

1 Aufgabenstellung

1. Ausmessen des Beugungsprofils eines Einzelspalt, Bestimmung der Beugungsparameter und Kalibrierung des Spaltes.
2. Bestimmung der Wellenlänge eines Lasers durch Ausmessen des Beugungsprofils an einem kalibrierten Spalt.

2 Grundlagen

1. Unter Beugung des Lichtes versteht man die Abweichung des Lichtweges von den in der Strahlenoptik (geometrischen Optik) geltenden Gesetzmäßigkeiten [1]. Beugung tritt auf, wenn die freie Ausbreitung des Lichtes durch irgendwelche Hindernisse, wie scharfe Kanten, Drähte, Spalte oder Blenden, behindert wird.

Die Abb. 1 zeigt eine Lichtquelle Q im Brennpunkt einer Sammellinse L_1 . Das von L_1 kollimierte (= parallelisierte) Licht leuchtet den Spalt aus. Parallele Lichtstrahlen, die unter einem Winkel α den Spalt verlassen, werden von einer weiteren Sammellinse L_2 auf dem Schirm in einem Punkt gebündelt. Beachten Sie bitte, dass der Schirm damit optisch unendlich weit vom Spalt entfernt steht (parallele Strahlen treffen einander im Unendlichen). Das Beugungsmuster auf einem unendlich weit entfernten Schirm bezeichnet man als *Fraunhofer-Beugung*.

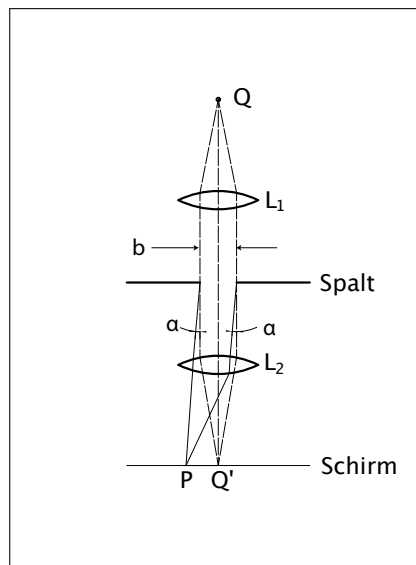


Abbildung 1: Geometrische Verhältnisse bei der Lichtbeugung an einer engen Öffnung (Spalt) [1]. Im Praktikum sind die Lichtquelle Q und die Linse L_1 durch einen Laser ersetzt; an Stelle des Schirms wird eine elektronische Kamera verwendet.

Für $\alpha = 0$ liegt der Bildpunkt Q' auf der optischen Achse. Die *geometrische* Optik liefert auf dem Schirm nur in diesem Punkt Q' Licht: die punktförmige Lichtquelle Q wird in den Punkt Q' abgebildet. Für alle anderen Winkel, beispielsweise den eingetragenen Winkel $\alpha \neq 0$, wäre die Lichtintensität des Punktes P auf dem Schirm gleich Null, wenn die Gesetze der geometrischen Optik (Strahlenoptik) strenge Gültigkeit hätten.

Tatsächlich beobachtet man aber auch bei Winkeln $\alpha \neq 0$ eine von Null verschiedene Lichtintensität. Dies ist durch die Wellennatur des Lichtes verursacht, die zu einer Interferenz der vom Spalt ausgehenden Elementarwellen führt [1]. Beugungsprofile hängen daher von der Wellenlänge des verwendeten Lichtes sowie von der die Interferenz beeinflussende Öffnungsbreite b des Spaltes ab.

Für die Intensitätsverteilung auf dem Schirm gilt die folgende Gleichung [1]:

$$I(\alpha) = I_0 \cdot (\text{sinc } x)^2 \quad (1)$$

mit

$$\operatorname{sinc} x = \frac{\sin x}{x} \quad \text{für } x \neq 0; \quad 1 \quad \text{für } x = 0 \quad (2)$$

und

$$x = \frac{\pi b \sin \alpha}{\lambda}. \quad (3)$$

In x gehen neben der Zahl π ein: die Öffnungsbreite b des Spaltes, der Sinus des Winkels α des Lichtsstrahls relativ zur optischen Achse sowie die Wellenlänge λ des verwendeten Lichtes. I_0 ist die Intensität für $\alpha = 0$.

Die Funktion 2 wird auch als *Sinus Cardinalis* oder als sinc bezeichnet. Intensitätsverteilung Die Funktionen $\operatorname{sinc}(x)$ und $(\operatorname{sinc}(x))^2$ sind in der Abb. 2 auf S. 3 dargestellt. Beachten Sie:

- Die $\operatorname{sinc}(x)$ -Funktion nimmt sowohl positive als auch negative Werte an. Diese entsprechen der *Amplitude* des Lichtes auf dem Schirm.
- Die Funktionswerte von $(\operatorname{sinc}(x))^2$ sind stets positiv. Sie entsprechen der Intensitätsverteilung des Lichtes (Quadrat der Amplitude [1]) auf dem Schirm S .

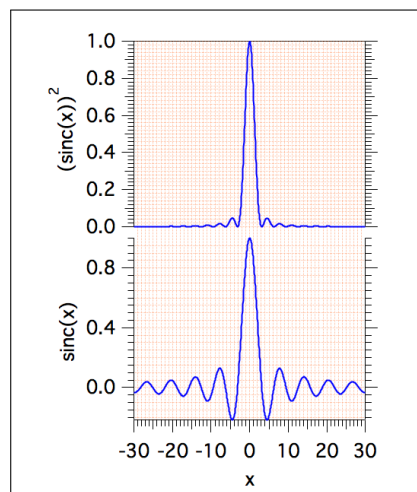


Abbildung 2: Die Funktionen $\operatorname{sinc}(x) = \frac{\sin x}{x}$ (unten) und deren Quadrat (oben).

3 Experimenteller Aufbau

Verwendete Geräte Statt der in der Abb. 1 gezeigten Kombination aus einer punktförmigen Lichtquelle und einer Sammellinse L_1 wird im Praktikum Laserstrahlung verwendet. Laserstrahlung ist von vorneherein parallel, so dass sich auch ohne L_1 ein Quellpunkt im Unendlichen ergibt.

Auf einer optischen Bank sind vorjustiert aufgebaut:

1. Ein Helium-Neon-Laser (Laserklasse II) mit einer Wellenlänge von $\lambda = 632,816 \text{ nm}$.
2. ein oder mehrere Polarisationsfilter zur Abschwächung des Lasers,
3. ein justierbarer Einzelspalt (Newport) mit einer Feingewindeschraube zur Einstellung der Spaltbreite,
4. Eine ansteuerbare (Computer) Monochrom-Kamera mit einem CMOS-Chip zur Aufnahme von Beugungsbildern, die den Schirm aus Abb. 1 ersetzt.

Weiterhin steht ein zweiter Laser unbekannter Wellenlänge zur Verfügung.

Durchführung

1. Zur Aufnahme der Beugungsbilder wird eine Monochrom-Kamera (uEye 1222, IDS) mit einer optisch empfindlichen Fläche von $4,512 \text{ mm} \times 2,880 \text{ mm}$ verwendet. Die Kamera wird von einem Rechner angesteuert, an den die Kamera über einen USB-Bus angeschlossen ist. Auf dem Rechner wird das Programm „uEye Cockpit“ gestartet.
2. Der Laser wird in einer optischen Bank auf den Spalt ausgerichtet. Der Spalt muss senkrecht zur Laserstrahlung aufgestellt sein.
3. Zwischen Spalt und Kamera befindet sich eine Sammellinse, in deren Brennpunkt der CMOS-Chip der Kamera liegt. Die Linse muss entsprechend ausgerichtet werden.
4. Es wird eine Aufnahme des Beugungsbildes vorgenommen. Das Intensitäts-

profil der Aufnahme wird erstellt. Zur Ermittlung der Intensität der Nebenmaxima nutzen wir die Software Igor Pro, die allen Studenten im Praktikum zur Verfügung steht. Gehen Sie wie folgt vor:

- a) Speichern Sie das Bild mit Hilfe der Kamera-Software im Format „BMP“ ab (Bitmap).
- b) Aktivieren Sie das Bildbearbeitungspaket innerhalb von Igor Pro: Analysis → Packages → Image Processing. Sie erhalten ein neues Menü „Image“ in Igor.
- c) Lesen Sie das abgespeicherte Bild (BMP-Format) in Igor ein (Igor → Data → Load Waves → Load Images...). Sie erhalten eine Dialogbox wie in Abb. 3 gezeigt. Wählen Sie die Datei mittels des Buttons File... aus. Mit den in Abb. 3 gezeigten Einstellungen lädt Igor die Bitmap-Datei als Wave, deren Namen dem Dateinamen der Bitmap-Datei entspricht und stellt das Bild automatisch graphisch dar.

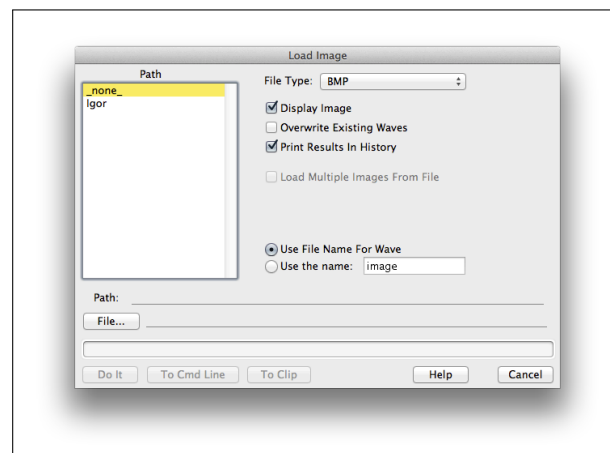


Abbildung 3: Dialogbox in Igor Pro zur Auswahl einer Bitmap-Datei

- d) Erzeugen Sie das Intensitätsprofil des Bildes: Image → Image Line Profiles . . . Es erscheint automatisch eine neue Abbildung, die das Intensitätsprofil des Bildausschnittes zeigt, der durch blaue Linien umgrenzt ist. Dies ist in den Abb. 4 und 5 gezeigt. Wählen Sie einen geeigneten Bereich des Bildes aus, indem Sie die Parameter *width* und *position* des Image Line Profiles variieren.

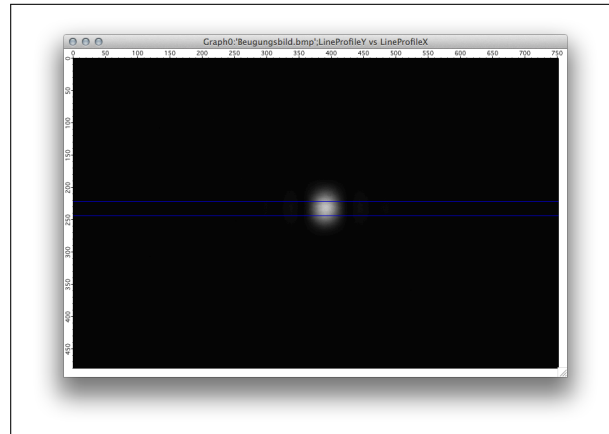


Abbildung 4: Graphische Darstellung eines Beugungsbildes (Bitmap-Datei) in Igor Pro. Die für Beugungsmuster typischen Minima und Maxima können mit bloßem Auge nicht erkannt werden, da die Intensität der Nebenmaxima zu schwach ist.

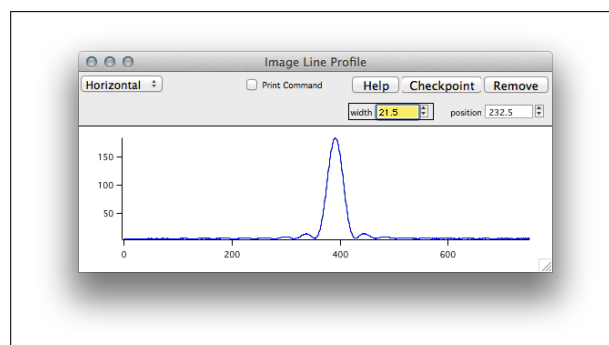


Abbildung 5: In Igor Pro erzeugtes Intensitätsprofil der Daten aus Abb. 4.

Das erste von Ihnen erzeugte Intensitätsprofil wird möglicherweise die folgenden Probleme aufweisen:

- i. die Nebenmaxima sind zu intensiv - Hinweis auf Sättigung der CCD im Hauptmaximum (Nullte Beugungsordnung). Die Intensität des ersten Nebenmaximums muss $< 5\%$ der Intensität des Hauptmaximums (Nullte Beugungsordnung) sein. Abhilfe: Verringern der Belichtungszeit; Abschwächen der Intensität des Lasers mit Hilfe eines Polarisationsfilters.
- ii. die Intensität der Nebenmaxima links und rechts vom Hauptmaximum ist nicht symmetrisch - Hinweis auf eine unzulängliche Ausrichtung des Spaltes (rechter Winkel zur einfallenden Laserlicht)

Es werden weitere Bilder aufgenommen und das Profil analysiert, bis keine Sättigungseffekte mehr zu beobachten sind. Dies ist Ihr erstes auswertbares Bild. Das Profil muss noch auf den tatsächlichen x-Achsen-Bereich des Chips der Kamera skaliert werden. Verwenden Sie hierzu den Befehl

```
setscale x, -2.256, 2.256, <wavename>
```

worin `wavename` der Name der Wave ist, die das Profil enthält.

- e) Die Erstellung auswertbarer Bilder wird für mindestens fünf verschiedene Spaltbreiten wiederholt und jeweils nachfolgend das Intensitätsprofil erstellt. Orientieren Sie sich dabei an der Position der Mikrometerschraube des Einzelspaltes und verwenden Sie Schraubenpositionen in Absprache mit dem Assistenten. Bei Verringerung der Spaltbreite muss die Belichtungszeit bzw. die Winkelposition des Polarisationsfilters nachjustiert werden, damit auswertbare Bilder entstehen.
- f) Der Versuch wird für eine Spaltbreite von ca. $250 \mu\text{m}$ unter Zuhilfenahme der sich aus der vorherigen Aufgabe ergebenden Kalibrierkurve mit mehreren Lasern unbekannter Wellenlänge wiederholt. Auch für diese Versuche wird das Intensitätsprofil erstellt.

Auswertung

- Die Intensitätsprofile der Beugungsbilder werden mittels Gl. 1 ausgewertet. Hierzu muss Gl. 1 als „Fitfunktion“ in Igor Pro genutzt werden. Die entsprechende Fitfunktion ist im Anhang dieser Skripte eingetragen.

Zur Bestimmung der Spaltbreite wird die Fitfunktion $\text{sinc2_SB}(w, x)$ genutzt. Ihre Anwendung auf ein typisches Beugungsprofil wird in der Abbildung 6 gezeigt.

Damit ist die Spaltbreite für das verwendete Profil bestimmt.

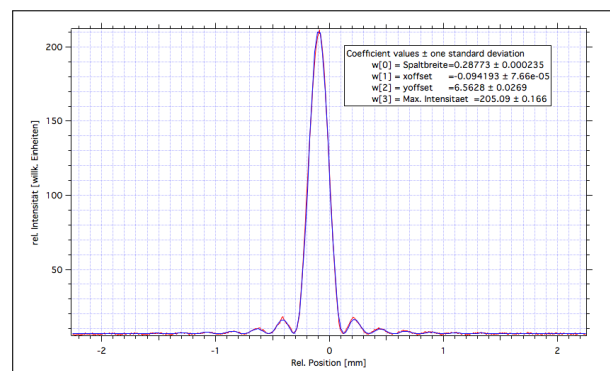


Abbildung 6: Nutzung der Anpassungsfunktion $\text{sinc2_SB}(w, x)$ zur Bestimmung der absoluten Breite des Beugungsspaltes.

- Fertigen Sie eine Graphik an, deren Abszisse die Einstellung an der Mikrometerschraube und deren Ordinate die ermittelte absolute Spaltbreite zeigt.
- Bestimmen Sie aus dem Intensitätsprofil des grünen Lasers seine Wellenlänge. Nutzen Sie hierzu die Anpassungsfunktion $\text{sinc2_WL}(w, x)$, die Sie ebenfalls im Anhang finden. Diese Funktion müssen Sie geringfügig modifizieren: in der Zeile

```
variable Spaltbreite = 0.1
```

muss der Wert 0.1 ersetzt werden durch die absolute Spaltbreite in mm, die Sie aus Ihren vorherigen Messungen für die Mikrometerschrauben-Einstellung „25“ erhalten haben.

Literatur

[1] H. Gobrecht (Hrsg): Bergmann Schaefer Lehrbuch der Experimentalphysik Band III Optik, de Gruyter, Berlin 1978.

Kommentar: dieses Buch ist in der Institutsbibliothek verfügbar und enthält eine sehr gut nachvollziehbare Erklärung der Beugungsphänomene am Einzelspalt, insbesondere eine gute und anschauliche Herleitung der Gl. 1.

Anhang Igor-Funktion zur Analyse der Beugungsprofile:

Ermittlung der Spaltbreite

```
Function sinc2_SB(w,x) : FitFunc
Wave w
Variable x
//w[0] = Spaltbreite
//w[1] = xoffset
//w[2] = yoffset
//w[3] = Intensitaet
variable dSL = 100 // Abstand Spalt - Linse
return (w[3]*(sinc((pi*w[0]*sin(atan((x-w[1])
/dSL))))/(6.32816e-4))^2) +w[2])
end
```

Die mit return beginnende Zeile und die nachfolgende Zeile sind in eine Zeile zu schreiben.

Ermittlung der Wellenlänge

```
Function sinc2_WL(w,x) : FitFunc
Wave w
Variable x

//w[0] = Wellenlaenge
//w[1] = xoffset
//w[2] = yoffset
//w[3] = Intensitaet
```

```
variable Spaltbreite = 0.1 // in mm, muss aktualisiert werden
variable dSL = 100 // Abstand Spalt - Linse
return (w[3]*(sinc((pi*Spaltbreite*sin(atan((x-w[1])/dSL)))/
    (w[0]))^2)+w[2])
end
```

Die mit return beginnende Zeile und die nachfolgende Zeile sind in eine Zeile zu schreiben. Die eingetragene Spaltbreite muss ersetzt werden durch die tatsächlich genutzte Spaltbreite in der Einheit mm, damit die richtige Wellenlänge ermittelt wird.

Version: 09.03.2015 — Flesch, Pohl