



Versuch P2-13:

Interferenz

Raum F1-09

Bei diesem Versuch geht es um Beugungs- und Interferenzerscheinungen des Lichts, also um Phänomene, deren Deutung den Wellencharakter des Lichts anspricht. Interferenzerscheinungen können in der Natur beobachtet werden, z.B. als Farben dünner Schichten (Seifenblasen, Ölfilm auf der Wasseroberfläche), als störende Farbschlieren bei der Diaprojektion oder als Beugung an Kanten. Die technischen Anwendungen sind vielfältig. Beispiele dafür sind Interferometer für diverse Meßzwecke, Interferenzfilter und holographische Verfahren.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten zur Erzeugung monochromatischen Lichts. Abgesehen von Lasern, denen zwei eigene Praktikumsversuche gewidmet sind, werden hier Spektrallampen eingesetzt, deren charakteristische Linienspektren durch die Atomphysik erklärt werden. Eine viel weniger aufwändige (und hundertmal billigere) Lichtquelle stellt eine LED dar, die im ersten Versuchsteil zur Anwendung kommt. Durch den Vergleich einer farbigen LED mit einer weißen oder gar mit der Na-Spektrallampe können Sie sich ein Bild davon machen, wie „monochromatisch“ ein solches Bauteil wirklich ist.

Aufgaben:

0. Vorstudie

Im Praktikum geht es auch um das Kennenlernen von unterschiedlichen Geräten als Handwerkszeug des Physikers. Für den ersten Versuchsteil steht Ihnen ein Stereo-Zoom-Mikroskop zur Verfügung, obwohl ein schlichtes, einäugiges Gerät für die Vermessung der Newtonschen Ringe ebenso gut geeignet wäre. Machen Sie sich mit diesem Gerät vertraut. Überzeugen Sie sich durch Zukneifen je eines Auges, das beide Augen ein leicht unterschiedliches, scharfes Bild eines Objektes sehen. Beidäugig können Sie sich dann an Mikrostrukturen in 3D erfreuen.

1. Newtonsche Ringe

1.1 Bestimmen Sie den Krümmungsradius R einer symmetrischen sphärischen Bikonvexlinse aus der Beobachtung Newtonscher Ringe. Auf dem verschiebbaren Objektisch des Mikroskops liegt ein planer Objektträger und darauf die Linse. Als Auflichtquelle dient eine einfarbige LED, die von vorne über einen Strahlteiler eingekoppelt wird. Reflexionen gibt es unter anderem an der unteren Linsenfläche (Glas-Luft-Übergang) und an der oberen Objektträgerfläche (Luft-Glas-Übergang). Je nach Länge des zusätzlichen Lichtweges $2d$ ergibt sich konstruktive oder destruktive Interferenz. Bei der Herleitung des Zusammenhanges zwischen Durchmesser $2r_k$ des k -ten dunklen Newtonringes, Wellenlänge λ des benutzten Lichts, Brechungsindex n_L der Luft ($n_L \sim 1$) und Krümmungsradius R muß ein zusätzlicher Phasensprung um π bei der Reflexion am optisch dichteren Medium berücksichtigt werden. Verifizieren Sie $r_k^2/R = k\lambda/n_L$. Der Wert von R soll aus der Steigung einer Regressionsgeraden durch viele Meßpunkte (in manchen Fällen bis $k = 100$, jedoch nicht in Einerschritten) bestimmt werden, die nicht à priori als Ursprungsgerade anzunehmen ist. Es könnte ja Staub zwischen Linse und Objektträger geraten sein, oder die Linse könnte im Scheitel 'abgewetzt' sein.

Führen Sie die Messung erst mit der gelben, dann mit der blauen LED durch.

Frage: Wieso spielen die übrigen Reflexionen keine Rolle für das Auftreten von Interferenzerscheinungen? Welchen wesentlichen Nachteil hätte eine Durchlichtbeobachtung?

1.2 Bestimmen Sie den Brechungsindex von Wasser aus den veränderten Durchmessern der Newtonschen Ringe (gelbe LED), wenn sich zwischen Linse und Objektträger Wasser statt Luft befindet.

1.3 Bestimmen Sie die Brennweite f der Linse durch Autokollimation. Ein 'selbstleuchtender' Gegenstand (eine beleuchtete Mattscheibe mit scharfen Schatten) wird vor der Linse so verschoben, daß er seitenverkehrt wieder scharf auf sich (d.h. auf der Mattscheibe) abgebildet wird, wenn hinter der Linse ein Planspiegel das Licht reflektiert. Dabei ist der Abstand Spiegel-Linse unwesentlich.

1.4 Bestimmen Sie den Brechungsindex n des Linsenglasses aus R und f . Die benötigte Formel sollte auf einfache Weise mit den Näherungen 'sehr dünne Linse' und 'sehr achsennahe Strahlen' verifiziert werden.
[$R = 2(n-1)f$]

2. Beugung am Gitter

2.1 Justieren Sie das Gitterspektrometer.

a) Stellen Sie die Brennweite (Okular verschieben) des Fernrohres auf „Unendlich“ indem Sie einen weit entfernten Gegenstand scharf einstellen. Bei richtiger Einstellung darf bei Kopfbewegung keine Verschiebung (Parallaxe) von einem beobachteten Detail und dem Fadenkreuz zu sehen sein. Normalsichtige beobachten mit entspanntem (d.h. auf „Unendlich“ gerichtetem) Auge. Kurzsichtige können Parallellicht nicht auf die Netzhaut fokussieren und benötigen (ohne Kontaktlinse oder Brille) eine etwas abweichende Einstellung.

b) Beleuchten Sie den Spalt mit der Natriumdampflampe. Überlegen Sie, ob ein Kondensor (Abbildung der Lichtquelle in die Apparatur) von Vorteil sein kann. Beobachten Sie den schmal eingestellten Spalt durch das Fernrohr, stellen Sie ihn durch Verschieben des Spaltes scharf ein und bringen Sie ihn dann durch Schwenken des Fernrohres mit dem Fadenkreuz zur Deckung. Stellen Sie den Spektrometertisch mit Teilkreis geeignet ein (Nullstellung) und arretieren Sie ihn. Setzen Sie dann den Spiegel in den Gitterhalter ein (Spalt weit geöffnet). Stellen Sie zwischen Spalt und Lampe einen Objektträger so unter 45° gegen die Achse auf, daß von der Seite her über diesen 'Strahlteiler' das vom Spiegel reflektierte Licht sichtbar wird, falls es durch den Spalt zurücktrifft; der Spiegel (und damit der Gitterhalter) also senkrecht zur Achse justiert ist (Justierung am Rändelrand des Gitterhalters). Stellen Sie dann den Spalt wieder schmal ein. Tauschen Sie schliesslich den Spiegel gegen das Gitter aus.

2.2 Bestimmen Sie die Gitterkonstante eines Gitters. Das Gitter ist nur mit 'Gitter' bezeichnet. Es hat etwa 600 Striche pro Millimeter. Das Öffnungsverhältnis $b/g \sim 0,9$ des Gitters ist sehr groß. Damit wird erreicht, daß die Spaltbreite noch nicht in die Gegend von $\lambda/2$ kommt. Die Breite des Gitters ist genügend groß, um den ganzen Querschnitt des Parallellichtbündels im Spektrometer auszunutzen. Zur Messung wird das gelbe Licht einer Natriumdampflampe verwendet. Nur die mittlere Wellenlänge der Doppellinie sei bekannt. (Der Abstand der beiden Linien beträgt etwa einen halben Nanometer. Er soll in der nächsten Aufgabe genauer bestimmt werden.) Überlegen Sie sich schon bei der Vorbereitung, unter welchen Winkeln etwa Maxima (Hauptmaxima) zu erwarten sind, ob sie vielleicht durch Minima der Interferenzfigur des Einzelspaltes ausgelöscht sind, wie breit die Maxima etwa sind, welches Intensitätsverhältnis sie haben, wie gut das theoretische Auflösungsvermögen ist, wie schmal der Spalt einzustellen wäre, um dieses zu nutzen, und ob wohl die Doppellinie getrennt beobachtbar und ihr Abstand meßbar ist.

2.3 Bestimmen Sie den Wellenlängenabstand der gelben Na-Linien. Verwendet wird das Gitter von Aufgabe 2.2. Zur Messung wird die zu eichende Feinverstellung mit Skala am Spektrometer benutzt.

2.4 Bestimmen Sie die Gitterkonstante eines zweiten Gitters. Das Gitter ist mit dem Grobwert 140/mm für die Strichdichte bezeichnet. Details der Gitterstruktur sind nicht bekannt. Es kann jedenfalls bis zu hohen Ordnungen (etwa 6) mit monoton abnehmender Intensität in jeder Ordnung beobachtet werden. Wundern Sie sich auch darüber? Haben Sie eine Erklärung? Als Lichtquelle dient wieder die Natriumdampflampe. Von welcher Ordnung ab ist die Na-Doppellinie getrennt beobachtbar? Entspricht das dem theoretischen Auflösungsvermögen?

2.5 Messen Sie möglichst genau die Wellenlängen der vier deutlichen Linien einer Zn-Spektrallampe. Die Farben sind violettblau, blau, blaugrün und rot. Begründen Sie Ihre Wahl der Mittel und der Methode.

Anregungen für die Vorbereitung:

Zum Beugungsgitter: Für die Intensität I in Abhängigkeit von Beobachtungswinkel α , Wellenlänge λ , Gitterkonstante (Gitterperiode) g , verwendeter Anzahl N der Gitterspalte und Breite b des einzelnen Spaltes gilt:

$$I = (\sin\beta / \beta)^2 \cdot (\sin N\Phi / \sin\Phi)^2 \quad \{ = f_s \cdot f_g = f_s \cdot f_1 / f_2 \} \quad \text{mit } \beta = \pi b / \lambda \times \sin\alpha, \quad \Phi = \pi g / \lambda \times \sin\alpha.$$

Der erste Faktor, f_s , beschreibt die Beugungsfigur des einzelnen Gitterspaltes, wirkt als 'Einhüllende' für die I-Kurve und heißt manchmal 'Spaltfunktion'. Der zweite Faktor, f_G , beschreibt das Zusammenwirken aller Gitterspalte und heißt manchmal 'Gitterinterferenzfunktion'. F_G hat (Haupt-)Maxima der Höhe N bei den Winkeln α , für die sowohl $f_1=0$ als auch $f_2=0$ ist. An diesen Stellen ($\alpha = \arcsin k\lambda/g$, Ordnung $k \in N_0$) werden Linien beobachtet, sofern nicht die Spaltfunktion f_s dort auch eine Nullstelle hat. Bei großer Spaltanzahl N liegen die Nullstellen ($f_1 = 0, f_2 \neq 0$) zwischen den Hauptmaxima so dicht, daß die Intensität dort nur vergleichsweise sehr geringe Werte erreicht ('Dunkelheit'). Die Halbwertsbreite der Linie bei einem Hauptmaximum ist etwa gleich dem Abstand zur benachbarten Nullstelle. Die Linienschärfe wird also mit zunehmender Spaltanzahl N besser. Aus diesen Überlegungen folgt der Ausdruck $\lambda/\Delta\lambda = kN$ für das 'Auflösungsvermögen' des Gitters.

Die angegebene Intensitätsformel gilt für ein spezielles ideales Gitter: Längs b perfekte Transmission ohne Phasenunterschiede, längs g-b perfekte Extinktion, über das ganze Gitter perfekte Periodizität. Ferner sind auftreffende ebene Wellenfronten parallel zur Gitterfläche vorausgesetzt. Man erhält diese Formel, wenn man sich die Gitteröffnungen mit äquidistanten kohärenten Emitttern besetzt denkt, deren Amplituden im Aufpunkt summiert und die Emitteranzahl gegen Unendlich gehen läßt. Reale Gitter sind deutlich schlechter. Neben diesem Gittertyp gibt es noch eine ganze Reihe weiterer. Beispiele: Bei sinusförmig schwankender Durchlässigkeit ('Sinusgitter') erhält man nur Linien 1.Ordnung. Die Herstellung kann z.B. durch Photographie von Interferenzstreifen erfolgen. 'Phasengitter' sind überall durchsichtig, aber die Brechzahl ändert sich periodisch. Aufgrund der resultierenden Dichteunterschiede erhält man ein solches Gitter z.B. bei stehenden Schallwellen in Flüssigkeiten. Weiter gibt es Reflexionsgitter, ebene und auch solche mit geneigten Furchen. Letztere (Echelette-Gitter) liefern die Hauptintensität in die 1.Ordnung statt nutzlos in die 0-te. Schließlich seien neben den bisher genannten eindimensionalen Gittern noch zwei- und dreidimensionale erwähnt.

Zum Spalt (am Eingang des Spektrometers, nicht etwa eine Gitteröffnung):

a) Das Gitter wird im Idealfall mit Parallellicht (ebene Wellenfronten) beleuchtet. Da es keine Spektrallampe (überhaupt keine Lampe) als Punktlichtquelle gibt, die man in den Brennpunkt einer idealen Linse stellen könnte, muß ein von einer ausgedehnten Gasentladung durchleuchteter schmaler Spalt als Ersatz dienen. Für die Sichtbarkeit der zu beobachtenden Linien muß der Spalt eine gewisse Mindestbreite haben. Soll die Formel für das Auflösungsvermögen des Gitters realistische, unterscheidbare $\Delta\lambda$ liefern, dürfte das beobachtete Spaltbild aber nicht breiter sein als die aus der Intensitätsformel folgende Linienbreite.

Frage: Wie breit höchstens müßte der Spalt eingestellt werden?

b) Beobachtbare Interferenz (stationäres Hell-Dunkel-Muster) setzt ausreichende Kohärenz des Lichtes voraus. Da Licht von spontan und unabhängig strahlenden Atomen aus einem ausgedehnten räumlichen Bereich benutzt wird, benötigt man den Spalt (auch 'Kohärenzspalt'), als effektive Begrenzung des Durchmessers der Lichtquelle. Dadurch wird erreicht, daß die möglichen Wegunterschiede des Lichtes von allen beitragenden Strahlern (Atomen) klein gegen eine halbe Wellenlänge sind. Das erzwingt die 'Kohärenzbedingung' $d \cdot \sin\epsilon \ll \lambda/2$ (d: Quellen- bzw. Spaltbreite; ϵ : halber Öffnungswinkel des benutzten Lichtbündels).

Frage: Wie breit höchstens müßte der Spalt eingestellt werden, wenn die Linsendurchmesser des Spektrometers (und damit auch die Spaltanzahl des Gitters) ausgenutzt werden sollen?

Zur Spektrallampe:

Die normale Lebensdauer angeregter Atomzustände (keine 'verbotenen' Übergänge, keine 'metastabilen' Zustände) ist etwa 10 ns. Daraus folgt mit der Heisenbergschen Unschärferelation eine natürliche Energie- und damit Wellenlängenunschärfe $\Delta\lambda \sim 10^{-5}$ nm. Da aber in einer Gasentladung die strahlenden Atome nicht in Ruhe sind, tritt Linienverbreiterung durch Dopplereffekt auf. Das angeregte Gas in den verwendeten Lampen ist nicht viel heißer als Zimmertemperatur. Die kinetische Gastheorie liefert die mittlere Teilchengeschwindigkeit ($v_v \approx 600$ m/s).

Die Dopplerverbreiterung (bis auf Faktoren nahe 1) ist $\Delta\lambda \approx v_v / c \cdot \lambda \cdot 2 \cdot 10^{-6} \lambda \approx 10^{-3}$ nm. Man sieht, daß die Dopplerverbreiterung im Vergleich zu dem mit Praktikumsmitteln auflösbaren $\Delta\lambda$ noch keine Rolle spielt. Die 'Stoßverbreiterung', ein weiterer Effekt, der die Lebensdauer verkürzt und die Spektrallinie verbreitert, spielt wegen des niedrigen Druckes in den verwendeten Lampen eine noch geringere Rolle.

Zubehör:

Auflichtmikroskop (Objektiv 1x, Okular 10x mit Fadenkreuz, Zoom-Faktor 1...4). Seitlich einfallendes Licht wird durch einen teildurchlässigen planen 45°-Reflektor von oben auf das Objekt gelenkt. Der Objektstisch (Kreuztisch) ist in beiden Richtungen verschiebbar. Die Verschiebungen sind an Millimeter-skalen mit Nonius ablesbar.

LED-Beleuchtung - blau: 465nm; grün: 520 nm; gelb: 590 nm; rot: 625 nm

Symmetrische Bikonvexlinsen, diverse Brennweiten zwischen 5cm und 35cm

Linsenhalter mit Wechselfassung

Mattscheibe mit undurchsichtigem Muster

Planspiegel, justierbar

Zeißscheibe mit Reitern und Meßvorrichtung

Glühlampe in Lampengehäuse mit zugehörigem Transformator

Gitterspektrometer (Feststehendes Spaltrohr mit symmetrisch einstellbarem Spalt S am äußeren und Achromat L_1 ($f=18\text{cm}$, $D=17,5\text{mm}$) am inneren Ende. Der Abstand SL_1 ist etwa von 17,5 bis 18,5cm einstellbar. Dreh- und arretierbarer Tisch mit Teilkreis 0 bis 360°, 1°-Teilung. Darauf justierbar bezüglich der Teilung der Halter für das Gitter G. Abstand L_1G ca. 6cm. Fernrohr, schwenkbar um die Tischachse mit Nonius am Teilkreis des Tisches, Objektiv = Achromat L_2 ($f=17\text{cm}$, $D=17,5\text{mm}$), Okular L_3 (8x, $f=3\text{cm}$, mit Fadenkreuz, verschiebbar im Fernrohrtubus), Abstand GL_2 ca. 6cm. Das Fernrohr hat noch eine Feinverstellmöglichkeit bezüglich des Teilkreises. Die zugehörige Mikrometerschraube trägt eine zusätzliche Skala, die mit Hilfe des Nonius geeicht werden kann und die Messung von Winkeldifferenzen ermöglicht, die am Nonius direkt nicht mehr abgelesen werden können

Gitter: Gitterkopien (Kollodiumfolien o.ä.) zwischen Diagläsern. Nutzbare Breite ca. 36mm, nutzbare Höhe ca. 24mm. Liniendichte ca. 140/mm und ca. 600/mm

Spiegel, passend zum Gitterhalter

Spektrallampen (Na und Zn): Wechselstrombetriebene Niederdruck-Gasentladungslampen mit nur mäßiger Erwärmung, beidseitig Glühkathoden. Die Na-Lampe funktioniert (bis auf die fehlende Leuchtschicht und die andersartige Füllung) wie eine übliche Leuchtstoffröhre. Der Glimm-Bimetall-Zünder ist in den Lampenkolben integriert. Die Vorschaltdrossel befindet sich in einem Universal-Vorschaltgerät. (Lampe ansehen und diskutieren, falls noch nicht bekannt ist, wie das Zünden und Brennen einer Leuchtstoffröhre funktioniert). Die Zn-Lampe ist anders aufgebaut. Sie enthält temperaturabhängige Widerstände.

Wellenlängen-Mittelwert der beiden gelben Na-Linien: $\lambda_{\text{u}} = 589,3 \text{ nm}$

Literatur:

Fast alle Physik- und speziell Optik-Lehrbücher sind geeignet, z.B. auch

Gerthsen: *Physik* (24.Aufl. S.519-543)

Eichler, Kronfeld, Sahn: *Das Neue Physikalische Grundpraktikum* (2.Aufl. S408-413)

Hecht (oder Hecht, Zajac): *Optics* oder *Optik*

Pohl: *Optik und Atomphysik*

Bergmann, Schäfer: *Experimentalphysik*, Bd.3