

## 8.7 Elektronenbeugung



**B1** Prince Louis-Victor Pierre Raymond DE BROGLIE (1892–1987), französischer Adliger, erhielt 1929 den Nobelpreis für Physik

**De-Broglie-Wellenlänge** – Louis-Victor DE BROGLIE (gesprochen *broi*, Bild **B1**) hatte eine Idee: So wie man bei Licht sowohl Wellen- als auch Teilcheneigenschaften gefunden hat, sollte man sich bei Elektronen nicht von vornherein auf die Beschreibung als klassische Teilchen allein beschränken, sondern auch Welleneigenschaften in Betracht ziehen. Symmetrie in der Natur war der Kern dieses Gedankens.

DE BROGLIE ordnete 1924 – analog zur Beziehung  $\lambda = \frac{h}{p}$  für Photonen – klassischen Teilchen wie dem Elektron formal die sogenannte **De-Broglie-Wellenlänge**  $\lambda_B$  zu:

$$\lambda_B = \frac{h}{p}. \quad (1)$$

$p$  ist der Impuls, dessen Betrag sich im Fall des Elektrons nach  $p = m \cdot v$  berechnet;  $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  Js ist die aus den Untersuchungen des Lichts bereits bekannte plancksche Konstante. Gleichung (1) wird auch als **De-Broglie-Gleichung** bezeichnet.

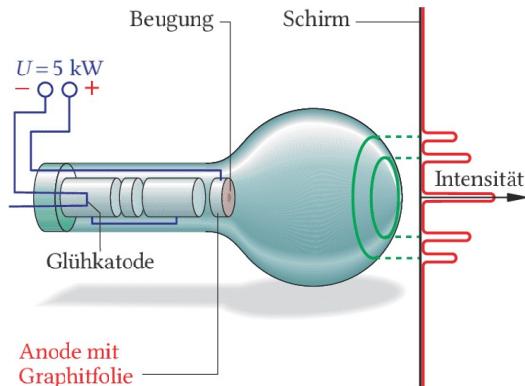
Die durch die Angabe dieser Wellenlänge beschriebene Welle heißt **De-Broglie-Welle**, **Materiewelle** oder  **$\Psi$ -Welle** (sprich: *Psi-Welle*).

Die Frequenz  $f$  dieser Welle ist – ebenfalls analog zu Photonen – mit der Konstanten  $h$  und mit der Energie  $E_\Psi$  der Welle verknüpft:

$$E_\Psi = h \cdot f. \quad (2)$$

Problematisch am Vorschlag von DE BROGLIE war, dass es keine experimentellen Befunde gab, die die Existenz dieser Materiewellen unterstützen. Anekdoten aus dieser Zeit berichten, dass DE BROGLIES Idee sofort großes Interesse und auch Zweifel hervorrief, aber zunächst nicht nachweisbar war.

### V1 Elektronenbeugung



Elektronen werden in der luftleeren Beugungsröhre mit der Spannung  $U = 5$  kV beschleunigt. Sie durchsetzen in der Anodenöffnung eine dünne Schicht aus polykristallinem Grafit (rot). Am Schirm sind zwei Beugungsringe mit Radien  $r_a$  und  $r_b$  zu erkennen (Bild **B2**). Nähert man dem Beugungsschirm einen Hufeisenmagneten, wird das Interferenzmuster verschoben – der Nachweis, dass es sich nicht um Photonen, sondern um Elektronen handelt.

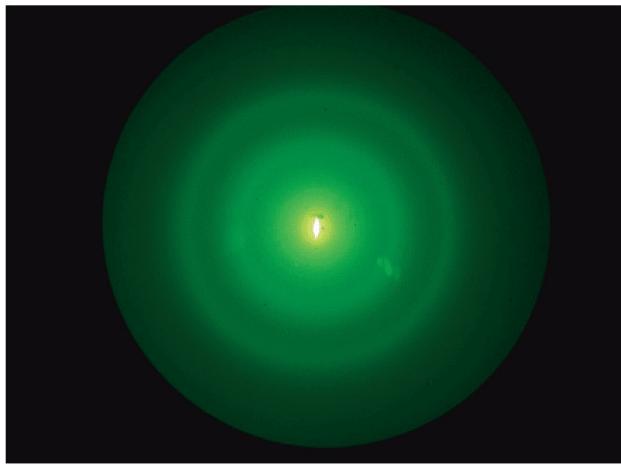
**Elektronenbeugung an Kristallgittern** – DE BROGLIES Hypothese über Materiewellen wurde von den amerikanischen Physikern C. J. DAVISSON (Nobelpreis 1937) und L. H. GERMER sowie dem Briten G. P. THOMSON untersucht. Sie wiesen 1927 mit Hilfe der Bragg-Reflexion (**Kapitel 7.9**) an Kristallen nach, dass Elektronen wie Röntgenstrahlen gebeugt werden. Während DAVISSON und Mitarbeiter mit einzelnen Kristallen (Einkristall) arbeiteten, nutzte THOMSON Folien aus vielen kleinen Kristallen mit beliebigen Orientierungen. Versuch **V1** zeigt einen typischen Aufbau zum Nachweis der Elektronenbeugung an Kristallgittern mit der sogenannten **Elektronenbeugungsröhre**. Die Elektronen bekommen durch die Spannung  $U = 5,0$  kV den Impuls  $p = 3,8 \cdot 10^{-23}$  Ns. Man erwartet also die De-Broglie-Wellenlänge

$$\lambda_R = \frac{h}{p} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Nms}}{3,8 \cdot 10^{-23} \text{ Ns}} = 17,4 \cdot 10^{-12} \text{ m.}$$

Sie wird an zwei Beugungsringen (**Debye-Scherrer-Ringe**) bestätigt (siehe **Auswertung des Versuchs**).

#### ! Merksatz

Beugung und Interferenz gibt es auch bei Elektronen. Mit dem Impuls  $p = m \cdot v$  ist ihre De-Broglie-Wellenlänge  $\lambda_B = \frac{h}{p}$ .



**B2** Elektronenverteilung auf dem Leuchtschirm

**Auswertung des Versuchs –** In der Beugungsröhre (Versuch **V1**) bekommt ein Elektron bei der Spannung  $U = 5,0 \text{ kV}$  die Energie  $E_{\text{kin}} = eU = 5 \text{ keV}$ , also Geschwindigkeit  $v$  und Impuls  $p$  mit

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m_e}} = 4,2 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}, p = m_e v = 3,8 \cdot 10^{-23} \text{ Ns},$$

und nach Gl. (1) die kleine de-Broglie-Wellenlänge

$$\lambda_B = \frac{h}{p} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Nms}}{3,8 \cdot 10^{-23} \text{ Ns}} = 17,4 \cdot 10^{-12} \text{ m}.$$

$\lambda_B$  liegt im Röntgenbereich. In **Kapitel 7** wurden Wellenlängen in diesem Bereich durch Bragg-Reflexion an Kristallgittern gemessen. Der benutzte Grafitkristall hat nach Bild **B3** zwei verschiedene Netzebenensysteme mit Abständen  $d_a = 213 \text{ pm}$  und  $d_b = 123 \text{ pm}$ . Man erwartet also nach der Bragg-Gleichung

$$\sin \varphi_n = \frac{k \cdot \lambda_B}{2d} \quad (3)$$

in der 1. Ordnung zwei Beugungsringe (Bild **B1**).

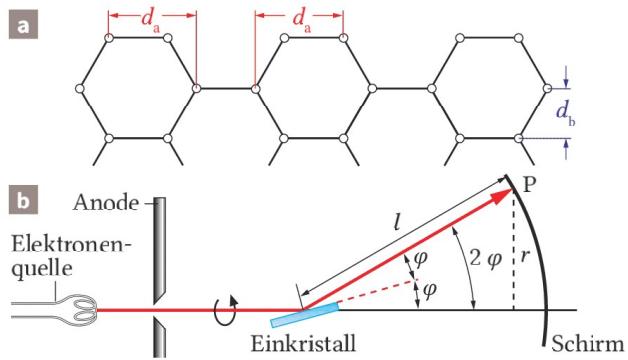
Bei den kleinen Glanzwinkeln  $\varphi_n$  in Bild **B3b** gilt  $\sin 2\varphi \approx 2 \sin \varphi = \frac{r}{l}$  und mit  $k = 1$ :  $2 \sin \varphi = \frac{r}{l} = \frac{\lambda_B}{d}$ . Also berechnet man beim Ringradius  $r$  die Wellenlänge

$$\lambda_B = \frac{d \cdot r}{l} \quad \text{oder} \quad r = \frac{l \cdot \lambda_B}{d}. \quad (4)$$

Das Netzebenensystem mit dem größeren Abstand  $d = 213 \text{ pm}$  erzeugt also den inneren Ring mit kleinerem Radius  $r = \frac{l \cdot \lambda_B}{d}$  (bei gleichem  $\lambda_B$ ). Der Schirmabstand ist  $l = 0,135 \text{ m}$ . Man ordnet also zu:

- dem inneren Ring ( $r = 0,011 \text{ m}$ ) das größere  $d = 213 \text{ pm}$ . Daraus folgt  $\lambda_B = \frac{d \cdot r}{l} = \frac{213 \text{ pm} \cdot 0,011 \text{ m}}{0,135 \text{ m}} = 17,3 \text{ pm}$ .
- dem äußeren Ring ( $r = 0,019 \text{ m}$ ) das kleinere  $d = 123 \text{ pm}$ . Daraus folgt  $\lambda_B = \frac{d \cdot r}{l} = 123 \text{ pm} \cdot \frac{0,019 \text{ m}}{0,135 \text{ m}} = 17,3 \text{ pm}$ .

Für beide Ringe ist  $\lambda_B \approx 17,3 \text{ pm}$ . Das bestätigt den für  $U = 5 \text{ kV}$  berechneten Wert  $\lambda_B = 17,4 \cdot 10^{-12} \text{ m} = 17,4 \text{ pm}$ .



**B3** a) Gitter mit Netzebenenabständen  $d_a$  und  $d_b$   
b) Bragg-Reflexion am Einkristall würde den Reflexpunkt Perzenzen. Im Grafit, einem Polykristall, sind die Kristallchen regellos gelagert. Es entstehen Debye-Scherrer-Ringe mit den Radien  $r$ .

**Klassische Betrachtung** – Lassen sich DE BROGLIES Materiewellen mit klassischen Wellen wie Wasser- oder Schallwellen vergleichen? Die Betrachtung eines Elektronenstrahls zeigt, dass die De-Broglie-Wellenlänge sehr viel kleiner ist als der Abstand der Elektronen untereinander (siehe **Exkurs**): Innerhalb einer Wellenlänge  $\lambda_B$  befinden sich in dieser klassischen Betrachtungsweise fast keine Elektronen. Sie können daher durch Schwingungen untereinander keine „echte“ Welle erzeugen, wie es bei Wasserteilchen in Wasser oder Luftteilchen in Schallwellen der Fall ist.

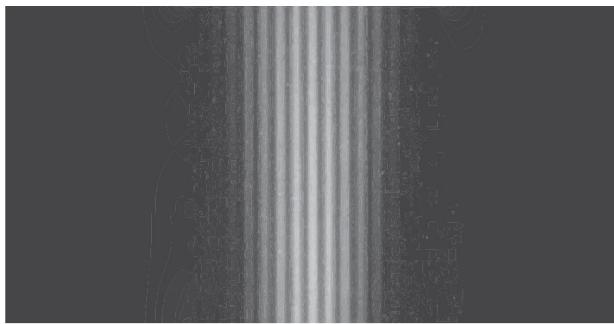
Materiewellen sind also keine Wellen im klassischen Sinne. Der Name Materiewelle ist daher etwas unglücklich.

### Exkurs: Elektronenabstände

Mit 1 kV beschleunigte Elektronen bewegen sich mit der Geschwindigkeit  $v = 1,8 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ . Bilden sie einen Elektronenstrahl mit Querschnitt  $A = 1 \text{ mm}^2$ , so tritt bei einer Stromstärke von  $I = 1 \text{ mA}$  in 1 s die Ladung  $Q = I \cdot t = 1 \cdot 10^{-3} \text{ C}$  durch den Querschnitt. Das sind  $n = \frac{Q}{e} \approx 6 \cdot 10^{15}$  Elektronen. Sie bilden also in 1 s einen  $l = v \cdot t = 1,8 \cdot 10^7 \text{ m}$  langen Strahl mit dem Volumen  $V = l \cdot A \approx 18 \text{ m}^3$ .

Jedem Elektron stünde das Volumen  $V_1 = \frac{V}{n} \approx 3 \cdot 10^{-15} \text{ m}^3$  zu, also z.B. ein Würfel mit Kantenlänge  $V_1^{1/3} \approx 2 \cdot 10^{-5} \text{ m}$ . Das ist etwa das  $10^6$ -Fache der De-Broglie-Wellenlänge  $\lambda_B \approx 39 \text{ pm}$  dieser Elektronen (1 pm = 1 Pikometer =  $10^{-12} \text{ m}$ ).

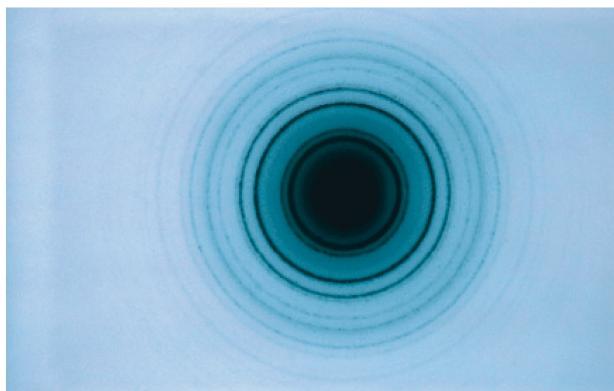
Bei einer solchen „Verdünnung“ kann es keine kontinuierliche Welle im klassischen Sinn geben. Man muss Materiewellen anders beschreiben.



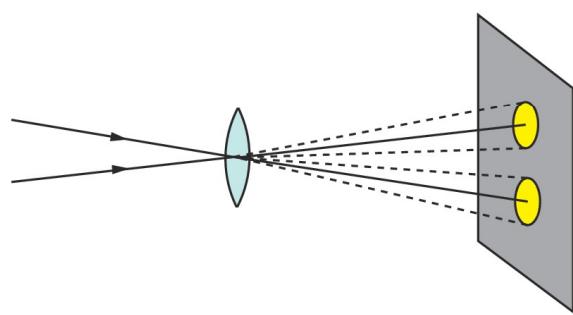
**B1** Elektronenstrahlinterferenzen an einem Doppelspalt. Die Beobachtung der Interferenzfigur erfolgt wegen ihres geringen Streifenabstands vergrößert mit einem Elektronenmikroskop.

**Elektronen am Doppelspalt –** Beim Experiment von Davisson und Germer bestand außerdem die Möglichkeit, dass eine periodische Wellenstruktur vielleicht von den periodisch angeordneten Atomen im Grafitkristall nur vorgetäuscht wurde. Das scheinbare Wellenbild würde dann also nicht von den Elektronen sondern vom verwendeten Kristallmaterial herrühren. Zur Klärung schickte C. JÖNSSON 1960 Elektronen durch einen im Vakuum aufgestellten Doppelspalt. Sie interferierten dort wie Licht und bestätigten die De-Broglie-Wellenlänge  $\lambda_B = \frac{h}{p}$  (Bild **B1**).

Ersetzt man den Beobachtungsschirm durch ein Feld winziger Detektoren (wie in elektronischen Kameras), so erkennt man: Die Beugungsringe setzen sich aus regellos verteilten Lokalisationen der gebeugten Elektronen zusammen. Was Dirac über Photonen sagte, gilt auch hier: *Jedes Elektron interferiert mit sich selbst*. Deshalb betrachtet man auch die von DE BROGLIE postulierte Welle als  $\Psi$ -Welle für Wahrscheinlichkeitsamplituden  $\Psi$ . Bild **B2** zeigt die Analogie: Elektronen werden gebeugt wie die Photonen von Röntgenstrahlen.



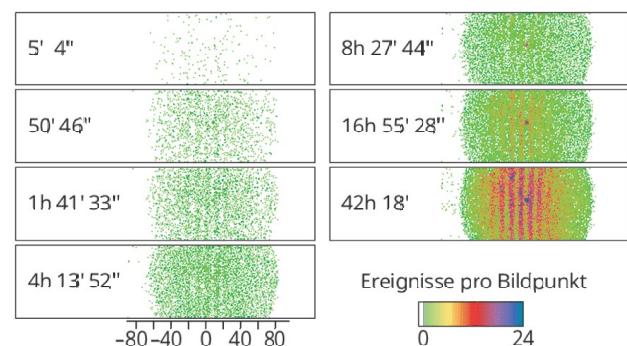
**B2** Beugungsringe beim Durchgang von Elektronen durch eine Zirkoniumfolie



**B3** Nur Beugungsscheiben, deren Abstand größer als die halbe Wellenlänge ist, werden von einem Mikroskop als einzelne Punkte aufgelöst

**Elektronenmikroskop –** Damit kann erklärt werden, warum das Elektronenmikroskop viel kleinere Strukturen auflöst als das Lichtmikroskop (Bild **B3**). Bei beiden werden punktförmige Objekte nicht als Punkte, sondern als Beugungsscheibchen registriert. Einzelheiten mit Abständen, die kleiner als  $\frac{\lambda}{2}$  sind, werden nicht aufgelöst. Beim Lichtmikroskop liegt die Grenze bei  $\frac{\lambda_{\text{Licht}}}{2} \approx 200 \text{ nm}$ . Bei Elektronen lässt sich jedoch die Geschwindigkeit  $v$  so steigern und  $\lambda_B = \frac{h}{m \cdot v}$  so weit verkleinern, dass bei  $\frac{\lambda_B}{2} \approx 0,2 \text{ nm}$  atomare Dimensionen sichtbar werden.

**Quantenobjekte –** Spätere Versuche wiesen nach, dass auch andere mikroskopische Teilchen wie Protonen, Neutronen oder Atome (Bild **B4**) Welleneigenschaften zeigen und mit der De-Broglie-Wellenlänge beschreibbar sind. Die klassisch streng getrennten, unvereinbaren Beschreibungen „Teilchen“ oder „Welle“ scheinen für diese Objekte und Photonen nicht zu gelten. Man fasst sie daher unter dem Begriff **Quantenobjekte** zusammen. Wenn der Welle-Teilchen-Dualismus allerdings für so viele Teilchen anwendbar ist – warum zeigen makroskopische Objekte im Alltag kein solches Verhalten?



**B4** Das Interferenzbild mit Heliumatomen baut sich im Laufe von 42 Stunden aus einzeln registrierten Atomen auf.

## ■ Exkurs: Schrödingers Katze



Wie im Bild lebe eine Katze in einem abgeschlossenen Kasten zusammen mit einer so geringen Menge eines radioaktiven Präparats, dass in einer Stunde vielleicht eines der Atome zerfällt, ebenso wahrscheinlich aber auch keines. Spricht ein Zählrohr darauf an, so zerbricht eine Zyankapsel; das austretende giftige Gas tötet die Katze.

Das Leben der Katze hängt von der Frage ab: Wurde das  $\alpha$ -Teilchen schon emittiert oder noch nicht. Dies ist ein nicht vorhersehbarer, unbestimmter Quantenvorgang; die Theorie antwortet nicht mit „Ja“ oder „Nein“, sondern mit „Ja und Nein zugleich“. Sie superponiert wie am Doppelspalt ( $\Psi = \Psi_1 + \Psi_2$ ) die Möglichkeit „ $\Psi_{ja}$ “ mit „ $\Psi_{nein}$ “ zu  $\Psi = \Psi_{ja} + \Psi_{nein}$ . Diesen klassisch unverständlichen Zustand des Quantenobjekts  $\alpha$ -Teilchen verkoppelte SCHRÖDINGER über Zählrohr und Zyankapsel mit dem Makroobjekt Katze. Er verschränkte beide so, dass für die Katze im geschlossenen Kasten die paradoxe Aussage gilt: „Tot und lebendig zugleich“ ( $\Psi = \Psi_{tot} + \Psi_{lebend}$ ). Dies muss jedem absurd erscheinen.

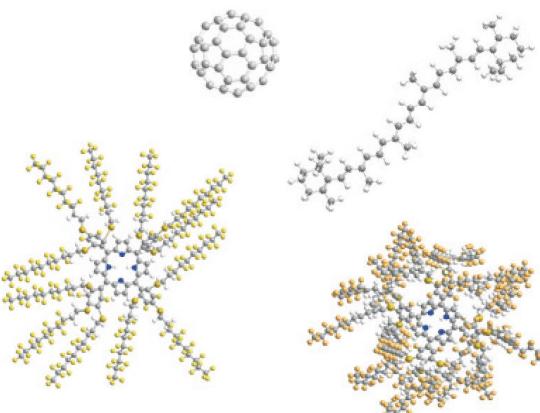
**Schrödingers Katze** – Der österreichische Physiker und Mitbegründer der Quantenphysik Erwin SCHRÖDINGER (Nobelpreis 1933) erfand das wahrscheinlich bekannteste Gedankenexperiment der Welt um zu veranschaulichen, warum die Annahme paradox erscheint, dass solche Objekte sich wie Quanten verhalten können (Exkurs).

**Dekohärenz** – Ein Ansatz zur Aufklärung von SCHRÖDINGERS Katzenparadoxon zeichnete sich erst 60 Jahre nach seiner Originalarbeit ab. Die Theorie der Dekohärenz vermag zu erklären, weshalb Überlagerungszustände mikroskopisch auftreten, aber in der makroskopischen Welt nicht nachzuweisen sind.

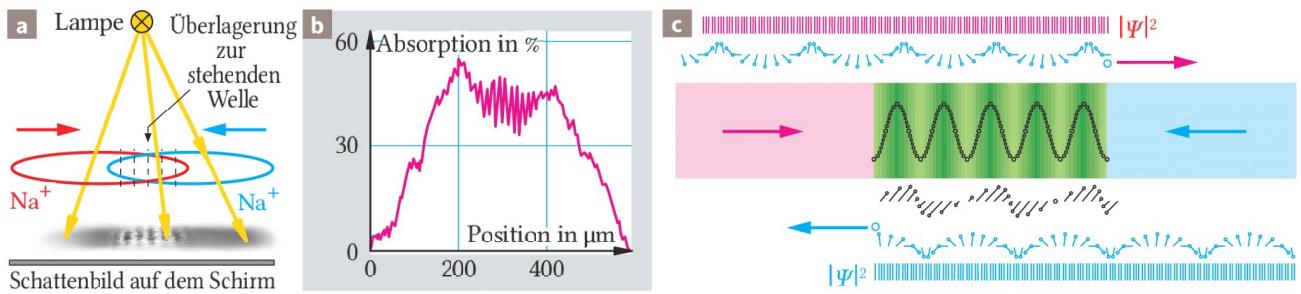
Die zentrale Idee ist, dass man makroskopische Körper (wie die Katze) nicht isoliert betrachten kann. Sie besitzen immer eine natürliche Umgebung, mit der sie auf vielfältige Weise wechselwirken. Die Katze z.B. streut Licht, gibt Wärmestrahlung ab und beeinflusst die Luftmoleküle um sie herum. Schon beim Doppelspaltexperiment war zu sehen, dass keine Interferenz auftritt, sobald die Quanten mit ihrer Umgebung interagieren (Polarisationsfilter). Dabei ist es egal, ob das polarisierte Photon von einem Beobachter registriert wird oder nicht. Ebenso wirkt die Wechselwirkung mit der Umgebung im Fall der Katze: Die Streuung von Licht oder Gasmolekülen zerstört das Kennzeichen eines Überlagerungszustandes, die Interferenzfähigkeit. Durch Wechselwirkung mit ihrer Umgebung wird die Katze „effektiv klassisch“. Sie ist tot *oder* lebendig; Überlagerungen oder Interferenzerscheinungen können nicht nachgewiesen werden.

**Interferenz mit großen Molekülen** – Es gibt jedoch auch Fälle, wo es experimentell gelingt, ein Objekt von seiner Umgebung abzuschirmen. Dann findet keine Dekohärenz statt und Interferenzphänomene werden auch bei großen Objekten nachweisbar.

An der Universität Wien gelang es 2013 z. B., Interferenz von komplexen organischen Molekülen nachzuweisen (Bild B5). Das schwerste davon bestand aus 810 Atomen und war über 10000-mal so schwer wie ein Wasserstoffatom. Auch Interferenz von Vitamin-Molekülen (z. B.  $\alpha$ -Tocopherol, also Vitamin E) wurde nachgewiesen. Statt eines Doppelspalts wurde dazu eine Abfolge von materiellen Gittern und stehenden Lichtwellen verwendet. Sofern es gelingt, Dekohärenz zu verhindern und technische Probleme zu überwinden, kann Interferenz also auch bei großen Quantenobjekten auftreten.



**B5** Einige Moleküle, mit denen Interferenzexperimente durchgeführt wurden.

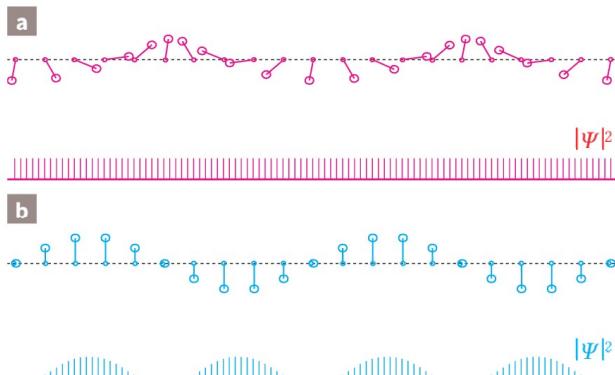


**B1** a) Die Lampe erzeugt von beiden gegenläufigen  $\text{Na}^+$ -Ionenwolken ein Schattenbild. Es ist dunkel, wo die Teilchen dicht liegen, wo ihre Antreffwahrscheinlichkeit  $|\Psi|^2$  groß ist. b)  $|\Psi|^2$  zeigt nur dort periodische Streifen, wo sich die Wolken überlappen. c) Die Länge der rotierenden Zeiger liefert  $|\Psi|^2$  (Bild B2).

**Sichtbare De-Broglie-Wellen –** Die endgültige Bestätigung der De-Broglie-Wellenlänge erbrachte schließlich W. KETTERLE (Nobelpreis 2001). Ihm gelang es sogar, De-Broglie-Wellen sichtbar zu machen (Bild B1). Er ließ zwei dichte Wolken aus Natrium-Ionen  ${}^{23}\text{Na}^+$  ( $m = 3,8 \cdot 10^{-26}$  kg) gegeneinanderlaufen, jeweils mit  $v = 6 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}}$ . Jede Wolke bildet eine fortschreitende De-Broglie-Welle mit  $\lambda_B = \frac{h}{p} = \frac{h}{m \cdot v} = 3 \cdot 10^{-5}$  m. Wo sich beide Wolken überlappen, entsteht eine stehende Welle. Dort zeigt das Schattenbild Interferenzstreifen mit Abständen von  $\frac{\lambda_B}{2} = 1,5 \cdot 10^{-5}$  m. Solche fehlen im Bereich der fortschreitenden Wellen.

Wie bei Photonen beschreiben rotierende Zeiger die Beobachtungen übereinstimmend:

- Die Knoten haben Abstände von  $\frac{\lambda_B}{2} = 1,5 \cdot 10^{-5}$  m; dort ist  $|\Psi|^2 = 0$ , d. h. Ionen fehlen; das Schattenbild zeigt helle Streifen.
- Wo sich hingegen die gegenläufig fortlaufenden De-Broglie-Wellen noch nicht überlappen, sind Zeigerlänge und  $|\Psi|^2$  konstant; das Schattenbild zeigt eine mittlere, konstante Helligkeit.

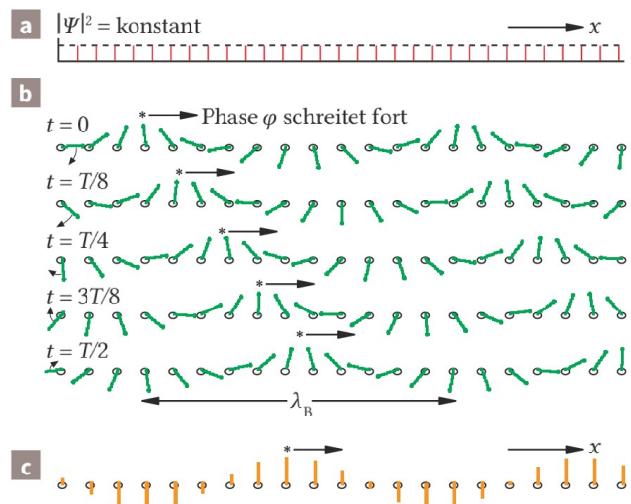


**B2** a) Rot: Bei fortlaufenden Wellen sind Zeigerlänge und Antreffwahrscheinlichkeit  $|\Psi|^2$  konstant. b) Blau: Bei stehenden Wellen dagegen hat  $|\Psi|^2$  die Periode  $\lambda_B/2$ . Dies ergibt die Streifen in Bild B1.

□ In den Bäuchen der stehenden Welle sind die Zeiger lang (Bild B2b); die Antreffwahrscheinlichkeit  $|\Psi|^2$  der Ionen ist groß, sie liegen dicht beisammen und absorbieren das von oben einfallende Licht stark. Der Schirm dahinter zeigt dunkle Schattenstreifen.

Stehende Schallwellen verhalten sich völlig anders. Ihre Teilchen schwingen hin- und her, bleiben aber im Mittel an ihren Plätzen und haben im Mittel eine konstante Dichte. Ein über längere Zeit aufgenommenes Schattenbild würde keine Streifen zeigen.

Dies bestätigt: Bei Quantenobjekten aller Art gibt die Länge der rotierenden Zeiger die Antreffwahrscheinlichkeit  $|\Psi|^2$  von Teilchen an, kein Schwingen wie bei klassischen Wellen.



**B3** a)  $|\Psi|^2$  längs eines Elektronenstrahls ist konstant. b) Fünf Momentbilder der nach rechts fortlaufenden De-Broglie-Welle in Abständen von  $T/8$ . c) Bei klassischen Querwellen liefert die Vertikal-Projektion der Zeiger Berge und Täler. Diese ist bei  $\Psi$ -Wellen nicht nötig.

## De-Broglie-Wellen im Elektronenstrahl – KETTERLES

Versuch zeigt: Quantenobjekte schwingen selbst in dichten Wolken nicht gegeneinander wie die Teilchen klassischer Wellen. Dies gilt auch für Elektronen in einem Strahl. Die dort gefundene fortschreitende de Broglie-Welle zeigt (Bild B3b) in Zeitabständen von  $T/8$ :

- Die Antreffwahrscheinlichkeit  $|\Psi(x)|^2$  für Elektronen ist konstant, die Zeiger der De-Broglie-Welle sind gleich lang. Man darf sie aber nicht mehr auf eine Gerade projizieren wie bei klassischen Längs- und Querwellen (Bild B3c). Die Elektronen schwingen ja nicht wie dort auf und ab oder hin und her.

- Der Impuls  $p = m \cdot v$  eines Elektrons bestimmt die De-Broglie-Wellenlänge  $\lambda_B = \frac{h}{p}$ , also die räumliche Periodizität der Welle. Sie zeigt sich bei Interferenz und Beugung.
- Die Energie  $E_\Psi$  bestimmt die Rotationsfrequenz  $f = \frac{E_\Psi}{\hbar}$  der Zeiger (gemäß  $E_\Psi = \hbar \cdot f$ , also wie bei Photonen).

### ! Merksatz

Der Impuls  $p$  von Quantenobjekten (Elektronen, Protonen, Molekülen, ...) bestimmt die Wellenlänge  $\lambda_B = \frac{h}{p}$  der fortschreitenden  $\Psi$ -Welle  $\Psi(x, t)$ . Die Länge der rotierenden Zeiger gibt die Antreffwahrscheinlichkeit  $|\Psi|^2$  der Quantenobjekte an und ist dort konstant.

**Photonen und Elektronen –** Nicht nur Photonen, auch Elektronen und andere kleinste Teilchen zeigen also Verhalten, das nicht mit der klassischen Physik, sondern nur mit der Quantenmechanik zu erklären ist. Das bedeutet jedoch nicht, dass sich diese Objekte dadurch identisch verhalten. Photonen und Elektronen sind zwar Quantenobjekte, gekennzeichnet durch die Planckkonstante  $h$ . Beide zeigen hinter schmalen Spalten Interferenz und Beugung mit der Wellenlänge  $\lambda = \frac{h}{p}$ . Zwischen den Quantenobjekten gibt es aber auch Unterschiede:

- Elektronen, aber auch Protonen und Neutronen, sind Bestandteile der Materie. Sie können Lichtgeschwindigkeit weder erreichen noch überschreiten.
- Photonen dagegen gibt es nur mit Lichtgeschwindigkeit, also „im Flug“. In sehr großer Zahl können sie klassische elektromagnetische Wellen bilden. Dort schwingen  $E$ - und  $B$ -Vektoren. Deren Verlauf kann man mit Dipolen am Oszilloskop betrachten. Radiowellen sind also klassische Wellen. Solche Wellen gibt es bei Elektronen, Protonen und Neutronen nicht.

Insgesamt gesehen gilt: Photonen verhalten sich nie wie fliegende klassische Teilchen im Sinne der newtonschen Mechanik, Elektronen nie wie klassische Wellen. Dies widerspricht der oft gehörten dualistischen Aussage, Quantenobjekte verhielten sich mal wie Teilchen, mal wie Wellen. *Quantenobjekte sind eben etwas anderes, der klassischen Physik fremd.*

## Lösen Sie selbst

- 1 In einem Elektronenmikroskop werden Elektronen mit der Energie 70 keV verwendet. Berechnen Sie die De-Broglie-Wellenlänge dieser Elektronen sowie das Auflösungsvermögen des Mikroskops.
- 2 Bestimmen Sie die De-Broglie-Wellenlänge einer Gewehrkugel (5 g), die sich mit  $500 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  bewegt. Bewerten Sie die Möglichkeit, in diesem Fall Interferenzen nachzuweisen.
- 3 Der Versuch von JÖNSSON soll mit Protonen statt Elektronen durchgeführt werden. Man beschleunigt sie mit  $U = 500 \text{ V}$  in Richtung eines Doppelspalts mit Spaltmittendistanz  $8 \mu\text{m}$ . In  $0,6 \text{ m}$  Entfernung hinter dem Spalt treffen sie auf einen Schirm. Berechnen Sie den Abstand zweier benachbarter Intensitätsmaxima.
- 4 Erläutern Sie, was bei Interferenz mit Quantenobjekten auf ein Wellen-, was auf ein Teilchenbild hindeutet. Was ist jeweils anders als bei klassischen Teilchen bzw. Wellen?
- 5 Elektronen, die mit  $U = 50 \text{ kV}$  beschleunigt wurden, werden auf einen kubischen Einkristall mit Netzebenenabstand  $282 \text{ pm}$  geschossen. Bestimmen Sie die Winkel, unter denen sie reflektiert werden. Zeichnen Sie eine Experimentieranordnung. Was ist bei Polycristallen anders, etwa bei feinkörnigem Grafit?
- 6 Erläutern Sie den Unterschied zwischen den beiden folgenden Situationen:
  - (a) Die Katze befindet sich entweder im Zustand „tot“ oder im Zustand „lebendig“, man weiß aber nicht in welchem von beiden,
  - (b) die Katze befindet sich in einem Überlagerungszustand aus „tot“ und „lebendig“.