

Versuchsvorbereitung P2-16: Laser und Wellenoptik A

Michael Walz, Kathrin Ender
Gruppe 10

9. Juni 2008

Inhaltsverzeichnis

L LASER	2
1 Brewsterwinkel	2
1.1 Bedeutung des Brewsterwinkels	3
1.2 Bestimmung des Brewsterwinkels und des Brechungsindex des Glases	3
2 Beugung an Spalt, Steg, Kreisloch, Kreisblende und Kante	3
2.1 Spaltbreitenbestimmung	3
2.2 Babinet-Theorem	4
2.3 Kreisöffnung, Kreisscheibe und Kante	4
2.4 Durchmesser eines Haares	4
3 Beugung an Mehrfachspalten und Gittern	5
3.1 Bestimmung der Spaltbreite und des Spaltabstand eines Doppelspaltes	5
3.2 Dreifachspalt	5
3.3 Bestimmung der Gitterkonstante eines Strichgitters	6
3.4 Kreuz- und Wabengitter	6
4 Abbildung nichtselbstleuchtender Gegenstände	6
5 Holographie	7

L LASER

LASER ist ein Akronym aus der englischen Sprache und steht für *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, zu deutsch: *Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung*.

Im Versuch verwendet wir einen He-Ne-Laser, der dementsprechend hauptsächlich aus einem Gasgefäß mit einem Helium-Neon-Gemisch besteht. Über zwei Elektroden wird das Heliumgas gezündet und damit die Heliumatome angeregt. Die Heliumatome können nun ihre zusätzliche Energie durch inelastische Stöße an die Neon-Atome abgeben und diese anregen. Hierbei entsteht eine Besetzungsinversion; d.h. es befinden sich mehr Neonatome im angeregten höherenergetischen Zustand als im niederenergetischen Zustand. Die Energiedifferenz zwischen zwei solchen Zustände entspricht der Wellenlänge eines Photons von 633 nm. Der Übergang zwischen den Zuständen erfolgt nicht spontan, sondern muss durch die Photon mit passender Wellenlänge angeregt werden. Gelangt ein solches Photon in den Bereich eines Neonatoms, so kann es entweder absorbiert werden und das Neonatom vom energiearmen in den energiehöheren Zustand wechseln oder ein angeregtes Neonatom gibt seine Energie in Form eines zweiten zum ersten kohärenten Photons ab. Wegen der Besetzungsinversion werden mehr Photonen erzeugt, als vernichtet.

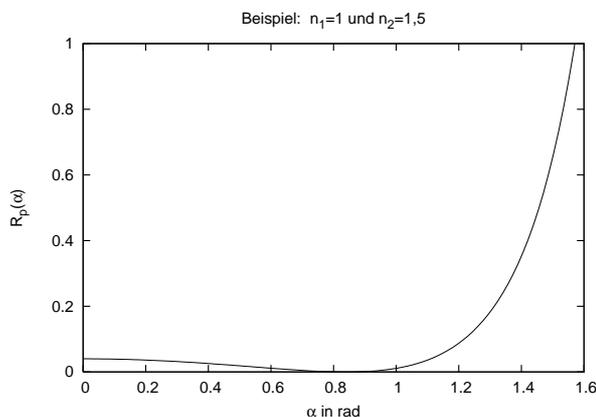
Zusätzlich befindet sich die gesamte Anordnung zwischen zwei Spiegeln, die als Resonator dienen. Der eine Spiegel soll quasi perfekt spiegeln und der zweite Spiegel nur leicht durchlässig sein, sodass sich die Anzahl der Photonen so lange aufschaukeln kann, bis der Verlust über den zweiten Spiegel groß genug geworden ist.

Der Vorteil des so erzeugten Laserlichts ist, dass es stark gebündelt und ebenso stark kohärent ist. Die Kohärenz ist vorallem für Beugungsversuche relevant, da dort aufgrund des Phasenunterschiedes Interferenzerscheinungen auftreten.

1 Brewsterwinkel

Beim Gaslaser wird das Entladungsrohr mit den sogenannten Brewsterfenstern abgedeckt. Der Laserstrahl passiert das Brewsterfenster noch bevor er auf den Resonatorspiegel trifft. Das Brewsterfenster kann unter einem bestimmten Winkel angebracht werden, so dass das parallel zur Einfallsebene polarisierte Licht vollständig durchgelassen wird ($R_p = 0$ und $T_p = 1$), während das senkrecht polarisierte Licht auch reflektiert wird, so dass es abgeschwächt wird, bzw nicht durch die Resonatorspiegel verstärkt werden kann. R_p kann als Funktion des Einfallswinkels α angeben werden.

$$R_p = \left(\frac{\tan(\alpha - \beta)}{\tan(\alpha + \beta)} \right)^2 \quad \text{mit} \quad \beta = \arcsin \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \alpha \right)$$



Der Winkel bei dem $R_p = 0$ gilt heißt Brewsterwinkel α_B . Es gilt:

$$\alpha_B + \beta = 90^\circ$$

Der Wellenvektor des reflektierten Strahls muss also senkrecht zum Wellenvektor des gebrochenen Strahls sein. Mit dem Brechungsgesetz folgt:

$$\tan \alpha_B = \frac{n_2}{n_1}$$

1.1 Bedeutung des Brewsterwinkels

Um sich die Bedeutung des Brewsterwinkels vor Augen zu führen, sollen wir bei einem Laser mit externen Resonatorspiegeln einen drehbaren Plattenhalter mit planparalleler Glasscheibe zwischen Entladungsrohr und Resonatorspiegel bringen. Beim Drehen der Glasscheibe verändert sich die Laserintensität. Ist der Einfallswinkel gleich dem Brewsterwinkel ist sie maximal.

1.2 Bestimmung des Brewsterwinkels und des Brechungsindex des Glases

Der Plattenhalter soll nun außerhalb des Lasers montiert werden und so gedreht werden, dass die Reflexion minimal bzw die Transmission maximal wird. Es gibt also zwei Möglichkeiten den Brewsterwinkel einzustellen. Man kann zum einen die Reflexion an der Zimmerdecke beobachten und schauen wann diese minimal wird. Oder man kann das Maximum der Transmission mit einem Si-Photoelement mit Meßinstrument bestimmen. Die erste Methode ist vermutlich genauer, da es bei geringen Intensitäten einfacher ist eine Intensitätsveränderung festzustellen. „Null“ lässt sich vermutlich leichter erkennen als ein „breites“ Maximum. „Breit“ da man vermutlich nur einen Bereich angeben kann, indem die Intensität maximal ist.

Geht man von einem Brechungsindex von $n_1 = 1$ für Luft aus so erhält man den Brechungsindex der Glasplatte bei bekannten Brewsterwinkel aus:

$$n_2 = \tan(\alpha_B)$$

2 Beugung an Spalt, Steg, Kreisloch, Kreisblende und Kante

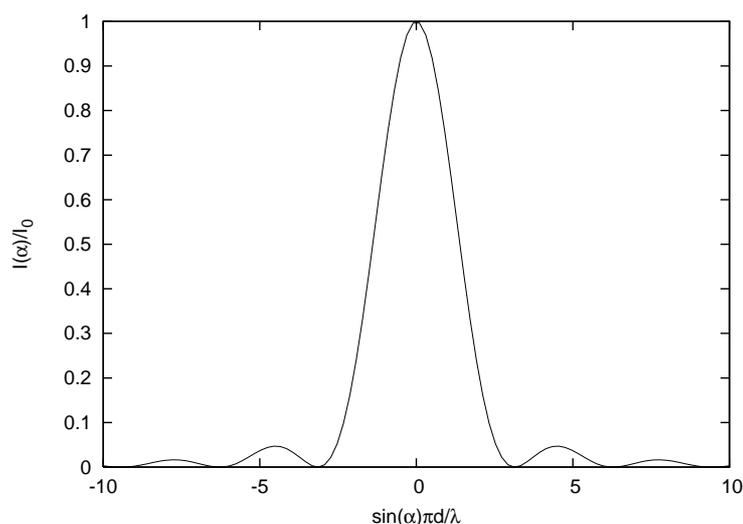
2.1 Spaltbreitenbestimmung

Aus der Lage der Beugungsmaxima und -minima im Beugungsbild, die durch konstruktive bzw destruktive Interferenz durch Gangunterschiede von Teilstrahlbündeln hervorgerufen werden, kann die Spaltbreite bestimmt werden. Für einen Einzelspalt gilt folgender Zusammenhang:

$$\text{Minima n-ter Ordnung } n\lambda = d \cdot \sin \alpha_n$$

$$\text{Maxima n-ter Ordnung } (2n + 1)\lambda = d \cdot \sin \alpha_n$$

α_n ist der Winkel unter dem die Extrema auftreten. d ist die zu bestimmende Spaltbreite. Die Lage der Maxima und Minima wird außerdem aus der Intensitätsverlauf für den Einfachspalt ersichtlich:



$$\frac{I(\alpha)}{I_0} = \frac{\sin^2\left(\frac{\pi d}{\lambda} \cdot \sin(\alpha)\right)}{\left(\frac{\pi d}{\lambda} \cdot \sin(\alpha)\right)^2}$$

Der Winkel α_n könnte zum Beispiel durch Messung der Entfernungen Spalt-Schirm l und Extremum-Hauptmaximum x .

$$\tan \alpha_n = \frac{x}{l}$$

Da die Wellenlänge des verwendeten Lasers bekannt ist $\lambda = 632,8\text{nm}$, kann bei Ausmessung mehrerer Ordnungen die Spaltbreite d aus der Steigung einer linearen Regression durch die Auftragung $n \cdot \pi \cdot \lambda$ über $\sin \alpha_n$ bestimmt werden.

2.2 Babinet-Theorem

Es soll nun das Beugungsbild eines Steges mit der eines gleichbreiten Spaltes verglichen werden. Das Babinet-Theorem sagt, dass zwei Gegenstände die komplementär zueinander sind ein identisches Beugungsbild erzeugen. Komplementär bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die lichtdurchlässigen Stellen gerade mit den nicht lichtdurchlässigen vertauscht sind. Der Steg ist also komplementär zum Spalt und es ist ein wie in 2.1 beschrieben Beugungsbild zu erwarten.

2.3 Kreisöffnung, Kreisscheibe und Kante

Es sollen die Beugungsbilder von Kreisöffnung, Kreisscheibe und Kante betrachtet werden. Wegen des Babinet-Theorem ist bei Kreisöffnung und Kreisscheibe dasselbe Beugungsbild zu erwarten¹. Für die Kreisöffnung ist es offensichtlich, dass sich in der Mitte, also bei einem Winkel $\alpha = 0^\circ$ ein Maximum befinden muss. Die weiteren Maxima sind kreisförmig um dieses Hauptmaximum angeordnet. Auch bei der Kreisscheibe ist bei $\alpha = 0^\circ$ ein heller Fleck, der sogenannte Poissonsche Fleck zu sehen. Er entsteht durch Beugung an der Kante der Scheibe. Die dort gebeugten Strahlen haben genau in der Mitte dieselbe Phase und es kommt zu konstruktiver Interferenz.

Auch an der Kante wird das einfallende Licht gebeugt, so dass kein scharfer Schattenwurf zu erkennen ist, sondern ein mit Interferenzstreifen durchzogenes Bild.

2.4 Durchmesser eines Haares

Genauso wie aus dem Beugungsbild in 2.1 die Spaltbreite bestimmt werden konnte, kann auch der Durchmesser eines Haares bestimmt werden, wenn man es als komplementären Spalt

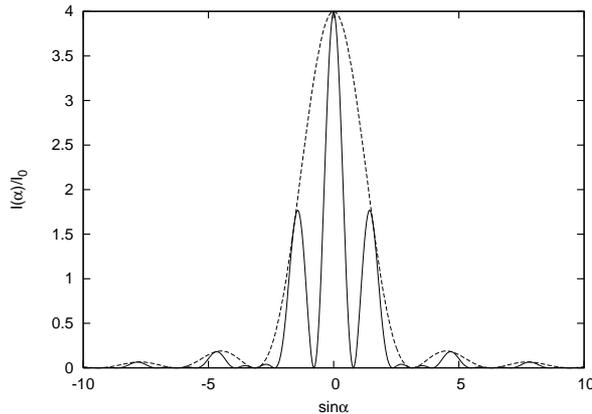
¹da beide den gleichen Durchmesser haben

in den Strahlengang bringt. Die so erhaltene Dicke soll mit dem Ergebnis einer Messung mit einer Mikrometerschraube verglichen werden.

3 Beugung an Mehrfachspalten und Gittern

3.1 Bestimmung der Spaltbreite und des Spaltabstand eines Doppelpaltes

Aus dem Beugungsbild eines Doppelpaltes soll die Spaltbreite d und der Abstand zwischen den beiden Spalten g bestimmt werden. Beim Doppelpalt ($N=2$) ergibt sich folgende Intensitätsverteilung:



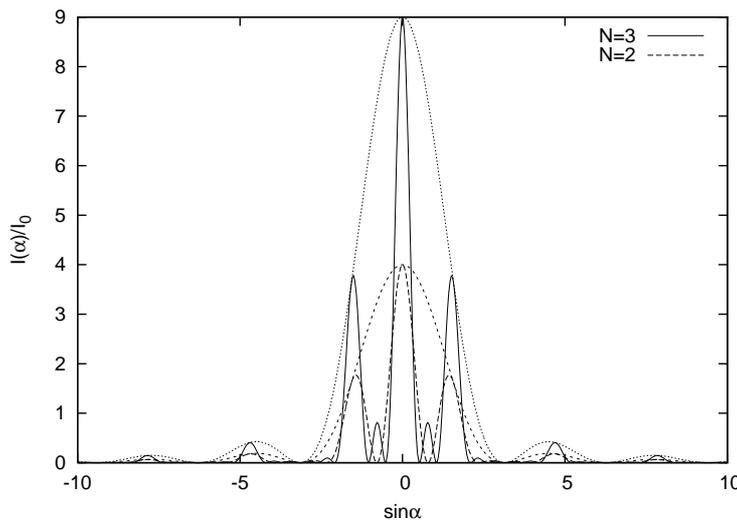
$$\frac{I(\alpha)}{I_0} = \frac{\sin^2\left(\frac{\pi d}{\lambda} \cdot \sin(\alpha)\right)}{\left(\frac{\pi d}{\lambda} \cdot \sin(\alpha)\right)^2} \cdot \frac{\sin^2\left(\frac{N\pi g}{\lambda} \cdot \sin(\alpha)\right)}{\sin^2\left(\frac{\pi g}{\lambda} \cdot \sin(\alpha)\right)}$$

Den Spaltabstand g kann man aus den Extrema der Verteilung bestimmen. Es gilt:

$$\text{Maximum n-ter Ordnung: } n\lambda = g \cdot \sin \alpha$$

Aus dem Minima der Einhüllenden kann die Spaltbreite bestimmt werden wie in 2.1.

3.2 Dreifachspalt



Beim Dreifachspalt treten zusätzlich zu den Hauptmaxima noch sogenannte Nebenmaxima geringerer Intensität zwischen den Hauptmaxima auf. Je mehr Spalte desto mehr Nebenmaxima gibt es. Die Hauptmaxima selbst sind an der selben Stelle jedoch deutlich schärfer und ausgeprägter.

3.3 Bestimmung der Gitterkonstante eines Strichgitters

Je nach Literatur ist als Gitterkonstante der Abstand zwischen zwei Strichen oder dessen Kehrwert definiert. Misst man die Maxima aus so erhält man mit

$$n\lambda = g \cdot \sin \alpha$$

g aus der Steigung der Linearen Regression durch die Auftragung $n \cdot \lambda$ über $\sin \alpha$.

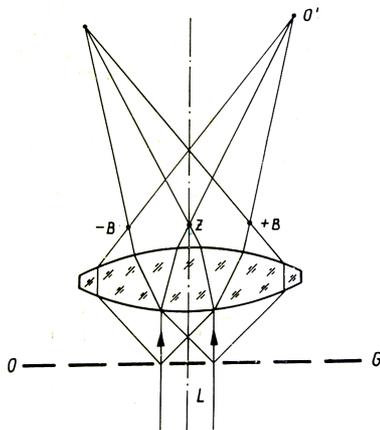
Je mehr Spalte des Gitters beleuchtet sind desto schärfer und deutlicher sind die Maxima zu erkennen.

3.4 Kreuz- und Wabengitter

Es soll außerdem als Demonstrationsversuch ein Kreuz- und ein Wabengitter untersucht werden. Wir erwarten die Überlagerung von Beugungsbildern, die zu den Gittern gehören, die sich zu dem Gesamtgitter überlagern.

4 Abbildung nichtselbstleuchtender Gegenstände

Nun soll ein Gitter mit ca. 100 Spalten pro cm mit parallelem Licht beleuchtet werden und mit Hilfe einer 150mm-Linse abgebildet werden. Es soll untersucht werden, wie das Fehlen von bestimmten Beugungsordnungen sich auf das Bild auswirkt. Dazu kann im Versuch über eine Beugungsordnungsblende gezielt das Maxima der nullten, ersten oder zweiten Ordnung ausgeblendet werden.



Quelle: Vorbereitungsmappe

Für den Winkel α , unter dem das erste Maximum auftritt, gilt:

$$\sin \alpha = \frac{\lambda}{g}$$

Dabei ist λ die Wellenlänge des Lichts zwischen Objekt und Linse und g die Gitterkonstante. Arbeitet man mit Flüssigkeiten, wie z.B. Öl, so kann man die Wellenlänge durch den Brechungsindex n und die Vakuumwellenlänge λ_0 angeben:

$$\sin \alpha = \frac{\lambda_0}{n \cdot g}$$

Wenn man jetzt voraussetzt, dass das erste Maxima gerade noch auf die Linse fallen soll, α also der halbe Öffnungswinkel ist, so erhält man für den kleinstmöglichen Abstand, der noch

aufgelöst werden kann:

$$g = \frac{\lambda_0}{n \cdot \sin \alpha} = \frac{\lambda_0}{A} \quad A = n \cdot \sin \alpha$$

Dabei muss g natürlich nicht mehr zwangsweise ein Gitter sein, sondern kann auch ein anderer kleiner Abstand zwischen zwei zu unterscheidenden Objekten sein.

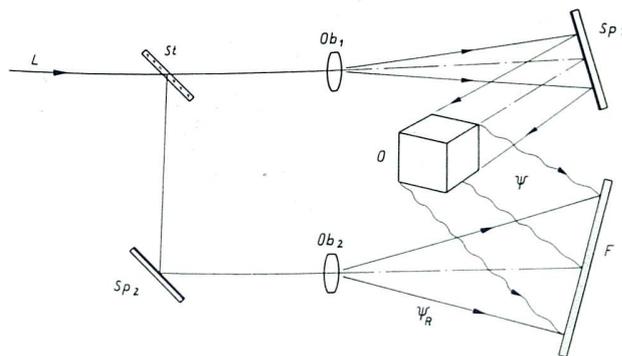
Die Größe A nennt man nach Abbé die *numerische Apertur*. Die Bildentstehung in einem Mikroskop erfolgt genauso. Daraus entstand Abbés oben aufgeführte Formel zur Auflösbarkeit.

Im Versuch soll auch noch geklärt werden, was passiert, wenn man nur die erste bzw. nur die zweite Beugungsordnung zulässt. Dann sollte ebenfalls ein Bild entstehen, das nicht mit der Wirklichkeit, also nicht mit dem abgebildeten Objekt, übereinstimmt.

5 Holographie

In diesem Versuchsteil soll nun ein Hologramm reproduziert werden.

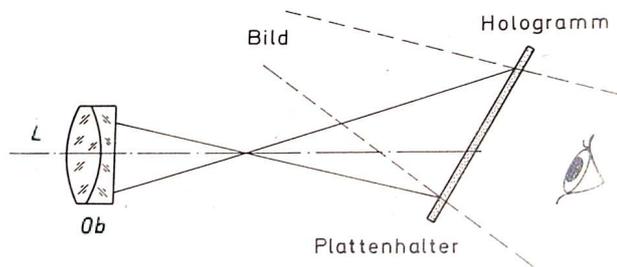
Zur Herstellung eines Hologramms benötigt man stark kohärentes Licht. Dazu wird meistens ein LASER benutzt. Das Licht des LASERS L wird von einem Strahlteiler St geteilt und über zwei Linsen Ob_i aufgefächert. Der eine Teil des Lichts erreicht über einen Spiegel Sp das Objekt, von dem ein Hologramm angefertigt werden soll. Das vom Objekt gestreute Licht (im Bild mit Ψ bezeichnet) wird nun von einem extrem feinen Film aufgefangen. Dort interferiert es mit dem Referenzlicht, das ungestreut den Film erreichte.



Quelle: Vorbereitungsmappe

Durch diese Technik wird, im Gegensatz zur klassischen Fotografie, die Phase der Elektromagnetischen Welle auf dem Film festgehalten.²

²Genaugenommen wird der Phasenunterschied zum Referenzlicht festgehalten



Quelle: Vorbereitungsmappe

Beleuchtet man den nun entwickelten Film wieder mit dem gleichen Referenzlicht, so wird das Referenzlicht an dem Hologramm (ähnlich einem feinem Gitter) gebeugt und auf der Gegenseite entsteht genau die Elektromagnetischen Wellen, die vom Objekt O auf den Film gestreut wurden. Schaut man durch den Hologrammfilm hindurch, so sieht man ein 3-dimensionales virtuelles Bild des Objektes, das auch aus (leicht) verschiedenen Blickwinkeln beobachtet werden kann.

Im Versuch soll ein vorhandenes Hologramm auf diese Weise sichtbar gemacht und beobachtet werden. Ebenso soll das reale Bild beobachtet werden, indem ein Schirm (oder weißes Papier) in den Strahlengang gehalten wird.