Das Wellenmodell des Lichtes

1. Doppelspaltversuch mit Licht

Bisher von dem Doppelspaltversuch mit elektromagnetischen Wellen bekannt: Beim Durchgang durch den Doppelspalt werden die em. Wellen gebeugt und interferieren miteinander.

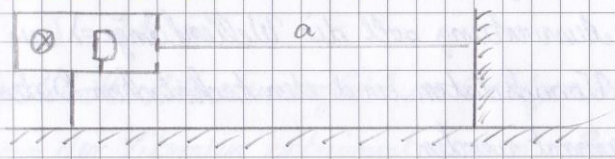
Merksatz:

> Die Interferenz ist eine eindeutige Welleneigenschaft. Charakteristisch ist dabei ein Interferenzbild, das aus abwechselnden Sequenzen von Maxima und Minima besteht.

Versuch 1:

Man bildet das Licht einer Lichtquelle durch eine Linse und einen Doppelspalt ab und betrachtet das Ergebnis auf einem Bildschirm.

Versuchsaufbau (Mikrophys-Technik)



Technische Daten:

$\lambda = 700\,nm$ Linse: $f = \frac{b}{g} = \frac{1}{2{,}0 \cdot 10^{3}} = 1{,}0 \cdot 10^{-3}$

Doppelspaltbreite: $5{,}0\,cm : 2{,}5 = 2{,}50\,cm$

Beobachtung:

Auf dem Bildschirm entsteht ein Muster aus hellen und dunklen Streifen. Dabei handelt es sich um ein Interferenzmuster mit Maxima (helle Streifen) und Minima (dunkle Streifen)

Messdaten: $a = 25{,}0\,cm$

Abstand 1. Maximum zum Hauptmaximum

$\Delta x = 0{,}9\,cm$

Auswertung des Versuches:

Zur Auswertung soll die Wellenlänge λ aus den Versuchdaten und den technischen Daten bestimmt werden

1. Schritt: Linsenbild d des Doppelspalts:

$g = 2{,}50\,cm \quad \frac{b}{g} = 1{,}0 \cdot 10^{-6:2}$

$\Rightarrow b = g \cdot 1{,}0 \cdot 10^{-6:2}$

$\Rightarrow b = 2{,}5 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-6:2}\,m$

$b = 2{,}5 \cdot 10^{-5}\,m$

$b = d \Rightarrow d = 2{,}5 \cdot 10^{-5}\,m$

2. Schritt: Öffnungswinkel zwischen Hauptmaximum und Maximum 1. Ordnung

$\tan\alpha = \frac{\Delta x}{a} \Rightarrow \tan\alpha = \frac{0{,}90\,cm}{25{,}0\,cm}$

$\Rightarrow \alpha = 2{,}06°$

3. Schritt: Berechnung der Wellenlänge:

$\lambda = d \cdot \sin\alpha \Rightarrow \lambda = 2{,}5 \cdot 10^{-5}\,m \cdot \sin 2{,}1°$

$\lambda = 7{,}18 \cdot 10^{-7}\,m$

$\lambda = 718\,nm$

4. Schritt: Literaturvergleich und Folgerung

Aus der Literatur entnimmt man den Bereich der Wellenlänge für weißes Licht: $700\,nm < \lambda < 800\,nm$

$\Rightarrow$ Unser Versuchsergebnis liegt im Wellenlängenbereich für weißes Licht.

$\Rightarrow$ Weißes Licht kann als elektromagnetische Wellenlänge mit $\lambda = 718\,nm$ gedeutet werden.

Zusammenfassung:

Da das Doppelspaltexperiment mit weißem Licht auf dem Bildschirm ein charakteristisches Interferenzbild ergibt, deutet man in der klassischen Physik weißes Licht als elektromagnetische Welle mit $700\,nm < \lambda < 800\,nm$.

Experiment am Doppelspalt und optisches Gitter

Problem beim Doppelspaltversuch

Der Abstand zwischen Schirm und Doppelspalt darf aufgrund der relativen schwachen Lichtintensität nicht zu groß gewählt werden. Daher ist der Abstand der Maxima am Schirm schwer zu messen.

Ziel:

Trotz kleinem Abstand zwischen Schirm und Doppelspalt soll der Abstand der Maxima zum Hauptmaximum möglichst groß sein. Welche Experimentellen Änderungen müssen vorgenommen werden?

Aus der Bedingung für ein Maximum k-ter Ordnung erhält man:

$$k \cdot \lambda = b \cdot \frac{d_k}{l}, \text{ wenn } d_k \ll l$$

Löst man diese Bedingung nach d_k auf, dann erhält man:

$$d_k = \frac{k \cdot \lambda \cdot l}{b} = k \cdot \lambda \cdot \frac{l}{b}$$

Man erkennt: Je kleiner der Abstand der Spaltmitten b, desto größer wird d_k.

Zweites Ziel: Erhöhung der Lichtintensität.
Anstelle des Doppelspalts wird ein optisches Gitter verwandt, das aus vielen Spaltöffnungen besteht:

Da $l \gg b$ verlaufen alle zu einem Punkt zielenden Strahlen quasi-parallel zueinander. Damit wird die Lichtintensität gesteigert.

Quantitative Beschreibung:

Für die Maxima k-ter Ordnung gilt:

$$k\lambda = b \cdot \sin\alpha$$

$b \hat{=}$ Gitterkonstante d. optischen Gitters

Versuchsdurchführung mit einem optischen Gitter:

Man erhält auf dem Bildschirm ebenfalls ein Interferenzmuster, das sich in folgenden Punkten vom Interferenzmuster des Doppelspaltes unterscheidet:

- Die Maxima breitzen zum Hauptmaximum größere Abstände auf dem Bildschirm.
- Die Lichtintensität des Interferenzbildes auf dem Bildschirm ist höher.

Spektralanalyse von Licht

Bekannt aus der Mittelstufe:

Weißes Licht entsteht aus der Mischung des Lichtes aus den Spektralfarben. Dies kann man aus der Lichtbeugung an einem Regentropfenvorhang erkennen, aus der dann der Regenbogen resultiert, der alle Spektralfarben abbildet.

Ziel: Genaue Untersuchung des Spektrum des weißen Lichts.

Versuchsaufbau:

Man fokusiert das Licht durch einen Beleuchtungsspalt durch eine Linse auf dem

dem optischen Gitter und betrachtet das Bild auf dem Schirm.

Beobachtung:
Man erkennt auf dem Bildschirm ein kontinuierliches Spektrum. Man nennt es kontinuierlich, weil die Farbübergänge stufenlos erfolgen.

Modellvorstellung:

Weißes Licht setzt sich aus dem Licht der Spektralfarben zusammen. Dieses Licht unterscheidet sich in der Wellenlänge und der zugehörigen Frequenz.

Bemerkung:
Mit dem Wellenmodell des Lichts kann man die Zusammensetzung des weißen Lichts erklären.

Physik Unterrichtsvorbereitung 11. Klasse

Aufgabenbeispiel:
Durch ein optisches Gitter (2000/cm) wird senkrecht auf das Gitter einstrahlendes Licht abgebildet.

a) Bestimme die Breite des Spektrums 1. Ordnung auf einem 3,20 m entfernten Schirm.

b) Zeige, dass sich die Spektren 2. und 3. Ordnung überlappen.

Lösung zu a) $\lambda_b = 400\,nm \quad b = \frac{1}{2000} \cdot 10^{-2}\,m$

$\lambda_r = 800\,nm \quad b = 5{,}00 \cdot 10^{-6}\,m$

Anwendung der Maximabedingung

$$\sin \alpha_r = \frac{\lambda_r}{b} = \frac{4{,}00 \cdot 10^{-7}\,m}{5{,}00 \cdot 10^{-6}\,m} \Rightarrow \alpha = 4{,}59°$$

$$\tan \alpha = \frac{\Delta x_r}{a} \Rightarrow a \cdot \tan \alpha = \Delta x$$

$$\Rightarrow \Delta x = 3{,}20\,m \cdot \tan 4{,}59°$$

$$= 25{,}6\,cm$$

Analog: $\Delta x_r = 0{,}505\,cm$

$$\Rightarrow B = \Delta x_r - \Delta x_b = 0{,}248\,m$$

Lösungsvorschlag zu Teilaufgabe b)

Die Abbildung zeigt die Situation von sich überlappenden Spektren benachbarter Ordnung. Dabei befindet sich das Maximum 3. Ordnung von blau innerhalb des Spektrums zweiter Ordnung. Dazu muss man also zeigen, dass $\alpha_{3b} < \alpha_{2r}$

Beweisführung:

$$b \cdot \sin\alpha_{2r} = 2\lambda_r \Rightarrow \sin\alpha_r = \frac{2\lambda_r}{g} \quad (g=b)$$

$$\sin\alpha_{2r} = \frac{2 \cdot 800\,nm}{5{,}00 \cdot 10^{-6}\,m} \Rightarrow \alpha_{2r} = 18{,}6°$$

$$b \cdot \sin\alpha_{3b} = 3\lambda_b \Rightarrow \sin\alpha_{3b} = \frac{3\lambda_b}{b}$$

$$\sin\alpha_{3b} = \frac{3 \cdot 400\,nm}{5{,}00 \cdot 10^{-6}\,m} \Rightarrow \alpha_{3b} = 13{,}8°$$

Damit liegt das blaue Maximum 3. Ordnung

innerhalb des Spektrums zweiter Ordnung.

c) Zeige, dass die Überlappung nicht durch die Gitterkonstante beeinflusst werden kann und berechne, ab welcher Ordnung sich benachbarte Spektren bereits überlappen können:

$$\sin\alpha_{2r} = \frac{2\lambda_r}{g} \qquad \sin\alpha_{3b} = \frac{3\lambda_b}{g} \quad (g=b)$$

Bei einer Überlappung muss gelten:

$$\sin\alpha_{2r} \geq \sin\alpha_{3b} \Rightarrow \frac{2\lambda_r}{g} \geq \frac{3\lambda_b}{g}$$

$$\Rightarrow 2\lambda_r \geq 3\lambda_b$$

Damit hängt die Überlappung nur von der Vielfachheit der Wellenlängen ab und kann nicht durch eine Variation der Gitterkonstante beeinflusst werden.

Im Grenzfall der Überlappung muss gelten:

$$\sin\alpha_{kr} = \sin\alpha_{(k+1)b}$$

$$\Rightarrow \quad k \cdot \lambda_r = (k+1) \cdot \lambda_b$$

Mit $\lambda_r = 2\lambda_b$ folgt:

$$2k\lambda_b = (k+1)\lambda_b$$
$$2k = k+1$$
$$k = 1$$

Damit kann man erkennen, dass die Überlappung bereits zwischen 1. und 2. Ordnung gegeben ist.

d) Kann man durch experimentelle Maßnahmen die Überlappung verhindern?

Man kann zwei benachbarte Spektrallinien gerade noch trennen, wenn man folgende Experimentelle Bedingungen erfüllt:
Je mehr Spalten des Gitters ausgeleuchtet werden, desto schärfer erscheinen die Maxima. Das bedeutet: Die Sammellinse vor dem Gitter soll in einem großen Abstand zum Gitter stehen.

Man kann dann die Linien gerade noch unterscheiden, wenn das nächstliegende Maximum der einen auf das Minimum der anderen fällt.

Zusammenfassung

Gegenüber dem Strahlenmodell des Lichtes kann man mit der Hilfe des Wellenmodell des Lichts alle Interferenzphänomene des sichtbaren Lichts erklären und die Spektralanalyse des Lichtes deuten. Daher war das Wellenmodell für das Licht das Standardmodell der Physik des 19. Jahrhunderts.