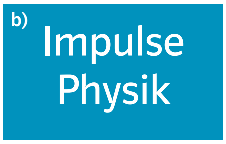
7.1 Interferenzen am Doppelspalt

Der Engländer **Thomas Young** beobachtete 1801 als Erster eine Interferenz von Licht an einem Doppelspalt. Diese Erscheinung stützte das Wellenmodell des Lichtes, das im Jahre 1678 von **Christiaan Huygens** zur Erklärung der Lichtausbreitung vorgeschlagen worden war.

Lochdurchmesser 0,6 mm



Lochdurchmesser 0,35 mm

Lochdurchmesser 0,15 mm

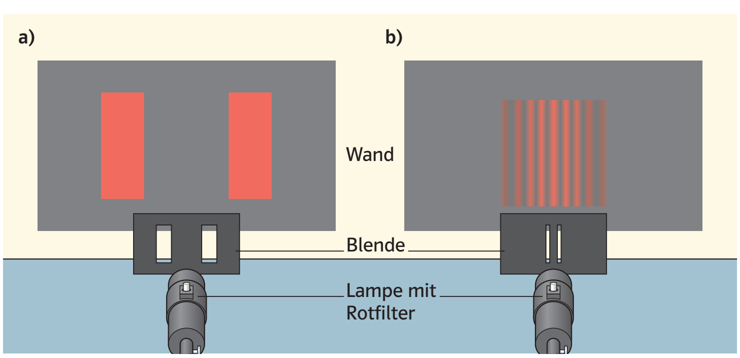
B1 Lochkamerabilder

Das Strahlenmodell des Lichtes zeigt Grenzen

Eine kleine Lichtquelle erzeugt von Gegenständen scharf begrenzte Schattenbilder. Mit Hilfe der Vorstellung, die Ausbreitung von Licht könne mit Strahlen beschrieben werden, lässt sich das begründen und es gelingt z. B., aus ihr gesetzmäßige Zusammenhänge zwischen Bildgrößen und Bildentfernungen abzuleiten. Auch die Beobachtung, dass mit der Lochkamera Bilder erzeugt werden, lässt sich erklären und man gewinnt die Aussage, dass für ein klares Bild ein möglichst kleines Loch günstig ist. Die Bildfolge **B1** scheint dem zu widersprechen. Die Vorstellung, Licht breite sich analog zu Wasser wie eine Welle aus, lässt eine Erklärung zu.

Diese Wellentheorie des Lichtes erklärt, weshalb sich das Licht hinter feinen Öffnungen wie in **B1c** nicht nur geradlinig ausbreitet, sondern auch in Bereiche eindringt, die nach der Vorstellung von Lichtstrahlen im Schattenraum liegen. Diese Erscheinung, die man bereits bei Versuchen mit Wasserwellen beobachtet hat, heißt **Beugung**.

Auch die am Doppelspalt entstehenden hellen und dunklen Bereiche lassen sich analog zum Verhalten von Wasserwellen erklären. Nach der Vorstellung von Christiaan Huygens kann jeder Punkt einer Wellenfront als Ausgangspunkt einer neuen Welle mit gleicher Frequenz und gleicher Phase betrachtet werden. Diese Wellen heißen **Huygens'sche Elementarwellen**. Bei ebenen Wellen (z. B. Wasserwellen) sind ihre Wellenfronten Halbkreise, im Raum Halbkugeln.



B2 Beleuchtung eines Doppelspalts mit einfarbigem Licht: Große Öffnungen ergeben ein scharfes Schattenbild (a). Kleine Öffnungen führen zu hellen Streifen (b).

Entstehung des Musters am Doppelspalt

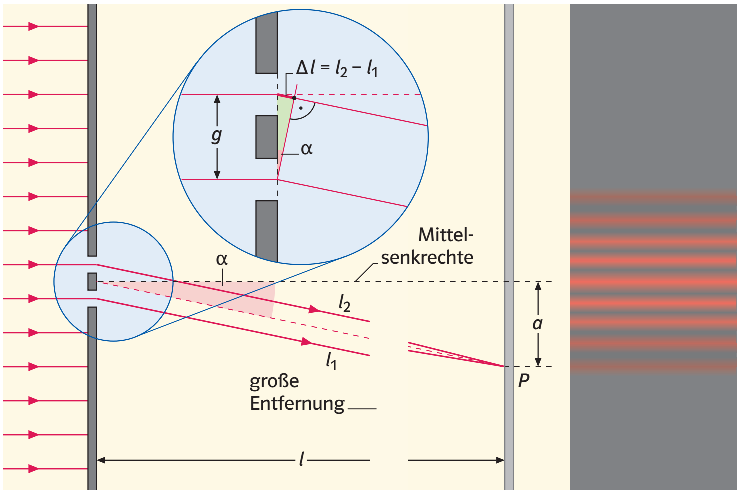
Kleine Öffnungen kann man sich als Ausgangspunkte von Elementarwellen vorstellen, die sich am Beobachtungsschirm überlagern. Die Elementarwellen, die von derselben Wellenfront stammen, haben bei der Entstehung gleiche Phase.

Von zwei Öffnungen aus ergeben sich zu allen Punkten, die außerhalb der Mittelsenkrechten zwischen den Öffnungen liegen, verschiedene Entfernungen. Der Unterschied, gemessen in Wellenlängen, heißt **Gangunterschied** Δl. Gangunterschiede führen zu Phasenunterschieden. Beträgt der Gangunterschied im Punkt P zum Beispiel eine halbe Wellenlänge, so sind in diesem Punkt beide Wellen ständig gegenphasig und schwächen sich gegenseitig. Beträgt der Gangunterschied dagegen eine Wellenlänge, verstärken sich die Wellen zu jedem Zeitpunkt. Nach dieser Vorstellung lassen sich Beobachtungen bei Licht, das durch feine Öffnungen gelangt, mit Welleneigenschaften erklären. Durch Verstärkung entstehen helle Bereiche, durch Abschwächung dunkle.
Da sich die geometrische Anordnung mit der Zeit nicht ändert, ergibt sich eine zeitlich stabile Verteilung heller und dunkler Bereiche, das **Interferenzmuster** (→**B2b**). Licht zeigt Interferenz. Licht kann daher als Phänomen mit Welleneigenschaften beschrieben werden, das sich durch eine bestimmte Wellenlänge λ bzw. Frequenz f auszeichnet.

Bedingungen für Verstärkung und Auslöschung

Für Licht sind die Öffnungen eines Doppelspaltes Ausgangspunkte von Elementarwellen. Analog zur Interferenz von Wasserwellen gelten folgende Bedingungen: Ist ihr Gangunterschied zum Punkt P auf dem Schirm null oder ein Vielfaches der Wellenlänge, also $\Delta l = 0$ oder $\Delta l = \lambda, 2\lambda, 3\lambda \ldots$, dann verstärken sich die Lichtwellen. Ist dagegen der Gangunterschied ein ungeradzahliges Vielfaches von $\lambda/2$, also $\Delta l = \lambda/2, 3\lambda/2, 5\lambda/2 \ldots$, dann löschen sich die Wellen aus.

Licht, das auf kleine Öffnungen trifft, kann Interferenz zeigen.



B1 Interferenz von Lichtwellen am Doppelspalt

An welchen Punkten welche Bedingung erfüllt ist, hängt von der Geometrie ab (→**B1**). Der Winkel α beschreibt die Richtung zum Punkt P. Ist der Abstand l zwischen Blende und Schirm groß gegenüber den Abständen a auf dem Schirm und sind die Abstände a groß gegenüber dem Abstand g der Spalte, so hat das gefärbte Dreieck in der Vergrößerung in Grafik **B1** näherungsweise einen rechten Winkel. Sein spitzer Winkel ist näherungsweise gleich dem Winkel α. Es gilt:

$$\sin\alpha = \frac{\Delta l}{g}$$

Maximale Verstärkung ergibt sich für einen Gangunterschied $\Delta l = k \cdot \lambda$, sodass die Bedingung für **Helligkeitsmaxima** lautet:

$$k \cdot \lambda = g \cdot \sin\alpha \quad \text{mit} \quad k = 0, 1, 2, 3, \ldots$$

Das Maximum für $k = 0$ erscheint unter dem Winkel $\alpha = 0$, es ist etwas heller und wird daher **Hauptmaximum** genannt.

Interferenz lässt sich nur bei Wellenvorgängen beobachten und auch nur, wenn sich Wellen gleicher Frequenz und fester Phasenbeziehung überlagern. Solche Wellen heißen **kohärent**. Diese Bedingung lässt sich erfüllen, wenn man Licht der gleichen Quelle auf verschiedene Pfade lenkt und dann wieder zusammenführt.

Bestimmung der Lichtwellenlänge

Mit obiger Gleichung lässt sich die Wellenlänge λ bestimmen. Da sich der Winkel α nicht messen lässt, muss er aus messbaren und bekannten Größen bestimmt werden. Wegen der Ähnlichkeit der Dreiecke in **B1** gilt sowohl

$$\sin\alpha_k = \frac{\Delta l}{g}, \quad \text{als auch} \quad \tan\alpha_k = \frac{a_k}{l}.$$

Auch Δl kann nicht direkt bestimmt werden. Allerdings lassen sich der Abstand eines Maximums zum Hauptmaximum (a_k) und der Abstand des Doppelspalts von der Leinwand (l) gut messen. Der Spaltabstand g ist bekannt. Damit ergibt sich für den Winkel:

$$\alpha_k = \arctan\left(\frac{a_k}{l}\right)$$

und für die gesuchte Wellenlänge λ:

$$\lambda = g \cdot \frac{\sin\alpha_k}{k} \quad \text{bzw.} \quad \lambda = \frac{g \cdot \sin\left(\arctan\frac{a_k}{l}\right)}{k}$$

Für kleine Winkel (α < 5°) unterscheiden sich Sinus und Tangens nur im Promillebereich, d.h., $\sin\alpha \approx \tan\alpha$. Aus

$$\sin\alpha_k = \frac{k \cdot \lambda}{g} \quad \text{und}$$

$$\tan\alpha_k = \frac{a_k}{l} \quad \text{folgt:}$$

$$\frac{k \cdot \lambda}{g} = \frac{a_k}{l}$$

Damit kann man die Wellenlänge berechnen zu:

$$\lambda = \frac{g}{k} \cdot \frac{a_k}{l}$$

Das Doppelspaltexperiment mit einem Helium-Neon-Laser habe folgende Messwerte ergeben:

- Spaltabstand: $g = 0{,}5\,\text{mm} = 0{,}5 \cdot 10^{-3}\,\text{m}$
- Abstand des Maximums 5. Ordnung zum Hauptmaximum: $a_5 = 2{,}5\,\text{cm} = 2{,}5 \cdot 10^{-2}\,\text{m}$
- Abstand des Doppelspalts von der Leinwand: $l = 3{,}95\,\text{m}$

Daraus ergibt sich die Wellenlänge des Laserlichts zu:

$$\lambda = \frac{0{,}5 \cdot 10^{-3}\,\text{m}}{3{,}95\,\text{m}} \cdot \frac{2{,}5 \cdot 10^{-2}\,\text{m}}{5} \approx 633\,\text{nm}$$

Für die Richtung α_k des k-ten Helligkeitsmaximums bei Interferenz am Doppelspalt gilt

$$\sin\alpha_k = \frac{k \cdot \lambda}{g} \quad \text{und} \quad \tan\alpha_k = \frac{a_k}{l} \quad \text{mit} \quad k = 0, 1, 2, \ldots$$

A1 ○ Bei Verwendung eines grünen Laserpointers ergeben sich folgende Messwerte: $l = 3{,}95\,\text{m}$; $a_6 = 2{,}5\,\text{cm}$; $g = 0{,}5\,\text{mm}$. Berechnen Sie die Wellenlänge des grünen Lichtes.

A2 ◒ Zeigen Sie, dass sich das Ergebnis der Wellenlängenberechnung mit der vereinfachten Gleichung $\lambda = (g/l) \cdot (a_k/k)$ nicht von dem bei Verwendung der vollständigen Gleichung $\lambda = g \cdot \sin\alpha_k/k$ unterscheidet.