

4.2. Gitter: Beugung und spektrales Auflösungsvermögen

Ziel

Von besonderer Bedeutung sind **Beugungserscheinungen** an mehreren nebeneinanderliegenden gleichen Öffnungen. Im vorliegenden Fall wird eine Anzahl schmaler paralleler Spalte, ein sogenanntes „Gitter“ betrachtet. Dies wurde erstmalig im Jahre 1821 von J. v. Fraunhofer durchgeführt.

Im Praktikumsversuch sollen verschiedene Gitter untersucht und dabei der Begriff des **spektralen Auflösungsvermögens** anschaulich vermittelt werden.

Hinweise zur Vorbereitung

Die Antworten auf diese Fragen sollten Sie vor der Versuchsdurchführung 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.

- Was ist Kohärenz? Was besagt die verdetsche Kohärenzbedingung?
- Was ist Beugung?
- Was besagt das Huygenssche Prinzip?
- Was ist Interferenz? Wann tritt konstruktive, wann destruktive Interferenz auf?
- Wie funktioniert ein Interferenzfilter?
- Was ist der Unterschied zwischen Fraunhoferscher Beugung und Fresnelscher Beugung?
- Unter welchen Winkeln sind bei der Beugung am Gitter die Maxima zu finden?
- Was versteht man unter dem spektralen Auflösungsvermögen eines Gitters?

Zubehör

- Hg-Dampf-Lampe
- Kondensorlinse, $f_1 = 65 \text{ mm}$
- verstellbarer Beleuchtungsspalt
- Sammellinse, $f_2 = 200 \text{ mm}$
- Interferenzfilter, Mittenwellenlänge $\lambda = 578 \text{ nm}$ (gelb)
- einschichtiges Drahtgitter, Drahtstärke 0.2 mm , Gitterkonstante $g_1 = 0.4 \text{ mm}$

- zweischichtiges Drahtgitter, Drahtstärke 0.2 mm, Gitterkonstante jeweils $g_1 = 0.4$ mm
- Glasgitter, Gitterkonstante $g_2 = ?$, mit davor angebrachtem verstellbarem Zusatzspalt zur Begrenzung der Zahl der beleuchteten Gitteröffnungen
- Fernrohr ca. $12\times$ komplett montiert aus Teleobjektiv (ca. $1.2\times$, $f_3 \approx 300$ mm) und Okular ($10\times$, $f_4 = 25$ mm) (zur Funktionsweise vgl. die Versuche „optische Instrumente“ und Linsengesetze“)
- Drehtisch mit über Messspindel und Hebelarm einstellbarem Drehwinkel

Grundlagen

Beugung

Unter Beugung versteht man die Abweichung des Lichtweges von den Gesetzen der geometrischen Optik durch Interferenz bei Wechselwirkung mit Objekten, deren Abmessungen mit der Wellenlänge des Lichtes vergleichbar sind.

Man unterscheidet die Begriffe Beugung, Streuung und Brechung, wobei alle drei Phänomene zur Abweichung vom geraden Lichtweg führen.

Von **Brechung** spricht man beim Übergang zwischen Medien verschiedener „Brechzahl“, dahinter verbirgt sich letztlich die Lichtgeschwindigkeit im Medium. Durch Brechung an einer ebenen Grenzfläche wird eine ebene Welle dabei i. Allg. (abgesehen vom hier nicht betrachteten Phänomen der Doppelbrechung) wieder in eine ebene Welle überführt, die sich nur in einer anderen Richtung ausbreitet. An gekrümmten Grenzflächen (z. B. Linsen) kann auch die Form der Wellenfront verändert werden.

Als **Beugung** wird üblicherweise bezeichnet, wenn aus einer einfallenden Welle ein Teil geschwächt (absorbiert) oder in seiner Phase verschoben wird (z. B. am sog. Amplituden- bzw. Phasen-Gitter), so dass die Form der Wellenfront dadurch verändert wird. Die sich neu ergebende Wellenfront kann man mit Hilfe des Huygensschen Prinzips (Überlagerung von Elementarwellen) bestimmen. Beugung beruht auf Interferenz kohärenter Wellen (s. u.). Die Frequenz der Welle ändert sich dabei nicht.

Für **Streuung** ist auf jeden Fall die Anwesenheit von Materie („Streukörpern“) notwendig. Diese kann z. B. durch die einfallende Lichtwelle zu erzwungenen Schwingungen angeregt werden. In der Folge kommt es zur *Abstrahlung* elektromagnetischer Wellen („Streulicht“), die sich mit der einfallenden Welle überlagern. Je nach Streukörper und Art der Wechselwirkung kann es durch Streuung auch zu einer Änderung der Frequenz der gestreuten Welle kommen (z. B. bei der Compton-Streuung von Photonen an Elektronen).

Die Übergänge zwischen den verschiedenen Prozessen sind manchmal fließend. So ist z. B. bei der sog. Mie-Streuung die Interferenz der gestreuten Lichtwellen ganz wesentlich. Das Problem kommt daher, dass die Begriffe zu einer Zeit geprägt wurden, als ein Verständnis von Licht als elektromagnetische Welle noch nicht gegeben war. Aus der heutigen Sichtweise handelt es sich jeweils nur um verschiedene Grenzfälle des im Grunde immer gleichen Vorgangs der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen und ihrer Wechselwirkung mit Materie.

Kohärenz

Wellen werden als kohärent bezeichnet, wenn sie eine feste Phasenbeziehung zueinander aufweisen¹. Der Begriff ist abgeleitet von ⟨lat.⟩ *cohaerere* = zusammenhängen.

Es muss unterschieden werden zwischen zeitlicher und räumlicher Kohärenz. Unter **zeitlicher Kohärenz** versteht man die Beziehung zwischen den Phasen eines Wellenfeldes an einem bestimmten Ort zu verschiedenen Zeiten. Die **räumliche Kohärenz** gibt an, wie die Phasen an verschiedenen Orten eines Wellenfeldes zu einem bestimmten Zeitpunkt zueinander in Beziehung stehen.

¹Dazu müssen sie i. Allg. zunächst einmal die gleiche Wellenlänge haben.

Interferenz

Interferenz nennt man eine Überlagerung zweier oder mehrerer kohärenter (s. o.) Wellen, bei der es zu gegenseitiger Verstärkung oder Abschwächung dieser Wellen kommt. Addiert man beispielsweise zwei harmonische (= sinusförmige) Wellen mit gleicher Wellenlänge (im Falle von Transversalwellen außerdem gleicher Polarisation) aber unterschiedlicher Phase, so erhält man wiederum eine harmonische Welle, deren Amplitude von den Einzelamplituden *und der Phasendifferenz* abhängt. Beträgt die Phasendifferenz 0 oder ein ganzzahliges Vielfaches von 2π (bzw. 360°), so verstärken sich die Wellen gegenseitig. Man sagt, sie sind *in Phase* und *interferieren konstruktiv*. Die resultierende Amplitude ist die Summe der Einzelamplituden. Bei einer Phasendifferenz von π (bzw. 180°) oder einem ungeradzahligem Vielfachen davon schwächen sich die Wellen gegenseitig. Man sagt, sie sind *in Gegenphase* und *interferieren destruktiv*. Die resultierende Amplitude ist dann die Differenz der Einzelamplituden. Im Spezialfall gleicher Einzelamplituden ergibt sich also die Gesamtamplitude null, d. h. die Wellen löschen sich gegenseitig komplett aus.

Da im Fall von Licht meist keine Amplituden, sondern nur Intensitäten beobachtet werden können, bezeichnet man üblicherweise jede Abweichung von der Additivität der Intensitäten als Interferenz. Allerdings reicht bei Licht die Kohärenz allein als Bedingung noch nicht aus, um eine solche Abweichung zu erzeugen. Da es sich bei Lichtwellen um Transversalwellen handelt, dürfen sie außerdem nicht senkrecht zueinander polarisiert sein, denn sonst wäre die Additivität der Intensitäten wieder erfüllt und es wären keine Interferenzerscheinungen zu beobachten.

Fraunhofersche Beugung

Bei fraunhoferscher und fresnelscher Beugung handelt es sich nur um zwei unterschiedliche Arten, Beugung zu beobachten, *nicht* jedoch um unterschiedliche Beugungsursachen oder gar unterschiedliche physikalische Effekte.

Bei dem vereinfachten Fall der fraunhoferschen Beugung liegen sowohl die Lichtquelle als auch der Beobachtungsschirm in sehr großer Entfernung vom beugenden Objekt („im Unendlichen“). Dieser Fall ist mathematisch leichter zu behandeln, da die zur Überlagerung kommenden Strahlen hier alle parallel verlaufen und sich sehr einfache geometrische Konstruktionen (z. B. rechtwinklige Dreiecke) zur Berechnung der Gangunterschiede heranziehen lassen. Da es im Labor eher recht unpraktisch wäre, einen „sehr großen“ Abstand vom beugenden Objekt einzuhalten, setzt man üblicherweise eine Sammellinse hinter dem beugenden Objekt ein, die alle in einer Richtung verlaufenden parallelen Strahlen in der Brennebene der Linse auf einem Punkt bündelt. Unterschiedliche Richtungen der Strahlen entsprechen dann unterschiedlichen Fokuspunkten.

Fresnelsche Beugung

Beim allgemeineren Fall der fresnelschen Beugung wird das Intensitätsmuster nahe hinter dem beugenden Objekt betrachtet und/oder das Licht vor dem beugenden Objekt ist nicht parallel (kommt z. B. von einer relativ nahen Lichtquelle). Diese Betrachtungsweise ist mathematisch aufwendiger, da in die Berechnung des Gangunterschiedes nun auch der

Abstand des Beobachtungspunktes vom beugenden Objekt mit einbezogen werden muss. Zwischen den beiden Fällen gibt es einen kontinuierlichen Übergang, der in Abbildung 4.2.1 für den Spezialfall eines Einzelspaltès dargestellt ist.

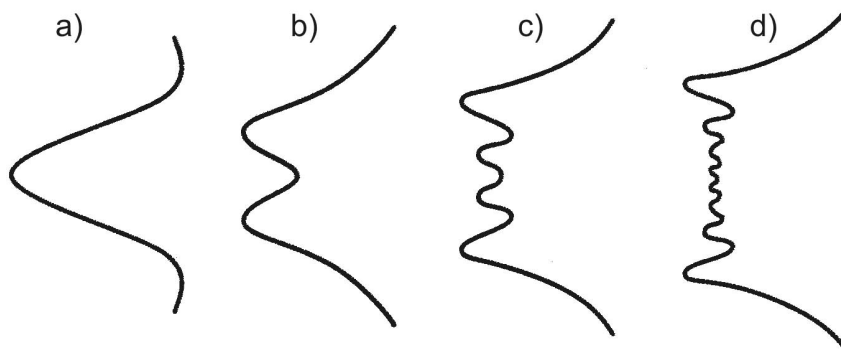


Abbildung 4.2.1.: Beugung an einem Einzelspalt: Übergang von fraunhoferscher Beugung im Unendlichen (a) zu fresnelscher Beugung bei geringen Abständen (d) [Tip00].

Versuchsdurchführung

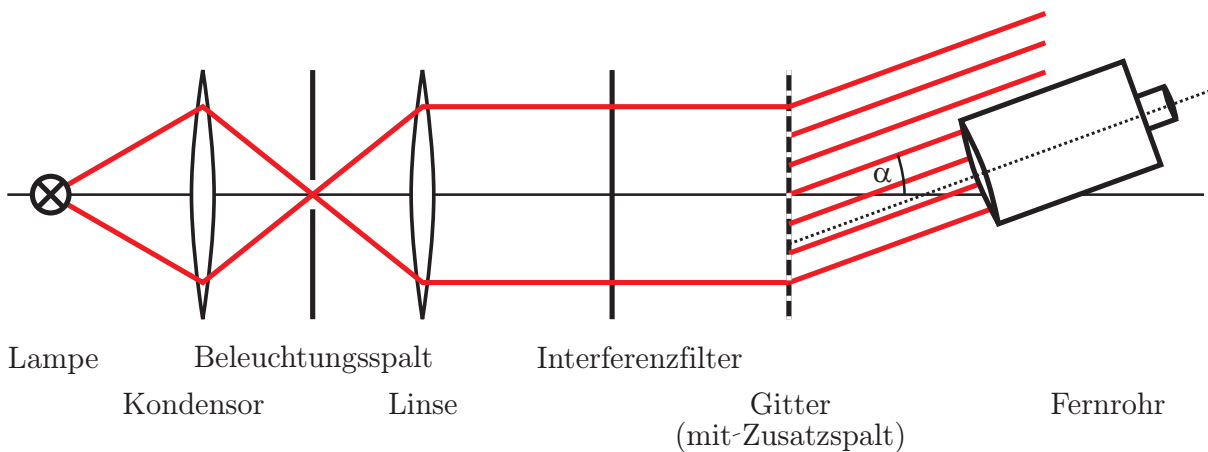


Abbildung 4.2.2.: Strahlengang der Versuchsanordnung zur Untersuchung der Beugung am Gitter. Das Interferenzfilter ist nur bei den ersten Versuchsteilen im Strahlengang, einen Zusatzspalt gibt es nur beim Glasgitter im zweiten Versuchsteil.

1. Leuchten Sie den Beleuchtungsspalt mit Hilfe der Hg-Dampf-Lampe und der Kondensatorlinse ($f_1 = 65 \text{ mm}$) möglichst gleichmäßig aus.

2. Stellen Sie die Sammellinse ($f_2 = 200$ mm) etwa im Abstand der Brennweite f_2 vor den Beleuchtungsspalt, um paralleles Licht zu erzeugen.

Überprüfen Sie die Parallelität mit dem Verfahren der Autokollimation.²

3. Stellen Sie das Fernrohr durch Drehen an dem seitlichen Fokusrädchen auf den Beleuchtungsspalt scharf ein.

Hinweis: Das Einstellrad auf keinen Fall mit Gewalt drehen. Die Verstellmechanik ist empfindlich!

4. Bringen Sie das Interferenzfilter und das *zweischichtige* Drahtgitter in den Strahlengang und beobachten Sie durch das Fernrohr hindurch die Beugungserscheinungen.
5. Bestimmen Sie mit der Messspindel die Ablenkwinkel der in erster bis fünfter Ordnung gebeugten Strahlen (nach links *und* rechts, also $\alpha_{-5}, \alpha_{-4}, \dots, 0, \dots, \alpha_5$).

Dazu messen Sie zunächst mit dem Lineal den Abstand zwischen der Messspindel und der Drehachse des Drehtisches. Dann stellen Sie das Fadenkreuz des Fernrohres auf die Mitte ein (Maximum nullter Ordnung), notieren die Position der Messspindel, kurbeln anschließend so lange an der Spindel, bis das Fadenkreuz das Maximum erster (bzw. zweiter, dritter, usw.) Ordnung erreicht hat, und notieren jeweils wieder die Position.

Hinweise:

- Achten Sie darauf, nicht „hin- und herzukurbeln“, da die Mechanik der Spindel etwas Spiel hat („toter Gang“) und die Messwerte dadurch sehr verfälscht würden. Idealerweise beginnt man die Messung also beim Maximum -5 . Ordnung und misst dann in einer Richtung bis $+5$. Ordnung (oder umgekehrt).
- Eine Spindelumdrehung entspricht einer Verschiebung um 1 mm und ist auf der Skala in 100 Teile unterteilt.
- Die Schraube am Langloch in der Mechanik oberhalb der Spindel darf nicht festgezogen werden, da sonst die Beweglichkeit eingeschränkt ist. Die Verschiebung erfolgt dann nicht mehr gleichmäßig, sondern ruckartig, und im ungünstigsten Fall wird sogar die Mechanik verbogen.

²Bei 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 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.

6. Entfernen Sie das Interferenzfilter aus dem Strahlengang und ersetzen Sie das Drahtgitter durch das Glasgitter. Der direkt am Glasgitter angebrachte verstellbare Zusatzspalt soll auf die Lichtquelle hin zeigen.
7. Öffnen Sie den Zusatzspalt so weit wie möglich. Betrachten Sie die gelbe Hg-Doppellinie und bestimmen Sie für deren **beide Teillinien jeweils den Ablenkwinkel** für das Maximum erster Ordnung (β_{1a} bzw. β_{1b}). Die Messung muss recht präzise durchgeführt werden (unbedingt auf toten Gang achten, d. h. Wert immer von der gleichen Richtung aus einstellen), denn aus den beiden Werten soll anschließend der **mittlere Ablenkwinkel** $\beta_1 = \frac{\beta_{1a} + \beta_{1b}}{2}$, sowie die **Winkeldifferenz** $\Delta\beta_1 = |\beta_{1a} - \beta_{1b}|$ berechnet werden.
8. Schließen Sie den Zusatzspalt so weit, dass die gelbe Doppellinie gerade nicht mehr aufgelöst wird und messen Sie die zugehörige Spaltweite $d_{\min,1}$. Einer Umdrehung des Einstellrades entspricht eine Öffnung des Zusatzspaltes um 1.0 mm.
9. Wiederholen Sie die letzten beiden Schritte für immer höhere Ordnungen ($\beta_2, \Delta\beta_2, d_{\min,2}, \dots$).
Achten Sie dabei besonders darauf, wie die gelbe Doppellinie, nachdem sie für eine bestimmte Ordnung nach Verengen des Zusatzspaltes nicht mehr auflösbar (= getrennt zu sehen) ist, bei Schwenken des Fernrohrs zu höheren Ordnungen wieder getrennt erscheint.
10. **für alle Physik-Studiengänge (B.Sc. und B.Ed.):** Bestimmen Sie experimentell an dem *einschichtigen* Drahtgitter der Gitterkonstante 0.4 mm, bei dem die Drahtdicke gleich dem Drahtabstand ist, welche Beugungsordnungen ausfallen.
Messen Sie hierzu die Positionen einer hinreichenden Zahl von Beugungsmaxima, um sie mit den Ergebnissen beim zweischichtigen Drahtgitter vergleichen zu können.
11. **für alle Physik-Studiengänge (B.Sc. und B.Ed.):** Drehen Sie das Drahtgitter so, dass die Drähte horizontal laufen. Sehen Sie noch Beugungserscheinungen? Ersetzen Sie den Beleuchtungsspalt durch eine kleine Lochblende, die Sie selbst mit Hilfe einer Stecknadel aus einem Stück Aluminiumfolie herstellen. Was beobachten Sie?

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.

Auswertung

1. Bestimmen Sie aus der Messung mit dem *zweischichtigen* Drahtgitter die Mittelwellenlänge λ_{gelb} der gelben Hg-Doppellinie.
2. Berechnen Sie aus den Messungen am Glasgitter für die gelbe Hg-Doppellinie für alle untersuchten Ordnungen ($i = 1, 2, 3, \dots$) jeweils den mittleren Ablenkwinkel $\beta_i = \frac{\beta_{ia} + \beta_{ib}}{2}$ sowie die Winkeldifferenz $\Delta\beta_i = |\beta_{ia} - \beta_{ib}|$.

- Bestimmen Sie aus λ_{gelb} und den Ablenkswinkeln β_i ($i = 1, 2, 3, \dots$) einen Wert für die Gitterkonstante g_2 des Glasgitters, sowie aus den Winkeldifferenzen $\Delta\beta_i$ einen Wert für die Wellenlängendifferenz $\Delta\lambda_{\text{gelb}}$ der beiden gelben Linien (Ergebnisse für die verschiedenen Ordnungen mitteln, um einen „Gesamtwert“ zu erhalten).
- Berechnen Sie aus der Gitterkonstanten g_2 und den für verschiedene Beugungsordnungen ermittelten Breiten $d_{\text{min},i}$ ($i = 1, 2, 3, \dots$) des Zusatzspaltes *jeweils* das theoretische spektrale Auflösungsvermögen.
Vergleichen Sie dieses mit dem von Ihnen als $\frac{\lambda_{\text{gelb}}}{\Delta\lambda_{\text{gelb}}}$ ermittelten Wert.

Fragen und Aufgaben

- Warum muss die Drehachse des Fernrohres nicht durch das Gitter verlaufen?
- Warum soll das Interferenzfilter in dem Bereich aufgestellt werden, in dem die Strahlen parallel verlaufen?
- Warum betragen bei einer 1:1-Abbildung der Lampe auf den Beleuchtungsspalt die Abstände zwischen Linse und Lampe, sowie zwischen Linse und Beleuchtungsspalt, gerade jeweils das Doppelte der Brennweite f_1 der Kondensorlinse?
- Beweisen Sie mit Hilfe des Huygensschen Prinzips, dass bei Fraunhoferscher Beugung am Gitter (d. h. bei paralleler Beleuchtung und Beobachtung im Unendlichen) die Maxima unter den Winkeln $\alpha_{\text{max}} = \arcsin \frac{m \cdot \lambda}{g}$ auftreten, wobei g die Gitterkonstante ist, also der Abstand zwischen den Mitten zweier Gitterspalte, λ die Wellenlänge des gebeugten Lichtes und m die Beugungsordnung.
- Warum ist für die Interferenz im Interferenzfilter kein Beleuchtungsspalt notwendig (z. B. bei den „Regenbogenfarben“ dünner Ölfilme auf Wasser)?
- Zeigen Sie, dass das spektrale Auflösungsvermögen des Gitters durch $\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = m \cdot Z$ gegeben ist, wobei m die Beugungsordnung ist und Z die effektive Strichzahl. Das spektrale Auflösungsvermögen hängt also *nicht* von der Gitterkonstanten g ab!
- Nach dieser Anleitung erfolgt die Berechnung des Ablenkswinkels aus den Messwerten zweier Strecken mit sehr unterschiedlichen absoluten Unsicherheiten (Abstand zwischen Drehachse und Spindel mit 1 mm-Teilung auf Lineal, Verschiebung entlang der Spindel mit $\frac{1}{100}$ mm-Teilung auf Messspindel).

Warum ist diese Art der Berechnung des Ablenkswinkels trotzdem sinnvoll (Tipp: denken Sie an das Fehlerfortpflanzungsgesetz!)?

8. **für alle Physik-Studiengänge (B.Sc. und B.Ed.):** Beweisen Sie die verdetsche Kohärenzbedingung³

$$D \cdot \sin \frac{\theta}{2} \leq \lambda \quad (4.2.1)$$

mit

D = Breite des Beleuchtungsspalt,
 θ = *effektiver* Öffnungswinkel hinter dem Beleuchtungsspalt,
 λ = Wellenlänge.

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

9. **für alle Physik-Studiengänge (B.Sc. und B.Ed.):** Welche Beugungsordnungen fallen bei der Beugung am Gitter aus, wenn die Breite der Gitterstege gleich der Breite der Spaltöffnungen ist (mit Begründung!)?

Auf welche Beugungsordnung wird die Beugung am Gitter reduziert, wenn Gittersteg und Spaltöffnung keine scharfen Grenzen haben, sondern die Lichtdurchlässigkeit sinusförmig variiert?

10. **für alle Physik-Studiengänge (B.Sc. und B.Ed.):** Im Versuch wurde zunächst ein zweischichtiges Drahtgitter verwendet. Auch bei diesem galt Drahtdicke = Drahtabstand. Warum fallen bei diesem Gitter *nicht* die Beugungsordnungen aus, die beim einschichtigen Gitter verschwinden?
11. **für alle Physik-Studiengänge (B.Sc. und B.Ed.):** Erklären Sie die unterschiedlichen Beobachtungen mit Beleuchtungsspalt und Lochblende bei senkrechten und horizontalen Gitteröffnungen.

Ergänzende Informationen

Interessant ist die Veränderung der Beugungserscheinungen beim Verdrehen des Gitters, d. h., wenn die ebene Welle nicht mehr senkrecht auf dem Gitter auftrifft. Mit zunehmendem Winkel wird die Beugung stärker, so als ob sich die Gitterkonstante verkleinern würde.⁴ Dies ist natürlich in gewisser Weise auch der Fall, da die Projektion der Gitterkonstanten auf die einfallende Wellenfront tatsächlich kleiner wird. Der Effekt hat eine Anwendung bei Gittern für Röntgenstrahlung, bei denen man die notwendigen kleinen Gitterkonstanten sonst gar nicht herstellen könnte.

³Die verdetsche Kohärenzbedingung bezieht sich nur auf die *räumliche* Kohärenz (siehe Seite 334). Mit Licht, das eine zu geringe *zeitliche* Kohärenz aufweist, erhält man selbst bei Einhalten dieser Bedingung keine Interferenzmuster.

⁴Außerdem wird die Beugungsfigur etwas asymmetrisch, dieser Effekt kann je nach Gitterkonstante und Wellenlänge sogar sehr ausgeprägt sein.

Literaturhinweise

Standardlehrbücher, z. B. [GGG78, Vog95, HMS99, Tip00].

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.
- [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.
- [HMS99] HERING, EKBERT, ROLF MARTIN und MARTIN STOHRER: *Physik für Ingenieure*. Springer-Verlag, Berlin, 7. Auflage, 1999.
- [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.
- [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.
- [Tip00] TIPLER, PAUL A.: *Physik*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg · Berlin, 2000. (amerikanische Originalausgabe 1976, 1982, 1991; deutsche Übersetzung 1994, 1995, 1998, 2000).
- [Vog95] VOGEL, HELMUT: *Gerthsen - Physik*. Springer-Verlag, Berlin · Heidelberg, 18. Auflage, 1995.

