4.1. Fraunhofer'sche Beugung am Spalt

Ziel

1. Bestimmung der mittleren Durchlasswellenlänge eines Interferenzfilters.
2. Qualitative Beobachtung von Beugungserscheinungen an verschieden großen Spalt- und Lochblenden.

Hinweise zur Vorbereitung

Die Antworten auf diese Fragen sollten Sie vor der Versuchdurchführung wissen. Sie sind die Grundlage für das Gespräch mit Ihrer Tutorin/Ihrem Tutor vor dem Versuch. Informationen zu diesen Themen erhalten Sie in der unten angegebenen Literatur.

1.
   - Was ist Kohärenz? Was besagt die Verdet'sche Kohärenzbedingung?
   - Was ist Beugung?
   - Was besagt das Huygens'sche Prinzip?
   - Was ist Intereferenz? Wann tritt konstruktive, wann destruktive Interferenz auf?
   - Wie funktioniert ein Interferenzfilter?
   - Was ist der Unterschied zwischen Fraunhofer'sche Beugung und Fresnel'sche Beugung?
   - Bei welchen Winkeln liegen bei der Beugung am Spalt die Mimima?
   - Wie sieht das Interferenzmuster qualitativ aus (Intensität aufgetragen über Beugungswinkel)?
2. **für alle Physik-Studiengänge (B.Sc. und B.Ed.):**
   - Was besagt das Babinet'sches Theorem?

Zubehör

- Hg-Dampf-Lampe
- Kondensorlinse $f = 65\,\mathrm{mm}$
- 2 Linsen $f = 200\,\mathrm{mm}$
- 1 Linse $f = 80\,\mathrm{mm}$ zur Verwendung als „Mikroskopobjektiv“
- 1 Okular auf Messspindel
- 1 Interferenzfilter
- 2 Lochblenden mit stufenweise veränderbarem Lochdurchmesser

© Bernd-Uwe Runge, Physikalisches Anfängerpraktikum der Universität Konstanz — zum internen Gebrauch bestimmt
Diese Anleitung ersetzt NICHT den Grundlagenteil Ihres Praktikumsberichtes! Haben Sie Verbesserungsvorschläge?
last change to this section: Revision: 1633 , Date: 2023-05-25 13:48:41 +0200 (Do, 25 Mai 2023)
Gesamtversion: kompiliert am 6. Dezember 2024 um 9:42 Uhr UTC

- 2 Spaltblenden, mindestens eine davon (als Beugungsspalt) mit Mikrometerschraube
- 1 Kalibriermaßstab aus graviertem Plexiglas

Grundlagen

Die Beugung am Einzelspalt gehört zu den grundlegenden Phänomenen der Optik und kann daher sehr einfach in der Literatur nachgelesen werden (siehe Literaturangaben am Ende der Versuchsanleitung).

Versuchsdurchführung

SICHERHEITSHINWEIS: Auf keinen Fall in das nicht genügend abgedunkelte Licht der Quecksilberdampflampe blicken! Dadurch könnte die Netzhaut beschädigt werden. Immer das Filter[1] benutzen und den Beleuchtungsspalt eng genug halten.

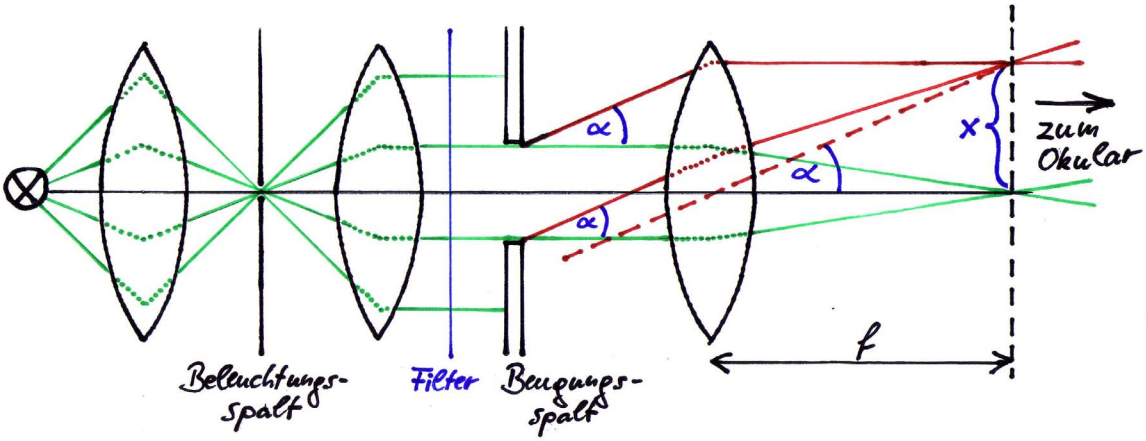

Abbildung 4.1.1.: Strahlengang zur Untersuchung der Fraunhofer'schen Beugungserscheinungen an einem Spalt.

1. Bauen Sie den Strahlengang nach Abbildung 4.1.1 auf. Lassen Sie aber den *Beugungs*spalt zunächst noch weg.
2. Verschieben Sie die Kondensorlinse, um den *Beleuchtungs*spalt möglichst gut auszuleuchten.
3. Stellen Sie die erste Abbildungslinse ($f = 200\,\mathrm{mm}$) etwa im Abstand der Brennweite f vor den Beleuchtungsspalt, um paralleles Licht zu erzeugen.

   Überprüfen Sie die Parallelität mit dem Verfahren der Autokollimation.[2]

[1] Fachsprachlich heißt es laut Duden meist „das Filter“, sonst „der Filter“ [dud00].

[2] Bei der Autokollimation wird in einem beliebigen Abstand hinter der Sammellinse ein ebener Spiegel aufgestellt, der das Licht durch die Linse auf den Spalt zurückwirft. Als Spiegel eignet sich z. B. gut

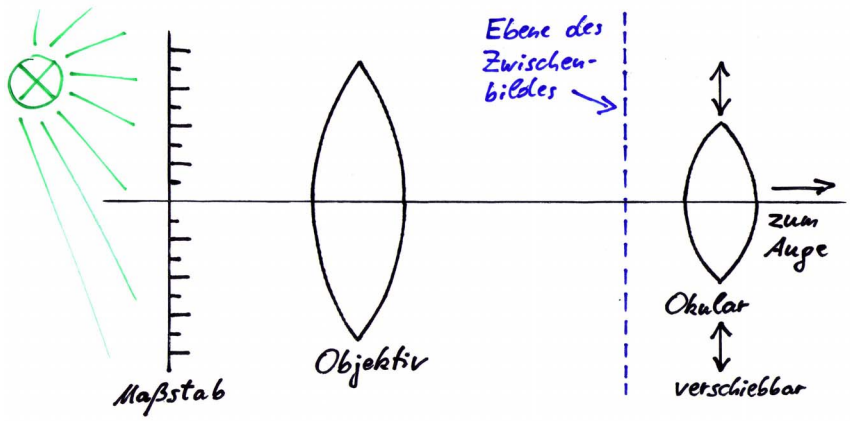

Abbildung 4.1.2.: Strahlengang zur Vermessung der Spaltöffnung (Kalibrierung der Mikrometerschraube). Die Beleuchtung erfolgt dabei zweckmäßigerweise einfach durch die bewegliche Schreibtischlampe.

4. Stellen Sie den *Beleuchtungs*spalt sehr eng ein und beobachten Sie ihn durch das Okular, während Sie die zweite Abbildungslinse so lange verschieben, bis Sie ein scharfes Bild des Spaltes sehen.

5. Bringen Sie nun den *Beugungs*spalt in den Strahlengang.

6. Messen Sie für mehrere Beugungsordnungen die Strecke, um die Sie die Messspindel verschieben müssen (wodurch das Okular bewegt wird), um von einem Maximum $+n$-ter Ordnung (rechts von der zentralen 0. Ordnung) zum entsprechenden Maximum $-n$-ter Ordnung (links von der zentralen 0. Ordnung) zu kommen. Berücksichtigen Sie hierbei unbedingt den „toten Gang“ der Messspindel.[3]

7. Wiederholen Sie Punkt 6 für insgesamt mindestens fünf verschiedene Breiten des Beugungsspaltes. Notieren Sie dabei jeweils die Spaltbreite (Stellung der Mikrometerschraube) und vermeiden Sie auch hier den „toten Gang“.

8. Wenn Sie den *Beleuchtungs*spalt immer weiter öffnen, wird das Interferenzmuster zwar heller, verschwimmt aber dabei auch mehr und mehr.

die verspiegelte Seite eines Interferenzfilters. Die Linse wird nun so lange verschoben, bis das Bild des Spaltes wieder genau auf den Spalt fällt (bzw. bei leicht gegen die Strahlrichtung verdrehter Spiegelfläche ein kleines Stück daneben auf die Spaltbegrenzung, was leichter zu kontrollieren ist). Dann ist der Strahl zwischen Linse und Spiegel parallel, denn eine Linse wandelt ja Licht, das von einem beliebigen Punkt der Brennebene kommt in einen Parallelstrahl um bzw. bündelt umgekehrt einen Parallelstrahl in einem Punkt der Brennebene.

[3] Unter „totem Gang“ versteht man den Effekt, dass sich bei Umkehr der Drehrichtung zwar das Betätigungselement (hier das Rad) sofort in die andere Richtung bewegt, das zu verstellende Element (also in diesem Fall das Okular oder der Beugungsspalt) aber zunächst noch in Ruhe bleibt, was auf mechanische Toleranzen zurückzuführen ist. Man vermeidet die daraus entstehenden Fehler, indem man alle Einstellungen *immer von der gleichen Seite her* kommend durchführt.

© Bernd-Uwe Runge, Physikalisches Anfängerpraktikum der Universität Konstanz — zum internen Gebrauch bestimmt
Diese Anleitung ersetzt NICHT den Grundlagenteil Ihres Praktikumsberichtes! Haben Sie Verbesserungsvorschläge?
last change to this section: Revision: 1633 , Date: 2023-05-25 13:48:41 +0200 (Do, 25 Mai 2023)
Gesamtversion: kompiliert am 6. Dezember 2024 um 9:42 Uhr UTC

Beobachten und notieren Sie qualitativ, wie die größte *Beleuchtungs*spaltbreite, bei der gerade noch ein Interferenzmuster zu erkennen ist, von der *Beugungs*spaltbreite abhängt.

9. Drehen Sie den Beleuchtungsspalt horizontal. Sehen Sie noch Beugungserscheinungen? Warum?

   Betrachten Sie qualitativ einige Beugungserscheinungen an Lochblenden. Stellen Sie auch selbst eine sehr feine Lochblende her, indem Sie mit einer Nadel ein kleines Loch in eine Aluminiumfolie stechen. Führen Sie das Ergebnis Ihrer Betreuerin/Ihrem Betreuer vor.

   Hinweis: Damit das Loch nicht zu groß wird, empfiehlt es sich, die Aluminiumfolie auf eine harte Unterlage zu legen und auch mit der Nadel nicht zu fest aufzudrücken. Das Loch darf mit bloßem Auge kaum sichtbar sein. Natürlich ist dadurch die Lichtintensität stark herabgesetzt, so dass die Umgebungshelligkeit im Raum für diesen Versuchsteil besonders niedrig sein sollte.

10. Aufgrund der Bauweise des Beugungsspaltes entspricht die Größe der Spaltöffnung nicht direkt dem Verstellweg der Mikrometerschraube, so dass eine Kalibriermessung nötig ist, um den Zusammenhang experimentell zu bestimmen.
    Bauen Sie dazu aus der Linse und dem Okular ein „Kalibriermikroskop“ (Abbildung 4.1.2) und kalibrieren Sie mit dessen Hilfe die Skala der Mikrometerschraube des *Beugungs*spaltes:[4]

    a) Zur Kalibrierung der Öffnung des Beugungsspaltes wird nur der gravierte Plexiglasmaßstab, eine Linse mit $f = 80\,\mathrm{mm}$ (oder auch $f = 65\,\mathrm{mm}$, das ergibt sogar eine höhere Vergrößerung) und das Okular auf der Messspindel benötigt. Zur Beleuchtung des Maßstabes genügt die Glühlampe am Tisch. Der übrige Aufbau muss weitgehend entfernt werden, um auf der optischen Bank genügend Platz für den Strahlengang zu schaffen (siehe auch Abbildung 4.1.2).

    b) Bilden Sie zunächst den Kalibriermaßstab mit der Linse so ab, dass Sie durch das Okular ein scharfes Bild sehen.

    c) Bestimmen Sie das Vergrößerungsverhältnis Ihres „Mikroskops“, indem Sie messen, wie weit Sie das Okular verschieben müssen, um das Fadenkreuz um eine bestimmte Strecke auf dem Maßstab zu verschieben (den toten Gang nicht vergessen).

    d) Entfernen Sie den Maßstab und setzen Sie den Beugungsspalt an seine Stelle. Vermessen Sie mindestens fünf verschiedene Spaltbreiten.

Auswertung

1. Bestimmen Sie aus den Ergebnissen der Punkte 6 und 10 der Versuchsdurchführung die mittlere Durchlasswellenlänge des Interferenzfilters.

[4] Zu den Begriffen „kalibrieren“ und „eichen“ siehe auch Abschnitt K.1 auf Seite 893.

© Bernd-Uwe Runge, Physikalisches Anfängerpraktikum der Universität Konstanz — zum internen Gebrauch bestimmt
Diese Anleitung ersetzt NICHT den Grundlagenteil Ihres Praktikumsberichtes! Haben Sie Verbesserungsvorschläge?
last change to this section: Revision: 1633 , Date: 2023-05-25 13:48:41 +0200 (Do, 25 Mai 2023)
Gesamtversion: kompiliert am 6. Dezember 2024 um 9:42 Uhr UTC

Fragen und Aufgaben

1. Wieso treffen die am Spalt gebeugten Strahlen die rechte Brennebene der Linse L2 im Abstand $x = f \cdot \tan\alpha$ (Bezeichnungen siehe Abbildung 4.1.1)?

2. Warum soll das Interferenzfilter in dem Bereich aufgestellt werden, in dem die Strahlen parallel verlaufen?

3. Beweisen Sie, dass der optische Gangunterschied $\triangle x$ zweier benachbarter die Kristallschicht verlassender Strahlen vom Einfallswinkel α wie folgt abhängt:

$$\triangle x = 2d\sqrt{n^2 - (\sin\alpha)^2} \tag{4.1.1}$$

   mit

$$n = \text{Brechungsindex der Kristallschicht,}$$
$$d = \text{Dicke der Kristallschicht.}$$

4. Wird das von einem Interferenzfilter durchgelassene Licht kurzwelliger oder langwelliger, wenn das Licht nicht senkrecht sondern schräg auf die Filterebene trifft (Einfallswinkel also $\alpha > 0°$)?
   Begründen Sie Ihre Antwort anhand der Ergebnisse von Aufgabe 3.

5. Beweisen Sie mit Hilfe des Huygens'schen Prinzips, dass bei Fraunhofer'scher Beugung am Spalt die folgende Beziehung für die Winkel zu den Minima gilt:

$$\alpha_{\min,n} = \arcsin\frac{n \cdot \lambda}{d} \tag{4.1.2}$$

6. Wozu dient der Beleuchtungsspalt?
   Was ist kohärentes Licht?

7. Erklären Sie qualitativ, warum die Interferenzmuster verschwinden, wenn der Spalt zu weit geöffnet wird (siehe z. B. [Wal04]).

8. Wieso ist für die Interferenz beim Interferenzfilter kein Beleuchtungsspalt erforderlich?[5]

9. Warum sind Interferenzfilter meist auf einer Seite silbrig verspiegelt, während die andere Seite farbig aussieht?

10. Wie werden Linsen und Brillengläser „entspiegelt"?

[5] Gleiches gilt z. B. auch bei Seifenblasen und dünnen Ölfilmen auf Regenpfützen.

© Bernd-Uwe Runge, Physikalisches Anfängerpraktikum der Universität Konstanz — zum internen Gebrauch bestimmt
Diese Anleitung ersetzt NICHT den Grundlagenteil Ihres Praktikumsberichtes! Haben Sie Verbesserungsvorschläge?
last change to this section: Revision: 1633 , Date: 2023-05-25 13:48:41 +0200 (Do, 25 Mai 2023)
Gesamtversion: kompiliert am 6. Dezember 2024 um 9:42 Uhr UTC

11. **für alle Physik-Studiengänge (B.Sc. und B.Ed.):** Beweisen Sie die Verdet'sche Kohärenzbedingung[6]

$$D \cdot \sin\vartheta \leq \lambda \tag{4.1.3}$$

mit

$$\begin{aligned} D &= \text{Breite des Beleuchtungsspaltes,} \\ \vartheta &= \text{halber effektiver Öffnungswinkel} \\ &\quad\ \text{vom Beleuchtungsspalt zum Beugungsspalt,} \\ \lambda &= \text{Wellenlänge.} \end{aligned}$$

Hinweis: Sie finden diese Bedingung in der Literatur häufig unter dem Stichwort „Kohärenz ausgedehnter Lichtquellen".

Literaturhinweise

Die Beugung am Einzelspalt gehört zu den grundlegenden Phänomenen der Optik und ist daher in jedem Standardlehrbuch beschrieben, z. B. [GGG78, Vog95, TM04].
Einige zusätzliche Kommentare insbesondere auch zur Verdet'schen Kohärenzbedingung finden sich in [Wal04].
Literaturwerte zu den Spektrallinien des Quecksilbers: [SSR96, RSB96, BD00].

Literaturverzeichnis

[BD00] Bare, William D. and J. N. Demas: *Monochromator wavelength calibration standards extending into the near-infrared using second- and third-order emission lines from mercury vapor lamps.* Journal of Fluorescence, 10(4):317–324, 2000.

[dud00] *Duden*, Band 1: Die deutsche Rechtschreibung. Dudenverlag, Mannheim · Leipzig · Wien · Zürich, 22. Auflage, 2000.

[GGG78] Gobrecht, Heinrich, Jens H. Gobrecht und Klaus H. Gobrecht (Herausgeber): *Bergmann-Schaefer – Lehrbuch der Experimentalphysik*, Band III: Optik. Walter de Gruyter, Berlin, 7. Auflage, 1978.

[RSB96] Reader, Joseph, Craig J. Sansonetti, and J. Mervin Bridges: *Irradiances of spectral lines in mercury vapor lamps.* Applied Optics, 35(1):78–83, 1996.

[6] Die Verdet'sche Kohärenzbedingung bezieht sich nur auf die *räumliche* Kohärenz (siehe Seite 356). Mit Licht, das eine zu geringe *zeitliche* Kohärenz aufweist, erhält man selbst bei Einhalten dieser Bedingung keine Interferenzmuster.

© Bernd-Uwe Runge, Physikalisches Anfängerpraktikum der Universität Konstanz — zum internen Gebrauch bestimmt
Diese Anleitung ersetzt NICHT den Grundlagenteil Ihres Praktikumsberichtes! Haben Sie Verbesserungsvorschläge?
last change to this section: Revision: 792 , Date: 2017-04-03 16:54:28 +0200 (Mo, 03 Apr 2017)
Gesamtversion: kompiliert am 6. Dezember 2024 um 9:42 Uhr UTC

[SSR96] Sansonetti, Craig J., Marc L. Salit, and Joseph Reader: *Wavelengths of spectral lines in mercury vapor lamps.* Applied Optics, 35(1):74–77, 1996.

[TM04] Tipler, Paul A. und Gene Mosca: *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure.* Elsevier GmbH, München, 2. Auflage, 2004. (2. Auflage der deutschen Übersetzung 2004 basierend auf 5. Auflage der amerikanischen Originalausgabe 2003).

[Vog95] Vogel, Helmut: *Gerthsen - Physik.* Springer-Verlag, Berlin · Heidelberg, 18. Auflage, 1995.

[Wal04] Walcher, Wilhelm: *Praktikum der Physik.* B. G. Teubner-Verlag, Stuttgart · Leipzig · Wiesbaden, 8. Auflage, 2004.

© Bernd-Uwe Runge, Physikalisches Anfängerpraktikum der Universität Konstanz — zum internen Gebrauch bestimmt
Diese Anleitung ersetzt NICHT den Grundlagenteil Ihres Praktikumsberichtes! Haben Sie Verbesserungsvorschläge?
last change to this section: Revision: 792 , Date: 2017-04-03 16:54:28 +0200 (Mo, 03 Apr 2017)
Gesamtversion: kompiliert am 6. Dezember 2024 um 9:42 Uhr UTC