

Interferometer - Kohärenz

Aufgabenstellung

1. Demonstration und Erklärung des Einflusses der Größe einer Lichtquelle auf das Interferenzmuster eines Doppelspaltes.
2. Demonstration und Erklärung des Einflusses der spektralen Breite des Lichtes einer räumlich kohärenten Lichtquelle auf das Interferenzmuster eines Doppelspaltes.
3. Bestimmung der Dicke einer Kunststoffschicht mit dem Doppelspalt-Interferenzmuster.
4. Bestimmung der Größe der Lichtquelle, bei der für Doppelspalten mit unterschiedlichem Spaltabstand das Licht noch räumlich kohärent ist.

Vorbereitung

Kohärenz/Interferenz

Siehe auch Demtröder, Experimentalphysik 2, Kapitel 10.1., S307 (5. Aufl.)

Licht lässt sich als elektromagnetische Welle im sichtbaren Spektralbereich verstehen. Das von einer Lichtquelle ausgesandte Licht kann man beispielsweise mit einem Strahlteiler oder einem Doppelspalt in zwei oder mehrere „Teilwellen“ aufteilen. Bei einem Strahlteiler sind dies die reflektierte und die transmittierte Teilwelle, beim Doppelspalt die von den beiden Spalten ausgehenden Teilwellen. Treffen diese Teilwellen in einem Raumbereich wieder aufeinander, dann überlagern sie sich und es kommt immer zu einem meist raum- und zeitabhängigen Interferenzmuster aus Auslöschung (destruktiver Interferenz) und Verstärkung (konstruktiver Interferenz). Ist dieses Muster zeitlich so konstant, dass man es beobachten kann (z.B. mehrere Sekunden bei Beobachtung mit dem Auge), bezeichnet man die beiden Teilwellen als „kohärent“. Ist die zeitliche Fluktuation so schnell, dass kein Muster beobachtet werden kann, bezeichnet man die beiden Teilwellen als „inkohärent“.

Die Sichtbarkeit von Interferenzmustern hängt von dem Spektrum und der Ausdehnung der Lichtquelle ebenso ab, wie von der Geometrie der überlagerten Teilwellen und eben von der Beobachtungszeit. Beschrieben wird sie formal durch die (stetige) Kohärenzfunktion (siehe z.B. E. Hecht, *Optik*), eine scharfe Grenze zwischen „kohärent“ und „inkohärent“ existiert im Allgemeinen nicht. Ist die Kohärenzfunktion bekannt, kann man z.B. ihre erste Nullstelle bei zunehmendem Gangunterschied der Teilwellen als Kenngröße verwenden (ähnlich wie man z.B. den zeitlichen Verlauf einer sinusförmigen Schwingung durch nur einen Parameter, die Schwingungsdauer, beschreiben kann). An dieser gilt dann die Bedingung, dass der Phasenunterschied zwischen „den“ Teilwellen genau 2π ist. Welche Teilwellen (welche Frequenzen einer Lichtquelle mit kontinuierlichem Spektrum bzw. welche Orte einer ausgedehnten, nicht homogen leuchtenden Lichtquelle) man dabei betrachtet, hängt wieder von der speziellen Kohärenzfunktion ab.

Zusammenfassend: Das Licht zweier (Teil-) Wellen ist kohärent, wenn bei einer Überlagerung Interferenzmuster sichtbar werden.

Welche Parameter bestimmen aber, ob Interferenzen sichtbar sind und warum?

Vereinfachend ist es zunächst sinnvoll zeitliche und örtliche Kohärenz zu unterscheiden. Zur Veranschaulichung betrachtet man irgend ein beleuchtetes Objekt und das von ihm erzeugte Beugungsmuster, welches ja durch Interferenz (also kohärente Überlagerung) von Teilwellen entsteht, z.B. einen Doppelspalt.

Zeitliche Kohärenz: Der Doppelspalt werde zunächst mit mehreren ebenen, monochromatischen **Teilwellen mit unterschiedlicher Wellenlänge bzw. Frequenz** beleuchtet, die alle parallel sind und senkrecht auf den Doppelspalt treffen. Für das Auftreten eines Beugungsmaximums im Fraunhofer-Limit gilt $\sin \theta = m\lambda/d$, wobei θ der Beugungswinkel, m die Ordnung, d die Gitterkonstante und λ die Wellenlänge ist (Abb 1a). Der Beugungswinkel der Maxima ist also von der Wellenlänge abhängig und mit Ausnahme des nullten Beugungsmaximums werden die Maxima der Teilwellen mit unterschiedlichen Wellenlängen bei unterschiedlichen Winkeln auftreten. In der Überlagerung der Beugungsmuster aller Teilwellen, wird der Kontrast des resultierenden Beugungsmusters mit zunehmendem Winkel also immer geringer werden (Abb. 1 b und c, blaue Linien, vgl. die Amplituden des nullten, ersten, zweiten etc. Maximums). Diese Frequenz- bzw. Wellenlängenabhängigkeit der Kohärenz bezeichnet man als *zeitliche Kohärenz*, da sie im Endeffekt auf die durch die Laufzeit t zum Beobachtungspunkt hervorgerufene Phasenverschiebung ϕ der

gebeugten Teilwellen unterschiedlicher Frequenz f zurückführbar ist ($\phi = 2\pi t f$). **Die zeitliche Kohärenz hängt somit vom Spektrum des Lichtes ab und nimmt bei zunehmender spektraler Breite ab.** Beim Doppelspalt reduziert sich mit zunehmender spektraler Breite der Kontrast der höheren Beugungsordnungen, die nullte Ordnung bleibt hingegen gut sichtbar.

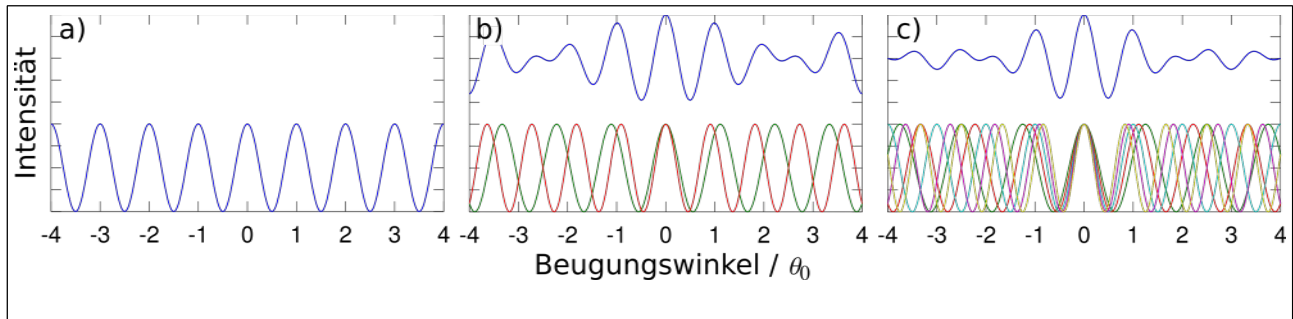


Abb. 1: a) Interferenzmuster eines Doppelspaltes bei Beleuchtung mit a) einer monochromatischen Welle. b) Interferenzmuster zweier monochromatischer Wellen unterschiedlicher Wellenlänge (rote und grüne Linie) und Überlagerung derselben (blaue Linie). Der Kontrast nimmt mit zunehmendem Abstand von $\theta=0$ ab. c) Überlagerung der Interferenzmuster von 5 monochromatischen Wellen unterschiedlicher Wellenlänge. Der Winkelbereich mit gutem Kontrast ist nun noch geringer.

Als *Kohärenzlänge* bezeichnet man nun den Wegunterschied der gebeugten Teilwellen Δs bei dem Interferenzen noch „gut“ erkennbar sind. Man sieht am Beispiel in Abb 2, dass der Kontrast mit zunehmendem Beugungswinkel nicht abrupt von 1 auf 0 geht. Als Kohärenzlänge *definiert* man für diesen Fall jene Länge, bei der der Phasenunterschied zwischen den beiden Teilwellen mit größter und kleinster Wellenlänge kleiner als 2π ist (vgl. Demtröder, Abschnitt 10.1). Bei diskreten Spektren entspricht das dem ersten Minimum des Kontrastes im Interferenzmuster. Bei kontinuierlichen Spektren müssen zusätzliche Bedingungen eingeführt werden um eine Kohärenzlänge definieren zu können. Die *Kohärenzzeit* ist mit der Kohärenzlänge über die Ausbreitungsgeschwindigkeit verknüpft:

$$\Delta \tau = \Delta s / c \quad [1]$$

Räumliche Kohärenz: Der Doppelspalt werde nun mit mehreren ebenen, monochromatischen Lichtwellen beleuchtet, die alle die selbe Frequenz und Wellenlänge aber **unterschiedliche Richtungen** haben, zum Beispiel weil die Lichtquelle nicht punktförmig ist. Für die Winkel der Beugungsmaxima gilt nun $\sin \theta = m\lambda/d + \sin \theta_i$, wobei θ_i der Einfallswinkel der entsprechenden Lichtwelle ist (Abb. 3). Die Beugungsmuster der einzelnen Teilwellen erzeugen Beugungsmaxima daher bei unterschiedlichen Winkeln θ . Die von unterschiedlichen Punkten einer Lichtquelle ausgesandten Lichtwellen haben ja keine fixe Phasenbeziehung zueinander, daher führt die Überlagerung ihrer Beugungsmuster insgesamt zu einer Reduktion des Kontrastes (vgl. Abb. 2). Diese Richtungsabhängigkeit der Kohärenz wird als *räumliche Kohärenz* bezeichnet, da sie letztendlich auf die räumliche Ausdehnung der Lichtquelle und des beugenden Objektes zurückführbar ist. **Die räumliche Kohärenz wird mit zunehmender Größe der Lichtquelle geringer.** Beim Beugungsmuster des Doppelspaltes reduziert sich der Kontrast gleichmäßig über alle Ordnungen (vgl. zeitliche Kohärenz).

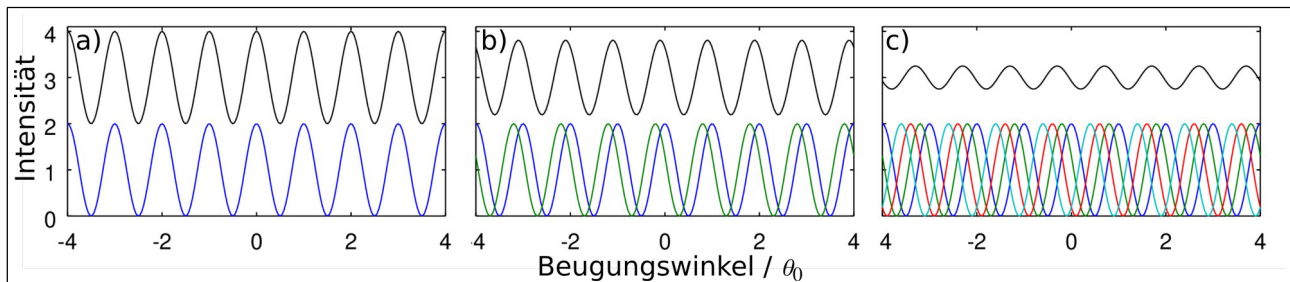


Abb. 2: a) Interferenzmuster eines Doppelspalt bei Beleuchtung mit a) einer monochromatischen ebenen Welle. b) Interferenzmuster zweier monochromatischer, ebener Wellen unterschiedlicher Richtung (blaue und grüne Linie) c) Interferenzmuster von vier monochromatischen, ebenen Wellen unterschiedlicher Richtung. Die schwarzen Linien geben jeweils die Summe der einzelnen Interferenzmuster wieder (zur Verbesserung der Sichtbarkeit ist der Nullpunkt vertikal verschoben). Der Kontrast (die Modulation) des schwarz dargestellten, resultierenden Interferenzmusters nimmt mit zunehmender Anzahl an beleuchtenden Wellen unterschiedlicher Richtung von a) nach c) über den gesamten Beugungswinkelbereich gleichmäßig ab.

Räumliche Kohärenz beim Doppelspalt: mathematische Beschreibung

Zur Vereinfachung wird im Folgenden angenommen, dass der Doppelspalt mit ebenen Wellen beleuchtet wird und das Beugungsmuster wird nur im Fraunhofer'schen Limit (sozusagen im Unendlichen) betrachtet. Experimentell lässt sich dies durch je eine Linse vor bzw. nach dem Doppelspalt realisieren (Abbildung 3).

Betrachten wir zunächst das Interferenzmuster des Doppelspalt, wenn dieser von nur einem Punkt der Lichtquelle beleuchtet wird, der auf der optischen Achse liegt. Die vom Punkt ausgehende Kugelwelle ist per Annahme monochromatisch und somit völlig kohärent (die Amplitude und Phase der Kugelwelle ist in jedem Punkt des Raumes und zu jedem Zeitpunkt eindeutig definiert und zwischen jeden zwei beliebigen Punkten besteht eine zeitlich konstante, bekannte Phasenverschiebung). Durch L1 werden die Wellenfronten der Kugelwellen zu ebenen Wellenfronten, die dann den Doppelspalt beleuchten. Nach dem Doppelspalt ergibt sich aus der kohärenten Überlagerung der von den beiden Spalten ausgehenden Teilwellen (siehe Demtröder, Experimentalphysik 2, Kapitel 10.5.1, 10.5.2. und 10.5.3.)

$$I(\sin(\theta)) = I_s \frac{\sin^2[\pi(b/\lambda)\sin\theta]}{[\pi(b/\lambda)\sin\theta]^2} \frac{\sin^2[2\pi(d/\lambda)\sin\theta]}{\sin^2[\pi(d/\lambda)\sin\theta]} \quad [2]$$

Der erste Bruch beschreibt die Beugung am Einzelspalt der Breite b , der zweite Bruch die Beugung an einem Doppelspalt mit isotrop emittierenden, ideal linienförmigen Spalten mit den Interferenzmaxima bei $\Delta s = d \sin\theta = m\lambda$. Dieses Beugungsmuster wird in der Brennebene von L2 abgebildet (Abb. 3), wobei $x = f_2 \sin\theta$ gilt.

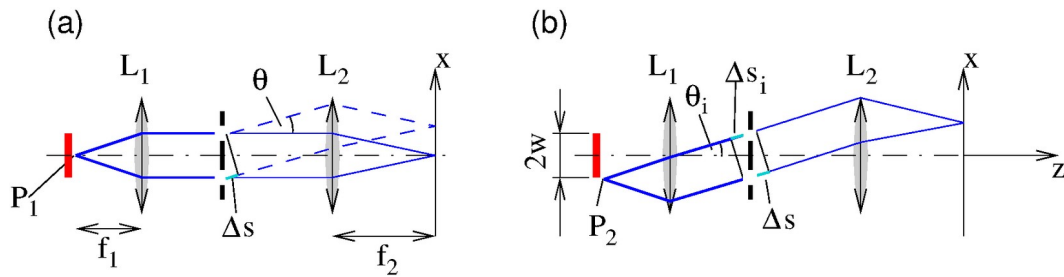


Abbildung 3: (a) 0^{te} (durchgezogene Linien) und 1^{te} (strichlierte Linien) Beugungsordnung bei Beleuchtung des Doppelspaltes mit einer ebenen Welle bei 0° Einfallswinkel. Das Licht geht von einem Punkt auf der optischen Achse aus und wird mit der Linse L_1 (Brennweite f_1) in eine ebene Welle transformiert. Parallele Teilstrahlen nach dem Doppelspalt werden durch die Linse L_2 (Brennweite f_2) in deren Brennebene phasenrichtig zur Interferenz gebracht. Entlang x entsteht ein Bild des Fraunhofer'schen Beugungsmusters des Doppelspaltes. (b) Beleuchtung von einem Punkt der Lichtquelle abseits der optischen Achse. Die ebenen Wellen nach L_1 haben nun einen Einfallswinkel von $\sin \theta_i = w / f_1$. Für die nullte Ordnung ($\Delta s - \Delta s_i = 0$) müssen die türkisen Teilstücke gleich lang sein. Die nullte Ordnung geht sozusagen gerade durch, das Beugungsmuster verschiebt sich entlang x .

Befindet sich der Punkt der Lichtquelle im Abstand w von der optischen Achse (Abbildung 3(b)), so ist in Gl. 2 $\sin \theta$ durch $(\sin \theta - \sin \theta_i)$ zu ersetzen, wobei $\sin \theta_i = w / f_1$ der Einfallswinkel der ebenen Lichtwelle auf den Doppelspalt ist. Dementsprechend verschiebt sich das Interferenzmuster entlang x . Wird der Doppelspalt gleichzeitig von mehreren Punkten einer ausgedehnten Lichtquelle beleuchtet, so überlagern sich die Interferenzmuster inkohärent (die Intensitäten addieren sich), da ja die von unterschiedlichen Punkten der Lichtquelle ausgesandten Wellen unabhängig von einander sind. Zur Berechnung des resultierenden Interferenzmusters, muss Gl. 2 dann über den Winkelbereich θ_i integriert bzw. summiert werden.

Betrachtet man nun eine ausgedehnte Lichtquelle, z.B. von $-w$ bis $+w$ mit *konstanter* Intensität in diesem Bereich, so ergibt die inkohärente Überlagerung der Interferenzmuster

$$I(x) = 2 \int_{-w}^w \tilde{I}_s (1 + \cos[2\pi(d/\lambda)(x/f_2 - w'/f_1)]) dw' = \quad [3]$$

$$= 2 \tilde{I}_s w \left[1 - \cos\left(2\pi \frac{d}{\lambda} \frac{x}{f_2}\right) \frac{\sin\left(2\pi \frac{d}{\lambda} \frac{w}{f_1}\right)}{\left(2\pi \frac{d}{\lambda} \frac{w}{f_1}\right)} \right]$$

Das Ergebnis ist für unterschiedliche Werte von w in Abb. 4 Dargestellt. Bei entsprechender Breite der Lichtquelle $2w$ ist der Kontrast null.

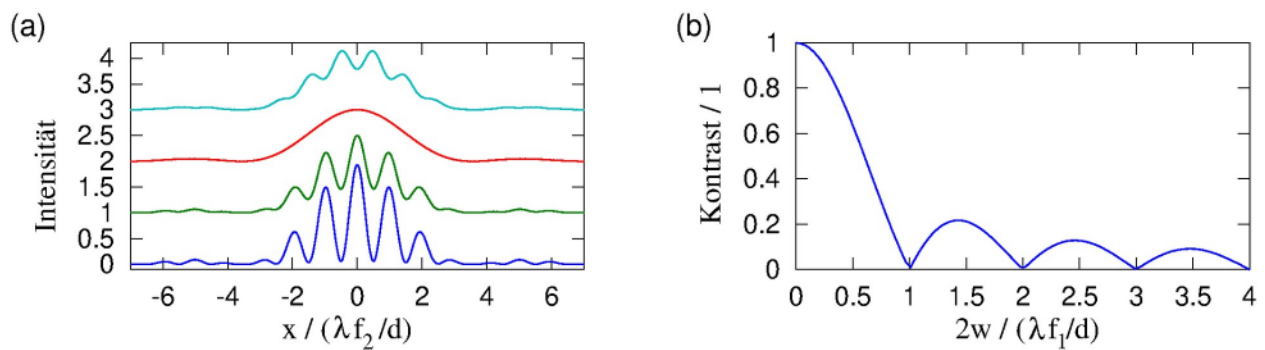


Abbildung 4: (a) Interferenzmuster eines Doppelspaltes unter Berücksichtigung der Beugung an den Einzelspalten bei verschiedenen Größen der Lichtquelle: $(2wd)/(\lambda f_1) = 0.2, 0.6, 1.0, 1.5$ (von unten nach oben, die Kurven sind zur besseren Darstellung vertikal verschoben). Die Abnahme der Intensität mit zunehmendem x ist aufgrund der Beugung an den einzelnen Spalten (vgl. Gl. 2, erster Bruch). Der Kontrast hingegen ist nicht von x abhängig. (b) Kontrast des Beugungsmusters in (a) im Bereich des 0-ten Maximums als Funktion der Lichtquellengröße $2w$.

Der Kontrast (auch Sichtbarkeit) des Beugungsmusters ergibt sich aus Gl. 3 mit

$$K = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \left| \frac{\sin\left(2\pi \frac{d}{\lambda} \frac{w}{f_1}\right)}{\left(2\pi \frac{d}{\lambda} \frac{w}{f_1}\right)} \right| \quad [4]$$

Das erste Minimum dieser Funktion tritt auf, wenn das Argument in Klammern gleich π ist (Abb. 4(b)). Obwohl es auch hier keine scharfe Grenze gibt, bezeichnet man zur Vereinfachung Lichtquellen mit Breiten $2w$ bezüglich des Spaltabstandes d als räumlich kohärent wenn

$$2\pi \frac{d}{\lambda} \frac{w}{f_1} \leq \pi \quad \text{bzw.} \quad 2w / f_1 \leq \lambda / d \quad [5]$$

erfüllt ist.

Im aufgebauten Experiment lässt sich die Größe der Lichtquelle $2w$ einstellen: die Glühwendel einer Halogenlampe ist auf eine Spaltblende mit einstellbarer Breite abgebildet. Das durch die Öffnung der Blende hindurchtretende Bild der Glühwendel dient somit als Lichtquelle mit einstellbarer Breite für die Beleuchtung des Doppelspaltes.

Beugung am Doppelspalt mit zusätzlicher Phasenverschiebung

Betrachtet man einen mit einer ebenen Welle beleuchteten Doppelspalt, hinter dem sich ein transparentes Objekt befindet (Abbildung 5), so ergibt sich die optische Weglängendifferenz zwischen zwei parallelen von den beiden Spalten ausgehenden Teilstrahlen für kleine Beugungswinkel ($\theta \ll 1$) mit

$$\Delta s_o = \Delta s + t n_2 - t n_1 = d \sin \theta + t n_2 - t n_1 \quad [6]$$

wobei t die physikalische Dicke des Objektes und n_i der Brechungsindex des Objektes bzw.

der Umgebung (Luft) vor dem einen bzw. anderen Spalt ist. Beugungsmaxima treten bei $\Delta s_o = m\lambda$ auf, wobei m die Nummer der Ordnung ist. Ist $n_1 = n_2$ ändert sich nichts gegenüber dem Fall ohne Objekt. Ist $n_1 \neq n_2$, verschiebt sich jedoch das Beugungsmuster gegenüber dem Fall ohne Objekt. Die nullte Ordnung $\Delta s_o = 0$ befindet sich nun bei $d \sin \theta = t(n_1 - n_2)$.

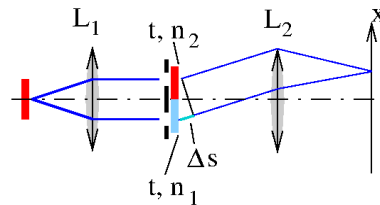


Abbildung 5: Skizze der Beugung am Doppelspalt mit transparenten Schichten unterschiedlicher Brechzahl hinter den Spalten des Doppelspaltes. Die Nullte Ordnung tritt bei einem Winkel auf, bei dem sich die gesamte optische Weglängendifferenz zu 0 addiert.

Aus dieser Beziehung lässt sich die optische Weglängendifferenz experimentell bestimmen, indem man die Verschiebung der Lage des 0^{ten} Maximums mit und ohne Objekt bestimmt. Dazu verwendet man wegen seiner kurzen Kohärenzlänge Weißlicht: Mit zunehmender Ordnung nimmt beim Beugungsmuster des Doppelspaltes ja auch die optische Weglängendifferenz zwischen den Teilstrahlen zu. Da die Kohärenzlänge von Weißlicht aber nur sehr kurz ist, sind nur niedrige Ordnungen beobachtbar. Die 0^{te} Ordnung ist leicht identifizierbar.

Zur Bestimmung der optischen Weglängendifferenz, der die gemessene Verschiebung des Beugungsmusters entspricht, verwendet man einigermaßen monochromatisches Licht bekannter Wellenlänge. Die Beugungsmaxima treten ja bei $d \sin \theta = m\lambda$ auf, die Änderung des optischen Weglängenunterschiedes der Teilstrahlen über die Distanz zwischen zwei benachbarten Maxima im Beugungsmuster ist λ . Eine Verschiebung des Weißlicht-Beugungsmusters um diese Distanz würde also einer zusätzlichen optischen Weglängendifferenz von λ entsprechen, womit sich die tatsächlich gemessene Verschiebung in die vorhandene optische Weglängendifferenz umrechnen lässt.

Hausaufgabe zur Vorbereitung

- Zeichnen Sie den Strahlengang zu Abb. 6 maßstabgetreu und bringen Sie die Zeichnung zur Laborübung mit.

Kontrollfragen zur Vorbereitung

- Was ist Interferenz?
- Was ist Kohärenz?
- Was ist räumliche Kohärenz: Erklärung anhand des Doppelspaltes; Einfluss der Größe der Lichtquelle. **Erklären Sie Abb. 2 dieser Unterlagen.**
- Was ist zeitliche Kohärenz: Erklärung anhand des Doppelspaltes; Einfluss der spektralen Breite der Lichtquelle. **Erklären Sie Abb. 1 dieser Unterlagen.**
- Was ist die Kohärenzlänge, wovon hängt sie ab?
- Erklären Sie die Interferenz am Doppelspalt. Bei welchen Winkeln treten im Fraunhofer-schen Fall Beugungsmaxima auf (kurze Herleitung der Formel)?
- Wie viele Beugungsordnungen sind hinter einem Doppelspalt mit $100\mu\text{m}$ Spaltabstand zu erwarten, wenn das Licht einer räumlich kohärenten Lichtquelle mit etwa 500nm Wellenlänge und $5\mu\text{m}$ Kohärenzlänge den Doppelspalt beleuchtet (=bei welcher Ordnung erreicht der optische Weglängenunterschied der beiden Teilwellen die Kohärenzlänge von $5\mu\text{m}$)?

Kontrollfragen zur Versuchsdurchführung

- Erklären Sie den in der Vorbereitung gezeichneten Strahlengang zu Abb. 6
- Bis zu welcher Größe der Lichtquelle erwarten Sie, dass Interferenzmuster am gegebenen Aufbau für den Doppelspalt mit 0.43mm Spaltabstand sichtbar sind (quantitativ)?
- Wie macht sich eine endliche Kohärenzlänge des verwendeten Lichtes im Beugungsmuster des Doppelspaltes bemerkbar?
- Wie lässt sich mit dem Doppelspalt-Experiment die Dicke einer Schicht bestimmen?
- Wozu ist die Spaltblende „S“ in Abbildung 6 bei diesem Experiment gut?

Versuchsanleitung

Skizze des optischen Aufbaus (nicht Maßstabgetreu)

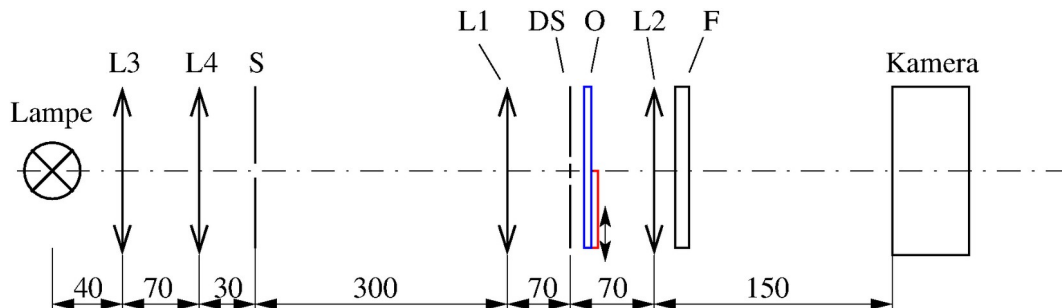


Abbildung 6: Skizze des optischen Aufbaus des Doppelspaltexperimentes (nicht maßstabgetreu). Linsen: L1: $f_1=300\text{mm}$; L2: $f_2=150\text{mm}$; L3: $f_3=40\text{mm}$; L4: $f_4=30\text{mm}$. S: Einstellbare Spaltblende. Das durch die Öffnung der Spaltblende durchtretende Bild der Lampe dient als Lichtquelle zur Beleuchtung des Doppelspaltes. DS: Doppelspalt. O: Substrat (blau) mit Polyacrylat-Schicht (rot), verschiebbar (Pfeil). F: 632nm Bandpassfilter oder Langpassfilter im Filterrad oder freier Durchgang.

Anmerkung:

- Es gibt auf einem Schieber 3 Doppelspalte mit den Abständen 0.43, 0.23 und 0.13 mm
- Klappen bzw. schieben Sie vor Beginn das Substrat mit Polyacrylatschicht aus dem Strahlengang.

Zu 1. Demonstration und Erklärung des Einflusses der Größe einer Lichtquelle auf das Interferenzmuster eines Doppelspaltes.

Messen Sie die Sichtbarkeit (Kontrast) des Beugungsmusters des Doppelspaltes mit 0.23 mm Spaltabstand als Funktion der Größe der Lichtquelle (Breite der Spaltblende) und vergleichen Sie das Ergebnis mit der theoretischen Vorhersage.

- Verwenden Sie monochromatisches Licht: drehen Sie am Filterrad den 633 nm Bandpassfilter in den Strahlengang (Nummer 3 befindet sich dann oben) und schieben Sie den **mittleren Doppelspalt** (jener mit dem Spaltabstand von $d=0.23\text{ mm}$) in den Strahlengang.
- Wählen Sie etwa 6 geeignete Größen der Lichtquelle (das durch die Spaltblende durchtretende Bild der Glühwendel dient hier als Lichtquelle, deren Größe über die Breite der Spaltblende an der μm -Schraube eingestellt werden kann) um den Verlauf des Kontrastes gemäß Abb. 4 b) im Bereich $0 < 2w < 1.5 f_1 \lambda / d$ gut darstellen zu können. Bestimmen Sie dafür zunächst aus dem Experiment jene Spaltbreite, bei der das erste Kontrast-Minimum auftritt. Ein Skalenteil an der Drehtrommel der Spaltblende entspricht $10\text{ }\mu\text{m}$, $100\text{ }\mu\text{m}$ sind mit „10“ beschriftet. Eine Umdrehung entspricht 0.5 mm. Ein Skalenteil am feststehenden Zylinder entspricht 0.5 mm. Bei Skalenwert 0 ist der Spalt nicht vollständig geschlossen, bestimmen und dokumentieren Sie die Abweichung.
- Nehmen Sie für die gewählten Größen der Lichtquelle jeweils ein Foto des Beugungsmusters auf. Passen Sie die Belichtungszeit so an, dass das Bild des Beugungsmuster nirgends

sättigt. Die Intensität in jedem Pixel muss kleiner als 255 sein. Überprüfen Sie das mit dem Histogramm.

- Extrahieren Sie aus den Bildern jeweils einen Querschnitt (z.B. mit imageJ) und stellen Sie die auf die Maximalintensität normierten Querschnitte in einem Diagramm (Intensität vs. Pixelnummer) dar. Berechnen Sie für jede Kurve den Kontrast des Beugungsmusters beim 0. Maximum. Verwenden Sie die Intensität im nullten Maximum als Maximalintensität, die Intensitäten in den \pm ersten Minima als Maß für die Minimalintensität. Ermitteln und begründen Sie die Unsicherheiten. Tragen Sie den Kontrast in einem Diagramm gegen die Größe der Lichtquelle (Breite der Spaltblende) auf. Zeichnen Sie in das gleiche Diagramm den theoretischen Verlauf des Kontrastes aus Gl. 4 ein (die Abstände der Punkte der gerechneten Kurve sollten etwa 0.05mm sein, die Breite der Spaltblende $2w$ sollte den Bereich 0 bis 2 mm haben).

Zu 2. Demonstration und Erklärung des Einflusses der spektralen Breite des Lichtes einer räumlich kohärenten Lichtquelle auf das Interferenzmuster eines Doppelspaltes.

- Stellen Sie die Spaltblende so ein, dass das Licht für den Doppelspalt mit 0.43 mm Spaltabstand räumlich gut kohärent ist. Nehmen Sie je ein Beugungsbild mit dem 633 nm Bandpassfilter (Nummer 3 am Filterrad ist oben), mit dem Langpassfilter (Nummer 2 am Filterrad ist oben) und ohne Filter auf. Achten Sie darauf die Belichtungszeit so anzupassen, dass das Bild des Beugungsmusters nirgends sättigt. Die Intensität in jedem Pixel muss kleiner als 255 sein. Überprüfen Sie das mit dem Histogramm.
- Stellen Sie die Bilder gegenüber und erklären Sie die beobachtbaren Unterschiede. Achten Sie auf die Änderung des Kontrastes bei der nullten und höheren Beugungsordnungen. Erklären Sie die Beobachtung anhand der Transmissionsspektren der Filter.

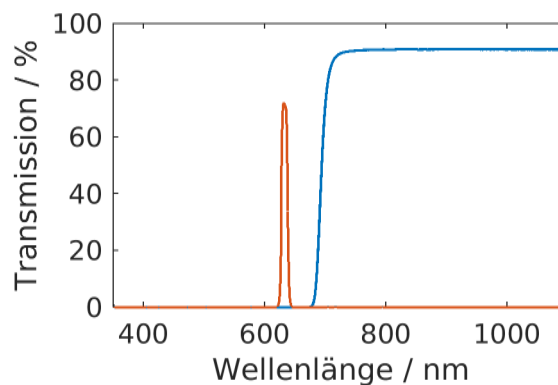


Abbildung 7: Transmissionsspektren des 633 nm Bandpassfilters (orange Linie) und des Langpassfilters (blaue Linie).

•

Zu 3. Bestimmung der Dicke einer Kunststoffschicht mit dem Doppelspalt-Interferenzmuster.

- Verwenden Sie den Doppelspalt mit 0.43 mm Spaltabstand und drehen Sie alle Filter aus

dem Strahlengang.

- Bringen Sie vorsichtig die bis zur Hälfte mit einer Polyacrylat-Schicht überzogene Probe (vgl. Abb. 6 „O“) in den Strahlengang. Beobachten Sie das Beugungsbild und verschieben Sie die Probe mit dem Justageschraube. Wenn die Probe so liegt, dass die Polyacrylat-Schicht nur einen der beiden Spalte abdeckt (wie in Abb. 6 skizziert), muss sich gemäß Gl.6 das Beugungsmuster verschieben.
- Nehmen Sie ein Bild des verschobenen und ein Bild des nicht verschobenen Beugungsmusters auf. Stellen Sie in einem Diagramm beide Querschnitte aus den Bildern dar (Intensität vs. Pixelnummer über die gesamte (!) Bildbreite) und bestimmen Sie die durch die Polyacrylat-Stufe hervorgerufene Verschiebung (Anzahl der Bild-Pixel).
- Bestimmen Sie aus dem Querschnitt des unter Punkt 2 aufgenommenen Beugungsbildes mit dem 633 nm Bandpassfilter den Proportionalitätsfaktor zwischen Pixelzahl und optischer Weglängendifferenz. Verwenden Sie dazu die Pixelzahl zwischen zwei (oder besser 10) Beugungsmaxima und die Differenz der entsprechenden optischen Weglängenunterschiede zwischen den beiden Teilstrahlen (wie viele nm pro Pixel?).
- Rechnen Sie aus der oben bestimmten Verschiebung des Beugungsmusters und dem Proportionalitätsfaktor die durch die Polyacrylat-Schicht hervorgerufene optische Weglängendifferenz bzw. die Dicke der Schicht aus. Die Brechzahl von Polyacrylat beträgt 1.492 bei 633 nm.

Zu 4. Bestimmung der Größe der Lichtquelle, bei denen für Doppelspalte mit unterschiedlichem Spaltabstand das Licht noch räumlich kohärent ist.

- Verwenden Sie monochromatisches Licht (633 nm Bandpass). Bestimmen Sie für jeden der drei Doppelspalte (Spaltabstände: 0.43, 0.23 und 0.13 mm) aus der Beobachtung des Beugungsbildes jene minimale Spaltbreite, bei der der Kontrast des Beugungsmusters das erste Minimum hat.
- Tragen Sie die Messpunkte in ein Diagramm der jeweiligen Spaltbreite vs. Doppelspaltabstand d ein. Ergänzen Sie das Diagramm durch die mit Gl.5 berechnete theoretische Kurve für $2w$ (Die Abstände der Punkte der gerechneten Kurve sollten etwa 0.01 mm sein, d sollte den Bereich 0.1 bis 1 mm haben).

Hinweise zur Erstellung des Laborberichtes/Auswertung

1. Aufgabenstellung:
2. Voraussetzungen und Grundlagen: *Kurze Beschreibung der Beugung am Doppelspalt bei Beleuchtung mit einer monochromatischen Punktquelle; kurze Beschreibung des Effektes ausgedehnter Lichtquellen auf die Beugungsmuster; kurze Beschreibung des Effektes von Lichtquellen endlicher zeitlicher Kohärenz auf das Beugungsmuster. Kurze Beschreibung des Messprinzips zur Schichtdickenbestimmung: Wie erfolgt die Messung / Kalibrierung. Fassen Sie sich kurz (insgesamt maximal 2 Seiten)!*
3. Beschreibung der Versuchsanordnung: **Maßstabgetreue** Skizze des Aufbaues, ergänzt um den Strahlengang sowie dessen Beschreibung: Wo befinden sich die Bilder der Lampe bzw. des Spaltes, wo wird das Fraunhofer'sche Beugungsmuster abgebildet? Wie groß sind die Unsicherheiten der angegebenen Distanzen?
4. Geräteliste
5. Versuchsdurchführung/Messergebnisse: Beschreiben Sie jeweils vor den Messwerttabellen, was Sie wie eingestellt haben und welche Parameter wie während der Messung geändert wurden (z.B: Spaltbreite, Spaltabstand, Filter). Verweisen Sie auf die Skizzen für die Benennung und Position der verwendeten Bedienelemente.
 - Zu 1. Dokumentieren Sie ein repräsentatives Bild des Beugungsmusters und alle Querschnitte.
 - Zu 2. Dokumentieren Sie nur die Bilder der Beugungsmuster.
 - Zu 3. Dokumentieren Sie nur die Querschnitte aus den Beugungsmustern.
 - Zu 4. (Option) Dokumentieren Sie für einen Doppelspalt das Bild des Beugungsmusters mit sehr kleiner Breite des Spaltes S und jenes bei dem ersten Minimum des Kontrastes des Beugungsmusters.
6. **Auswertung:** Erstellen und Erklären Sie alle in der Versuchsanleitung beschriebenen Diagramme mit deutlicher Kennzeichnung der Messpunkte und deren Unsicherheiten; Berechnen Sie die Dicke der Polyacrylat-Schicht.
7. Diskussion /**Fehleranalyse:** Geben Sie für jede Messgröße deren Unsicherheit quantitativ mit einer kurzen Begründung an (z.B: Unsicherheit der Spaltbreite: $5\mu\text{m}$Ursache: Ableseunsicherheit der Schraubenskala). Berechnen Sie die Unsicherheit der abgeleiteten Größen (z.B. Schichtdicke).
8. Zusammenfassung
9. Literatur

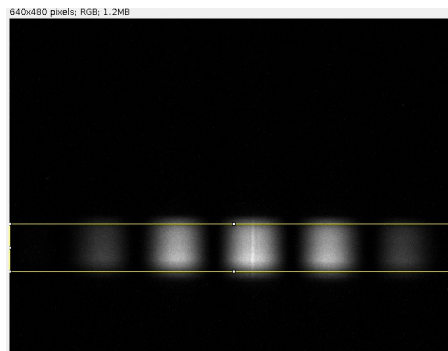
Literatur

- *Experimentalphysik 2*, W. Demtröder, Springer Verlag, 4. oder 5. Auflage, Kapitel 10
- *Optik*, E. Hecht, Oldenbourg, 4. Auflage, Kapitel 12: „Grundlagen der Kohärenztheorie“

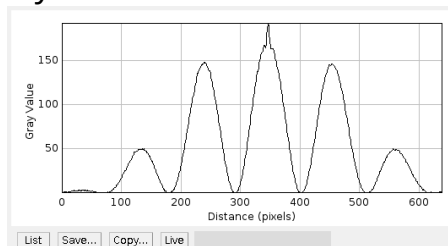
Hinweise zur Erstellung der Querschnitte aus den Bildern der Beugungsmuster

Die Bildquerschnitte können z.B. mit der frei verfügbaren Bildbearbeitungssoftware imageJ erstellt werden (<http://imagej.nih.gov/ij/>):

1. Öffnen Sie die Bilddatei: Menü **File, Open**
2. Markieren Sie eine rechteckige Auswahl über das Beugungsmuster wie im Bild unten. Achten Sie darauf, dass die Auswahl immer vom linken bis zum rechten Rand des Bildes geht. Damit wird sichergestellt, dass die Pixelnummer zwischen den Bildern vergleichbar ist.



3. Wählen Sie im Menü **Analyse** den **Punkt Plot Profile**.



4. Im Fenster des Profil-Plots wählen Sie **Save....** und speichern Sie das Profil als .txt Datei. Diese Datei enthält zwei durch Tabulator getrennte Spalten die nun z.B: in Excel oder QtiPlot importiert werden können. In der ersten Spalte befindet sich die Pixel-Nummer, in der zweiten der Grauwert (Intensität) des Profiles.

Bsp.:

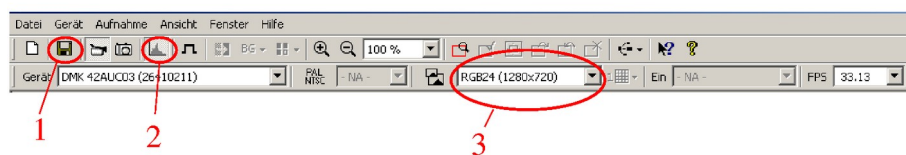
0	1.6618
1	1.5147
2	1.4853
3	1.4265
4	1.8824
5	1.8235
6	2.5000 ...

Hinweise zur Verwendung der Kamera

Die Kamera wird mit der Software "IC Capture" gesteuert.

- Wählen Sie als Bildformat 1280x720 (Auswahl „3“ in Abb. 8(a))
- Im Fenster Eigenschaften, das im Menü Gerät aufgerufen werden kann, werden die Belichtungsparameter eingestellt. Wählen Sie manuell eine Verstärkung von 100 und passen Sie die Belichtungszeit so an, dass das Bild gerade nicht sättigt. Das ist am Besten im Histogramm (Abb. 8(b)) aufzurufen mit dem Symbol „2“ in Abb. 8(a)) ersichtlich.
- Um ein Bild aufzunehmen, klicken Sie auf das Icon mit der **Diskette**, (Abb. 8(a) „1“) bzw. im Menü „Datei“ auf „Bild abspeichern“.

(a)



(b)

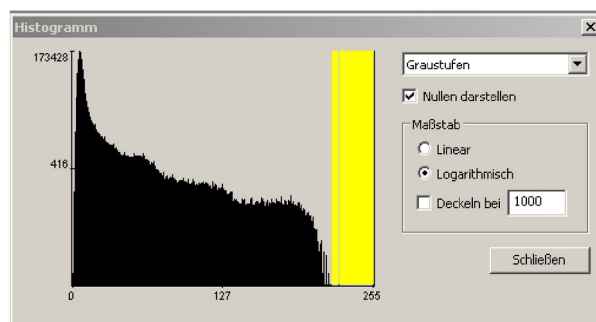


Abbildung 8: (a) Menü von IC-Capture. (b) Histogramm. Dargestellt ist die Anzahl der Pixel (Ordinate) über deren Intensität (Abszisse). Intensitätsbereiche die im Bild nicht auftreten sind gelb markiert. Die Belichtungsparameter sind dann richtig eingestellt, wenn der gelbe Bereich gerade etwas unterhalb von 255 beginnt.

Version

Skriptum:

28.09.2025: Überarbeitung der Grundlagen.

18.09.2020: Überarbeitung, Vereinfachung der Grundlagen. Aufbau eines dritten Experiments

18.11.2016: Korrektur des Spaltabstandes, sinc , $L1L2 \rightarrow L3L4$ in „zu 1.“

27.10.2015: Vereinfachung der Formel zur Schichtdickenbestimmung.

24.09.2015: Einige kleine Korrekturen.

19.11.2014: Ergänzung der Kontrollfragen, einige kleine Korrekturen.

13.10.2014: Einige Korrekturen nach dankenswerten Kommentaren von L. Sproß.

09.09.2014: Einige Korrekturen nach dankenswerter Durchsicht von J. Reynvaan und P. Geistlinger.

21.08.2014: Einige Korrekturen und inhaltliche Verbesserungen nach dankenswerter Durchsicht von H. Ditlbacher

13.08.2014: Erste Version.

Aufbau:

Aug. 2014: Neubau unter Verwendung kommerzieller optischer und optomechanischer Komponenten. Sondergefertigte Teile wurden unter der Leitung von Robert Holzapfel in der feinmechanischen Werkstätte des Institutes für Physik, Karl-Franzens Universität Graz konstruiert und hergestellt. Dank für die Unterstützung!