



Physikalisches Praktikum II

Bachelor Physikalische Technik: Lasertechnik, Biomedizintechnik
Prof. Dr. H.-Ch. Mertins, MSc. M. Gilbert

O06 Beugung an Spalt und Gitter

(Pr_PhII_O06_Beugung_7, 25.10.2015)

Name	Matr. Nr.	Gruppe	Team
1.			
2.			
Protokoll ist ok	<input type="radio"/>	Datum	Abtestat
Folgende Korrekturen nötig	<input type="radio"/>		

Hinweis

Lesen Sie die Versuchsanleitung (inkl. Versuchsdurchführung & Auswertung!) gründlich durch und machen sich mit den Begrifflichkeiten vertraut. Die Teilnahme am Praktikum erfordert das erfolgreiche Beantworten der Zulassungsfragen am Versuchstag (siehe Anleitung) oder alternativ eine kurze Vorstellung eines Themengebietes an der Tafel.

1. Ziel

Ein typisches Kennzeichen von Wellen ist Beugung, d.h. die Abweichung von der geradlinigen Ausbreitung. Sie wird hervorgerufen durch eine seitliche Begrenzung des Wellenfeldes wie einer Kante oder einem Spalt und tritt bei beliebigen Wellen, wie z.B. Licht-, Schall, Radio- oder Materie-Wellen auf. Als Folge der Beugung beobachtet man Interferenz, die u.a. in optischen Technologien gezielt ausgenutzt wird. Zum Beispiel wird Interferenz bei hochreflektiven Spiegeln für Laserresonatoren genutzt. Viele moderne hochempfindliche Verfahren zur Messung von Längen, Abständen oder Krümmungsradien beruhen auf der Interferenz.

In diesem Praktikum lernen Sie die Grundprinzipien der Wellenoptik kennen

2 Theorie

2.1 Interferenz

Interferenz bedeutet die Überlagerung von mehreren Wellen in einem Raumpunkt. Hierdurch können sich Wellen je nach ihrem Gangunterschied Δ bzw. Phasendifferenz φ abschwächen oder verstärken. Zum Verständnis betrachten wir zwei identische Wellen, die sich in gleicher Richtung ausbreiten

$$(1) \quad y_1(x, t) = y_0 \sin(kx - \omega t) \quad y_2(x, t) = y_0 \sin(kx - \omega t + \varphi)$$

und sich nur in ihrer Phase φ unterscheiden. Die Interferenz (Summe) beider Wellen ergibt:

$$(2) \quad y_1 + y_2 = y(x, t) = [2 y_0 \cos \frac{1}{2}\varphi] \cdot \sin(kx - \omega t + \frac{1}{2}\varphi)$$

Dies ist wieder eine Sinus-Welle $y(x, t)$ mit der Amplitude $2 y_0 \cos \frac{1}{2}\varphi$. Die Amplitude hängt empfindlich von der Phasendifferenz φ der beiden Wellen y_1 und y_2 ab. Wollen wir die Phasendifferenz in der Ortsdarstellung sichtbar machen, müssen wir diese als Wegstreckendifferenz, genauer als Gangunterschied Δ ausdrücken. Der ergibt sich zu $\Delta = \varphi/k = \lambda \varphi/2\pi$. Der Gangunterschied verhält sich also zur Wellenlänge, wie die Phasendifferenz zu 2π . Beachte die Sonderfälle (Abb. 1):

A) Konstruktive Interferenz

Hier sind beide Wellen in Phase, d.h. die Phasendifferenz beträgt $\varphi = 0, 2\pi, 4\pi \dots$ bzw. der Gangunterschied ist ein ganzzahliges Vielfache von λ

$$\Delta = m\lambda, \quad m = 1, 2, \dots$$

Nach Gl. 2 addieren sich die Wellen dann zu

$$(3) \quad y(x, t) = 2 y_0 \cdot \sin(kx - \omega t)$$

B) Destruktive Interferenz

Beide Wellen y_1 und y_2 sind außer Phase und löschen sich somit nach Gl. 2 immer und überall aus

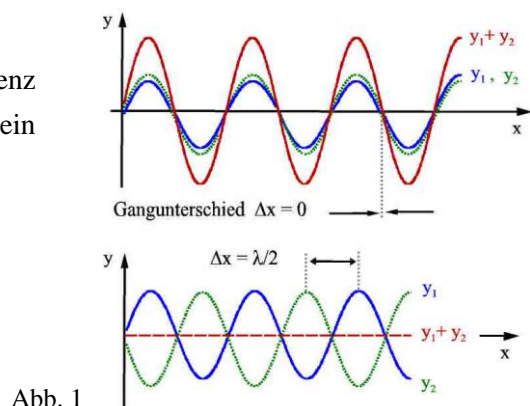


Abb. 1

(4) $y(x, t) = 0$ da $\cos \frac{1}{2} \pi = 0$

destruktive Interferenz tritt immer dann auf, wenn die Phasendifferenz die Werte $\varphi = \pi, 3\pi, 5\pi \dots$ annimmt bzw. der Gangunterschied ein ungerades, halbzahliges Vielfache der Wellenlänge

$$\Delta = \frac{1}{2}(2m + 1)\lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots \text{ betr\u00e4gt.}$$

2.2 Beugung am Doppelspalt

Trifft eine Wellenfront auf einen Spalt, so wird die Welle gebeugt und breitet sich auch in den „Schattenraum“ aus (Abb. 2). Zur Deutung betrachten wir den einfachsten Fall des Doppelspaltes. Ein Doppelspalt besteht aus zwei parallelen Spalten im Abstand g (siehe Abb. 2). Eine monochromatische Wellenfront trifft von links auf den Doppelspalt. Nach dem Huygenschen Prinzip behandeln wir beiden Spalte als Quellpunkte, von denen aus sich eine Kugelwelle in den gesamten Raum, also auch in den „Schattenraum“ ausbreitet. Betrachtet man zwei Wellenz\u00fcge, die sich unter dem Winkel α ausbreiten, so besteht zwischen ihnen der Gangunterschied Δ

(5) $\Delta = g \sin \alpha.$

Beugungsmaxima, d.h. Verst\u00e4rkung der Intensit\u00e4t durch Interferenz der beiden Wellenz\u00fcge beobachtet man auf dem Schirm hinter dem Doppelspalt, falls der Gangunterschied ganzzahlige Vielfache von λ annimmt. Diese treten f\u00fcr Beugungswinkel α auf, wenn gilt:

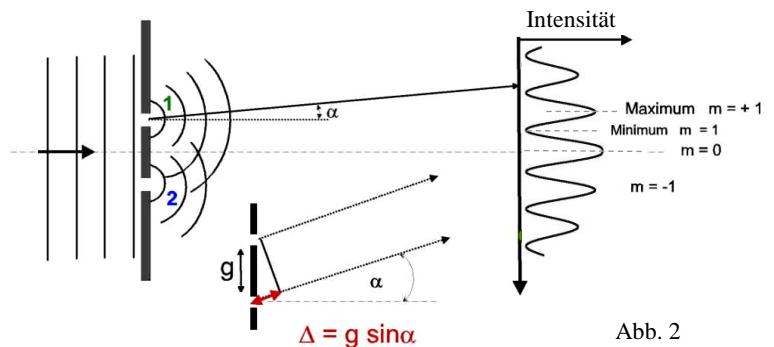


Abb. 2

(6) $m\lambda = g \sin \alpha \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Beugungsminima, d.h. Ausl\u00f6schung der Wellenz\u00fcge erh\u00e4lt man, wenn Δ ein ungerades Vielfache der halben Wellenl\u00e4nge ist, also wenn

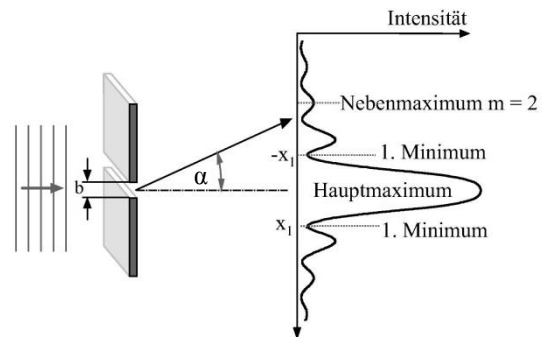
(7) $\frac{2m + 1}{2} \lambda = g \sin \alpha .$

Die Beugungsordnung ist durch m gegeben.

Da in der Realit\u00e4t die Spalte aber deutlich breiter als die Lichtwellenl\u00e4nge sind, muss diese vereinfachte Darstellung noch modifiziert werden. Bereits ein einziger Spalt realer Breite erzeugt ein eigenes Beugungsmuster mit dessen Intensit\u00e4tskurve die Verteilungskurve (Abb.2) noch gewichtet werden muss. Die Position der Minima und Maxima \u00e4ndert sich gegen\u00fcber dem idealen Doppelspalt aber nicht.

2.4 Beugung am Einzelspalt

Hier ergibt sich ein breites, intensives Hauptmaximum im Zentrum. Die Nebenmaxima sind schmaler und ihre Intensität viel geringer als beim Doppelspalt. Zur Deutung des Ursprungs der Beugungsfigur unterteilt man den Wellenzug im Spalt gedanklich in viele kleine Wellenzentren, z.B. 100. Eine mechanische Einteilung in viele Spalte ist nicht nötig, da nach dem Huygenschen Prinzip jede Wellenfront (auch ohne Spalte) in eine Reihe von Quellpunkten von Kugelwellen gedacht werden kann.



Schaut man unter dem Winkel α in die Richtung des ersten Minimums, so müssen die dort eintreffenden Strahlen sich auslöschen. Dies geschieht, wenn es je ein Strahlenpaar mit dem Gangunterschied von $\lambda/2$ gibt. In unserem Modell wären dies die Strahlenpaare ausgehend von den Zentren $j = 1$ & 51 (in Abb.4), $j = 2$ & 52, $j = 50$ & 100. Analog wird die Entstehung des ersten Nebenmaximums durch einen Gangunterschied λ der Strahlenpaare gedeutet. Da die Spaltbreite b in die Beugung eingeht, kann diese umgekehrt vermessen werden, ein typisches Verfahren zur Bestimmung kleiner Blenden mit Spaltbreiten im Mikrometerbereich. Für Maxima (Minima) der Ordnung m gilt:

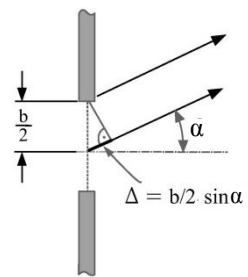


Abb.4

$$(9) \quad b \cdot \sin \alpha = \frac{(2m+1)}{2} \lambda \quad m = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (\text{Maxima})$$

$$(10) \quad b \cdot \sin \alpha = m \lambda \quad (\text{Minima})$$

Verwendet man statt eines Spaltes eine runde Lochblende mit dem Durchmesser d , so muss aus geometrischen Gründen ein Korrekturfaktor eingeführt werden. Für das erste Minimum folgt:

$$(11) \quad 1,22 \cdot \lambda = d \sin \theta.$$

2.3 Beugung am Gitter

Eine Beugung am Mehrfachspalt, oder einem Gitter stellt eine Kombination der beiden oben beschriebenen Phänomene dar. Ein optisches Gitter wird durch N parallele Spalte gebildet, die den Abstand g besitzen. Typisch sind 1000 Spalte pro Millimeter, so dass die Gitterkonstante $g = 1 \mu\text{m}$ beträgt. Abbildung 5 zeigt die Beugungsbilder eines (a) Doppel-, (b) 4-fach- und (c) 8-fach-Spaltes. Im Beugungsbild eines Gitters erscheinen äquidistante Hauptmaxima, die sehr viel schmaler aber viel heller als die Maxima des Doppelspaltes sind. Die reale Breite der Spalte zeigt sich zum einen in dem Auftretenden der Nebenmaxima (Abb.5) und zum anderen bekommt die Intensitätskurve insgesamt die Form (Hüllkurve) des Beugungsbildes des Einzelspaltes. Mit zunehmender Anzahl der Spalte wird das Licht in den Bereichen zwischen den Hauptmaxima nahezu ausgelöscht. Ursache ist die größere Zahl von Spalten, die, wie beim Doppelspalt, Quellen von Kugelwellen darstellen. Je größer die Anzahl der Spalte, desto besser ist das Licht in diesen Bereichen ausgelöscht, denn es finden sich viele Paarungen von Strahlen, die zur destruktiver Interferenz führen.

Die Interferenzbedingung für Maxima lautet sowie für den Doppelspalt

$$(8) \quad m\lambda = g \sin \alpha \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

(Maxima)

Die Intensität I_{Max} der Maxima steigt mit der Zahl N der Gitterstriche (Spalte) und zwar quadratisch:

$$I_{Max} \sim N^2.$$

Nach Gl. 8 ist die Position α der Maxima von der Wellenlänge abhängig, was in einem Gitterspektrometer (Monochromator) technisch ausgenutzt wird. Wird das Gitter mit weißem Licht beleuchtet, so erscheinen die Maxima höherer Ordnung farbig (außer für $m = 0$), d.h. das Licht wird in seine Spektralkomponenten räumlich aufgespalten. Rotes Licht wird weiter nach außen gebeugt, blaues Licht dagegen weiter nach innen ($\alpha_{rot} > \alpha_{blau}$). Mit Hilfe einer schmalen Blende wird dann Licht in einen schmalen Wellenlängenbereich ausgekoppelt und der Rest des Spektrums abgeblendet.

Ein großer Vorteil des Gitters gegenüber dem Doppelspalt sind die sehr schmalen Maxima (Abb. 3). Dies ist für die praktische Anwendung als Spektrometer sehr wichtig, denn somit können z.B. Spektrallinien einer Lampe deutlicher getrennt werden, d.h. das Auflösungsvermögen R ist gewachsen ($R \sim N$). Anwendung finden Beugungsgitter nicht nur in Spektrographen, sondern auch als frequenzselektive Elemente in der Lasertechnik oder für die Bilderzeugung in der Holographie. Zur Bestimmung von Kristallstrukturen mit Röntgenlicht nutzt man die „Gitterwirkung“ des Kristalls (siehe Praktikum Röntgenstrahlung).

2.5 Beugung an der Kante

Stellt man in das einfallende parallele Lichtbündel die Kante eines Objektes, so erscheint auf einem weit entfernten Schirm keine scharfe Schattengrenze, sondern ein kontinuierlicher Übergang vom dunklen zum hellen Bereich, an dem sich Interferenzstreifen anschließen.

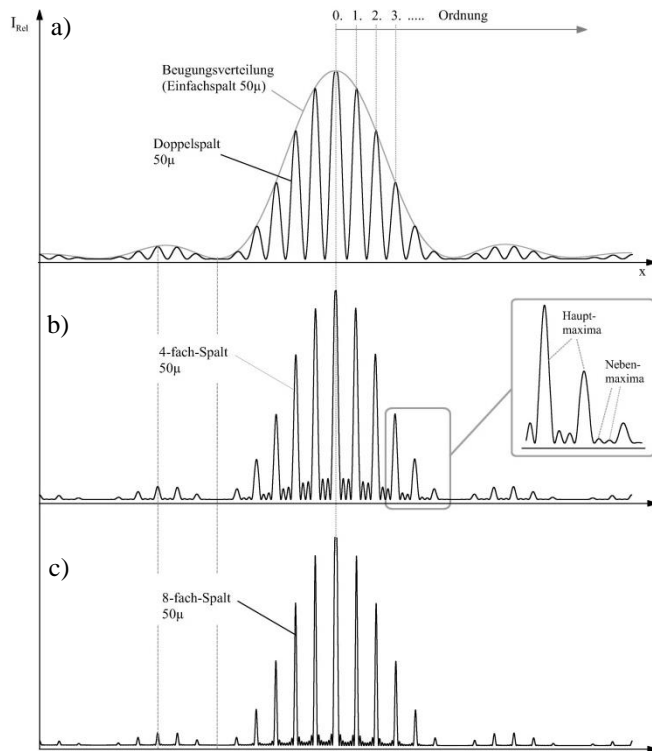


Abb.5 Beugung am Gitter (aus: Mertins, Gilbert „Prüfungstrainer Experimentalphysik“, Elsevier Spektrum)

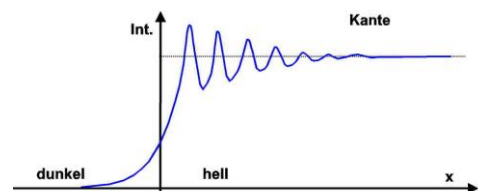


Abb. 6

Fragen Zulassung

- Was ist Interferenz und was ist Beugung?
- Skizzieren Sie die Intensitätsverteilung der Beugungsbilder an Doppelspalt, Einzelspalt, Gitter.
- Erklären Sie die Beugung am Doppelspalt durch die Interferenz der Wellenzüge.
- Nennen Sie die Bedingung für Beugungsmaxima am Doppelspalt und am Gitter.

3. Durchführung

Aufbau: aufgeweiteter, paralleler Laserstrahl mit weit entferntem Schirm (2 – 4 m). Schauen Sie nie in den Laserstrahl! Reflexionen des Laserstrahls durch spiegelnde Materialien sind zu vermeiden!

3.0 Vermessen Sie in jedem Experiment den Abstand zwischen Beugungsobjekt (Spalt, Gitter etc.) und Schirm. Notieren Sie die Wellenlänge des Laserlichtes sowie die Genauigkeit $\Delta\lambda$.

Kante

3.1 Halten Sie die Kante eines Teppichmesser als Beugungsobjekt vor den Schirm:

a) nah (ca. 0,3 m) vor den Schirm b) weit entfernt (ca. 3 m) vor den Schirm und zeichnen Sie je die Beugungsfiguren auf Papier. Weshalb ändern sich die Abstände der Beugungsmuster?

3.2 Beobachten sie das Beugungsbild verschieden „scharfkantiger“ und verschieden geformter Gegenstände wie Bleistift, Aluminiumfolie, Kupferdraht. Notieren Sie grob die Bilder. Welche Rolle spielt die „Scharfkantigkeit“ der Beugungsobjekte?

Einfachspalt

3.3 Setzen Sie den Einfachspalt an der vorgesehenen Position in den Strahlengang (Betreuer fragen). Befestigen Sie ein Blatt Papier am Schirm und zeichnen Sie das Beugungsbild nach. Für die spätere quantitative Auswertung benötigen Sie die Abstände der Beugungsmuster und den Schirmabstand! Notieren Sie die ungefähre Intensitätsverteilung $I(x)$. Vergleichen Sie mit Abb. 3.

Doppel-Spalt

3.4 Setzen Sie den Doppelspalt in den Strahlengang und zeichnen Sie das Beugungsbild und notieren Sie die Intensitätsverteilung $I(x)$. Vergleichen Sie mit Abb. 2. Die Abstände der Beugungsmuster sowie der Schirmabstand müssen für die spätere Auswertung genau bestimmt werden!

Gitter

3.5 Setzen Sie das 10-Linien Gitter in den Strahlengang und zeichnen Sie die Intensitätsverteilung $I(x)$ des Bildes. Vermessen Sie möglichst genau die Abstände der Maxima! Notieren Sie die Messgenauigkeit. Vergleichen Sie mit Abb. 5.

3.6 Drehen Sie das Gitter um die optische Achse. Wie sind Beugungsbild und Lage der Gitterstriche zueinander orientiert?

3.7 Tauschen Sie das 10-Linien Gitter gegen ein Gitter mit größerer Strichzahl (530 l/mm oder 100 l/mm oder 1000 l/mm) aus und notieren Sie den Unterschied der Beugungsbilder.

3.8 Das 530-Linien/mm (oder 100 l/mm) Gitter wird auf den Goniometertisch gesetzt und mit einer weißen Lichtquelle beleuchtet – nicht mit dem Laser! Beobachten Sie das Beugungsbild durch das Fernrohr. Nicht den Laser benutzen!

3.9 Bestimmen Sie durch Beugung die Maschenweite des Kreuzgitters. Sind es quadratische Maschen?

3.10 Bestimmen Sie durch Laserbeugung den Linienabstand auf einer CD.

4. Auswertung

Fügen Sie im Folgenden die jeweils gezeichneten Intensitätsverteilungen der Beugungsbilder hinzu.

- 4.1 Dokumentieren Sie die Beobachtungen aus 3.1 a), b) und erklären Sie diese.
- 4.2 Beschreiben Sie die Beugungsbilder der in 3.2 verwendeten Gegenstände. Erklären Sie, warum die Beugung unabhängig von der Scharfkantigkeit des beugenden Objektes ist.
- 4.3 Bestimmen Sie aus der Position der Maxima & Minima des Einzelspaltes die Spaltbreite.
- 4.4 Bestimmen Sie den Abstand g des Doppelspaltes.
- 4.5 Bestimmen Sie die Gitterkonstante des 10-Linien Gitters aus 3.5.

Machen Sie die Fehlerrechnung für Δg gemäß
$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{\Delta g}{g} + \frac{y^2}{x^2 + y^2} \left(\frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y} \right)$$

mit y = Abstand Gitter – Schirm, x = Abstand zwischen den Beugungsmaxima

- 4.6 Wie sind Beugungsbild und Lage der Gitterstriche zueinander orientiert?
- 4.7 Wie beeinflusst die Linienzahl des Gitters die Beugungsfigur (Beobachtungen aus 3.7)
- 4.8 Berechnen Sie die Maschenweite des Kreuzgitters. Sind es Quadratische Maschen?
- 4.9 Wie groß ist der Linienabstand auf der vermessenen CD?