

Fraunhoferbeugung (O3)

Ziel des Versuches

Die Fraunhoferbeugung von kohärentem Licht an ebenen Objekten (Einzelspalt, Mehrfachspalt und Gitter) soll untersucht werden.

Theoretischer Hintergrund

Die Beugung einer kohärenten Lichtwelle an einem ebenen Objekt wie z. B. einem Spalt kann durch das Huygenssche Prinzip erklärt werden. Dabei konstruiert man die Lichtintensität hinter einem beugenden Objekt durch die Überlagerung (Interferenz) von Kugelwellen, die von jedem Punkt der beugenden Öffnung ausgehen. Sind der Abstand sowohl des Beobachters als auch der Lichtquelle vom beugenden Objekt sehr viel größer als die Ausdehnung der beugenden Struktur, dann spricht man von Fraunhoferbeugung. Abb. 1 zeigt das Prinzip der Fraunhoferbeugung an einem Doppelspalt.

Die Intensitätsverteilung $I(\theta)$ des gebeugten Lichtes weist für bestimmte Beugungswinkel θ Maxima bzw. Minima auf, die als konstruktive bzw. destruktive Interferenz zwischen den Huygensschen Kugelwellen interpretiert werden können. Im Spezialfall von Einzelspalten, Mehrfachspalten oder Gittern als beugende Objekte handelt es sich um räumlich periodische Anordnungen von N Einzelspalten (beim Einzelspalt ist $N = 1$). Beleuchtet man diese senkrecht mit parallelem Licht, so lässt sich die Funktion $I(\theta)$ in einer einheitlichen Form als Produkt zweier Funktionen $f_{\text{ES}}(\theta)$ und $f_{\text{P}}(\theta)$ schreiben. Dabei entspricht $f_{\text{ES}}(\theta)$ der Beugung an einem Einzelspalt der Breite b und $f_{\text{P}}(\theta)$ der Beugung an N im Abstand d angeordneten Einzelspalten der Breite $b \rightarrow 0$:

$$I(\theta) = I_0 f_{\text{ES}}(\theta) f_{\text{P}}(\theta) \quad . \quad (1)$$

I_0 ist eine Konstante. Die Funktionen $f_{\text{ES}}(\theta)$ und $f_{\text{P}}(\theta)$ ergeben sich zu:

$$f_{\text{ES}}(\theta) = \frac{\sin^2 \varphi(\theta)}{\varphi^2(\theta)} \quad \text{mit} \quad \varphi(\theta) = \frac{\pi b \sin \theta}{\lambda} \quad \text{und} \quad (2)$$

$$f_{\text{P}}(\theta) = \frac{\sin^2(N\phi(\theta))}{\sin^2 \phi(\theta)} \quad \text{mit} \quad \phi(\theta) = \frac{\pi d \sin \theta}{\lambda} \quad . \quad (3)$$

Für den Einzelspalt ist $f_{\text{P}}(\theta) = 1$ und dadurch $I(\theta) = I_0 f_{\text{ES}}(\theta)$. In Abb. 2 sind exemplarisch einige Intensitätsverteilungen $I(\theta)$ dargestellt.

Nach Gl. (2) ergeben sich für einen Einzelspalt die Beugungswinkel θ_n der Intensitätsmaxima bzw. -minima zu

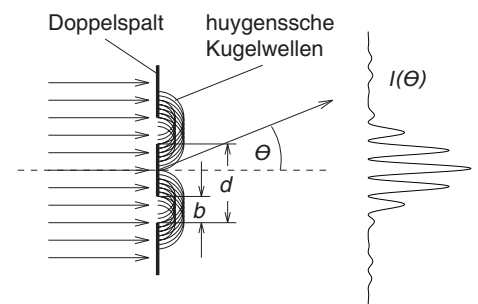


Abbildung 1: Fraunhoferbeugung an einem Doppelspalt.

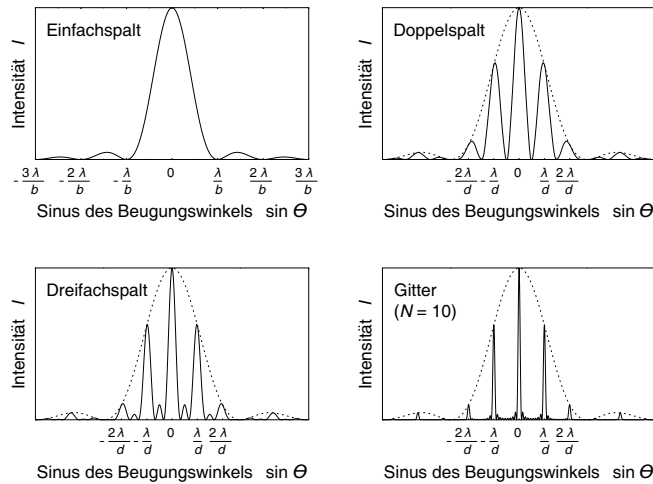


Abbildung 2: Berechnete Intensitätsverteilungen für einen Einzelspalt, einen Doppelspalt, einen Dreifachspalt und ein Gitter. Dabei wurde willkürlich $d = 2,7 \times b$ angenommen. Die gestrichelten Kurven entsprechen der Funktion $f_{ES}(\theta)$ und bilden die Einhüllenden der Beugungsverteilung bei Mehrfachspalten bzw. Gittern.

$$\sin \theta_n = \frac{n\lambda}{b} \quad \text{mit} \quad n = \begin{cases} \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots & : \quad \text{Minima} \\ 0, \pm \frac{3}{2}, \pm \frac{5}{2}, \pm \frac{7}{2}, \dots & : \quad \text{Maxima} \end{cases} \quad (4)$$

Dabei ist die Formel für die Intensitätsmaxima eine Näherung, deren Genauigkeit jedoch mit steigender Beugungsordnung (n) zunimmt. Für einen Mehrfachspalt oder Gitter erhält man aus Gl. (3) die Beugungswinkel der Hauptmaxima zu

$$\sin \theta_n = \frac{n\lambda}{d} \quad \text{mit} \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (5)$$

Versuchsaufbau und -durchführung

Der Versuchsaufbau ist in Abb. 3 skizziert. Als kohärente Lichtquelle dient ein Halbleiter- (HL)-Laser mit einer Ausgangsleistung kleiner 1 mW. Da der Laser polarisiertes Licht erzeugt, kann mit Hilfe eines Polarisationsfilters im Strahlengang die Lichtintensität reduziert werden.

Informieren Sie sich über dessen Wirkungsweise. Warum eignen sich gerade Laser für Beugungsversuche?

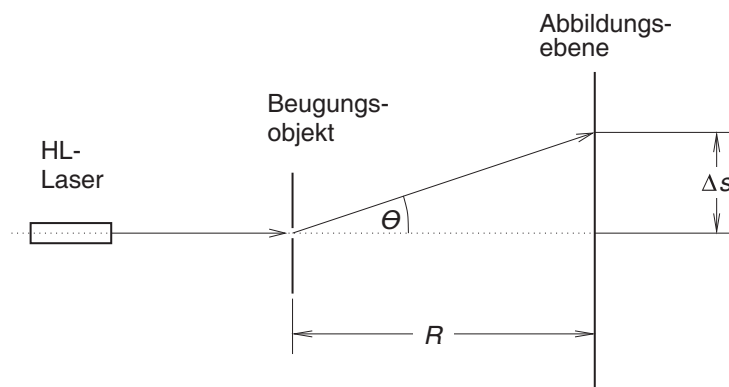


Abbildung 3: Optischer Aufbau zur Fraunhoferbeugung.

Die Intensitätsverteilung in der Abbildungsebene wird mit einem Phototransistor als Detektor gemessen.¹ Die Photospannung, die in guter Näherung proportional zur einfallenden Lichtintensität ist, wird mit dem CASSY-Interface (als Spannung U_{A1}) registriert. Der Detektor ist auf einem Verschiebereiter montiert, der mit einem Motor in der Abbildungsebene bewegt

¹ Eine hinter dem Beugungsobjekt platzierte Zylinderlinse sorgt dafür, dass die Punkte des Beugungsbildes zu senkrechten Strichen werden. Damit wirken sich geringe Abweichungen von der Waagerechten beim Verschieben des Photodetektors nicht auf die Intensitätsmessungen aus.

werden kann. Die Vortriebsgeschwindigkeit des Verschiebereiters und damit die des Phototransistors kann variiert werden. Die Ansteuerelektronik des Vortriebs liefert ein zur zurückgelegten Wegstrecke proportionales Spannungssignal (Spannungsrampe), das ebenfalls mit CASSY (als Spannung U_{B1}) aufgenommen wird.

Zur Kalibrierung des Vortriebs – und damit auch der x -Achse Ihrer Graphen – steht Ihnen ein von innen beleuchteter Acrylglasstab zur Verfügung, in den im Abstand von jeweils 1 cm Ringe eingefräst sind. An diesen Ringen tritt Licht aus. Wenn Sie mit dem Phototransistor an dem Acrylglasstab entlang fahren, so erhalten Sie Intensitätsmaxima, deren Abstand jeweils 1 cm Phototransistorvortrieb entspricht. Aus der Darstellung Photostrom über der zur Wegstrecke proportionalen Spannung ($U_{A1} = f(U_{B1})$) und der Kenntnis, dass zwei Maxima einen Abstand von 1 cm haben, können Sie den Kalibrierungsfaktor K für die x -Achse in cm/V bestimmen.

Für die auf der x -Achse aufzutragenden Beugungswinkeldifferenzen $\Delta\theta$, den Abständen Δs (z. B. zwischen zwei Beugungsmaxima) und der gemessenen, zur Wegstrecke proportionalen Spannung U_{B1} besteht nun folgender Zusammenhang:

$$\Delta(\tan \theta) = \frac{\Delta s}{R} = \frac{U_{B1} K}{R}. \quad (6)$$

Für kleine Winkel θ kann weiterhin die Näherung

$$\theta \approx \sin \theta \approx \tan \theta \quad (7)$$

verwendet werden.

Vorsicht beim Umgang mit Lasern:

Trifft Laserstrahlung auf das ungeschützte menschliche Auge, so kann dies schwere gesundheitliche Schäden zur Folge haben. Durch die fokussierende Wirkung der Augenlinse ist insbesondere die Netzhaut gefährdet. Bei Verletzung des Sehnervs kann es sogar zu einer totalen Erblindung des Auges kommen. Gehen sie deshalb äußerst vorsichtig mit Laserstrahlung um:

- Schauen Sie auch mit geschützten Augen niemals direkt in den Laserstrahl.
- Begrenzen Sie den Laserstrahl in geeigneter Weise auf die zur Arbeit notwendige Länge.
- Unterbrechen Sie wann immer möglich den Laserstrahl während der Arbeit an optischen Elementen im Strahlengang.
- Vermeiden Sie alle unkontrollierbaren Reflexe des Laserstrahls. Bedenken Sie, dass es beim Eingriff in den Strahlengang auch zu ungewollten Reflexionen an Armbanduhren, Ringen o. ä. kommen kann.

Aufgabenstellung

1. Messen Sie die geometrischen Dimensionen b und d der vorgegebenen Elemente (zwei Einfachspalte A und B, den Doppelspalt A und ein Gitter mit 4 oder 8 Strichen/mm) mit einem Mikroskop aus. Verwenden Sie dazu das vorgegebene Eichokular zusammen mit dem Eichobjektträger.
2. Justieren Sie den Messaufbau so, dass die Beugungsbilder gut aufgelöst dargestellt sind.
3. Nehmen Sie die Intensitätsverteilung $I(\theta)$ dieser Elemente auf. Stellen Sie $\theta_n(n)$ grafisch dar. Stellen Sie die Intensitätsverteilungen für den Einfachspalt A und den Doppelspalt A gemeinsam in einer Grafik dar.
4. Bestimmen Sie am Beispiel eines Einfachspaltes aus dem Anstieg der Geraden $\theta_n(n)$ nach Gl. (4) die Wellenlänge des HL-Lasers, und vergleichen Sie diese mit dem Literaturwert.
5. Bestimmen Sie bei dem Doppelspalt und dem Gitter aus dem Anstieg der Geraden $\theta_n(n)$ und der vorher bestimmten Laserwellenlänge die Spaltabstände bzw. die Gitterkonstante. Vergleichen Sie diese mit den mikroskopisch bestimmten Werten.
6. Vergleichen Sie die gemessenen Intensitätsverteilungen qualitativ mit denen in Abb. 2 und diskutieren Sie eventuelle Unterschiede.

Vergessen Sie nicht, den zur Auswertung notwendigen Abstand R zu messen.