Glasplatte geteilt. Die Detektoren D₁ und D₂ weisen das Licht nach. Wenn man die Intensität des Lichtes extrem reduziert, erkennt man für jeden Detektor einzelne Impulse (→ B4), wobei niemals beide Detektoren gleichzeitig ansprechen. Wenn D₁ anspricht, ist in dem Moment ein Photon dort lokalisiert, entsprechend beim Ansprechen von D₂ zu einem anderen Zeitpunkt. Es zeigt sich:

● **Quantenobjekte können gezählt werden. Sie sind nicht teilbar.**

Mit Quantenobjekten lässt sich z. B. hinter einem Doppelspalt ein Interferenzbild erzeugen. Auf der Grundlage der Wellenvorstellung kann die Lage von Maxima und Minima berechnet werden. Experimente belegen:

● **Quantenobjekte zeigen Interferenz.**

Bei sehr geringer Intensität werden Einzelereignisse an nicht vorhersagbaren Stellen registriert (→ B2). Wenn Licht durch zwei Polarisationsfilter geht, hängt die gemessene Intensität davon ab, um welchen Winkel beide gegeneinander verdreht sind. Bei sehr geringer



B1 Polarisationsfilter ändern die Helligkeit.

Intensität der Quelle registriert ein geeigneter Detektor nacheinander einzelne Ereignisse. Es ist nicht vorhersagbar, wann nach einem Ereignis das nächste eintritt. Es zeigt sich:

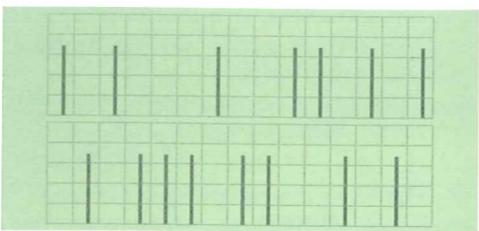
● **Für Quantenobjekte sind Einzelereignisse nicht vorhersehbar.**

Bei längerer Versuchsdauer bildet sich zunehmend die für **Zwei-Wege-Experimente** typische und vorhersagbare Interferenzfigur heraus, bei Polarisatoren entsprechend die Winkelabhängigkeit der Intensität. Dies kann wie folgt gedeutet werden:

● **Die vorhersagbare Intensitätsverteilung entspricht der Häufigkeitsverteilung bei der Registrierung von Einzelereignissen.**

Bei Zwei-Wege-Experimenten lässt sich, die einmal gewonnene Häufigkeitsverteilung reproduzieren. Dies legt es nahe, das nächste Ereignis eher in einem Maximum der Häufigkeitsverteilung zu erwarten als in einem Minimum. Das bedeutet:

● **Über Ereignisse mit Quantenobjekten sind Wahrscheinlichkeitsaussagen möglich.**



B3 Nachweis einzelner Photonen

B4 Photonenimpulse

Entstehung von Interferenz Im Wellenbild setzt Interferenz das Zusammentreffen von mindestens zwei Wellen am Beobachtungsort voraus, Quantenobjekte sind jedoch unteilbar. Wenn man sie sich als Teilchen vorstellt, hätten diese beim Doppelspalt mindestens zwei Möglichkeiten, um zum Beobachtungsort zu gelangen (→ B1).

Dies ist die Situation in allen Experimenten, die Interferenz mit Quantenobjekten zeigen. In Interferometern ist diese Bedingung auf unterschiedliche Weise realisiert (→ B2). Es gilt:

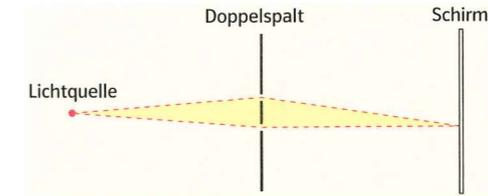
● **Quantenobjekte zeigen Interferenz in solchen Anordnungen, in denen die Teilchenvorstellung verschiedene Wege zulässt.**

Das Interferenzbild entspricht der Häufigkeitsverteilung, die sich aus sehr vielen Einzelereignissen aufbaut (→ B3). Einerseits trägt also jedes einzelne Quantenobjekt zum Interferenzbild bei, andererseits erlaubt das Interferenzbild Aussagen über die Wahrscheinlichkeit des Auftreffens eines Quantenobjekts. Wie die Intensität einer Welle ergibt sich die Wahrscheinlichkeit aus dem Quadrat der Amplitude.

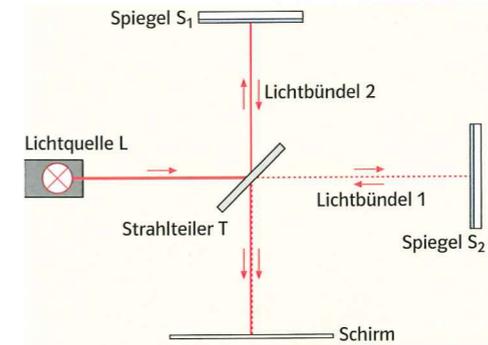
Das Interferenzbild erlaubt keinen Rückschluss auf irgendeinen Weg des Quantenobjekts von der Quelle zum Ort der Registrierung. Zur Vorhersage des Interferenzbildes müssen immer alle für Teilchen denkbaren Wege berücksichtigt werden.

Große Quantenobjekte Fullerene wie in der Abbildung B5 sind eine Kohlenstoffmodifikation. Die Moleküle dieser Sorte bestehen aus 60 Kohlenstoffatomen. Mit solchen Molekülen experimentierte im Jahre 2000 eine Gruppe in Wien. Ein Strahl solcher Moleküle wurde auf ein Gitter mit 50 nm breiten Spalten und einer Gitterkonstanten von 100 nm geschickt. Die Grafik B4 zeigt die Registrierung. Der Einfluss des Gitters ist deutlich erkennbar. Das Bild lässt sich als Interferenzbild deuten.

■ A1 Um zur Intensität einer Welle an einem Ort B im Interferenzbild zu gelangen, muss die Amplitude an dieser Stelle ermittelt werden. Erläutern und begründen Sie das in Abbildung B6 dargestellte Verfahren: S₁ und S₂ sind dabei Ausgangspunkte (z. B. zwei Spalte) von Wellen. Auf den Wegen zum Beobachtungsort B rollen die Zeigeräder mit Umfang λ.



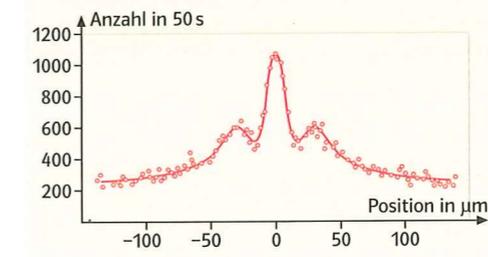
B1 Zwei mögliche Wege führen zu Interferenz.



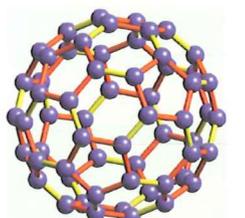
B2 Wege im Interferometer



B3 Interferenzmuster

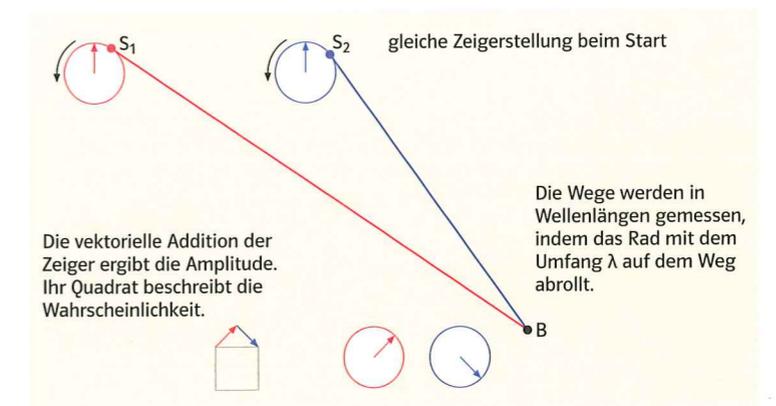


B4 Interferenz von Fullerenen

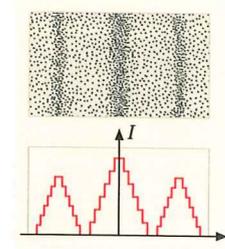


B5 Fullerenmolekül

Die Fullerene haben die Masse $m = 1,2 \cdot 10^{-24}$ kg und bewegten sich mit $v = 220$ m/s, d. h. mit dem Impuls $p = 2,6 \cdot 10^{-22}$ kgm/s. Mit $\lambda = h/p$ ergibt sich $\lambda = 2,5 \cdot 10^{-12}$ m. Die Auswertung des Interferenzmusters lieferte diesen Wert aus dem de Broglie'schen Ansatz.



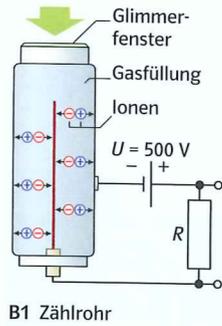
B6



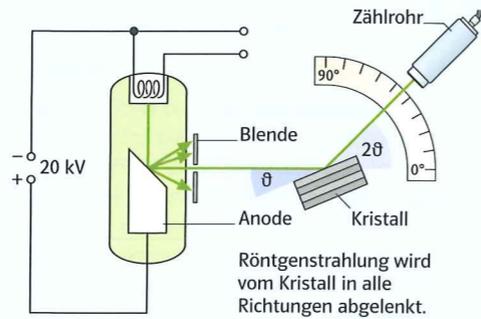
B2 Interferenz von Photonen

Röntgenstrahlung

„... in Anerkennung der außergewöhnlichen Verdienste, die er sich durch die Entdeckung der bemerkenswerten Strahlen ...“ (Anlässlich der Nobelpreisverleihung an Conrad Röntgen, 1901). Der Begriff „Strahlen“ weist auf die Vorstellung einer Art Licht hin.



V1 Mit einem Geiger-Müller-Zählrohr (→B1), das an ein Zählgerät angeschlossen ist, wird für eine Zeitspanne $\Delta t = 1 \text{ min}$ die „natürliche Strahlung“ der Umgebung gemessen. Die Messung wird mehrfach wiederholt. Die Zahl der Impulse schwankt um einen Mittelwert von 16 Impulsen in der Minute.



B2 Wellenlänge von Röntgenstrahlung

V2 Das Zählrohr wird in die vorgesehene Halterung des Röntgengerätes eingesetzt und die Beschleunigungsspannung U_B der Röntgenröhre verändert. Vor das Zählrohr werden Gegenstände gehalten. Die Zählrate nimmt mit der Beschleunigungsspannung zu. Ein Hindernis vor dem Zählrohr lässt die Zählrate absinken.

V3 In der Anordnung nach der Grafik B2 trifft Röntgenstrahlung auf einen Lithiumfluorid-Kristall und dringt dann in ein Zählrohr ein. Kristall und Zählrohr werden so angeordnet, dass das Zählrohr die Strahlung unter dem Winkel 2θ empfängt, während sie unter dem Winkel θ auf den Kristall trifft. Ab einem bestimmten Winkel $\theta_{\text{Grenz}} > 0$ wird eine erhöhte Zählrate festgestellt. Der Winkel θ_{Grenz} hängt von der zwischen Kathode und Anode der Röntgenröhre angelegten Spannung U_B ab.

Man kann feststellen:

- Röntgenstrahlung zeigt Interferenz.

Mit einem Zählrohr wie in der Grafik B1 lässt sich Röntgenstrahlung nachweisen: Sie erzeugt Ionen im Füllgas. Beim Entladen der Ionen an den Elektroden entstehen elektrische Impulse. Die Impulse erfolgen einzeln und in unregelmäßiger Folge, sie können gezählt werden. Nach einem registrierten Impuls kann der Zeitpunkt des nächsten nicht vorhergesagt werden. Dies weist auf einen statistischen Charakter der Röntgenstrahlung hin. Wie beim Licht spricht man auch hier von Photonen, den Röntgenphotonen. Insgesamt ergibt sich:

- Röntgenphotonen sind Quantenobjekte.

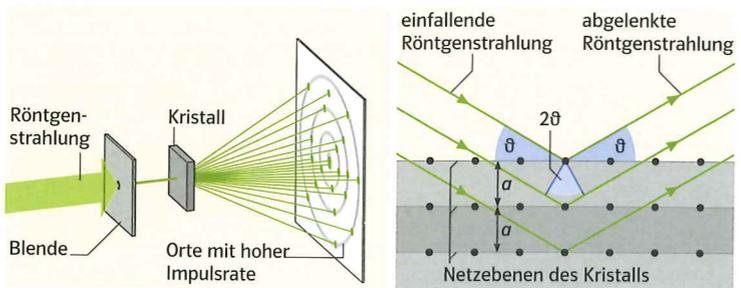
Die beobachteten Muster in Abbildung B4 entstehen erst mit einer Vielzahl von Photonen. Eine hohe Zählrate in Beobachtungsrichtung bzw. stark belichtete Stellen eines Filmes bedeuten eine große Antreffwahrscheinlichkeit der Photonen.



B3 Röntgenaufnahme

Röntgenphotonen Die Ausbreitung von Röntgenstrahlung lässt sich durch elektromagnetische Wellen mit $\lambda \leq 10^{-9} \text{ m}$ beschreiben. Diese Wellenlängen sind jedoch zu klein, um an optischen Gittern Interferenz zu zeigen. Röntgenstrahlung kann Materie durchstrahlen (→B3).

Trifft Röntgenstrahlung auf einen geeigneten Kristall, so bilden sich auf einem geeigneten Schirm Muster, die denen bei der Beugung von Elektronen an Graphit ähnlich sind (→B4). Aus dem Muster lässt sich eine Wellenlänge bestimmen. Mit Hilfe des Abstandes a der Netzebenen des Kristalls errechnet sich die Wellenlänge λ nach der Bragg-Bedingung: $2a \cdot \sin \theta = k \cdot \lambda$ mit $k = 1, 2, 3 \dots$



B4 Röntgenstrahlung zeigt nach dem Kristall eine Struktur.

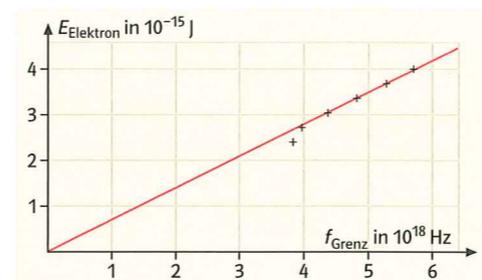
Röntgenstrahlung und Energie Beim Lithiumfluorid-Kristall ist der Abstand der Netzebenen $a = 201 \text{ pm}$ bekannt. Damit lässt sich die Wellenlänge der Strahlung einer Röntgenröhre bestimmen. Die Strahlung wird dazu auf den Kristall gerichtet und der abgelenkte Anteil mit dem Zählrohr, mit dem Winkel $\theta = 0^\circ$ beginnend, gemessen. Über die Bragg-Bedingung liefert der Winkel die Wellenlänge. Das Zählrohr zeigt bei der Beschleunigungsspannung $U_B = 19 \text{ kV}$ bis etwa $\theta = 9^\circ$ eine vom Kristall nicht beeinflusste Strahlung an. Ab dem Grenzwinkel $\theta_{\text{Grenz}} = 9,8^\circ$ nimmt jedoch die Zählrate deutlich zu (→B2). Für $\theta_{\text{Grenz}} = 9,8^\circ$ und $k = 1$ ergibt sich eine Wellenlänge $\lambda_{\text{Grenz}} = 68,6 \text{ pm}$. Da zu einem größeren Winkel θ eine größere Wellenlänge λ gehört, ist λ_{Grenz} die kleinste Wellenlänge der Strahlung. Von da an schließt sich ein kontinuierliches Röntgenspektrum mit $\lambda \geq \lambda_{\text{Grenz}}$ an. Aus der für elektromagnetische Wellen gültigen Beziehung $c = \lambda \cdot f$ folgt $f_{\text{Grenz}} = c / \lambda_{\text{Grenz}}$.

- Eine Röntgenröhre sendet Strahlung mit den Wellenlängen $\lambda \geq \lambda_{\text{Grenz}}$ aus.

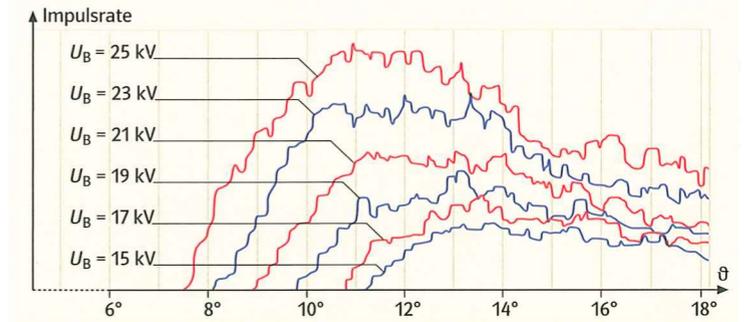
Die Wellenlänge λ_{Grenz} bzw. die Frequenz f_{Grenz} wird von der Beschleunigungsspannung U_B bestimmt. Beobachtet wird, dass der Grenzwinkel und damit auch die Grenzwellenlänge mit zunehmender Beschleunigungsspannung U_B kleiner werden, die Grenzfrequenz steigt mit der Spannung U_B .

Die Röntgenstrahlung der Röntgenröhre entsteht dadurch, dass die im elektrischen Feld zwischen Glühkathode und Anode auf hohe Geschwindigkeit beschleunigten Elektronen im Anodenmaterial abgebremst werden. Dabei wird ihre Energie $E_{\text{Elektron}} = e \cdot U_B$ ganz oder teilweise in Energie der Röntgenphotonen umgesetzt.

Wie beim Fotoeffekt weisen die Beobachtungen auf einen Zusammenhang zwischen



B1 Energie und Grenzfrequenz bei Röntgenstrahlung



U_B in kV	E_{Elektron} in 10^{-15} J	θ_{Grenz} in $^\circ$	λ_{Grenz} in 10^{-12} m	f_{Grenz} in 10^{18} Hz	$E_{\text{Elektron}}/f_{\text{Grenz}}$ in 10^{-34} Js
15	2,40	11,2	78,3	3,83	6,27
17	2,72	10,8	75,5	3,97	6,85
19	3,04	9,8	68,6	4,37	6,96
21	3,36	8,9	62,3	4,82	6,97
23	3,68	8,1	56,8	5,28	6,97
25	4,00	7,5	52,6	5,70	7,02

B2 Grenzfrequenz und Energie der Röntgenstrahlung

der Energie und der Frequenz hin (→B1). Der Quotient $E_{\text{Elektron}}/f_{\text{Grenz}}$ hat im Rahmen der Messgenauigkeit denselben Wert wie die vom Fotoeffekt bekannte Planck'sche Konstante h :

$$\frac{E_{\text{Elektron}}}{f_{\text{Grenz}}} = 6,8 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \approx h$$

- Die von abgebremsten Elektronen erzeugte Röntgenstrahlung tritt in Energiequanten, d.h. Photonen der Energie $E_{\text{ph}} = h \cdot f$, auf.

Die Planck'sche Konstante verknüpft Energie und Frequenz.

Beim Fotoeffekt übertragen Photonen Energie auf Elektronen. Bei der Erzeugung von Röntgenstrahlung übertragen Elektronen Energie auf die entstehenden Photonen (→B3).

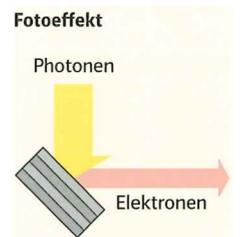
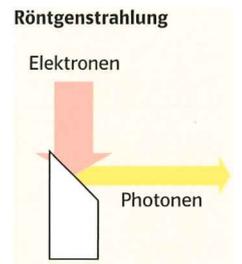
Die meisten Elektronen erzeugen mit ihrer Energie nicht nur ein Photon, sondern stufenweise mehrere Photonen. Es entstehen somit auch Photonen, die nur einen Teil der maximalen Energie der Elektronen haben. Deshalb gilt:

$$E_{\text{Photon}} \leq E_{\text{Elektron}} \text{ bzw.}$$

$$h \cdot f \leq e \cdot U_B, \text{ daraus folgt: } f \leq \frac{e \cdot U_B}{h} = f_{\text{Grenz}}$$

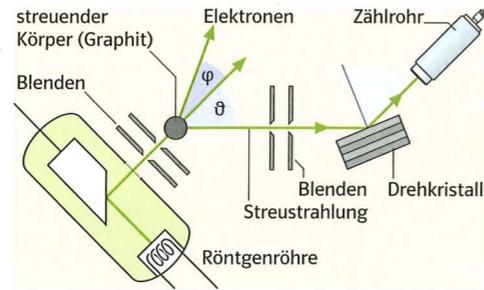
Diese Ungleichung erklärt das beobachtete kontinuierliche Spektrum einer Röntgenstrahlung sowie dessen Grenze.

- A1 Die Planck'sche Konstante ist eine wichtige Naturkonstante. Stellen Sie Verfahren zu ihrer Bestimmung zusammen.



B3 Energieübertragung bei Elektronen und Photonen

$\frac{h}{m_0 \cdot c} = 2,4 \cdot 10^{-12} \text{ m}$
heißt Compton-Wellenlänge.



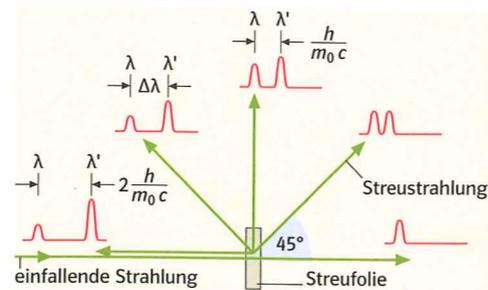
B1 Der Comptoneffekt

Der Comptoneffekt In der skizzierten Anordnung fällt ein fein ausgeblendetes Röntgenbündel auf einen Körper aus Graphit. Um den Körper lässt sich in allen Richtungen Röntgenstrahlung nachweisen. Man sagt, die Röntgenstrahlung wird gestreut. Unter verschiedenen Winkeln ϑ wird ein Strahl aus der gestreuten Strahlung ausgeblendet und mittels einer Bragg'schen Drehkristallanordnung auf ihre Wellenlänge untersucht. Der Versuch zeigt: Unter allen Winkeln findet man die Wellenlänge λ und eine zweite $\lambda' > \lambda$. Die Abweichung $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ ist umso größer, je größer der Streuwinkel ist (\rightarrow B2).

1922 formulierte Arthur Holly Compton die

$$\text{Streufomel: } \Delta\lambda = h \cdot \frac{(1 - \cos \vartheta)}{m_0 \cdot c}$$

m_0 = Ruhemasse des Elektrons
 c = Lichtgeschwindigkeit



B2 Wellenlänge und Streuwinkel

Er ging dabei von folgender Vorstellung aus:

• Bei der Streuung wechselwirken Photonen der Strahlung mit Elektronen des Streukörpers wie bei einem elastischen Stoß. Dabei gelten die Erhaltungssätze für Energie und Impuls.

Er unterschied zwei Wechselwirkungen zwischen den Photonen und dem Graphit:

A: Das Photon trifft auf ein Atom wie ein Ball auf eine starre Wand. Es wird dabei abgelenkt, behält aber seine Energie. Frequenz bzw. Wellenlänge werden daher nicht geändert.

B: Das Photon trifft auf ein im Graphit fast frei bewegliches Elektron. Jetzt wird Energie übertragen. Die Frequenz nimmt ab, die Wellenlänge zu.

einen ruhenden Körper mit der Masse m_2 die Energie

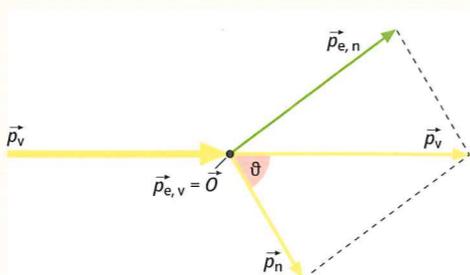
$$\Delta E = E_1 \cdot \frac{4m_1 \cdot m_2}{(m_1 + m_2)^2} \text{ übertragen wird.}$$

■ A3 Die Stroboskopaufnahme B4 zeigt den elastischen Stoß einer von links kommenden Kugel gegen eine ruhende mit gleicher Masse. Überlegen Sie, wie man an einem solchen Bild die Erhaltung von Energie und Impuls prüfen kann.

■ A4 Wenn die Wechselwirkung zwischen Photonen und Elektronen im Prinzip wie ein Stoß zweier Billardkugeln zu behandeln ist, müsste den Photonen eine Masse zugeordnet werden. Man findet $m = h \cdot f/c^2$. Liefen Sie eine Begründung für diese Beziehung.

■ A5 Begründen Sie, warum sich bei Streuung von sichtbarem Licht an den Gegenständen der Umwelt kein Comptoneffekt zeigt.

Man muss m_e und $m_{e,n}$ unterscheiden, weil nach der Relativitätstheorie die Masse eine Funktion der Geschwindigkeit ist.



$$\vec{p}_v = \vec{p}_n + \vec{p}_{e,n}; p_v^2 + p_n^2 - 2p_v \cdot p_n \cdot \cos \vartheta = p_{e,n}^2$$

$$h \cdot f_v + m_e \cdot c^2 = h \cdot f_n + m_{e,n} \cdot c^2$$

B3 Nichtzentraler Stoß

■ A1 Experimentieren Sie mit dem Stoß zweier Münzen. Ziehen Sie auch Simulationen hinzu. Finden Sie Bedingungen, unter denen am meisten Energie vom stoßenden auf den gestoßenen Körper übertragen wird.

■ A2 Zeigen Sie, dass beim elastischen zentralen Stoß eines Körpers mit der Masse m_1 auf

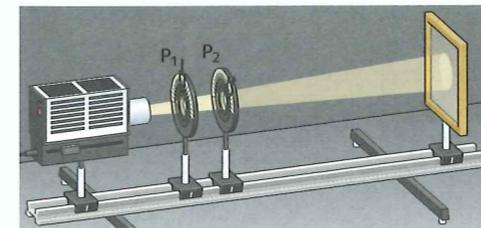


B4

Messungen an Quantenobjekten

„Es liegt nicht an unserer Unfähigkeit, wenn wir nichts über den Polarisationszustand eines Photons vor der Messung aussagen können: es gibt vielmehr gar keine eindeutig definierte Polarisationsrichtung eines Photons. Die Unbestimmtheit liegt im Photon selbst ...“ Paul Davies

■ V1 In der Grafik B1 durchsetzt ein Lichtbündel zwei Polarisationsfilter. Auf dem Schirm beobachtet man maximale Helligkeit bei gleich ausgerichteten Filtern, Dunkelheit bei gekreuzten. Zwischenstellungen führen zu unterschiedlichen Helligkeiten. Ein drittes Filter hinter P_2 ändert bei gleicher Ausrichtung wie P_2 die Helligkeit nicht. Ein drittes Filter zwischen gekreuzten Filtern P_1 und P_2 führt je nach Stellung zu Aufhellungen.



B1 Polarisation und Helligkeit

Möglichkeit und Unbestimmtheit Ein Interferenzbild zeigt, wo einzelne Photonen auftreffen können. Erst nach der Registrierung liegt der Ort fest. Man sagt:

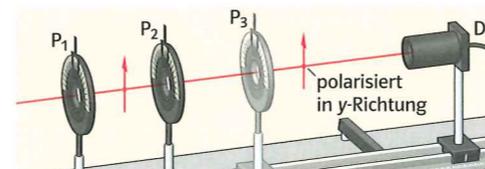
• Bei Quantenobjekten wird in der Messung eine von vielen Möglichkeiten realisiert.

Das Interferenzmuster kann vorhergesagt werden. Es liefert eine Wahrscheinlichkeit dafür, ein einzelnes Photon an einem bestimmten Ort zu registrieren. Das bedeutet:

• Darüber, welche der Möglichkeiten in einer Messung realisiert wird, sind Wahrscheinlichkeitsaussagen möglich.

Die Messung ist nicht überprüfbar, weil das Photon absorbiert wurde.

In der Grafik B2 registriert der Detektor Licht, wenn die beiden Polarisationsfilter P_1 und P_2 parallel, kein Licht, wenn sie senkrecht zueinander ausgerichtet sind. Das bleibt so, auch wenn die Intensität der Lichtquelle reduziert wird, sodass der Detektor einzelne Photonen anzeigt. Man kann auch bei Photonen von einem Polarisationszustand sprechen. Registrierung eines Photons hinter P_2 heißt: Das Photon ist in Richtung von P_2 polarisiert.



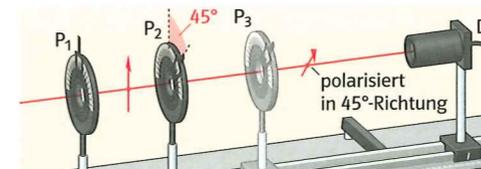
B2 Messergebnis „Polarisiert in y-Richtung“

Mit weiteren Filtern P_3 parallel zu P_2 kann man dies Messergebnis überprüfen. Man stellt fest:

• Eine Messung an einem Quantenobjekt liefert ein eindeutiges Ergebnis.

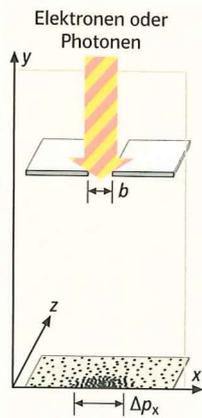
Dreht man P_3 , so zeigt sich eine vom Winkel mit P_2 abhängige Intensität des durchgelassenen Lichtes. Einzelne Photonen passieren also P_3 oder nicht. Bei einem Winkel von 45 Grad wäre die Intensität des Lichtes auf die Hälfte reduziert, die Wahrscheinlichkeit, dass ein einzelnes Photon P_3 passiert, ist entsprechend 50%. P_3 in einer bestimmten Stellung stellt zusammen mit dem Detektor ein Messgerät für den Zustand „das Photon ist in Richtung P_3 polarisiert“ dar (\rightarrow B3). Für jeden eingestellten Winkel ist dieses Ergebnis eindeutig und kann durch weitere Filter parallel zu P_3 überprüft werden. Jedes in P_1 -Richtung polarisierte Photon hat offenbar die Möglichkeit, auch andere Polarisationszustände einzunehmen. Im Moment der Messung wird eine der Möglichkeiten mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit – für 45 Grad ist sie 50% – realisiert.

• Die Realisierung eines bestimmten Polarisationszustandes erfolgt erst im Augenblick der Messung.



B3 Messung definiert einen Zustand.

Bemerkung: Ob einem Photon unabhängig von der Messung eine Eigenschaft wie „ist unter 45 Grad polarisiert“ zukommt, ist eine nicht entschiedene philosophische Frage.



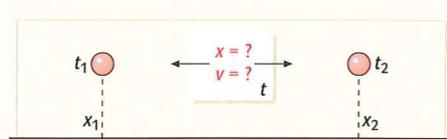
B1

Beobachtungen: Elektronen und Photonen verhalten sich beim Durchgang durch einen Spalt gleichartig.

Bemerkungen: Die Planck'sche Konstante ist ein Maß für die Unbestimmtheit bei Messungen an Quantenobjekten.

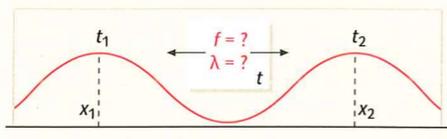
Die Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation

Die Bewegung von Teilchen lässt sich vorher-sagen, wenn ihr Ort und ihre Geschwindigkeit für einen bestimmten Zeitpunkt bekannt sind. Wirken Kräfte auf die Teilchen, dann spielt auch ihre Masse für die weitere Bewegung eine Rolle. Masse und Geschwindigkeit legen den Impuls $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$ fest. Die Geschwindigkeit wird durch Messen von zwei Ortskoordinaten zu zwei verschiedenen Zeitpunkten bestimmt (→B2). Auf welchen Ort bezieht sich dann eine gleichzeitige Angabe von Ort und Geschwindigkeit bzw. Impuls?



B2

Wellen sind räumlich und zeitlich gesehen periodische Vorgänge. Die sie kennzeichnenden Größen sind Frequenz und Wellenlänge. Sie lassen sich durch Messungen bestimmen. Dazu muss mindestens über die Dauer einer Periode und die Differenz zweier Ortskoordinaten im Abstand einer Wellenlänge gemessen werden (→B3). Was bedeutet „Frequenz“ der Welle nach einer Betrachtung in einer sehr kurzen Zeitspanne, was bedeutet Wellenlänge beim Beobachten in einem sehr kleinen Raumbereich?



B3

Elektronen, die aus einer Glühkathode austreten, werden im elektrischen Feld zur Anode beschleunigt. Bewegen sie sich alle in dieselbe Richtung, so sind ihre Geschwindigkeit \vec{v} und ihr Impuls $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$ eindeutig bestimmt.

Lichtbündel von Lasern sind paralleles Licht mit einheitlicher Wellenlänge λ . Den Photonen



B4 Sammellinse

dieses Laserlichtes lässt sich damit ein bestimmter Impuls mit dem Betrag $p = h/\lambda$ und bekannter Geschwindigkeit \vec{c} zuordnen. Treten Elektronen oder Photonen durch einen Spalt der Breite b , so ist ihre Ortskoordinate quer zur Ausbreitungsrichtung bis auf $\Delta x = b/2$ genau bekannt (→B1). Man sagt, dass das Photon im Spalt die mittlere Unbestimmtheit des Ortes $\Delta x \leq b/2$ hat. Für geradlinig fliegende Teilchen würde man einen Fleck etwa der Breite b erwarten. Das ist aber nicht der Fall. Es ergibt sich ein Muster mit größerer Breite. Elektronen und Photonen zeigen beim Durchgang durch einen Spalt gleichartiges Verhalten. Einige haben ihre Ausbreitungsrichtung geändert, sie müssen einen Impuls Δp_x senkrecht zur ursprünglichen Richtung erhalten haben. Für einzelne Objekte ist Δp_x nicht bestimmbar, erst bei einer großen Anzahl verteilen sich Elektronen oder Photonen in einem Muster entsprechend einer mittleren Unbestimmtheit des Impulses. Wird der Spalt enger, so verbreitert sich das Muster auf einem Schirm dahinter. Jeder Versuch, die Unbestimmtheit ihres Ortes zu verkleinern, vergrößert „automatisch“ ihren Querimpuls Δp_x . Elektronen und Photonen haben gemeinsam, dass man an ihnen Ort und Impuls nicht gleichzeitig beliebig genau messen kann. Bei der gleichzeitigen Messung von Ort und Impuls gibt es eine prinzipielle Grenze der Genauigkeit. Heisenberg formulierte 1926 als Erster den Zusammenhang zwischen den mittleren Unbestimmtheiten Δx des Ortes und Δp_x des Impulses, die bei Messungen stets vorhanden sind.

• Ort und Impuls können nie gleichzeitig exakt bestimmt werden.

Für deren mittlere Unbestimmtheiten Δx und Δp_x gilt:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{h}{4\pi}$$

h ist die Planck'sche Konstante.

Diese Beziehung wird als die Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation bezeichnet. Heisenberg erhielt dafür 1932 den Nobelpreis für Physik.

■ A1 In der geometrischen Optik verwendet man das Strahlenmodell des Lichtes und spricht vom Brennpunkt einer Sammellinse (→B4). Diskutieren Sie dies auf der Grundlage der Photonenvorstellung.

Auswirkungen der Heisenberg'schen Unbestimmtheitsrelation

Die Bildschärfe eines Fernsehers In der Fernschröhre erzeugen Elektronen ein Bild. Die Elektronen werden im elektrischen Feld zwischen Kathode und Anode der Röhre beschleunigt. Bezeichnet e den Betrag der Ladung und m_e die Masse eines Elektrons, so hat sein Impuls in Bewegungsrichtung den Betrag:

$$p = m_e \cdot v = \sqrt{2e \cdot m_e \cdot U}$$

Für die Spannung $U = 10 \text{ kV}$ errechnet sich $p \approx 5,4 \cdot 10^{-23} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$. Treten die Elektronen durch ein Loch in der Anode mit der Breite $b = 0,1 \text{ mm}$ hindurch, so beträgt die mittlere Unbestimmtheit ihres Ortes senkrecht zur bisherigen Bewegungsrichtung höchstens $\Delta x = b/2$. Die Unbestimmtheitsrelation liefert dann eine Unbestimmtheit Δp_x des Impulses senkrecht zur Bewegungsrichtung:

$$\Delta p_x \geq \frac{h}{4\pi \cdot \Delta x} \approx 1 \cdot 10^{-30} \text{ kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Dieser mittlere „Querimpuls“ führt dazu, dass auf dem Bildschirm in der Entfernung l ein Leuchtfleck der Breite Δl entsteht (→B1):

$$\Delta l = l \cdot \frac{\Delta p_x}{p_y} \text{ mit } p_y \approx p$$

Für eine Entfernung $l = 0,5 \text{ m}$ zum Bildschirm beträgt die Verbreiterung des Auftreffpunktes $\Delta l \approx 1 \cdot 10^{-8} \text{ m}$. Dies kann kein Zuschauer als Unschärfe registrieren.

Atomare Dimensionen Würde die Öffnung in der Anode einer Fernschröhre eine Million Mal kleiner als „normal“ sein, so hätte sie etwa die Größe eines Atoms ($b = 10^{-10} \text{ m}$). In x -Richtung würde die Unbestimmtheit des Impulses der Elektronen im Mittel $\Delta p_x \geq 1 \cdot 10^{-24} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ betragen. Auf dem Schirm in $0,5 \text{ m}$ Entfernung würden die Auftrefforte der meisten von ihnen auf eine Breite $\Delta l \approx 1 \cdot 10^{-2} \text{ m} = 1 \text{ cm}$ verteilt sein. Von einem Bild wäre nun nicht mehr zu sprechen!

Körper mit großer Masse Die Unbestimmtheitsrelation ist bei Körpern mit großer Masse nicht nachweisbar. Die genaueste Messung ihres Ortes, also die kleinste Unbestimmtheit Δx , führt nach der Unbestimmtheitsrelation immer noch zu einer sehr kleinen Unbestimmtheit $\Delta p_x = m \cdot \Delta v_x$ des Impulses. Bei großer Masse m ist deshalb nur eine kleine Unbestimmtheit Δv_x der Geschwindigkeit nötig, um eine Unbestimmtheit des Impulses Δp_x zu erhalten, für die gilt: $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h/4\pi$.

Beispiel (→B2): Ein Sandkorn der Masse $m \approx 2 \cdot 10^{-6} \text{ g}$ habe den Durchmesser $d \approx 10^{-4} \text{ m}$. Es sei $\Delta x = d/2 \approx 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}$. Nach der Unbestimmtheitsrelation wird

$$\Delta p_x \geq \frac{h}{4\pi \cdot \Delta x} \approx 10^{-30} \text{ kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{Dann ist } \Delta v_x = \frac{\Delta p_x}{m} \approx 10^{-21} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Würde sich das Sandkorn mit dieser Geschwindigkeit bewegen, so würde es für die Weglänge eines Sandkorndurchmessers $10^{17} \text{ s} \approx 10^9$ Jahre benötigen.

• Die Unbestimmtheitsrelation wirkt sich nur bei Objekten im atomaren Bereich aus.

Es gibt auch eine Unbestimmtheitsrelation für Energie und Zeit

Die folgende Betrachtung ist keine Herleitung, sondern sie soll nur plausibel machen, dass es eine Unbestimmtheitsrelation für die Energie gibt: Photonen haben den Impuls $p = h \cdot f/c = E/c$. Aus der mittleren Unbestimmtheit Δp_x des Impulses folgt somit eine mittlere Unbestimmtheit ΔE der Energie:

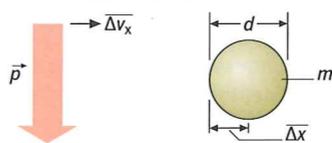
$$\Delta p_x = \frac{\Delta E}{c}$$

Photonen haben in alle Richtungen die Ausbreitungsgeschwindigkeit c ; es ist also $\Delta x = c \cdot \Delta t$. Werden Δx und Δp_x in die Unbestimmtheitsrelation für Ort und Impuls eingesetzt, so folgt:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x = c \cdot \Delta t \cdot \frac{\Delta E}{c} = \Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$

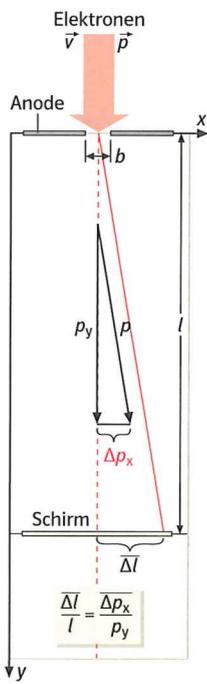
Die Unbestimmtheit für die Energie hat zur Folge, dass der Energieerhaltungssatz für einzelne Quantenobjekte innerhalb sehr kleiner Beobachtungszeiten verletzt sein kann. Die Unbestimmtheitsrelation $\Delta E \cdot \Delta t \geq h/4\pi$ hat für einige Quantenobjekte zur Folge, dass ihre Energie in einer sehr kleinen Zeitspanne Δt deutlich größer als ihre Anfangsenergie E wird.

■ A1 Im Fadenstrahlrohr (→B1, Seite 134) beobachtet man die „Bahn von Elektronen“ im Magnetfeld. Diskutieren Sie den Bahnbegriff.



B2

Exkurs



B1 Der Querimpuls Δp_x verbreitert den Leuchtfleck um Δl .

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{h}{4\pi}$$

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$

Photonen im Interferometer

„Wir haben also guten Grund, gegen die kritiklose Anwendung jener Worte ‚Ort‘ und ‚Geschwindigkeit‘ Verdacht zu schöpfen“. Werner Heisenberg, 1927



B1 Interferenzmuster beim Interferometer

Weg A	Weg B
⊕	⊕
Photonen nicht unterscheidbar Interferenz	
⊗	⊗
Photonen unterscheidbar keine Interferenz	
⊕	
zusätzlich vor D ₂ Unterscheidung aufgehoben Interferenz	

B3 Markierung von Photonen und Interferenz

■ V1 In einem Mach-Zehnder-Interferometer wird Laserlicht über Strahlteiler (Glasplättchen) und Spiegel auf zwei verschiedenen Wegen auf einen Schirm gelenkt (→ B2).

a) Auf dem Schirm erscheint ein Interferenzmuster (→ B1)

b) In die Wege A und B wird je ein Polarisationsfilter gebracht. Sind beide parallel zueinander, bleibt das Interferenzmuster erhalten, bei gekreuzten Filtern verschwindet es.

c) Ein drittes Filter vor dem Schirm lässt das Muster wieder erscheinen, wenn seine Ein-

Das Interferometer Interferenz entsteht, wenn am Beobachtungsort mindestens zwei Wellen zusammentreffen. Das Interferenzergebnis wird vom Gangunterschied bestimmt. Beim Mach-Zehnder-Interferometer werden durch Strahlteiler und Spiegel verschiedene Lichtwege ermöglicht. Bei der Ermittlung des Gangunterschiedes sind Phasensprünge bei der Reflexion zu beachten, sie betragen $\pi/2$ bei Reflexion an Strahlteilern und π an Spiegeln (→ B2).

Für gleich lange geometrische Wege zeigt Tabelle B4 die Gangunterschiede für die Ausgänge D₁ bzw. D₂:

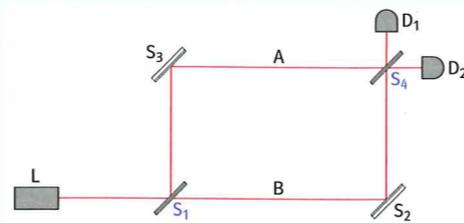
	Lichtweg	Phasensprünge	Unterschied der Phasen
D ₁	L-S ₁ -S ₃ -S ₄ -D ₁	$\pi/2 + \pi + \pi/2 = 2\pi$	Unterschied π
	L-S ₁ -S ₂ -S ₄ -D ₁	π	
D ₂	L-S ₁ -S ₃ -S ₄ -D ₂	$\pi/2 + \pi = 3\pi/2$	Unterschied 0
	L-S ₁ -S ₂ -S ₄ -D ₂	$\pi + \pi/2 = 3\pi/2$	

B4

Bei D₁ ist also Auslöschung, bei D₂ Verstärkung zu erwarten. Ein Detektor bei D₁ würde nichts registrieren, wohl aber bei D₂. Diese Situation bleibt erhalten, wenn sich nur einzelne Photonen in der Anordnung befinden. Als Quantenobjekte sind Photonen nicht teilbar. Die Vorstellung, Interferenz entstehe beim Zusammentreffen von mindestens zwei Photonen, ist falsch. Von Bedeutung sind aber die verschiedenen Wege. Der Detektor zeigt aber nicht an, auf welchem Wege ein Photon ihn erreicht hat.

Beobachtungen: Auf einem Schirm entsteht ein Interferenzmuster mit konzentrischen Ringen, weil sich das Lichtbündel kegelförmig öffnet.

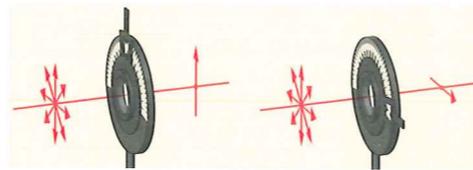
stellung mit beiden anderen einen Winkel von 45 Grad bildet.



B2 Lichtwege beim Mach-Zehnder-Interferometer

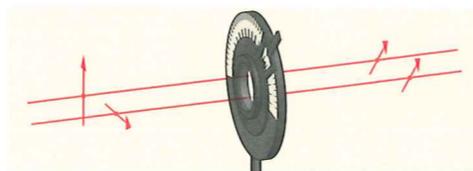
Markierung von Photonen Im Experiment mit vielen Photonen, d.h. einem ungeschwächten Laser, zeigt sich, dass das Auftreten von Interferenz durch Polarisationsfilter in den Wegen A und B bzw. vor dem Schirm in D₂ beeinflusst werden kann. Die Grafik B3 zeigt die Ergebnisse in Abhängigkeit von den Einstellungen der Polarisationsfilter.

Polarisationsfilter „markieren“ die Photonen (→ B5). Wenn sie durch ein Polarisationsfilter hindurchgegangen sind, gehen sie mit Sicherheit auch durch ein zweites in gleicher Ausrichtung, mit Sicherheit nicht durch ein zweites, das senkrecht zum ersten ausgerichtet ist.



B5 Photonen werden markiert.

So ist festzustellen, welchen Weg ein Photon genommen hat. Die durch die Markierung mögliche Unterscheidung kann durch ein weiteres Polarisationsfilter wieder aufgehoben werden (→ B6).



B6 Die Markierung wird aufgehoben.

Komplementarität Experimente zeigen: Wenn Photonen auf beiden Wegen gleich markiert werden, d.h., nicht unterscheidbar sind, hat das keinen Einfluss auf das Interferenzmuster. Erfolgt aber z.B. durch gekreuzte Polarisationsfilter die Markierung so, dass mit einem weiteren Filter entschieden werden kann, welchen Weg das Photon genommen hat, verschwindet das Interferenzmuster. Wenn durch ein drittes Filter die Unterscheidbarkeit wieder aufgehoben wird, erscheint das Interferenzmuster wieder. Offenbar gilt:

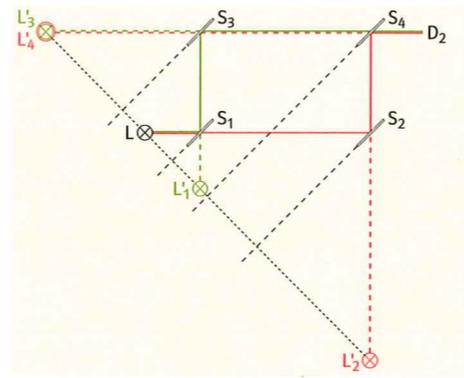
● Bei Quantenobjekten schließen sich Unterscheidbarkeit und Interferenz aus.

Diese Erkenntnis ist vergleichbar mit der Aussage der Heisenberg'schen Unbestimmtheitsrelation, nach der z.B. Ort und Impuls nicht gleichzeitig beliebig genau bekannt sein können. Den Umstand, dass sich bei Quantenobjekten gewisse Kenntnisse gegenseitig ausschließen, nennt man das **Prinzip der Komplementarität**.

Bei unterscheidbaren Wegen verhalten sich Quantenobjekte wie Teilchen (→ B3), bei nicht unterscheidbaren wie Wellen (→ B4).

Klassische Eigenschaften Beim Mach-Zehnder-Interferometer zeigt sich ein Interferenzmuster nur, wenn keine Information über einen Weg der Photonen möglich ist. Das entstehende Interferenzbild kann als Häufigkeitsverteilung der Photonen betrachtet werden. Ein einzelnes Photon wird wahrscheinlicher im Bereich eines Maximums auf dem Schirm auftreffen als in einem Minimum.

Ein Verdrehen von zunächst parallelen Polarisationsfiltern in den beiden Armen des Interferometers lässt das Interferenzmuster verschwinden, d.h., es treten Photonen auch



B1 Reflexionen beim Interferometer

in ursprünglichen Minimumbereichen auf. Die Antreffwahrscheinlichkeit der Photonen hat sich in Abhängigkeit von der Stellung der Polarisationsfilter in beiden Wegen geändert, das Verhalten jedes einzelnen Photons hängt also von der gesamten Messapparatur ab. Mit der Vorstellung, ein Photon befinde sich zu einem bestimmten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort auf einem der Wege des Interferometers, ist das nicht vereinbar. Es gilt also:

● Quantenobjekten im Interferometer lässt sich kein Weg zuschreiben.

Von einem Ort zu reden ist erst sinnvoll, wenn z.B. durch einen Detektor im Weg A ein Photon nachgewiesen wird.

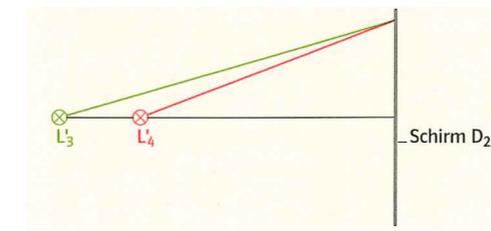
Gegenstände, wie Fußbälle oder Sandkörner, haben eine Ausdehnung. Für bestimmte Fragestellungen ersetzt man sie durch das Modell des Massenpunktes. Dessen genauen Ort anzugeben, kann ein messtechnisches Problem sein.

Die Messung stellt aber in diesem Falle eine Eigenschaft fest, die dem Körper auch ohne Messung zukommt. Bei Quantenobjekten wird im Moment der Messung einer der möglichen Zustände realisiert. Über unabhängig von der Messung existierende Eigenschaften ist damit keine Aussage gemacht.

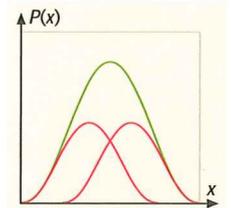
■ A1 Beim Mach-Zehnder-Interferometer gelangt das Licht über mehrere Reflexionen von der Quelle L zum Beobachter D₂. Es scheint für ihn von den virtuellen Lichtquellen L'₄ bzw. L'₃ zu kommen (→ B1).

a) Erläutern Sie die in der Grafik B1 ange-deutete Konstruktion dieser beiden virtuellen Quellen.

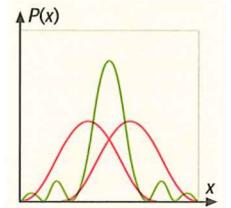
b) In der Grafik B2 ist der den Phasensprüngen entsprechende Gangunterschied durch die Lage von L'₄ und L'₃ berücksichtigt. Die von beiden Quellen ausgehenden Lichtbündel sind leicht kegelförmig. Begründen Sie mit diesen Voraussetzungen die Ringstruktur der Interferenzerscheinung.



B2 Virtuelle Lichtquellen und Interferenz



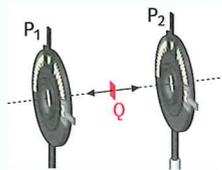
B3 Bei Teilchen Antreffwahrscheinlichkeit $P_{1,2}(x) = P_1(x) + P_2(x)$



B4 Bei Wellen Antreffwahrscheinlichkeit $P_{1,2}(x) \neq P_1(x) + P_2(x)$

Verschränkung

„Ich bin davon überzeugt, dass ohne Änderung unserer grundlegenden Konzepte von Zeit und Raum kein wirkliches Verständnis der Quantenmechanik erreicht werden kann.“ Henning Genz

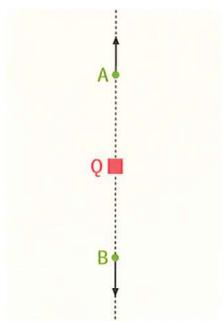


B1 Verschränkte Photonen

■ **V1** Photonen gehen mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit durch Polarisationsfilter hindurch oder nicht. Ein Spiel soll eine Situation simulieren: In der Abbildung B1 treffen zwei von Q ausgehende Photonen auf die Polarisationsfilter A und B. Diese können zwei verschiedene Stellungen haben. Das wird zufällig durch Münzwurf entschieden. Ob ein Photon durchgeht oder nicht, wird durch Würfeln entschieden. Die Tabelle zeigt die Regeln.

Kopf	1 oder 2	durch
Zahl	3, 4, 5 oder 6	durch

Ein Spielzug sieht folgendermaßen aus: Bei A und B Stellung ermitteln und notieren. Bei A und B Durchgang feststellen und notieren. Spielen Sie das Spiel möglichst oft. Es zeigen sich keine Zusammenhänge zwischen den Ergebnissen bei A und B.



B2 Impulserhaltung und Unbestimmtheit

Spukhafte Fernwirkung In der Diskussion um die Quantenphysik erdachte Einstein Gedankenexperimente. In Abbildung B2 sendet das Objekt Q zwei Teilchen A und B gleicher Masse in entgegengesetzte Richtung aus. Wenn vor der Aussendung der Gesamtimpuls null war, müssen die Impulse beider Teilchen den gleichen Betrag und entgegengesetzte Richtung haben. Bei gleicher Masse sind ihre Geschwindigkeiten gleich groß und entgegengesetzt gerichtet, d. h., A und B sind zu jedem Zeitpunkt gleich weit von Q entfernt. An solchen über einen Erhaltungssatz verschränkten Teilchen ließe sich nach Einsteins Vorstellung die Unbestimmtheitsrelation überlisten: Man misst an A die eine, an B die andere der Größen. Weil nur jeweils eine Größe gemessen wird, kann man das trotz Unbestimmtheitsrelation mit beliebiger Genauigkeit. Man hätte dann aber für beide Teilchen die volle Information.

Diese Überlegung enthält zwei Annahmen:
– die Teilchen lassen sich voneinander trennen und beeinflussen sich dann nicht. Dies nennt man **Separabilität**.
– die Teilchen sind zu einer bestimmten Zeit an einem bestimmten Ort. Wirkungen der Teilchen aufeinander erfolgen durch unmittelbaren Kontakt oder durch Felder. Dies nennt man **Lokalität**.

Heute sind entsprechende Experimente für Quantenobjekte realisiert. In der Abbildung B1 treffen zwei von der Quelle Q ausgehende Photonen auf die Polarisationsfilter A und B und werden dort mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit durchgelassen oder nicht. Das Experiment zeigt: Immer wenn beide Filter parallel sind, gehen entweder beide

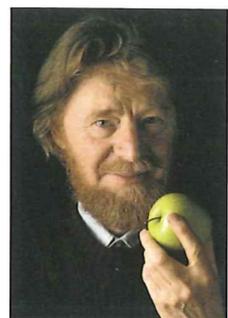
Photonen durch oder keines. Dies tritt auch ein, wenn die Stellung der Polarisationsfilter zufällig geändert wird und auch dann noch, wenn diese Änderung erst erfolgt, wenn die Photonen schon unterwegs sind. Die Photonen sind also nicht unabhängig voneinander. Wenn bei A das Photon durchgeht, ist im Moment der Messung seine Polarisation festgelegt und im gleichen Moment auch die des zweiten Photons, obwohl vor der Messung der Polarisationszustand unbestimmt ist. Einstein sprach von „spukhafter Fernwirkung“, denn eine Informationsübermittlung zwischen beiden Photonen hätte mit Überlichtgeschwindigkeit erfolgen müssen. Dies stand im Widerspruch zu zentralen Erkenntnissen im Rahmen der Relativitätstheorie. Einstein nahm an, die Quantentheorie sei noch unvollständig und es gäbe noch unbekannte Parameter, d. h., die Photonen hätten Verabredungen der Form: „Bei Filterstellung x gehen wir durch“ getroffen.

J. S. Bell konnte aus dieser Annahme eine Ungleichung herleiten, die den Experimenten der Quantenphysik widersprach. Es gilt also:

● **Für verschränkte Quantenobjekte gelten Separabilität und Lokalität nicht.**

Für verschränkte Quantenobjekte gibt es mehr Zustandmöglichkeiten als die Summe der Möglichkeiten der beiden Beteiligten. Die beiden am Experiment beteiligten Photonen bilden als Paar ein neues Quantenobjekt.

■ **A1** Vertiefen Sie die hier angedeuteten Überlegungen. Recherchieren Sie dazu unter dem Stichwort „EPR-Paradoxon“.



John Stewart Bell (1928 – 1990)

Deutungen

Das Grundproblem „Ökonomen haben nachgewiesen, dass in den USA rund 23% des Brutto-sozialproduktes auf den wissenschaftlichen Durchbruch zur Quantenmechanik in der Physik zurückgehen.“ (Roman Herzog, 1995)
Aussagen der Quantentheorie sind äußerst präzise, so stimmen z. B. beim magnetischen Moment eines Elektrons theoretisch ermittelter und gemessener Wert in den ersten 7 Ziffern überein.
Dennoch formuliert Richard Feynman, der 1965 den Nobelpreis für seine Beiträge zur Quantenelektrodynamik erhielt: „... ich denke, ich kann davon ausgehen, dass niemand die Quantenmechanik versteht.“

Quantenobjekte wie Photonen, Elektronen, Neutronen, Protonen, Atome, Moleküle ... zeigen sich in einem schillernden Gewand. Offen ist die Frage: Was sind sie wirklich? Drei Fragen haben zur Bildung verschiedener Lager unter den Physikern geführt:

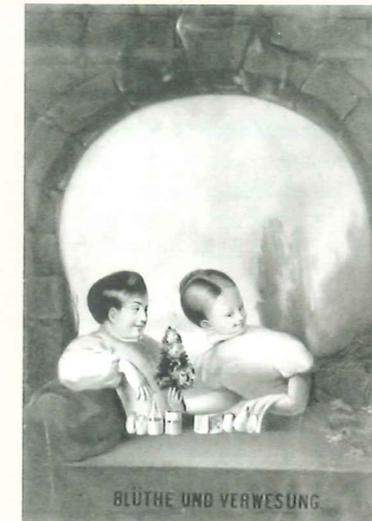
- 1 Die Frage nach der **Realität**: Existieren Quantenobjekte unabhängig von den Menschen und ihren Beobachtungen?
- 2 Die Frage des **Verstehens**: Ist es möglich, von Strukturen und Vorgängen gedankliche Bilder zu formen, die der Realität entsprechen?
- 3 Die Frage der **Kausalität**: Sollten die Gesetze der Physik so formuliert werden, dass jeder beobachtete Effekt auf mindestens eine Ursache zurückgeführt werden kann?

Zitate „Kein Ergebnis eines solchen Experiments kann dahin gedeutet werden, dass es Aufschluss über unabhängige Eigenschaften des Objekts gibt ...“ (Niels Bohr)
„Die Atome oder Elementarteilchen ... bilden eine Welt der Potenzialitäten oder Möglichkeiten ... Atome sind keine Dinge.“ (Werner Heisenberg)
„Die Ereignisse der Zukunft können wir nicht aus den gegenwärtigen erschließen. Der Glaube an den kausalen Zusammenhang ist der Aberglaube.“ (Ludwig Wittgenstein)

„Die Theorie liefert viel, aber dem Geheimnis des Alten (gemeint ist Gott) bringt sie uns kaum näher. Gott würfeln nicht.“ (Albert Einstein)
„Ein Philosoph hat einmal behauptet: ‚Naturwissenschaft setzt notwendig voraus, dass gleiche Umstände immer auch gleiche Auswirkungen haben‘. Nun, dem ist nicht so.“ (Richard Feynman)
„Eine physikalische Theorie glauben wir dann zu verstehen, wenn wir uns in allen Fällen die experimentellen Konsequenzen ... qualitativ denken können, und wenn wir erkannt haben, dass die

Anwendung der Theorie niemals einen Widerspruch enthält.“ (Werner Heisenberg)
„Wirklichkeit und Information sind dasselbe.“ (Anton Zeilinger)
„Das Weltbild steht überhaupt nicht fest. Wir haben gerade erst begonnen, darüber nachzudenken.“ (Anton Zeilinger)

■ **A1** Diskutieren Sie die Fragen untereinander. Beziehen Sie bei der Diskussion um die Realität das folgende Bild mit ein.

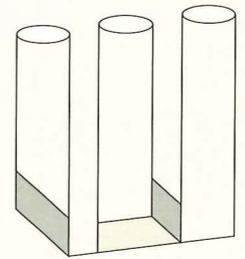


■ **A2** Versuchen Sie, die Zitate den Positionen in der Tabelle zuzuordnen.

Kopenhagener Deutung	Es gibt keine tieferliegende Realität.
Realisten	Es gibt eine vom Beobachter unabhängige Realität.
Bewusstseinsrealisten	Das Bewusstsein schafft die Realität.
Platoniker	Es gibt das Mögliche und das Faktische.
Naivrealisten	Realität ist, was wir wahrnehmen.
Pragmatiker	Es interessiert nur, was beim Experiment herauskommt.

■ **A3** Mit 20 Fragen, die nur mit „Ja“ oder „Nein“ beantwortet werden dürfen, soll ein Begriff erraten werden. Der Physiker J. A. Wheeler berichtet, er habe einmal raten müssen, ohne dass die Antwortenden vorher einen Begriff vereinbarten. Sie konstruieren den Begriff aus seinen Fragen. Spielen Sie das Spiel in dieser Form. Stellen Sie Beziehungen zu Ihren Kenntnissen über Quantenobjekte her.

Exkurs

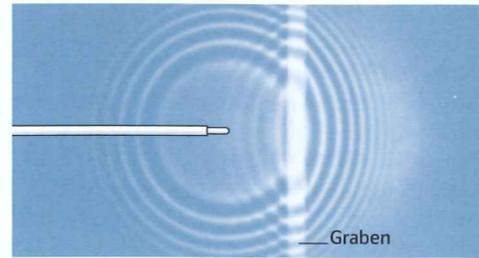


Halten Sie ein Stück Papier über das obige Bild. Verdecken Sie jeweils den oberen oder den unteren Teil des Bildes. Stellen Sie Beziehungen zu Ihren Kenntnissen über Quantenobjekte her. Diskutieren Sie in diesem Zusammenhang auch den Eingangstext.

Der Tunneleffekt und Zustandsfunktionen

1986 erhielten Gerd Binnig und Heinrich Rohrer den Physik-Nobelpreis für die Entwicklung des Rastertunnelmikroskops. Das öffnete den Blick in die Welt der Atome.

■ **V1** Wasserwellen werden beim Übergang vom flachen zum tiefen Wasser im Wesentlichen reflektiert. Wenn sich nur ein Graben zwischen zwei Flachwasserbereichen befindet, erkennt man neben der einlaufenden Welle wieder die reflektierte. Zusätzlich erkennt man jetzt auch eine Welle im zweiten Flachwasserbereich, besonders deutlich, wenn die Breite des Grabens etwa so groß ist wie die Wellenlänge.



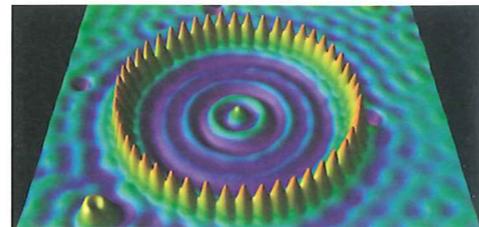
B1 Wasserwellen an einer Barriere

der Energieerhaltungssatz außer Kraft gesetzt sein kann. Damit kann das Elektron die Energiebarriere durchdringen, auch wenn seine Energie nicht reicht.

● **Quantenobjekte können endliche Energiebarrieren durchtunneln und auf beiden Seiten der Barriere gefunden werden.**

Beim RTM hängt die Stärke des Stroms vom Abstand zwischen Spitze und Oberfläche ab. Damit ergeben sich zwei Messmöglichkeiten: **1** Man benutzt eine konstante Stromstärke als Regelgröße. Dann besteht immer der gleiche Abstand zwischen Spitze und Oberfläche.

2 Man führt die Spitze auf einer bestimmten Höhe. Aus den Änderungen der Stromstärke lässt sich der Abstand und damit die Struktur der Oberfläche ermitteln. Das mit einem solchen Rastertunnelmikroskop erstellte Bild B5 zeigt die wahrscheinlichen Orte von Atomen und Elektronen auf einer Metalloberfläche.

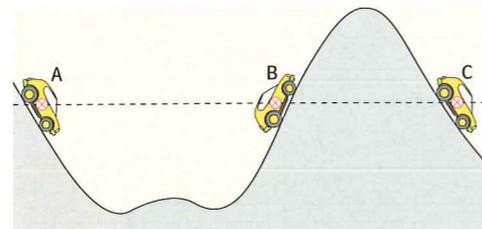


B5 RTM-Aufnahme

■ **A1** Bei einem Foto entstehen alle Bildpunkte gleichzeitig, bei einem Fernsehbild nacheinander. Erläutern Sie den Unterschied genauer. Klären Sie, welcher Fall beim RTM vorliegt.

Quantenobjekte überwinden Barrieren

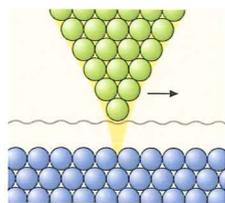
Beim Rastertunnelmikroskop (RTM) besteht zwischen einer feinen Spitze und einer metallischen Oberfläche ein Strom, obwohl die Spitze die Oberfläche nicht berührt (→ B2).



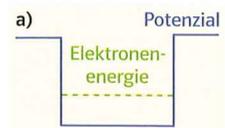
B4 Energie bei Berg- und Talfahrt

Das Fahrzeug in Abbildung B4 hat im Startpunkt A eine gewisse Energie der Lage. In C ist die Höhe und damit die Energie die gleiche wie beim Start. Bei Überquerung des hohen Hügels müsste allerdings die Energie größer gewesen sein, sodass das Fahrzeug in C nicht erwartet werden kann. Wasserwellen können einen Tiefwasserbereich, an dem sie eigentlich reflektiert werden, durchdringen, wenn der hinreichend schmal ist. Elektronen können wie das Fahrzeug in einer „Energimulde“ gefangen sein (→ B3a). Für Quantenobjekte wie die Elektronen liefern Betrachtungen über Wellen Hinweise auf das Verhalten. Es könnte also sein, dass Elektronen eine schmale Energiebarriere durchdringen können (→ B3b), auch wenn ihre Energie nicht ausreicht. Beim Rastertunnelmikroskop tritt dieser Tunneleffekt zwischen Spitze und Oberfläche auf.

Für Quantenobjekte gilt die Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation. In der Form $\Delta E \cdot \Delta t \geq h/4\pi$ besagt sie, dass „kurzfristig“



B2



B3a Eingesperres Elektron



B3b Energimulde

B3b Energimulde

Zustandsfunktionen Quantenobjekte lassen sich mit den anschaulichen Vorstellungen – Teilchen und Welle – nicht erfassen. Es wurde aber ein mathematischer Apparat zu ihrer Beschreibung entwickelt. Dabei lieferte die Anschauung durchaus Ideen. Erwin Schrödinger formulierte 1926 analog zur Wellengleichung eine Differenzialgleichung, die das Verhalten von Quantenobjekten erfasst. Die Lösungen dieser Schrödinger-Gleichungen sind Funktionen $\psi(x, t)$ von Ort und Zeit. Sie heißen **Zustandsfunktionen**. Ihre Funktionswerte sind keine Messwerte, liefern aber eine Aussage über das stochastische Verhalten von Quantenobjekten. Es gilt:

● $|\Psi(x_0, t_0)|^2 \cdot \Delta V$ ist die **Wahrscheinlichkeit**, ein Quantenobjekt zum Zeitpunkt t_0 in einem Volumen ΔV in der Umgebung des Ortes x_0 zu registrieren.

Abbildung B1 zeigt die zeitliche Entwicklung für den Tunneleffekt. Das Maximum der Aufenthaltswahrscheinlichkeit nähert sich von links der Barriere und erreicht sie. Nach einem komplizierten Prozess ergeben sich dann zwei Maxima, die sich von der Barriere entfernen. Gibt es für ein Quantenobjekt in der Teilchenvorstellung mehrere Möglichkeiten, zum Beob-

achtungsort zu gelangen, so müssen mehrere Zustandsfunktionen berücksichtigt werden. Die Gesamtamplitude ψ_0 ergibt sich aus den Einzelamplituden ψ_1 und ψ_2 nach folgenden Regeln:

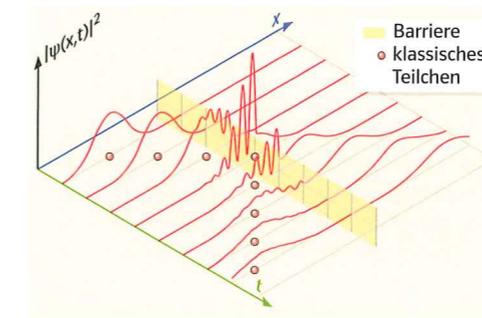
1 Wenn die Möglichkeiten nicht unterscheidbar sind, d.h., Interferenz erfolgt, gilt:

$$|\Psi_0|^2 = |\Psi_1 + \Psi_2|^2$$

2 Wenn die Möglichkeiten unterscheidbar sind, d.h., keine Interferenz erfolgt, gilt:

$$|\Psi_0|^2 = |\Psi_1|^2 + |\Psi_2|^2$$

Das Verhalten von verschränkten Quantenobjekten wird durch eine einzige Zustandsfunktion beschrieben.



B1 Tunnelingeffekt und Zustandsfunktion

Lösung einer Schrödinger-Gleichung

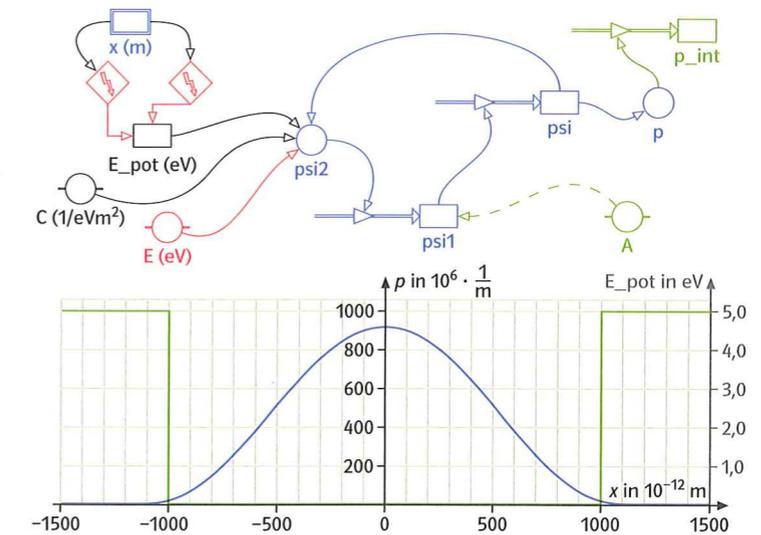
Die Schrödinger-Gleichung für ein Elektron in einem eindimensionalen Kasten lautet

$$\psi''(x) = -C \cdot (E - E_{\text{pot}}(x)) \cdot \psi(x)$$

E ist die Energie des Elektrons, $E_{\text{pot}}(x)$ die potenzielle Energie und $C = 8\pi^2 \cdot m/h^2$. Diese Differenzialgleichung hat dieselbe Form wie die der harmonischen Schwingung. Sie lässt sich daher wie diese mit einem Modellbildungssystem lösen (→ B2 oben). ψ , ψ' und ψ'' . Die Ereignissymbole besagen: Für $L \leq x \leq R$ ist $E_{\text{pot}} = 0$, sonst ist $E_{\text{pot}} = 5 \text{ eV}$ (Kastenpotenzial), wobei $L = -10^{-9} \text{ m}$, $R = 10^{-9} \text{ m}$. $p = \psi \cdot \psi$ ist die Wahrscheinlichkeitsdichte $|\psi|^2$ für den Ort des Elektrons, die in p_{int} aufintegriert wird. Der Wert A wird so gewählt, dass $p_{\text{int}} = 1$ ist, d.h., die Wahrscheinlichkeit, das Elektron irgendwo im Raum anzutreffen, ist 100%. Lösungen sind die Werte von E , für die außerhalb des Kastens $\psi \rightarrow 0$ geht.

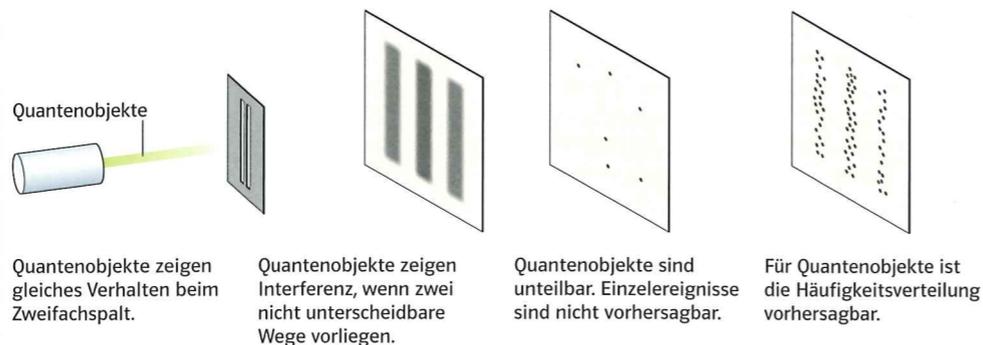
■ **A1** Finden Sie durch Probieren mit der Simulation Lösungen für E (→ B2 unten).

Methoden



B2 Wirkungsgefüge (oben), Simulationsergebnis für $E = 0,0796 \text{ eV}$ (unten)

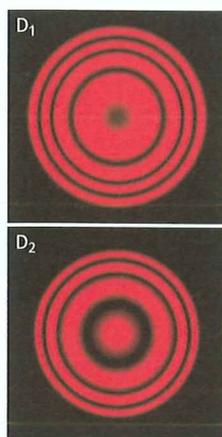
■ **A2** Ergänzen Sie das Wirkungsgefüge um ein Ereignis „für $x \geq D$ ist $E_{\text{pot}} = 0$ “. Wählen Sie $D > R$ und diskutieren Sie die Ergebnisse.



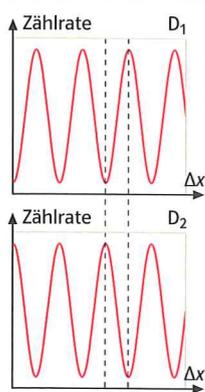
Planck'sche Konstante: $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$
Energie $E = h \cdot f$

Impuls: $p = h/\lambda$;
Unbestimmtheitsrelation: $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h/4\pi$

Beispiele

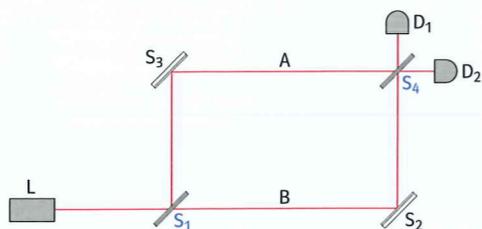


B1



B2 Zählraten

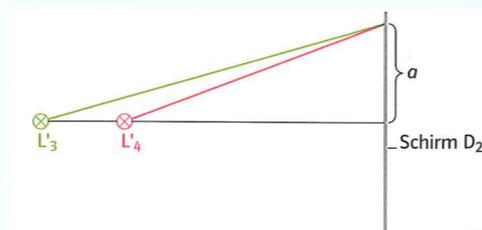
Das Mach-Zehnder-Interferometer Abbildung B3 zeigt ein Mach-Zehnder-Interferometer. L ist eine Lichtquelle (Laser), D₁ und D₂ Detektoren bzw. Schirme.



B3

- a) Auf den Schirmen beobachtet man Muster wie in Abbildung B1. Erklären Sie deren Zustandekommen.
- b) L sende einzelne Photonen aus, die von D₁ bzw. D₂ angezeigt werden können. Man verlängert einen der beiden Wege um Δx (z. B. mittels eines Glasfaserkabels) und registriert die Zählrate beider Detektoren. Begründen Sie die Ergebnisse in B2.
- c) An vielen verschiedenen Orten wird in völlig identischen Anordnungen jeweils ein Photon auf einem Schirm registriert. Welches Bild ergibt sich beim Übereinanderlegen aller Schirme?
- d) Machen Sie Aussagen darüber, welchen Weg ein einzelnes Photon nimmt.
- e) Die geometrischen Wege $S_1 S_3 S_4$ und $S_1 S_2 S_4$ seien exakt gleich lang. Was registrieren die Detektoren? Wie ändert sich die Anzeige, wenn einer der Wege unterbrochen ist?

- Lösung:**
- a) Es liegt Interferenz vor. Die Wellen scheinen von zwei virtuellen Lichtquellen zu kommen. Der Gangunterschied am Beobachtungsort hängt von a ab (\rightarrow B4). Die Figur ist drehsymmetrisch um die Achse. Die Bilder verhalten sich wie Positiv und Negativ zueinander, weil die Phasensprünge sich auswirken.
 - b) Bei Verschiebung ändert sich der Gangunterschied und damit das Interferenzergebnis an einem Messpunkt.
 - c) Einzelereignisse sind nicht vorhersagbar. Bei vielen ergibt sich das Interferenzmuster aus a).
 - d) Für Quantenobjekte sind Wegaussagen nicht möglich. Es gibt nur Wahrscheinlichkeitsaussagen für die Registrierung in einem der Detektoren. Dafür müssen alle Wegmöglichkeiten entsprechend der Teilchenvorstellung berücksichtigt werden.
 - e) Maßgeblich sind nur die Phasenverschiebungen an S_1 bis S_3 . Konstruktive Interferenz ist in D_2 , destruktive in D_1 , also werden alle Photonen in D_2 registriert. Wenn einer der Wege unterbrochen ist, sind beide unterscheidbar. Jetzt ist keine Interferenz, daher reagieren beide Detektoren.



B4

Interferenz bei Elektronen

1 Lässt man Elektronen gleicher Geschwindigkeit und Richtung durch einen feinen Zweifachspalt treten, so entsteht ein Streifenmuster, wie es bei der Interferenz von Licht zu beobachten ist. Welche Vorstellung über die Elektronen ergibt sich daraus?

2 Das Verhalten von Sandkörnern und Wasserwellen unterscheidet sich wesentlich von dem der Elektronen in der Beugungsröhre. Erläutern Sie dies näher.

3 Beim Versuch mit der Elektronenbeugungsröhre wird ein Strahl von Elektronen auf eine Graphitschicht gelenkt. Auf dem Schirm erzeugen die Elektronen danach Kreisringe, deren Radien sich durch Verändern der Beschleunigungsspannung U_B beeinflussen lassen.

- a) Erläutern Sie das Zustandekommen der Ringe. Welche Hypothese über die Natur der Elektronen wird dabei gemacht?
- b) Welche Naturkonstante ergibt sich aus den Messwerten?
- c) Was versteht man unter der De-Broglie-Wellenlänge der Elektronen? Weshalb kommt man erst bei vielen Elektronen gleicher Energie auf diese Vorstellung?

Fotoeffekt

4 Auf der am Rand abgebildeten Briefmarke wird der Fotoeffekt dargestellt. Wo erhalten die Elektronen die größte Energie? Begründen Sie Ihre Antwort.

5a) Eine Fozelle wird belichtet. Geben Sie eine Schaltung an, mit der die Daten für das am Rand abgebildete Diagramm B2 aufgenommen werden können.

b) Erklären Sie den Verlauf des Graphen A sowie Gleichheit bzw. Unterschiede zwischen den anderen Graphen unter der Annahme, dass stets nur Licht einer Wellenlänge verwendet wurde.

6 Parallel zu einer Fozelle ist ein Kondensator geschaltet (\rightarrow B3): Wird die Fozelle mit Licht einer Wellenlänge beleuchtet, so stellt sich am Kondensator C eine zeitlich konstante Endspannung ein. In der Tabelle sind die Messergebnisse zusammengestellt.

- a) Erklären Sie das Versuchsergebnis.
- b) Welche Veränderungen im Versuchsablauf sind zu erwarten, wenn man – die Lichtintensität verkleinert?

- den Kondensator durch einen mit größerer Kapazität ersetzt?
- c) Stellen Sie den Zusammenhang zwischen Lichtfrequenz und Spannung grafisch dar und bestimmen Sie die Konstante h , die Grenzfrequenz und die Austrittsarbeit.

Wellenlänge des Lichts in nm			
546	434	405	366
Endspannung am Kondensator in V			
0,27	0,81	1,02	1,35

7 Die Tabelle gibt die zum Herauslösen eines Elektrons erforderliche Energie ΔE bei verschiedenen Materialien an:

Metall	Cs	Rb	Ba	Mg	Zn	Ag	Pt
ΔE in 10^{-19} J	3,04	3,36	4,01	5,93	6,89	7,53	10,09

- a) Berechnen Sie jeweils die zum Fotoeffekt erforderlichen Grenzwellenlängen.
- b) Rubidium wird mit Licht der Wellenlänge $\lambda = 436 \text{ nm}$ beleuchtet. Berechnen Sie die Geschwindigkeit der schnellsten der herausgelösten Elektronen.
- c) Welche Wellenlänge muss das Licht zum Beleuchten eines Platinbleches haben, damit Elektronen mit der maximalen kinetischen Energie von $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ austreten können?
- d) Geben Sie die Spannung U_G an, bei der beim Beleuchten der Mg-Kathode einer Fozelle mit Licht der Wellenlänge $\lambda = 302 \text{ nm}$ keine Elektronen mehr zur Anode gelangen.

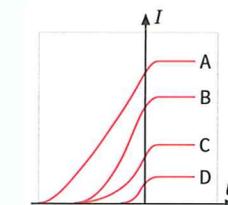
8 Auf die Kathode einer Fozelle fällt Licht der Wellenlänge $\lambda = 436 \text{ nm}$. Die Arbeit ΔE zum Auslösen von Elektronen aus dieser Kathode betrage $3,0 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Berechnen Sie die Grenzfrequenz und die maximale kinetische Energie der ausgelösten Elektronen. Warum ist die kinetische Energie der Elektronen bei Licht mit doppelter Frequenz nicht doppelt so groß?

- 9a) Welche maximale Spannung kann man messen, wenn eine Kaliumplatte mit Licht der Wellenlänge $\lambda = 350 \text{ nm}$ bestrahlt wird? Die zum Verlassen des Kaliums erforderliche Energie der Elektronen beträgt $\Delta E = 3,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.
- b) Die Kaliumplatte hat eine Fläche von $1,0 \text{ cm}^2$. Die Bestrahlungsstärke beträgt $2,0 \text{ W/m}^2$. Man misst einen Fotostrom von $1,4 \cdot 10^{-11} \text{ A}$. Berechnen Sie die Anzahl der pro Sekunde auftreffenden Photonen und der ausgelösten Elektronen. Vergleichen Sie.

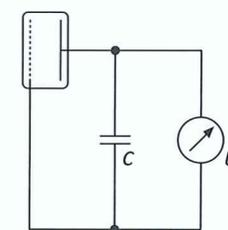
Aufgaben



B1 Zu Aufgabe 4



B2 Zu Aufgabe 5



B3 Zu Aufgabe 6

Aufgaben



Louis de Broglie
(1892–1987)

10 Licht der Wellenlänge $\lambda = 500 \text{ nm}$ trifft auf eine Metalloberfläche auf, und es werden Elektronen mit der Maximalgeschwindigkeit $6,0 \cdot 10^5 \text{ ms}^{-1}$ ausgelöst.

- a) Berechnen Sie die notwendige Energie zum Herauslösen der Elektronen aus dem Metall und geben Sie die Grenzfrequenz für dieses Metall an.
b) Warum spricht man von der maximalen Geschwindigkeit?

11 Ein Lichtblitz transportiert bei einer Wellenlänge von $\lambda = 510 \text{ nm}$ die Energie $2,5 \cdot 10^{-17} \text{ J}$. Aus wie vielen Photonen besteht er?

12 Der Mensch kann Licht der Wellenlänge $\lambda = 600 \text{ nm}$ gerade noch mit bloßem Auge wahrnehmen, wenn es in den Sehzellen der Netzhaut eine Energie von mindestens $2 \cdot 10^{-18} \text{ J}$ umsetzt. Um wie viele Photonen muss es sich dabei mindestens handeln?

13 Was würde im täglichen Leben anders sein, wenn die Planck'sche Konstante wesentlich größer wäre, z. B.:

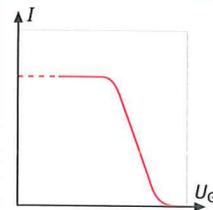
- a) $h \approx 10^{-24} \text{ Js}$ b) $h \approx 10^{-14} \text{ Js}$ c) $h \approx 10^{-4} \text{ Js}$

14 Die Kathode einer Fozelle wird mit Licht konstanter Intensität und bestimmter Frequenz f bestrahlt. Die Abbildung am Rand zeigt den Zusammenhang zwischen Stromstärke I und Spannung U_G .

a) Weshalb lässt sich bei diesem Kurvenverlauf auf eine Geschwindigkeitsverteilung der Fotoelektronen schließen?

b) Bei genauer Beobachtung stellt man fest, dass bei sehr kurzwelligem Licht hoher Intensität und bei noch weiter zunehmender Spannung in negativer Richtung die Stromstärke geringfügig ansteigt und schließlich einen konstanten Wert erreicht. Erklären Sie dies!

c) Wie ändert sich die Anfangsgeschwindigkeit der Elektronen, wenn das Licht durch einen Schirm auf die halbe Intensität abgedunkelt wird?



B1 Zu Aufgabe 15

Quantenobjekte und Unbestimmtheitsrelation

15 Das Licht einer Natriumdampflampe mit der Wellenlänge $\lambda = 589 \text{ nm}$ trifft auf einen Zweifachspalt mit einem Abstand der Spaltenmitten von $g = 1 \text{ mm}$. Hinter dem Spalt befindet sich im Abstand $l = 16,8 \text{ m}$ eine 5 cm breite und 3 cm hohe Fotoplatte.

a) Skizzieren Sie das Bild, das auf der entwickelten Fotoplatte entstehen wird.

b) Mit einem Filter vor dem Zweifachspalt kann die Lichtintensität stark reduziert werden. So gelingt es, dass im Mittel nur $100\,000$ Photonen pro Sekunde auf die Fotoplatte treffen. Skizzieren Sie das Bild auf der Fotoplatte, wenn sie $\frac{1}{10\,000} \text{ s}$ lang belichtet wurde. Was ändert sich bei einer sehr langen Belichtungszeit?

c) Photonen sind keine klassischen Teilchen. Erläutern Sie diese Aussage!

16 Wodurch unterscheidet sich die „Unsicherheit“ eines klassischen Messergebnisses von der „Unbestimmtheit“ von Vorhersagen für Quantenobjekte?

17 Berücksichtigt man die Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation, so hat ein Fußball eine wohldefinierte Geschwindigkeit und einen wohldefinierten Ort, beim Elektron ist das nicht der Fall. Erläutern Sie Hintergründe und Grenzen dieser Aussage.

18 Elektronen mit der kinetischen Energie $E_k = 103 \text{ eV} = 1,65 \cdot 10^{-17} \text{ J}$ hinterlassen in einer Nebelkammer Bahnspuren der Breite 10^{-4} m .

a) Berechnen Sie den Impuls p_y in Richtung der Nebelspuren und die Unbestimmtheit Δp_x senkrecht dazu. Vergleichen Sie beide Ergebnisse.

b) Welche Bedeutung hat die Unbestimmtheitsrelation für dieses Experiment?

19 Ein Elektron und ein Ball der Masse 150 g bewegen sich jeweils mit der Geschwindigkeit 220 ms^{-1} , die mit $0,065\%$ unbestimmt ist. Wie groß ist dann für beide Objekte die zu erwartende Unbestimmtheit, wenn man den Ort möglichst genau messen will?

20 Die Unbestimmtheit der Ortsangabe für ein Elektron sei $\Delta x = 1,6 \cdot 10^{-8} \text{ m}$. Wie genau lässt sich dann die Geschwindigkeit des Elektrons höchstens bestimmen?

21 Ein Gewichtsstück der Masse 1 g ruht reibungsfrei auf einer Fläche. Wie groß kann nach der Messung des Ortes mit der Unsicherheit von $\Delta x = 0,1 \text{ mm}$ die Geschwindigkeit des Gewichtsstücks sein?

22 Die Geschwindigkeit eines Elektrons betrage mit einer Unbestimmtheit von $1\% \cdot 1 \cdot 10^6 \text{ m/s}$. Welche Unbestimmtheit hat sein Ort mindestens, wenn Ort und Impuls zum gleichen Zeitpunkt bestimmt werden sollen?

23 Kommentieren Sie die Aussage: „Je größer die Masse eines Körpers ist, desto genauer kann seine Ortsveränderung angegeben werden.“ unter Bezug auf die Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation.

24 In einer Fernsehöhre werden Elektronen mit der Spannung $U_B = 10 \text{ kV}$ beschleunigt.

a) Welche Geschwindigkeit und welchen Impuls haben sie an der Anode? Welcher De-Broglie-Wellenlänge entspricht dies?

b) Die Öffnung der Anode sei $d = 0,1 \text{ mm}$; dies sei auch die Unbestimmtheit Δx für die Ortsangabe der Elektronen. Wie groß ist die Unbestimmtheit Δp_x des Querimpulses der Elektronen mindestens?

c) Welchen Durchmesser hat der von den Elektronen auf einem 30 cm von der Anode entfernten Schirm erzeugte Bildfleck?

25 a) Formen Sie die Unbestimmtheitsrelation für Energie und Zeit: $\Delta E \cdot \Delta t \geq h/4\pi$ so um, dass eine Unbestimmtheit der Frequenz Δf von Lichtwellen angegeben wird.

b) Geben Sie die Unbestimmtheiten Δf und $\Delta \lambda$ für Licht mit der Wellenlänge $\lambda = 600 \text{ nm}$ an, wenn die Lichtaussendung eine Unbestimmtheit von $\Delta t = 10^{-8} \text{ s}$ hat.

26 Bei einem Michelson-Interferometer sei es möglich, zu registrieren, wann ein Photon auf einen der Endspiegel trifft.

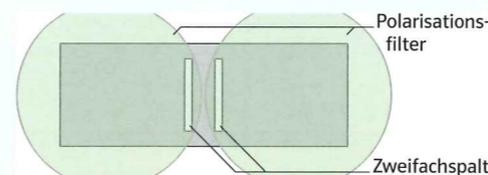
a) Vergleichen Sie die möglichen Ergebnisse für beide Spiegel.

b) Man liest manchmal: „Jedes Photon interferiert mit sich selbst“. Nehmen Sie Stellung zu dieser Aussage.

27 Die beiden Spalte eines Zweifachspaltes seien mit drehbaren Polarisationsfiltern abgedeckt (\rightarrow B1). Je nach Stellung der Filter ist Interferenz zu beobachten oder nicht.

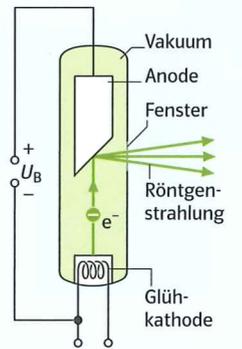
a) Begründen Sie dies und kennzeichnen Sie die Fälle mit Interferenz.

b) Für den Fall, dass keine Interferenz beobachtbar ist, kann durch ein drittes Filter wieder ein Interferenzbild sichtbar gemacht werden. Begründen Sie dies und geben Sie die experimentellen Bedingungen an.



B1

Aufgaben



B2 Wie funktioniert diese Röntgenöhre?



Wilhelm Conrad Röntgen
(1845–1923)

28 a) Bei Interferenzexperimenten mit Fullerenen sorgt man dafür, dass möglichst alle Fullerene die gleiche Geschwindigkeit haben. Begründen Sie diese Notwendigkeit.

Im Folgenden wird ein Gedankenversuch beschrieben: Fullerene werden auf einen Dreifachspalt gelenkt. Dahinter befindet sich an einer Stelle ein Detektor, der einzelne Fullerene registrieren kann.

b) Beschreiben Sie anhand geeigneter Skizzen ein Verfahren, die Auftreffwahrscheinlichkeit am Ort des Detektors zu ermitteln.

c) Bei hoher Intensität oder langer Versuchsdauer ergibt sich insgesamt ein für den Dreifachspalt typisches Interferenzmuster. Nehmen Sie an, es könne eindeutig festgestellt werden, wenn ein Fulleren durch den mittleren Spalt geht. Beschreiben und begründen Sie Veränderungen im Interferenzmuster.

29 Es wird mit 100 Photonen und einem Zweifachspalt experimentiert.

a) 100 Experimentatoren schicken je ein Photon auf je eine Spaltanordnung und markieren den Auftreffort auf einem Schirm. Inwieweit ist eine Vorhersage möglich?

b) In einem Experiment werden alle 100 Photonen auf eine Spaltanordnung geschickt. Machen Sie eine Aussage über das Schirmbild.

c) Die Auftrefforte aus a) werden alle auf einen Schirm übertragen. Vergleichen Sie mit dem Ergebnis aus b).

Röntgenstrahlung und Comptoneffekt

30 Zwischen Kathode und Anode einer Röntgenöhre liegt die Spannung $5 \cdot 10^4 \text{ V}$. Die Anodenstromstärke ist $I = 20 \text{ mA}$. Nur $0,1\%$ der zugeführten Energie wird in Röntgenstrahlung umgesetzt.

a) Wie groß ist die maximale Frequenz der entstehenden Röntgenstrahlung?

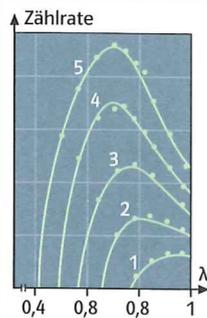
b) Welche Energie hat die Röntgenstrahlung und was geschieht mit dem anderen Teil der zugeführten Energie?

31 a) Mit welcher Spannung muss eine Röntgenöhre betrieben werden, wenn die Röntgenstrahlung die Wellenlänge 66 pm enthalten soll?

b) Wie muss ein NaCl -Kristall ($a = 282 \text{ pm}$) in den Strahlengang gebracht werden, damit die Wellenlänge 71 pm „ausgefiltert“ wird?

c) Unter welcher Voraussetzung sind weitere Wellenlängen im reflektierten Strahl vorhanden? Um welche Wellenlängen handelt es sich?

Aufgaben



Messwerte zur Strahlung einer Röntgenröhre bei der Kurve
 1 für $U_B = 17 \text{ kV}$
 2 für $U_B = 19 \text{ kV}$
 3 für $U_B = 22 \text{ kV}$
 4 für $U_B = 25 \text{ kV}$
 5 für $U_B = 30 \text{ kV}$

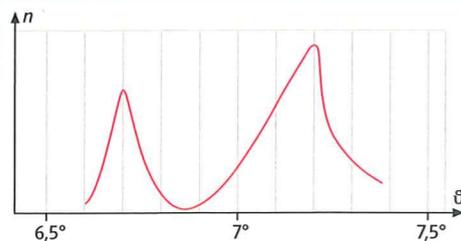
B1 Zu Aufgabe 33

32 Beschreiben Sie, wie Sie Grenzfrequenz und Intensität einer an einem Lithiumfluorid-Kristall reflektierten Röntgenstrahlung bestimmen können.

33 Die Abbildung B1 zeigt den Verlauf der Intensität (Zählrate) von Röntgenstrahlung für verschiedene Spannungen U_B . Wie entsteht die Röntgenstrahlung und weshalb gibt es zu jeder Spannung eine Grenzwellenlänge?

34 Röntgenstrahlung einer Wellenlänge wird unter 120° an einem Graphitkristall gestreut. Die gestreute Strahlung wird nach dem Bragg'schen Verfahren untersucht (\rightarrow B2).

a) Weshalb misst man zwei Maxima?
 b) Bestimmen Sie die Planck'sche Konstante h unter der Annahme, dass die Wellenlänge der einfallenden Röntgenstrahlung $\lambda = 48 \cdot 10^{-12} \text{ m}$ ist.



B2

35 a) Röntgenstrahlung ($\lambda = 100 \text{ pm}$) wird an einem Körper gestreut. Welche Wellenlänge hat die gestreute Strahlung bei den Beobachtungswinkeln $45^\circ, 90^\circ, 180^\circ$?

b) Geben Sie Energie und Impulsbetrag der Photonen vor und nach der Streuung an.

36 Beschreiben und erklären Sie den Compton-Effekt. Warum verwendet man Röntgenstrahlung zum Nachweis des Compton-Effekts? Begründen Sie dies mit einer Rechnung.

37 Ein Röntgenphoton wird an einem Elektron gestreut. Ändert sich dabei die Wellenlänge des Elektrons und wenn ja, wie? Erläutern Sie Ihr Ergebnis.

38 Ein Photon mit der Frequenz $f = 3 \cdot 10^{18} \text{ Hz}$ stößt zentral mit einem ruhenden Elektron zusammen. Das Elektron bewegt sich danach in der Einfallrichtung des Photons weiter, das Photon bewegt sich danach exakt in Gegenrichtung.

a) Berechnen Sie die Frequenz des Photons nach der Wechselwirkung.

b) Berechnen Sie die kinetische Energie des Elektrons nach dem Stoß.

Messung der Planck'schen Konstanten

39 Die folgenden Messwerte wurden bei der Streuung von Röntgenstrahlung an einem Kristall mit $a = 201 \text{ pm}$ gewonnen. Dabei ist U die Spannung der Röntgenröhre und ϑ der Glanzwinkel.

$\vartheta = 15^\circ$		$\vartheta = 14^\circ$	
U in kV	n in 10^5 Imp./min	U in kV	n in 10^5 Imp./min
23	5,8	23	6,6
22	5,3	22	6,2
20	4,6	20	5,0
18	3,9	18	3,9
16	2,6	16	2,8
14	1,5	14	1,2

$\vartheta = 13^\circ$		$\vartheta = 12^\circ$	
U in kV	n in 10^5 Imp./min	U in kV	n in 10^5 Imp./min
23	7,9	23	7,8
22	6,3	22	7,1
20	5,8	20	5,5
18	4,5	18	3,7
16	2,6	16	1,4

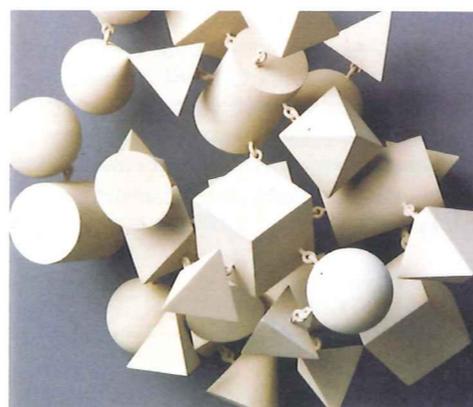
$\vartheta = 10^\circ$		$\vartheta = 8^\circ$	
U in kV	n in 10^5 Imp./min	U in kV	n in 10^5 Imp./min
23	6,8	23	3,2
22	6,0	22	2,7
20	3,8	20	0,5
18	1,0	18	-

a) Skizzieren Sie den Versuchsaufbau und beschreiben Sie den Messvorgang.
 b) Stellen Sie die Messdaten grafisch dar (U auf horizontaler Achse).
 c) Bestimmen Sie durch Verlängern der Graphen deren Schnittpunkte mit der Abszisse und tabellieren Sie die Ergebnisse.
 d) Es wird behauptet, dass aus diesen Schnittpunkten die Grenzwellenlänge der Röntgenstrahlung für die jeweilige Beschleunigungsspannung zu erhalten ist. Begründen Sie diese Aussage.
 e) Erstellen Sie einen f - U -Graphen aus den Daten. Begründen Sie den Verlauf des Graphen und bestimmen Sie h .

Atomphysik

Bilder von Atomen Das obige Bild zeigt zehn Moleküle, die entlang einer atomaren Stufe auf einer Kupferoberfläche verschoben werden und so die Zahlen 0 bis 10 darstellen, vergleichbar mit der Anwendung eines Zählrahmens eines Abakus, der aus einzelnen Atomen aufgebaut wurde. Solche Bilder von Atomen lassen sich mit Raster-Tunnel-Mikroskopien (RTM) gewinnen, mit denen es auch gleichzeitig möglich ist, einzelne Atome zu manipulieren.

Die Vorstellung vom Aufbau der Welt aus Atomen geht auf den griechischen Philosoph Leukipp und seinen Schüler Demokrit zurück. Demokrit behauptete, dass sich alle Stoffe aus für das menschliche Auge nicht sichtbaren und nicht weiter teilbaren Bausteinen zusammensetzen. Diese sind verschieden groß, besitzen die Form von Kugeln, Quadern usw. und können sich durch Haken und Ösen zu den unterschiedlichsten Stoffen verbinden.



Die Entwicklung der Atomvorstellung

um 450 v.Chr.	Leukipp, Demokrit	Die Welt besteht aus kleinsten unteilbaren Teilchen
1660	R. Boyle	Die Elastizität der Luft wird auf kleinste Teilchen zurückgeführt
1738	D. Bernoulli	Gasdruck wird durch Stöße kleinster Teilchen erklärt
1808	J. Dalton	Atomvorstellung, Tabelle relativer Atommassen
1811	A. Avogadro	Bestimmung der Anzahl der Teilchen in einem Gasvolumen
1827	R. Brown	Brown'sche Teilchenbewegung
1860	W. Bunsen, G. R. Kirchhoff	Spektralanalyse
1865	J. Loschmidt	Größe eines Gasatoms
1868	A. J. Ångström	Genaueres Messen von Spektrallinien
1870	D. Mendelejew, L. Meyer	Periodensystem der chemischen Elemente
1885	J. Balmer	Formel zum Wasserstoffspektrum
1904	J. J. Thomson	Rosinenkuchenmodell für Atome
1909	R. Millikan	Elementarladung
1911	E. Rutherford	Kern-Hülle-Modell des Atoms
1913	N. Bohr	Verknüpfung des Kern-Hülle-Modells mit Photonenhypothese
1913/1914	J. Franck, G. Hertz	Quantenhafte Absorption von Energie im Atom
1924	W. Pauli	Ausschlussprinzip
1925/1926	W. Heisenberg, E. Schrödinger	Theoretische Grundlagen für Atommodelle auf der Basis quantisierter Energieumsetzungen
1927	W. Heisenberg	Unbestimmtheitsrelation
1930	M. Born	Statistische Deutung der Elektronenverteilung im Atom
1951	E. Müller	Feldionenmikroskop: erste Bilder von Wolfram-Atomen
1981	G. Binnig, H. Rohrer	Rastertunnelmikroskop: Darstellung atomarer Strukturen