

Beugung an Spalt und Gitter

0 Einführende Bemerkungen

Beugung von Licht an optischen Blenden ist ein Interferenzphänomen, das für Wellen charakteristisch ist. Mathematisch wird die Ausdehnung von Wellen durch eine Differentialgleichung in Ort und Zeit, die sogenannte *Wellengleichung*, beschrieben. Dies ist im Allgemeinen sehr aufwändig und wird in der Praxis mit numerischen Methoden vorgenommen. Eine instruktive und für das grundlegende Verständnis von Interferenzphänomenen sehr hilfreiche Alternative wird durch das *Huygens-Fresnel* Prinzip möglich, das im folgenden Kapitel eingeführt wird. Wenn Sie den sehr knapp gefassten Text dazu nicht gleich verstehen, nehmen Sie ein einführendes Physik-Lehrbuch zur Hand, in dem Wellenphänomene erläutert werden. Vorschläge für geeignete Lehrbücher sind am Ende dieser Anleitung aufgeführt.

Bitte beachten Sie unbedingt die Warnhinweise im Kapitel 6 bevor Sie mit dem Laser experimentieren!

1 Grundlagen

Licht besteht aus elektrischen und magnetischen Feldern, die sich als elektromagnetische Welle in Raum und Zeit ausbreiten ähnlich wie die Auslenkungen aus einer Ruhelage in einer mechanischen Welle oder Druckänderungen in einer Schallwelle. Es reicht hier aus die elektrische Feldstärke E zu betrachten. In einer *ebenen Welle*, die sich in x -Richtung ausbreitet, ist das elektrische Feld:

$$E(x, t) = E_0 \cdot \sin\left(2\pi\nu \cdot \left(t - \frac{x}{c}\right)\right) \quad (1).$$

Die Formel besagt, dass das elektrische Feld E an einem festen Ort x periodisch in der Zeit mit der *Frequenz* ν schwingt. Räumlich breiten sich Punkte gleicher *Phase* mit der Geschwindigkeit c in x -Richtung aus. Dabei entsteht ein Wellenfeld mit der räumlichen Periode $\lambda = c/\nu$. Die Größe λ hat die Einheit Meter und wird *Wellenlänge* genannt. Für das menschliche Auge ist nur die Intensität des Lichts bedeutsam. Sie ist proportional zum Quadrat der elektrischen Feldstärke der Lichtwelle:

$$I_{\text{Licht}} \propto |E|^2 \quad (2).$$

Ebene Lichtwellen wie jene der Gleichung (1) sind mathematisch sehr einfach, beschreiben aber bei weitem nicht alle möglichen Wellenfelder. Bei ebenen Wellen breiten sich die sogenannten *Wellenfronten* (Flächen gleicher Phase) als ebene Flächen im Raum aus. Grundsätzlich werden elektromagnetische Wellen durch oszillierende Punktladungen generiert. Eine einzelne Punktladung erzeugt eine *Elementarwelle*, die sich vom Ort der Ladung in alle Richtungen mit der Lichtgeschwindigkeit ausbreitet. Die Wellenfronten sind dann Kugeloberflächen, und das Feld muss mit zunehmendem Abstand von der Punktquelle sinken, siehe Abb. 1.

Sind die Orte der Punktquellen oder die Form einer Wellenfront zu einem bestimmten Zeitpunkt bekannt, so liefert das *Huygens'sche Prinzip* eine Methode, Position und Form der Wellenfront zu einem späteren Zeitpunkt zu bestimmen:

- Jeder Punkt der bekannten Wellenfront sendet eine Elementarwelle aus.

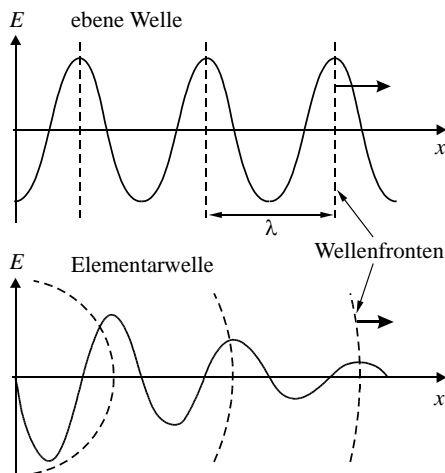


Abbildung 1: Feldstärke und Wellenfronten einer ebenen Lichtwelle und einer Kugelwelle

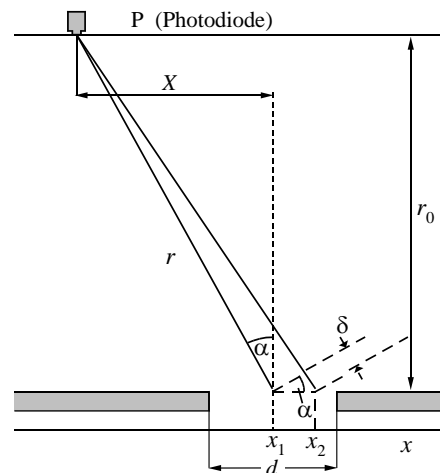


Abbildung 2: Experimentelle Anordnung zur Vermessung des Beugungsmuster eines Einzelspalts. Im Spalt sind die Punkte x_1 und x_2 Quellen von Elementarwellen. Die Verbindungslinien zwischen diesen Punkten und dem Detektor markieren die Radien der am Beobachtungsort interferierenden Elementarwellen

- Die neue Wellenfront ergibt sich aus der äußeren Einhüllenden aller Elementarwellen in Vorwärtsrichtung.

Etwa 150 Jahre nach Huygens, als die Wichtigkeit der Begriffe Frequenz und Phase für die Beschreibung von Lichtwellen klar war, zeigt Fresnel, dass mit einer Erweiterung des Huygens'schen Prinzips die Beobachtung erklärt werden kann, dass kleine optische Blenden kein perfektes Schattenbild haben. Das erweiterte *Huygens-Fresnel* Prinzip lautet:

- Zu einem gegebenen Zeitpunkt sendet jeder nicht abgeblendete Punkt einer Wellenfront eine Elementarwelle aus, die die gleiche Frequenz wie die Primärwelle hat. Das elektrische Feld der Welle an einem Ort in Vorwärtsrichtung zu einem späteren Zeitpunkt ergibt sich aus der Superposition aller Elementarwellen, d.h. der Summe der Felder aller Elementarwellen unter Berücksichtigung der Amplitude und Phase.

Es ist wichtig anzumerken, dass bei der Überlagerung sich die Feldstärken aufsummieren, nicht die Intensitäten. Ein zum Verständnis des Folgenden weiterer zentraler Punkt ist, dass die Elementarwellen nun nicht mehr alle die gleichen Radien haben müssen. Die Berücksichtigung der verschiedenen Phasen¹ der Elementarwellen mit Ursprung an verschiedenen Punkten reicht aus.

In diesem Versuch soll durch Beugung am Spalt, Doppelspalt und Gitter gezeigt werden, welche Auswirkungen die Wellennatur des Lichts mit sich bringt.

¹ Voraussetzung ist, dass die Phasenbeziehung zwischen Elementarwellen aus verschiedenen Quellpunkten wohl definiert ist. Diese sogenannte *Kohärenzbedingung* ist bei Laserlicht sehr gut erfüllt.

2 Beugung am Einzelspalt

Trifft eine Welle auf eine Öffnung geringerer Größe in einer sonst überall undurchlässigen Fläche (Spalt, Kreisblende), dann folgt die Intensitätsverteilung dahinter nicht mehr dem Schattenriss dieser Öffnung, sondern es entsteht dort eine so genannte Beugungsfigur. Relativ einfach lassen sich solche Beugungserscheinungen erklären, wenn folgende Voraussetzungen erfüllt sind (man spricht dann von Fraunhoferscher Beugung):

- Eine *ebene Welle* fällt auf den Spalt.
- Die Betrachtung findet in einer Entfernung $r_0 \gg d$ ($d = \text{Spaltbreite}$) statt.

Die Berechnung des Beugungsmusters lässt sich wie folgt verstehen (Abb. 2): Elementarwellen mit unterschiedlichen Startpunkten x_i im Spalt haben beim Beobachter P einen *Gangunterschied*

$$\delta = (x_1 - x_2) \cdot \sin \alpha,$$

wenn α den Winkel zwischen der optischen Achse (Linie senkrecht zum Spalt) und der Verbindungslinie zwischen Spalt und P ist. Um das Wellenfeld bei P zu erhalten, müssen wir nun nach dem Huygens'schen Prinzip alle Elementarwellen aus dem Spalt am Betrachtungsort überlagern, d. h. die Summe der entsprechenden Felder bilden. Die Intensität erhält man durch Quadrieren des Resultats:

$$I_S = I_0 \left(\frac{\sin \left(\frac{\pi \cdot d}{\lambda} \sin \alpha \right)}{\frac{\pi \cdot d}{\lambda} \sin \alpha} \right)^2 \quad (3).$$

Hierbei bezeichnet I_0 die Intensität bei $\alpha = 0$. Es ergibt sich ein dominierendes Maximum bei $\alpha = 0^\circ$. Für Winkel α_{\min} mit

$$\sin \alpha_{\min} = m \frac{\lambda}{d} \quad \text{mit } m = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (4)$$

finden wir $I_S = 0$, also Auslöschung. Die Elementarwellen von den beiden Spalträndern haben dann einen Gangunterschied $\delta = d \cdot \sin \alpha = m \cdot \lambda$. Man nennt m die *Ordnung* der Beugung. Aus Abb. 3 erkennt man am Beispiel des Minimums erster Ordnung, wie es zur Auslöschung kommt: Für jede Welle aus dem Lichtbündel (a) findet sich eine Welle in dem Lichtbündel (b) mit entgegengesetztem Feld, so dass die Summe Null ist. Man sagt die Wellen interferieren destruktiv. Drei sich auslöschende Wellenpaare sind exemplarisch eingezeichnet.

Dagegen finden wir Maxima der Intensität in guter Näherung bei Winkeln α_{\max} mit

$$\sin \alpha_{\max} = \begin{cases} 0 & \\ \left(m + \frac{1}{2}\right) \cdot \frac{\lambda}{d} & \text{mit } m = 1, 2, 3, \dots \\ \left(m - \frac{1}{2}\right) \cdot \frac{\lambda}{d} & \text{mit } m = -1, -2, -3, \dots \end{cases} \quad (5),$$

d. h. wenn die größtmögliche Anzahl von Elementarwellen unausgelöscht auf dem Schirm bleibt. In Abb. 4 ist die Winkelabhängigkeit der Intensität hinter dem Spalt, die so genannte Beugungsfigur, aufgetragen. Die Intensitätsverteilung bildet Helligkeitsstreifen parallel zum Spalt, wobei der zentrale Streifen bei $\alpha = 0$ bei weitem dominiert. Die Intensität der Streifen nimmt mit der Ordnung m schnell ab. Im Maximum beim Winkel α_{\max} beträgt die Intensität

$$I_{\max} = \frac{I_0}{\pi^2(|m| + 1/2)^2} \quad (6).$$

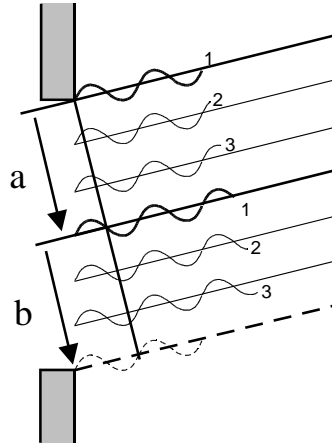


Abbildung 3: Interferenz der Wellenzüge am Spalt.

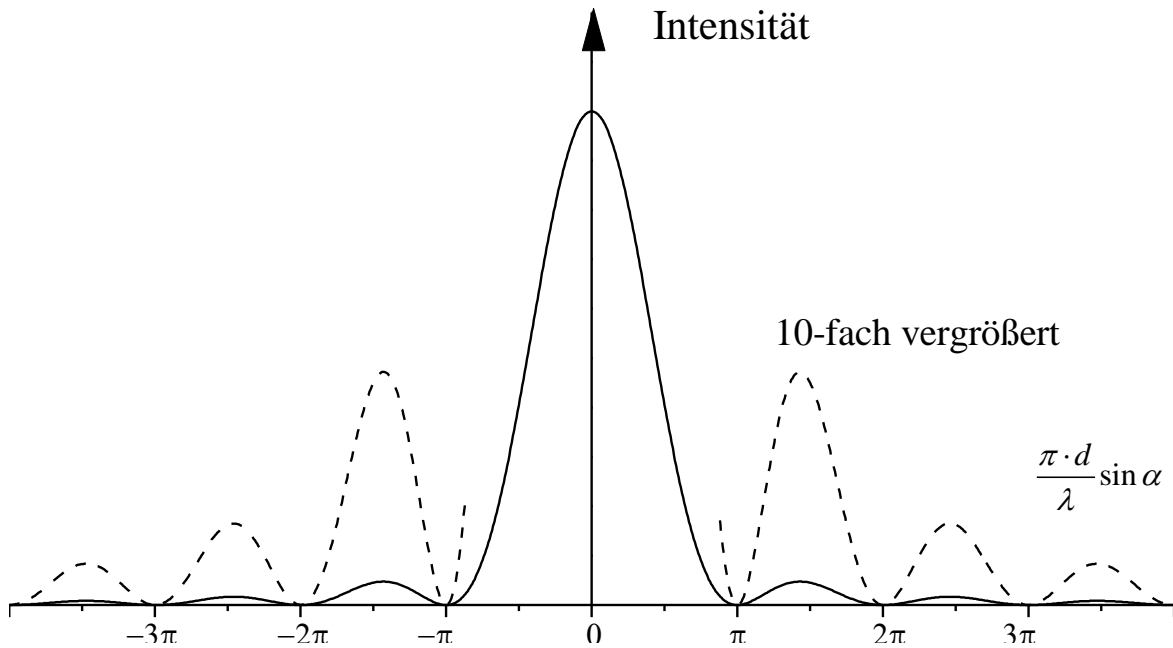


Abbildung 4: Winkelabhängigkeit der Intensität I_S bei der Beugung am Einzelspalt

3 Beugung am Gitter mit N Spalten

Bei der Beugung am Gitter haben wir die Elementarwellen aus allen N beleuchteten Gitterspalten zur Überlagerung zu bringen (Abb. 5). Wir betrachten zunächst die Überlagerung von Elementarwellen, die ihren Ursprung in der Mitte der Gitterspalte haben. Der Gangunterschied Δ zwischen Elementarwellen in verschiedenen Spalten ist dann $\Delta = D \cdot \sin \alpha$, wobei D die sogenannte *Gitterkonstante* ist. Die Intensität ergibt sich in diesem Fall zu

$$I_G = I_S \left(\frac{\sin \left(\frac{N \cdot \pi \cdot D}{\lambda} \sin \alpha \right)}{\sin \left(\frac{\pi \cdot D}{\lambda} \sin \alpha \right)} \right)^2 \quad (7).$$

Auslöschung finden wir nun für Winkel α_{\min} mit

$$\sin \alpha_{\min} = \frac{\ell}{N} \cdot \frac{\lambda}{D}, \quad \ell = \pm 1, \pm 2, \dots \text{ und } \ell \neq N \quad (8).$$

Wenn ℓ/N eine ganze Zahl ist, wird der Nenner von I_G in Gleichung (7) ebenfalls Null. Eine mathematische Grenzbetrachtung ergibt dann Maxima mit der Intensität $N^2 I_S$. Diese Maxima sind viel größer als die dazwischen liegenden *Nebenmaxima* und werden *Hauptmaxima* genannt. Für die Winkel α_{\max} der Hauptmaxima gilt:

$$\sin \alpha_{\max} = m \frac{\lambda}{D}, \quad m = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (9).$$

Die Lage der Hauptmaxima kann man sich durch eine einfache geometrische Betrachtung klar machen: Elementarwellen aus benachbarten Spalten haben bei den Hauptmaxima gerade ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge als Gangunterschied: $\Delta = m \cdot \lambda$. Sie überlagern sich daher verstärkend (*konstruktiv*). Zwischen den Hauptmaxima von Gleichung (9) liegen jeweils $(N - 2)$ Nebenmaxima, deren Höhe relativ zu den Hauptmaxima mit zunehmendem N rasch abnimmt.

Hat in jedem Spalt jeweils nur eine Elementarwelle ihren Ursprung so ist der Faktor I_S in Gleichung (7) die Intensität einer Elementarwelle. Dies ist allerdings nur für Gitter mit extrem kleinen Spalten eine gute Näherung. In einem realen Gitter entstehen innerhalb des Spaltes viele Elementarwellen, die alle an verschiedenen Punkten im Spalt ihren Ursprung haben. Wenn sich aber die Elementarwellen aus einem Spalt bereits auslöschen, kann die Existenz vieler Spalte daran nichts ändern. Die endliche Spaltbreite wird in Gleichung (7) berücksichtigt, wenn der Faktor I_S das Intensitätsmuster eines einzelnen Gitterspaltes nach Gleichung (3) enthält. So ergibt sich das Beugungsmuster des Gitters wie in Abb. 6 mit dem Intensitätsmuster I_S aus Abb. 4 als Einhüllender.

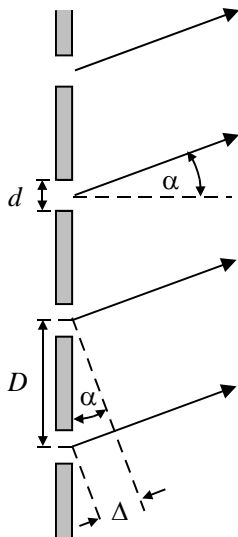


Abbildung 5: Geometrie beim Beugungsgitter

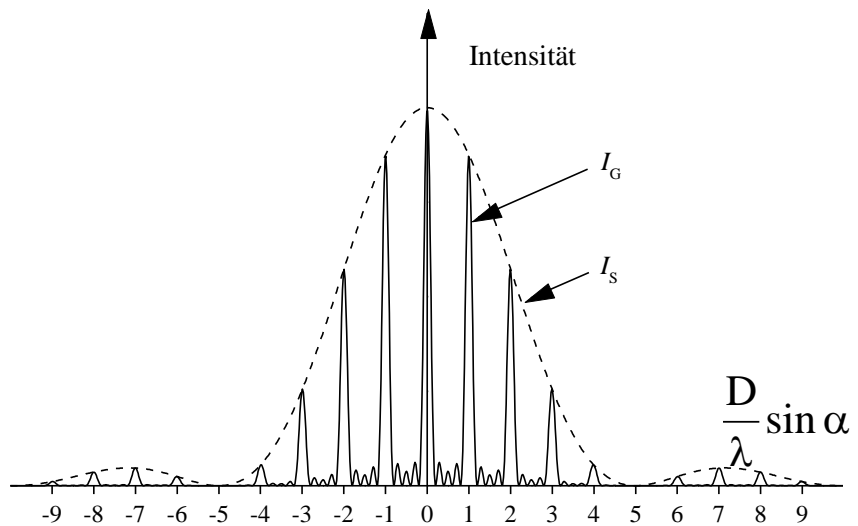


Abbildung 6: Intensitätsmuster bei Gitterbeugung. Hier $N = 5$ Spalte. Die mit I_S gekennzeichnete gestrichelte Linie gibt die Intensitätsverteilung eines einzelnen Gitterspaltes wieder.

4 Anwendungen

Wegen der Wellenlängenabhängigkeit der Winkel, unter denen die Maxima auftreten, lässt sich Licht aus einem Gemisch verschiedener Wellenlängen mit Hilfe eines Gitters spektral zerlegen. Von dieser Eigenschaft wird in sogenannten Gitterspektrometern Gebrauch gemacht. Dabei nimmt das Auflösungsvermögen (*die Trennschärfe*) eines Gitters proportional zur Anzahl N der beleuchteten Spalte zu.

5 Versuchsaufbau

Die Anordnung von Maske und Detektor des Versuchsaufbaus ist in Abb. 2 skizziert, die Form der Maske in Abb. 7. Als Lichtquelle dient ein Helium-Neon-Laser ($\lambda = 632,8 \text{ nm}$) mit 2 mW Leistung. Die Maske mit den verschiedenen Beugungsspalten wird so im Strahl justiert, dass der an der Blende reflektierte Teil des Laserstrahls auf die Öffnung des Lasers zurückfällt (senkrechter Einfall). Die Beugungsbilder werden mit einer senkrecht zur optischen Achse verschiebbaren Photodiode ausgemessen. Sie liefert einen zur Lichtintensität I_L proportionalen Photostrom I_P , der an einem $R = 200 \Omega$ -Widerstand gemäß dem Ohmschen Gesetz $U = R \cdot I_P$ eine Spannung U erzeugt, die damit ebenfalls proportional zu I_L ist. Die Spannung wird mit einem Digitalmultimeter abgelesen. Es sei angemerkt, dass I_L und I_P unterschiedliche physikalische Größen sind und daher auch nicht die gleiche Einheit haben.

Der Laser muss 20 Minuten vor der Messung warm laufen, um ein konstantes Verhalten zu liefern.

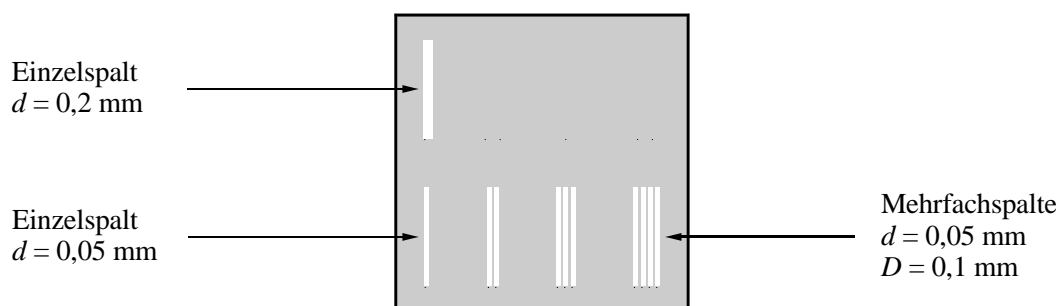


Abbildung 7: Maske mit den Beugungsspalten des Praktikumsversuches.

6 Versuchsdurchführung

ACHTUNG!: NIEMALS in den Laserstrahl hinein blicken! Zerstörung der Netzhaut!

Keine metallischen Gegenstände in den Laserstrahl halten, die zu unkontrollierten, für das Auge gefährlichen Reflexen womöglich in das Auge des Nachbarn führen könnten.

Nicht hinsetzen, da sonst der Laserstrahl in Augenhöhe liegt!

Uhren und metallischen Handschmuck ablegen!

7 Aufgaben

Notieren Sie den Abstand r_0 zwischen Spalt und Beobachter (Pfeilmarkierung auf der Photodiode) bei $\alpha = 0$, um später den Winkel $\alpha = \arctan(X/r_0)$ aus dem Abstand X der Photodiode von der optischen Achse (siehe Abb. 2) berechnen zu können.

- Messen Sie am Einzelspalt mit der Breite 0,2 mm die Lage einiger Minima sowie die Lage und Intensität einiger Maxima. Achten Sie darauf, dass die Verschiebung der Photodiode genau senkrecht zur optischen Achse erfolgt. Stellen Sie sicher, dass Sie bei Ihrer Messung das Maximum nullter Ordnung mit aufnehmen sowie Minima und Maxima auf *beiden* Seiten der nullten Ordnung in Ihrer Intensitätsverteilung vorliegen! Zudem ist die Wahl einer kleinen Schrittweite sehr wichtig, um bei der Datenaufnahme Minima und Maxima nicht zu übersehen.
- Betrachten Sie nacheinander die Beugungsbilder des Doppel-, Dreifach- und Vierfachspalts auf einem weiter entfernten Schirm hinter der Photodiode. Notieren Sie die Abfolge von Haupt- und Nebenmaxima in einer Skizze. Beschreiben und vergleichen Sie die Bilder qualitativ. Für ein Gitter mit N Spalten werden entsprechend den Gleichungen (8) und (9) genau $(N - 2)$ Nebenmaxima erwartet. Bestätigen Ihre Beobachtungen dies?
- Vermessen Sie mit der Fotodiode die Lage und Intensität der Haupt- und Nebenmaxima im Beugungsbild des Vierfachspalts bis zum 2. sichtbaren Hauptmaximum, ferner die restlichen beobachtbaren Hauptmaxima.

8 Auswertung

- Notieren Sie für beide Einzelspalte die in 5.2 a) vermessenen Maxima und Minima in einer Tabelle. Berechnen Sie die Winkel α_{\min} und α_{\max} und daraus jeweils eine Wellenlänge λ . Bilden Sie den Mittelwert aller Wellenlängen und geben Sie, wenn möglich, den statistischen Fehler des Mittelwerts an. Vergleichen Sie Ihr Resultat mit der Laserwellenlänge und suchen Sie Fehlerursachen.
- Vergleichen Sie die gemessenen Intensitätswerte der Maxima mit der Theorie, indem Sie in Gleichung (6) die passenden Werte für m einsetzen. Die Intensität im Hauptmaximum bei $\alpha = 0$ entspricht dann I_0 . Wie beurteilen Sie Ihre Messwerte?
- Diskutieren Sie, wie das Beugungsbild für sehr breite ($d > 1$ mm) bzw. sehr schmale Spalte ($d \cong \lambda$) aussähe. Der letztere Fall dient bei kreisförmiger Blende (*pinhole*) der Aufweitung eines Laserstrahls zu einem breiten, einfarbigen (*monochromatischen*) Lichtfeld z.B. für die Holographie.
- Die Intensitätsverteilung des schmalen Spalts $d = 0,05$ mm soll zusammen mit der Intensitätsverteilung des Vierfachspalts $d = 0,05$ mm / $D = 0,1$ mm in ein Diagramm eingetragen werden, ähnlich der Abbildung 6. Zeichnen Sie also das Beugungsbild des Einfachspalts und die Intensitätswerte des Vierfachspalts in einen (I/I_0) über $(D/\lambda \cdot \sin\alpha)$ -Graphen.
- Erklären Sie anhand des Graphen aus 5.3 d), wie sich der Umstand auswirkt, dass bei den verwendeten Masken die Gitterkonstante D genau doppelt so groß ist, wie die Spaltbreite d . Wie können Sie die beobachteten Beugungsbilder der Mehrfachspalte mit der theoretischen Vorhersage von $(N - 2)$ Nebenmaxima in Einklang bringen? Markieren Sie in den skizzierten Beugungsfiguren, an welchen Stellen Nebenmaxima sichtbar wären, wenn die Spalte viel schmaler wären.

Hilfestellungen:

Das in 5.3 b) verlangte Diagramm der Beugungsfiguren kann unter Benutzung der Formeln (3) und (7) erzeugt werden:

Man erhält ein Diagramm ähnlich wie in Abb. 6, wenn man die auf die Höhe der Hauptmaxima $N^2 I_0$ normierte Intensität des Gitters, Gleichungen (7),

$$\frac{I_G(N, \lambda, x)}{N^2 I_0} = \left(\frac{\sin(\gamma \cdot \pi \cdot x)}{\gamma \cdot \pi \cdot x} \right)^2 \cdot \left(\frac{\sin(N \cdot \pi \cdot x)}{\sin(\pi \cdot x)} \right)^2 \quad (10)$$

und die normierte Intensität hinter einem Einzelspalt, Gleichung (3)

$$\frac{I_S(\gamma, x)}{I_0} = \left(\frac{\sin(\gamma \cdot \pi \cdot x)}{\pi \cdot \gamma \cdot x} \right)^2 \quad (11)$$

gegen einen Parameter $x = D \sin\alpha/\lambda$ aufträgt. Hierbei ist wieder N die Anzahl der beleuchteten Spalte im Gitter, und $\gamma = d/D$ ist das Verhältnis von Spaltbreite zu Gitterkonstante. Der erste Faktor auf der rechten Seite in Gleichung (10) ist der durch die Spaltform verursachte Beitrag, wie sich leicht durch Vergleich mit Gleichung (11) ersehen lässt. Der zweite Faktor in Gleichung (10) reflektiert die Periodizität des Gitters.

Mit einem programmierbaren Taschenrechner lassen sich Wertetabellen für (10) und (11) erzeugen, mit denen man dann auf Millimeterpapier ein Diagramm wie Abb. 6 zeichnen kann. Allerdings führen x -Werte an den Stellen der Hauptmaxima bei numerischen Rechnern oft zu Fehlermeldungen (warum?). Vermeiden sie diese Werte also.

Bequemer geht dies mit Computerprogrammen², in denen man die Funktionen (10) und (11) eingibt und sich deren Verlauf dann in einem frei wählbaren Wertebereich anzeigen lässt. Auch berechnet zumindest Mathematica selbst bei den x -Werten der Hauptmaxima die korrekte Intensität.

Die Antwort zu 5.3 c) lässt sich relativ einfach finden, wenn man das Verlauf der Funktion in Gleichung (10) mit dem reinen Gitteranteil, also dem zweiten Faktor in der Gleichung (10), vergleicht.

Beispiel: Das normierte Intensitätsmuster eines 5-fach Spalts mit $\gamma = 1/4$, berechnet nach Gl. (10) mit einem Mathematica-Notebook³, ist in der Abb. 8 dargestellt. Zum Vergleich ist in

² wie zum Beispiel Maple, MathLab, MathCAD, Mathematica, GNU Octave (<https://www.gnu.org/software/octave/>), Maxima (<http://maxima.sourceforge.net/>) oder SciLab (<http://www.scilab.org/>)

³ In Mathematica können die obigen Diagramme mit nur wenigen Befehlen erzeugt werden. Eine entsprechende Notebook-Datei (Dateiendung nb) mit den Befehlen können sie von der Praktikumsseite im Internet herunterladen. Sie lässt sich problemlos für den Vierfachspalt ($N = 4$) mit $\gamma = 1/2$ abändern und kann auch problemlos in MatLab oder Maple übersetzt werden.

Zu beachten: Das Notebook in Mathematica einladen und evaluieren (Befehl „evaluate Notebook“). Zur Erstellung des geforderten Diagramms ist im entsprechenden Plotbefehl nur noch der Wert für γ einzusetzen. In Mathematica wird eine Eingabe mit der Taste <Enter> auf dem Ziffernblock (oder <Shift Return>) abgeschlossen. Ein <Return> erzeugt lediglich einen Zeilenumbruch in einer mehrzeiligen Eingabe. Spielen sie ruhig einmal etwas mit den Parametern im Befehl `Plot` herum, um ein Gefühl dafür zu bekommen, wie sich Änderungen der Parameter auswirken. Die Größe der Diagramme lässt sich leicht durch „anfassen“ mit der Maus ändern. Sind Sie schließlich mit den Diagrammen zufrieden, können sie diese exportieren, indem Sie mit einem Rechtsklick auf das Diagramm das Kontextmenü öffnen und dort den Befehl zum Speichern als Grafik auswählen.

Abb. (9) der zweite Faktor in Gl. (10) aufgetragen. Ein Verhältnis von $\frac{1}{4}$ von Spaltbreite zu Gitterkonstante führt also dazu, dass im Beugungsbild jedes vierte Hauptmaximum von den Nullstellen des Spaltanteils der Beugung ausgelöscht wird.

Anmerkung: In den Abbildungen ist das Beugungsbild gegen $(D/\lambda) \cdot \sin(\alpha)$ und nicht - wie im Experiment - gegen die Detektorposition X aufgetragen. Die Hauptmaxima liegen dann bei ganzen Zahlen. Wann ergeben sich merkbliche Differenzen im Verlauf?

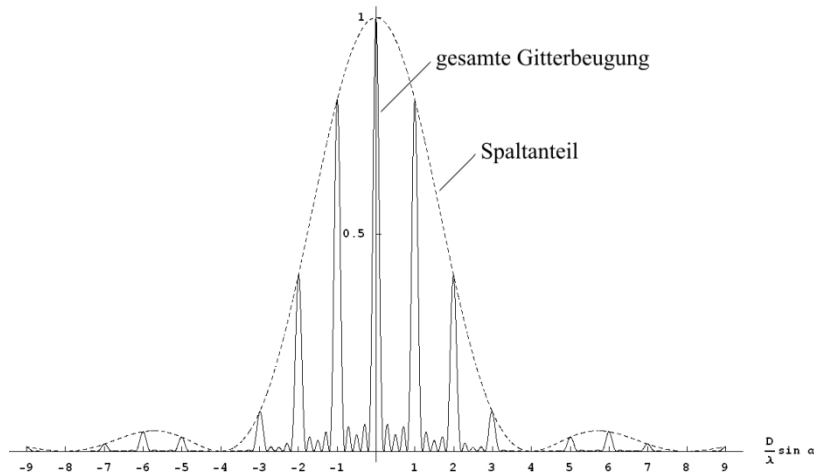


Abbildung 8: Das normierte Intensitätsmuster eines Gitters mit $N = 5$ Spalten und einem Verhältnis $\gamma = \frac{1}{4}$ zwischen Spaltbreite d und Gitterperiode D .

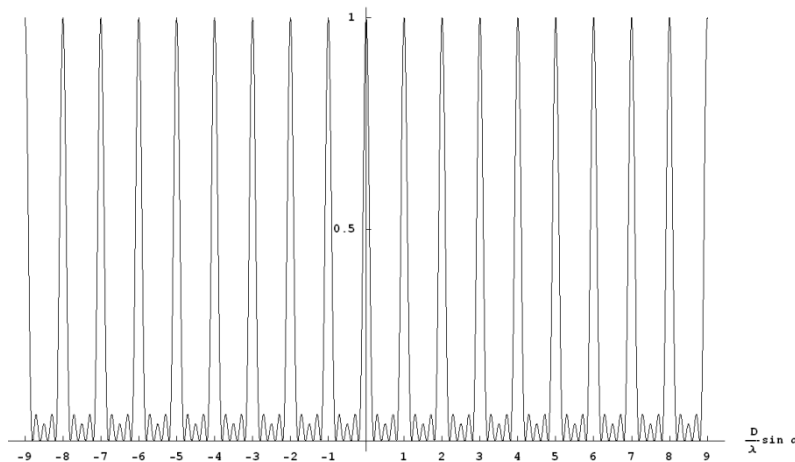


Abbildung 9: Der zweite Faktor auf der rechten Seite in Gleichung (10) für ein Gitter aus $N = 5$ Spalten, der den periodischen Teil im Intensitätsmuster reflektiert.

9 Kontrollfragen

Diese Fragen dienen einerseits zur Selbstkontrolle, können andererseits aber durchaus bei der Besprechung des Versuchs gestellt werden:

- (1) Woraus besteht eine Lichtwelle physikalisch gesehen?
- (2) Kann man mit dem Auge eine Lichtwelle „sehen“ oder nimmt man etwas anderes wahr?
- (3) Benötigt Licht, ebenso wie mechanische Wellen (z.B. Wasserwellen, Schallwellen), immer ein Medium, um sich ausbreiten zu können?

- (4) Was versteht man unter einer Wellenfront, und wie lässt sich hiermit der Unterschied zwischen einer ebenen und einer Elementarwelle erklären?
- (5) Erklären Sie das Huygens'sche Prinzip. Wie erklärt man hiermit das Phänomen der Lichtbeugung an einem schmalen Spalt? Was versteht man unter Gangunterschied?
- (6) Was muss erfüllt sein, damit der Grenzfall der Fraunhoferbeugung erfüllt ist? Zeichnen Sie für diesen Fall qualitativ das Beugungsbild eines Einzelspalt. Was versteht man unter Beugungsmaxima bzw. Beugungsminima?
- (7) Wie kann man sich aus der Formel (3) für das Beugungsbild eines Spalts die Bedingungen (4), (5) für das Auftreten von Beugungsmaxima und Beugungsminima einfach herleiten?
- (8) Wie kann man sich anschaulich und ähnlich wie beim Einzelspalt die Lichtbeugung an mehreren parallel nebeneinander im Abstand D angeordneten und beleuchteten Spalten mit gleicher Breite d ($:=$ Beugungsgitter) erklären? Hat hierbei die Beugung am einzelnen Spalt einen Einfluss auf das Beugungsbild des gesamten Gitters?
- (9) Bei der Gitterbeugung tauchen im Beugungsbild große Hauptmaxima und deutlich kleinere Nebenmaxima auf. Wie hängt die Anzahl der Nebenmaxima zwischen je zwei Hauptmaxima von der Zahl der beleuchteten Spalte im Gitter ab?

10 Versuchsvorbereitung

Dies sind Vorschläge zu sinnvollen Vorarbeiten, die im Rahmen der Vorbereitung vor Versuchsbeginn erledigt werden können:

- Studieren Sie die Versuchsanleitung gründlich, damit Sie wissen, welche Messreihen Sie durchführen sollen.
- Entnehmen Sie der Versuchsanleitung, welche Diagramme anzufertigen sind und überlegen Sie sich anhand des theoretischen Teils, welche Kurvenverläufe durch die im Diagramm eingetragenen Messwerte sinnvoll sind.
- Achten Sie auf eine korrekte Fehleranalyse. Studieren Sie hierzu das zusätzliche Skript „Fehlerrechnung“.
- Mit der Information, dass sich der Abstand r_0 zwischen Spalt und Photodiode in der Versuchsanordnung sinnvoll nur zwischen 50 cm und 62 cm variieren lässt kann man die Lage der Beugungsminima und Maxima und Abhängigkeit von r_0 und der Beugungsordnung m auch vorab berechnen, indem man in den Gleichungen (4) und (5) die Wellenlänge $\lambda = 632,8$ nm verwendet und nach der Detektorposition X auflöst (Hinweis: $\alpha = \arctan(X/r_0)$). Die sich so ergebenden Funktionen $X(r_0, m)$ kann man für verschiedene Beugungsordnungen ($m = 1, 2, 3$) in einem Diagramm gegen r_0 auftragen.

11 Versuchsdurchführung

Dieser Versuch ist so angelegt, dass die Messungen bei zügiger, aber sorgfältiger Durchführung die volle Zeit in Anspruch nehmen:

- Aufgabenteilung spart Zeit. Ein Praktikant führt Messungen durch, der Zweite notiert die Ergebnisse, während gegebenenfalls der Dritte mittels Taschenrechner stichprobenartig aus

den Messgrößen und den gegebenen Formeln die zu bestimmende Größe ausrechnet, um Fehlmessungen frühzeitig aufzudecken.

- Überlegen sie sich vor Versuchsbeginn eine sinnvolle, übersichtliche Dokumentation der Messergebnisse in entsprechend gestalteten Tabellen.
- Beachten sie unbedingt die einleitenden Hinweise in Kapitel 6 zum Experimentieren mit Lasern!

Die in den Abschnitten 5.2 und 5.3 beschriebenen Aufgaben und Auswertungen können nach Maßgabe des Betreuers leicht abgewandelt werden und sind dann in entsprechender Weise abzuarbeiten.

12 Literatur

Ausführliche Erläuterungen zum Huygens-Fresnel Prinzip und den damit zusammenhängenden Wellenphänomenen wie zum Beispiel Beugung und Brechung finden Sie in jedem einführnden Physiklehrbuch, wie beispielsweise:

D. Halliday, R. Resnick: Physics, Wiley-VCH, 2005

P.M. Fishbane: Physics for scientists and engineers, Vol. 1, Prentice-Hall International, 2004

J.D. Cutnell: Physics, Student Solutions Manual, Wiley & Sons Inc, 2006

D.C. Giancoli: Physics for Scientists and Engineers, Prentice Hall, ISBN 0-13-021517-1.

D.C. Giancoli: Physik, Pearson Studium, 2006.

J. Orear: Physik, Hanser, 1989

E. Hering, R. Martin, M. Stohrer: Physik für Ingenieure, Springer 2007.

H. Vogel: „Gerthsen“ Physik, Springer, 2004.

P.A. Tipler: Physik für Wissenschaftler und Ingenieure, Spektrum, 2004

Walcher: Praktikum der Physik, Springer 2013.