

411 – Nahfeldbeugung

1. Aufgaben

- 1.1 Untersuchen Sie das Beugungsbild eines Spaltes im Nahfeld!
- 1.2 Beobachten Sie das Beugungsbild eines Doppelspaltes und einer Kante!

2. Grundlagen

Stichworte:

Huygenssches Prinzip, Fresnelsche und Fraunhofersche Beugung, Nah- und Fernfeld, Fresnelsche Elementarzonon, Babinetsches Theorem, Kohärenz, CCD - Zeile, Oszilloskop

2.1 Beugung

Trifft Licht auf ein Hindernis, so beobachtet man in Gebieten, wo nach den Vorstellungen der geometrischen Optik Schatten herrschen sollte, typische Erscheinungen (je nach Art des Hindernisses helle und dunkle Streifen, konzentrische Ringe u.ä.), welche unter dem Begriff „Beugung“ zusammengefasst werden können. Diese sind mit Hilfe des Huygensschen Prinzips erklärbar, wonach alle Punkte einer Welle Ausgangspunkt neuer Elementarwellen sind. Dadurch gelangt Licht in den Raum hinter einem Hindernis, und durch die Überlagerung der einzelnen Elementarwellen, die sich je nach Phasenlage verstärken bzw. ganz oder teilweise auslöschen, ergeben sich die bekannten Beugungsmuster.

Bei der Behandlung von Beugungserscheinungen muss unterschieden werden, ob man sich im Nahfeld (kurz hinter dem beugenden Objekt) oder Fernfeld (Abstand groß im Vergleich zur Ausdehnung des Objektes) befindet. Während die Beugungserscheinungen im Nahfeld (als „Fresnel-Beugung“ bezeichnet) eine relativ komplizierte mathematische Beschreibung verlangen, lassen sich im Fernfeld (Fraunhofer-Beugung) die Stellen der Intensitätsmaxima und -minima aus Lichtwellenlänge und den Abmessungen des beugenden Objektes bereits mit einfachen Formeln exakt berechnen (vgl. unten). Die angegebenen Beziehungen gelten streng bei Beleuchtung mit ebenen Wellen sowie Beobachtung im Unendlichen.

2.2 Fraunhofersche Beugung am Spalt

Bild 1 zeigt die Intensitätsverteilung I des an einem Spalt der Breite b gebeugten Lichtes als Funktion der Beobachtungsrichtung (Winkel α).

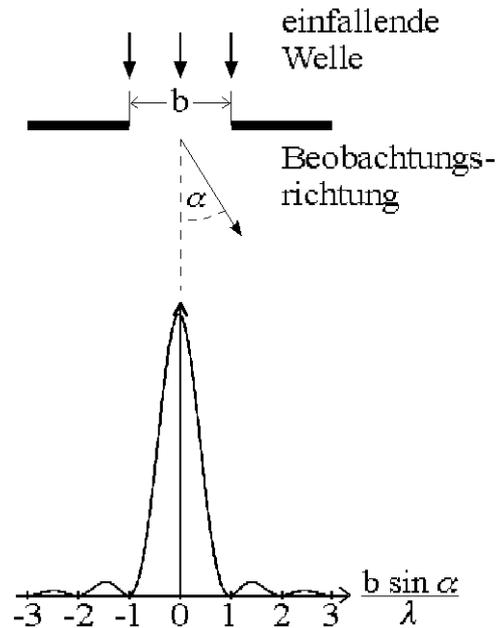


Bild 1: Beugung am Spalt.

Für die Nullstellen der Intensität gilt:

$$\sin \alpha_k = k \cdot \frac{\lambda}{b} \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

Zwischen den Nullstellen befinden sich Nebenmaxima, deren Intensität nach außen hin rasch abnimmt (1. Max. Intensität $I = 4,7\%$, 2. Max. $1,6\%$, 3. Max. $0,8\%$ von $I_0 =$ Intensität vor dem Hindernis).

2.3 Fraunhofersche Beugung am Doppelspalt

Besteht das beugende Objekt aus zwei parallelen Spalten der Breite b , deren Mitten den Abstand a von einander haben, so überlagern sich die gebeugten Wellen beider Spalte und erzeugen ein Interferenzmuster, für dessen Extrema folgende Bedingungen gelten:

$$\sin \alpha_k = k \cdot \frac{\lambda}{2a} \quad \text{mit} \quad \begin{array}{l} k = 0, 2, 4, \dots \text{ (Max.)} \\ k = 1, 3, 5, \dots \text{ (Min.)} \end{array} \quad (2)$$

Überlagert wird das Ganze vom Beugungsbild der identischen Einzelspalte (gestrichelte Kurve in Bild 2).

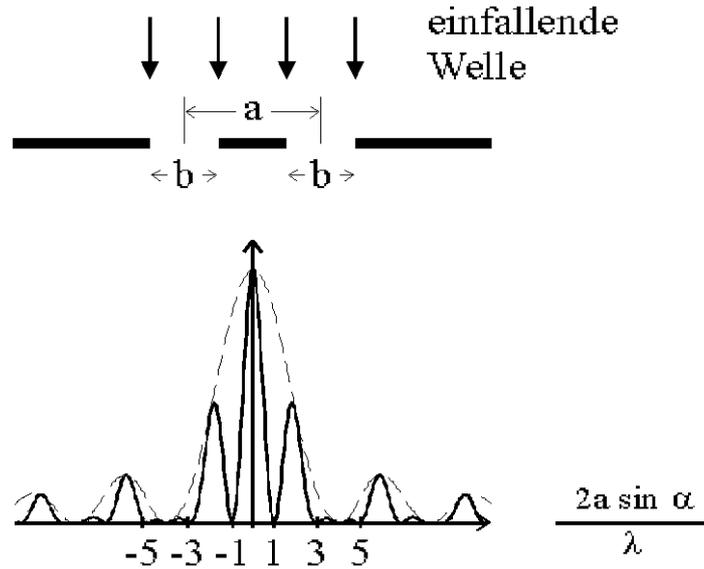


Bild 2: Beugung am Doppelspalt.

Verallgemeinert man die Formel des Doppelspaltens Gl. 2 für den Fall vieler regelmäßig angeordneter Spalte (Gitter mit Spaltabstand a bzw. Gitterfrequenz $1/a$), so findet man die Beugungswinkel α für das erste Hauptmaximum der gebeugten Strahlen bei

$$\sin \alpha (a) = \pm \frac{\lambda}{a} .$$

Zur Beobachtung der Fraunhoferschen Beugung werden die Parallelstrahlen mit einer Linse der Brennweite f in die Bildebene fokussiert. Wie man bei einfacher geometrischer Betrachtung nach Bild 3 sofort sieht, wird das gebeugte Licht im Abstand

$$s = f \cdot \tan \alpha \approx f \cdot \sin \alpha$$

von der optischen Achse fokussiert, und kann dort vermessen werden.

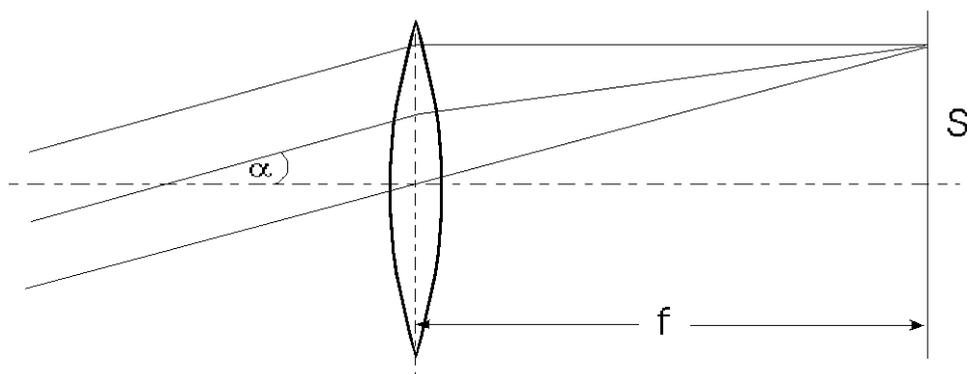


Bild 3: Beugungsbild in der Fokusebene.

2.4 Fresnelsche Beugung an einer Kante (Nahfeld)

Am Rande eines gegen die Wellenlänge großen Schirmes (oder einer Kante; siehe Bild 4) treten Beugungserscheinungen auf. Dabei weist der Raum außerhalb des geometrischen Schattens dunklere und hellere Interferenzstreifen auf, die parallel zum Rand des Schirmes verlaufen und deren Helligkeitsunterschied mit wachsendem Abstand von der Schattengrenze immer kleiner wird (Bild 4). Für den Abstand x_n der dunklen Streifen außerhalb des geometrischen Schattens gilt:

$$x_n = \sqrt{L \lambda \left(n - \frac{1}{4} \right)} \quad n = 2, 4, 6, \dots \quad (3)$$

(L ... Abstand „Beugungsobjekt – Beobachtungsebene“).

Innerhalb der Schattengrenze existieren keine Intensitätsschwankungen. Im Fernfeld (z.B. bei der Abbildung mit einer Linse) sind diese Beugungserscheinungen nicht wahrnehmbar.

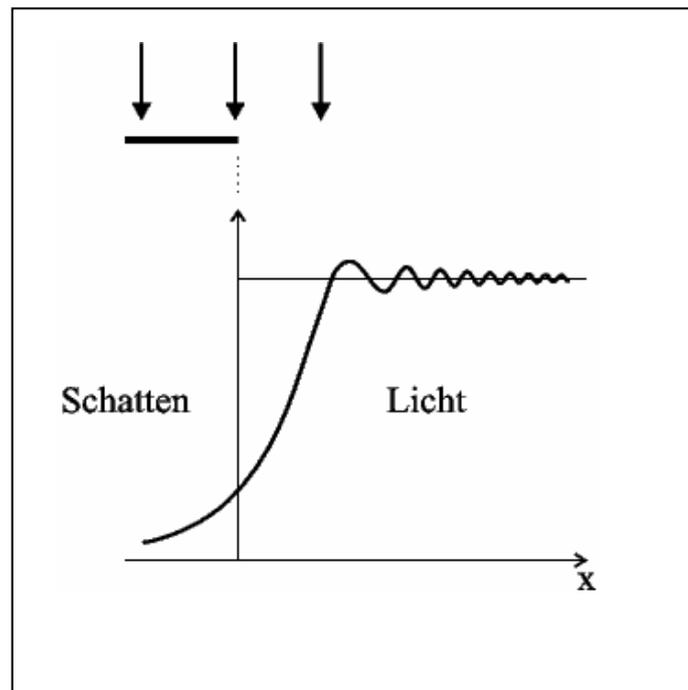


Bild 4: Beugung an einer Kante.

2.5 Fresnelsche Beugung am Spalt

Untersucht man die Beugungserscheinungen in unmittelbarer Nähe einer Spaltöffnung ohne optische Abbildungen, so beobachtet man weiterhin periodische Strukturen, die aber bzgl. Anzahl, Lage und Intensität der Maxima/Minima bei Veränderung des Abstandes (bzw. der Spaltbreite) ständig wechseln. Ein typisches Beispiel zeigt Bild 5.

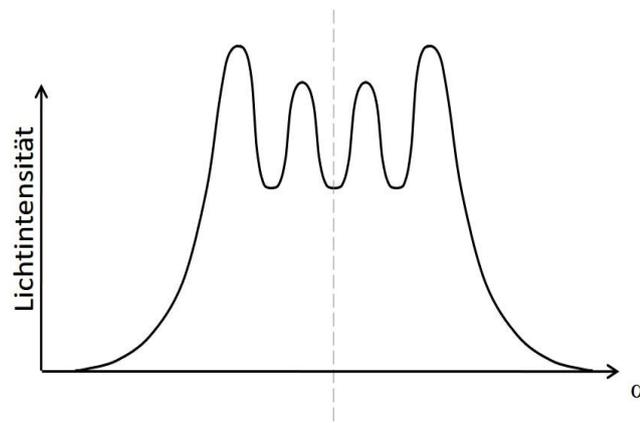


Bild 5: Beugung am Spalt (Nahfeld).

Qualitativ erklären kann man diese Erscheinungen mit Hilfe der „Fresnelschen Zonen“. Das geht vereinfacht gesagt so: Aus Sicht eines beliebigen Beobachtungspunktes im Nahfeld lässt sich die Spaltöffnung so in verschiedene Bereiche (Fresnelsche Zonen) aufteilen, dass sich jeweils das Licht aus einem Bereich mit dem Licht des benachbarten Bereiches gerade vollständig auslöscht. Bei gerader Anzahl von Zonen herrscht dann an der betreffenden Stelle Dunkelheit. Dort ist ein Intensitätsminimum. Bei ungerader Anzahl wird der Punkt beleuchtet und stellt ein (lokales) Maximum dar. Man kann sich das alles durch geometrische Konstruktion auf einem Blatt Papier recht gut veranschaulichen und auch Abschätzungen über die Lage der Minima und Maxima in Abhängigkeit von Abstand, Spaltbreite und Wellenlänge vornehmen. Wer es genauer wissen will, muss sich durch die entsprechende Literatur „kämpfen“ (Stichworte: Fresnel-Zone, Zonenplatte und für exakte Berechnungen „Cornu-Spirale“).

Hinter einem dünnen Draht existiert qualitativ die gleiche Beugungsstruktur wie hinter einem Spalt („Babinetsches Theorem“). Hier findet man aber im Zentrum stets ein lokales Maximum (welches durchaus geringere Intensität haben kann als die benachbarten Nebenmaxima).

Möglich ist auch, die Fresnel-Beugung an Spalt und Draht jeweils als Überlagerung der Feldstärkeverläufe (Amplitude und Phase) zweier Kanten zu deuten.

2.6 Kohärenzbedingung

Um das beugende Objekt mit kohärentem (interferenzfähigem) Licht zu beleuchten, wird mit einem Beleuchtungsspalt eine nahezu linienförmige Lichtquelle realisiert. Mit der Breite B des Beleuchtungsspalt und dessen Abstand A vom Objekt wird die Apertur ($\sin \delta$) des einfallenden Lichtbündels festgelegt (vgl. Bild 6). Zur Beobachtung eines kontrastreichen Beugungsbildes eines Objektes mit einer Breite b lautet die *Kohärenzbedingung*:

$$2 \cdot \sin \delta \approx \frac{B}{A} \ll \frac{\lambda}{b} \quad (4).$$

Die erforderliche Monochromasie des Lichtes wird mit einem Metallinterferenzfilter realisiert.

3. Versuchsdurchführung

3.1 Versuchsaufbau

Als Lichtquelle dient eine Halogenlampe mit einem verstellbaren Beleuchtungsspalt und einem Interferenzfilter, der an beliebiger Stelle in den Strahlengang eingebracht wird. Der Empfänger ist eine CCD-Zeile (1728 Pixel) mit dazu gehörigem Steuergerät, Oszilloskop und Plotter. Als beugende Objekte stehen ein Präzisionsspalt mit veränderlicher Spaltbreite sowie ein Doppelspalt zur Verfügung. Hinweise zur Bedienung der Geräte finden Sie am Versuchsplatz.

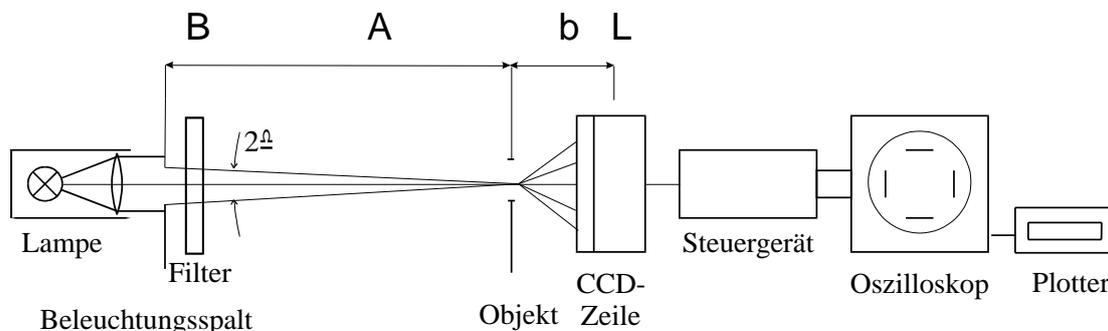


Bild 6: Versuchsaufbau zur Beugung.

3.2 Messung

Als erstes wird der Strahlengang bezüglich der optischen Achse justiert. Das geschieht am besten mit bereits eingesetztem Filter und Beugungsobjekt sowie bei möglichst wenig Fremdlicht, um die Zeile nicht zu übersteuern. Bei kleiner X -Verstärkung am Oszilloskop (z.B. $\text{TIME} = 2\text{ms} / \text{DIV}$) ist dann das Grundsignal der Zeile mit darauf befindlichem (sehr schmalen) Beugungsbild zu sehen. Durch Horizontalverstellen des Objektes wird das Bild in die Nähe des linken Randes gebracht und durch Veränderung der X -Ablenkung auf die gewünschte Breite vergrößert.

Die Höhe des Bildes kann über die Y -Verstärkung am Oszilloskop eingestellt werden. Um ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis zu erzielen, ist aber in erster Linie die Intensität des einfallenden Lichtes zu optimieren, d.h., bei starken Signalen (Kante, breiter Spalt) einen Interferenzfilter und einen schmalen Beleuchtungsspalt verwenden; bei schwachen Signalen den Beleuchtungsspalt weiter öffnen bzw. einen breitbandigen Filter (Hg - Mon) verwenden.

Die Beugungsbilder können am Oszilloskop-Bildschirm vermessen sowie mittels Plotter ausgedruckt werden (Hinweise dazu am Platz).

3.3 Hinweise zu den einzelnen Messaufgaben

Bei allen Mess- und Beobachtungsaufgaben ist es wichtig, die entscheidenden Parameter (Größe des Beleuchtungsspalt, ausgewählter Filter, Größe des Objektes/Spaltbreite und Abstand des Objektes vom Empfänger) zu optimieren und ggf. auch zu dokumentieren.

Diskutieren Sie den Einfluss des Beleuchtungsspalt und der verwendeten Filter unter dem Aspekt der Kohärenz.

zu 1.1

Stellen Sie den geöffneten Spalt (mehrere Maxima) nahe an die CCD-Zeile, optimieren Sie das Bild, und verändern Sie dann die Spaltbreite, so dass nacheinander z.B. 5, 4, 3, 2 Maxima entstehen bis in die Nähe des Fernfeldes (ein Maximum mit je einem angedeuteten Minimum auf jeder Seite). Beschreiben und erklären Sie die Beobachtungen (dazu ggf. auch einzelne Bilder ausdrucken). Berechnen Sie aus Spaltbreite b und Abstand L die Anzahl der Fresnel'schen Elementarzonen, und vergleichen Sie diese mit den realen Bildern.

Überprüfen Sie anhand der Lage des 1. Min. im „Fernfeld“ (Vergleich mit Theoriewert), inwieweit wir uns bei dieser Einstellung bereits dem Fall der Fraunhoferbeugung angenähert haben.

zu 1.2

Überprüfen Sie für den kleinsten Doppelspalt ($a = 0.2$ mm), ob die Lage der Interferenzminima mit den theoretischen Berechnungen (Fernfeld) übereinstimmt.

Beobachten Sie bei den anderen Doppelspalten ($a = 0.3$ mm bzw. $a = 0.4$ mm), wie sich das Bild bei Vergrößerung des Abstandes zum Empfänger qualitativ ändert.

Beobachten Sie das Bild einer Kante (Diarahmen, Rasierklinge, Bleistift, ...) im Nahfeld. Optimieren Sie die Einstellungen, so dass möglichst mehrere Beugungsminima ausgemessen werden können. Vergleichen Sie deren Lage mit der Theorie (Gl.3). Dabei genügt es, die Differenz zwischen den Beugungsordnungen zu betrachten, ansonsten muss der Nullpunkt (geometrische Schattengrenze) etwa dort angenommen werden, wo die Intensität auf $\frac{1}{4}$ abgefallen ist (vgl. Bild 4).