

2 Die Wellennatur der Elektronen

Im Jahre 1924 stellte der französische Physiker LOUIS DE BROGLIE die Hypothese auf, ein Elektron sei nicht nur als kleines Teilchen zu betrachten, sondern es besitze auch die Eigenschaften einer Welle. Beim Experimentieren mit Kathodenstrahlen, d. h. schnellfliegenden Elektronen, kam man tatsächlich zu Ergebnissen, die nur mit einem Modell erfaßt werden können, das Elektronen als Wellen beschreibt.

Dieses Problem, ein bewegtes Teilchen auch als Welle darstellen zu müssen, war zu Beginn des 20. Jahrhunderts bereits bei der Erklärung der Natur des Lichts aufgetreten. Es zeigte sich, daß ein Lichtstrahl, dessen Verhalten als Welle bereits bewiesen war, sich auch wie ein Strahl aus schnellfliegenden Teilchen (Korpuskeln), den Photonen, verhielt.

Die unterschiedlichen Beschreibungen von Licht und Elektronen hoher Geschwindigkeit als Wellen oder Teilchen (*Welle-Teilchen-Dualismus*) sind zwei unterschiedliche Modellbetrachtungen. Es ist zweckmäßig, je nach beobachtbarer Eigenschaft jeweils das eine oder andere Modell heranzuziehen, das eine sinnvolle Deutung zuläßt.

Um das Verhalten von Elektronen als Wellen zu verstehen, untersuchen wir zunächst uns bekannte Wellen, z. B. eine Seilwelle.

Bewegt man das Ende einer aufgespannten Wäscheleine schnell quer zur Seilrichtung hin und her, so breitet sich diese Bewegung entlang des ganzen Seils aus; eine **Welle** läuft über das Seil. Je weiter die Auslenkung des Seils erfolgt, um so höher ist der Wellenberg. Die Höhe des Wellenbergs gegenüber der Ruhelage des Seils bezeichnet man als die **Amplitude** der Welle. Wird ein Seil nicht nur einmalig ausgelenkt, sondern dessen Ende gleichmäßig hin- und herbewegt, erhält man eine Folge

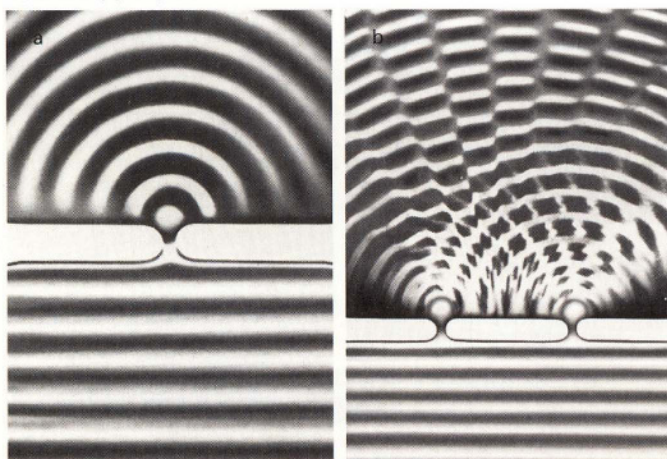
von Wellenbergen und -tälern, die entlang des Seils fortschreiten. Die Wellenlänge, d. h. die Entfernung zwischen zwei benachbarten Wellenbergen, ist um so kleiner, je größer die Frequenz der Anregungsschwingung ist.

Bei Seilwellen erfolgt die Ausbreitung nur in eine Richtung. Eine zweidimensionale Wellenausbreitung finden wir bei den Wasserwellen. Wirft man einen Stein ins Wasser, so entstehen kreisförmige Wellenfronten, die sich konzentrisch ausbreiten. Die Kreise stellen Linien dar, die Punkte gleicher Amplitude verbinden. Für Wellenexperimente kann man solche Wellen durch einen auf- und abschwingenden Stift in einer mit Wasser gefüllten Wanne erzeugen.

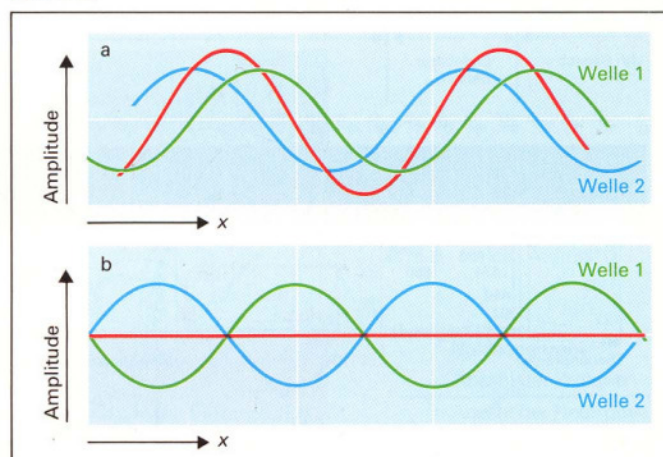
Verwendet man anstatt eines Stiftes ein schwingendes Lineal, das mit seiner ganzen Kante die Wasseroberfläche anregt, ergeben sich parallel verlaufende Wellenfronten, die sich geradlinig ausbreiten.

Läßt man solche Wellen auf ein geradliniges Hindernis auftreffen, in dem sich ein Spalt befindet, so verlaufen die Wellenfronten nach dem Spalt nicht geradlinig weiter, sondern breiten sich konzentrisch von diesem aus (► B 1a). Diese Erscheinung nennt man eine **Beugung**. Befinden sich bei diesem Experiment zwei Spalte dicht nebeneinander in dem Hindernis, so erhält man das in ► B 1b dargestellte Bild. Von jedem Spalt gehen konzentrische Wellenfronten aus, die sich durchdringen. Sie sind durch Linien unterbrochen, in denen sich das Wasser in Ruhe befindet. Es scheint, als hätten sich an diesen Stellen die von den beiden Spalten ausgehenden Wellen gegenseitig ausgelöscht. Zwischen diesen Streifen findet man Bereiche, in denen die Amplitude der Wellen größer ist als vor der Durchdringung. Hier müssen sich die beiden Wellen gegenseitig verstärkt haben. Experimente, die genauere Beobachtungen zulassen, zeigen, daß im-

B 1 Beugung von Wasserwellen. a) am Spalt
b) am Doppelspalt



B 2 Interferenz von Wellen. Die resultierende Welle ist rot eingezeichnet



Die Wellennatur der Elektronen

mer dann eine Vergrößerung der Amplitude auftritt, wenn zwei Wellenberge aufeinandertreffen. Entsprechend wird die Amplitude kleiner beim Zusammentreffen eines Wellenberges mit einem Wellental. Die Vergrößerung und Verkleinerung der Amplituden ist also eine Frage der Überlagerung von beiden Wellen, man nennt dies **Interferenz**. Die Ausbreitung der beiden Wellen wird dadurch nicht gestört. Die Amplitude nach der Überlagerung von zwei Wellen ergibt sich aus der Addition der beiden ursprünglichen Amplituden, wobei das Vorzeichen der Amplitude eines Wellentals negativ ist. Dies ist in ► B 2 am Beispiel von zwei sich eindimensional ausbreitenden Wellen schematisch dargestellt.

Ähnliche Interferenzmuster wie bei der Überlagerung von Wasserwellen erhält man bei der Beugung von Licht an einem Doppelspalt auf einem dahinterstehenden Schirm (► B 3). Dies ist nur zu erklären, wenn man annimmt, daß von jedem Spalt eine Welle ausgeht und beide Wellen miteinander interferieren.

Die hellen Streifen entstehen durch Verstärkung, wenn also Wellenberg auf Wellenberg und Wellental auf Wellental treffen. An den dunklen Stellen treffen Wellen auf, die sich gegenseitig auslöschen. Weiter fällt auf, daß die einzelnen Streifen unterschiedlich hell sind. Mißt man die unterschiedliche Lichtintensität und trägt sie entlang des Schirms auf, so erhält man ► B 3b. Im Photonenmodell bedeutet dies, daß an den helleren Stellen mehr Photonen auftreffen. Eine entsprechende Verteilung der Intensität erhält man auch, wenn man in einer Wellenwanne (► B 1b) an der hinter einem Doppelspalt liegenden Wannenwand die Höhe der ankommenden Wasserwellen registriert.

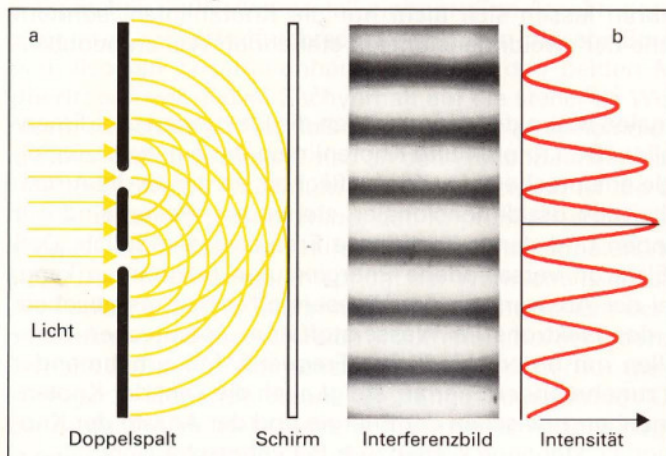
Ein Doppelspaltversuch kann mit Elektronen nicht auf ebenso einfache Weise wie mit Wasser- oder Lichtwellen

durchgeführt werden, weil dafür ein außerordentlich kleiner Doppelspalt nötig ist. Es gibt jedoch andere Versuchsanordnungen, bei denen man mit einem Elektronenstrahl auch Interferenzmuster ähnlich denen des Lichts erhält (► B 4a), so z. B. beim Durchgang eines Elektronenstrahls durch eine dünne Metallfolie. Die regelmäßige Anordnung der Atomlagen im Metallgitter wirkt dabei wie sehr viele enge Spalte. Diese Interferenzmuster bestehen allerdings aus konzentrischen Kreisen, wie man sie auch bei der Beugung von Licht an kreisförmigen Hindernissen feststellt (► B 4b).

Zur Deutung der Interferenzmuster bei Elektronen müssen wir also ein Wellenmodell für das Elektron verwenden. Die unterschiedliche Intensität der Streifen deuten wir damit, daß an verschiedenen Orten des Schirms unterschiedlich viele Elektronen auftreffen. Bei Wiederholung des Experiments unter gleichen Bedingungen erhält man immer die gleiche Intensitätsverteilung. Hohe Intensität bedeutet demnach eine hohe Wahrscheinlichkeit, daß Elektronen an diesem Ort auftreffen werden. Man spricht von einer unterschiedlichen **Wahrscheinlichkeitsdichte** an verschiedenen Orten.

Im folgenden werden uns häufiger Wahrscheinlichkeitsdichten im dreidimensionalen Raum begegnen. Dort ist die Wahrscheinlichkeitsdichte definiert als der Quotient aus der Wahrscheinlichkeit, z. B. ein Elektron in einem Raumbereich anzutreffen, und dem Volumen dieses Raumbereichs. Die Wahrscheinlichkeitsdichte verhält sich zur Wahrscheinlichkeit ebenso wie die Massendichte zur Masse. Bei ungleichmäßiger Verteilung der Wahrscheinlichkeit oder der Masse über den Raum muß in beiden Fällen ein Grenzübergang $\Delta V \rightarrow 0$ vorgenommen werden, so daß die von Ort zu Ort verschiedene Dichte erfaßt werden kann.

B 3 Beugung von Licht am Doppelspalt, Interferenzmuster und Intensitätsverteilung



B 4 Interferenzmuster von Elektronenstrahlen bei unterschiedlichen Versuchsanordnungen

