

VORBEREITUNG: LASER A

FREYA GNAM, TOBIAS FREY

1. FUNKTIONSPRINZIP DES LASERS

Der Begriff Laser ist eine Abkürzung für *light amplification by stimulated emission of radiation* (Lichtverstärkung durch stimulierte Strahlungsaussendung). Die Gemeinsamkeit der unterschiedlichen Laser liegt im Entstehungsprozess des Lichts, der so genannten stimulierten Emission. Die wichtigsten Bestandteile eines Lasers sind ein optisch aktives Medium, mittels dessen das Licht erzeugt wird und ein Resonator, der für die Eigenschaften des Laserstrahls, wie Parallelität, verantwortlich ist. Führt man einem Atom Energie zu, so kann ein Elektron in einen angeregten Zustand übergehen. Licht entsteht, indem ein Elektron von einem angeregten zu einem energieärmeren Zustand wechselt, wobei die Energiedifferenz in Form eines Lichtteilchens (Photon) abgegeben wird. Unter Absorption versteht man den entgegengesetzten Prozess, bei dem ein Elektron durch die Energie eines Photons auf ein höheres Energieniveau angehoben wird. Bei einem Laser erfolgt im Unterschied zu einer herkömmlichen Lichtquelle der Übergang nicht durch spontane Emission, sondern durch stimuliertes Emission. Unter der stimulierten Emission versteht man, dass der Übergang eines Elektrons von einem höheren in ein tieferes Energieniveau unter Emission eines Photons durch ein anderes Photon ausgelöst wird. Das induzierte Photon bleibt hierbei erhalten. Weiter haben das induzierte und das emittierte Photon die gleiche Quantenzahlen, wodurch Lichtverstärkung erzielt wird. Die zweite wichtige Komponente des Lasers, der Resonator, besteht aus zwei Spiegeln, zwischen denen das Licht beim Hin- und Herlaufen weiter verstärkt wird. Einer der beiden Spiegel ist teilweise lichtdurchlässig, um Licht aus dem Laser herauszulassen. Besondere Eigenschaften des Lasers sind seine hohe Strahlungsdichte, sowie die große räumliche und zeitliche Kohärenz.

2. BREWSTERWINKEL

2.1. Anwendung des Brewsterwinkels. Trifft ein Laserstrahl auf ein optisches Medium, so wird ein Teil des Strahls reflektiert und ein Teil gebrochen und transmittiert. Beträgt der Winkel zwischen einfallendem und reflektierten Strahl $\alpha = 90^\circ$, so besteht der reflektierte Strahl nur aus senkrecht zur Einfallsebene polarisiertem Licht. Dieser Winkel wird Brewsterwinkel genannt. Die Definition des Brewsterwinkel für einen Strahl der aus Luft auf ein Medium mit Brechungsindex n trifft, ergibt sich also zu:
$$\tan \alpha = n$$

Bei einem Gaslaser ist es notwendig, diesen mit Glas zu umschließen. Um Reflexionsverluste an den Enden eines Gaslasers zu vermeiden, verwendet man Glasplatten, die unter dem Brewsterwinkel angeordnet sind. Parallel zur Einfallsebene polarisiertes Licht erleidet somit keine Reflektionsverluste. Insgesamt emittiert der Laser linear polarisiertes Licht, da die Komponenten des Lichts senkrecht zur Einfallsebene zum Teil reflektiert und damit geschwächt werden.

2.2. Demonstration der Notwendigkeit der Brewsterfenster. Um die Notwendigkeit des Brewsterfensters zu demonstrieren, wird eine planparallele Glasscheibe in den Strahlengang zwischen Entladungsrohr und Resonatorspiegel eingebracht. Das Licht wird zum größten Teil an der Glasplatte gebrochen, wobei der reflektierte Anteil vom Winkel der Glasplatte gegen den Strahlengang abhängt. Ist der Winkel zwischen dem Strahlengang und der Glasplatte gleich dem Brewsterwinkel, so wird der Verlust durch Reflexion minimal. Aus diesem Grund benutzt man die Brewsterfenster, da sonst aufgrund der Reflexion ein viel zu großer Intensitätsverlust auftreten würde.

2.3. Der Brechungsindex eines Glases. Um den Brechungsindex des Glases zu bestimmen, verwenden wir den geschlossenen Laser und halten die Glasplatte in den Strahlengang. Im Gegensatz zum vorherigen Versuch geschieht das Einbringen der Glasplatte außerhalb des Resonators. Wie im vorherigen Abschnitt erklärt, hängt die Intensität der Reflexion vom Winkel zwischen der Glasplatte und dem Strahlengang ab. Unter dem Brewsterwinkel wird die Reflexion null und wir sehen keinen Lichtfleck mehr an der Decke, der auf Grund der Reflexion entsteht. Der Brewsterwinkel könnte auch dadurch bestimmt werden, dass die Intensität des transmittierten Strahls mittels einer Photodiode gemessen wird. Erreicht diese Intensität ein Maximum, so ist der Brewsterwinkel erreicht. Dieses Verfahren ist allerdings ungenauer als das mittels Reflexion, da das Verschwinden der Reflexion leichter und eindeutiger als das Maximum mit der Photodiode zu bestimmen ist. Mittels der Beziehung $\tan \alpha = n$ kann man den Brechungsindex berechnen.

3. BEUGUNG AN VERSCHIEDENEN OBJEKten

3.1. Die Breite verschiedener Einzelpalte. Auf Grund der Beugung von Licht an einem Einzelpalt der Breite d , kann man auf einem Schirm, der sich im Abstand y vom Spalt befindet, ein Interferenzmuster beobachten. Betrachtet man das Interferenzmuster im Fernfeld, so kann man die Fraunhofer-Beugung (Fernfeldnäherung) anwenden und erhält folgende Gleichung für die zu messenden Intensitäten: $I(\theta) = I_0 \cdot \frac{\sin^2(x(\theta))}{x^2(\theta)}$ mit $x(\theta) = \frac{\pi}{\lambda} \cdot d \cdot \sin(\theta)$. Wir erwarten ein Beugungsbild wie in Abbildung 1.

Um die Breite d des Spaltes, die nicht genau bekannt ist, zu berechnen, benutzen wir die Lage der Beugungsminima. Damit die Intensität in obiger Gleichung null wird,

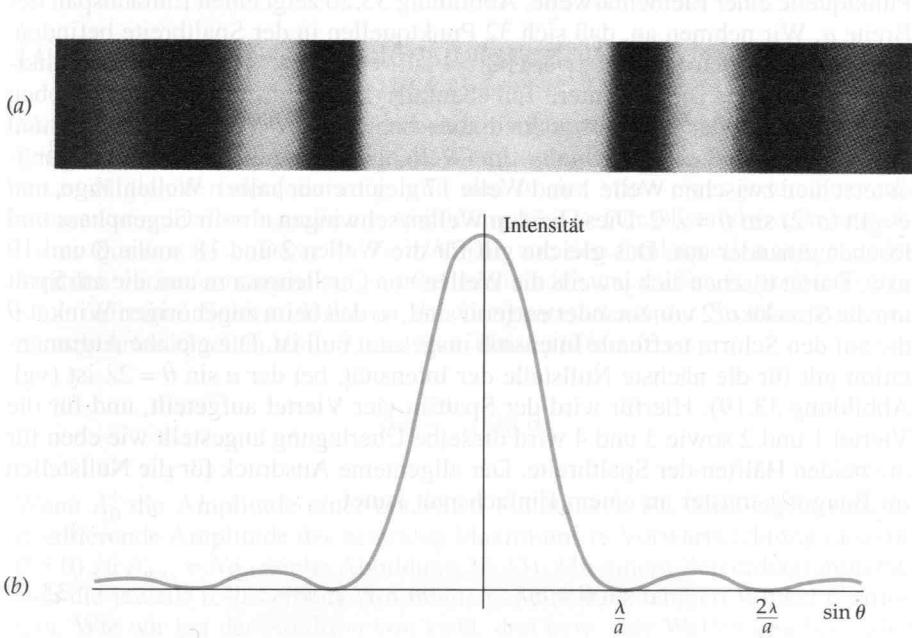


ABBILDUNG 1. Beugungsbild des Einfachspaltes

muss gelten:

$$\sin(\theta) = \frac{n\lambda}{d} \approx \frac{x_n}{y}$$

x_n wird durch Messung des Abstandes zwischen einem der Minima und der Mitte des Beugungsmuster bestimmt. y ist der Abstand des Schirms vom Gitter.

3.2. Das Babinet-Theorem. Nun sollen das Beugungsbild des Einfachspaltes mit dem eines Steges verglichen werden. Hier findet das Babinet-Theorem Anwendung. Es besagt, dass komplementäre Beugungsflächen gleiche Beugungsmuster ergeben.

3.3. Das Beugungsbild einer Kreisöffnung, einer gleichgroßen Kreisscheibe sowie einer Kante. Nach dem Babinet-Theorem haben die Kreisöffnung und die Kreisscheibe die gleichen Beugungsbilder. Bei der Kreisöffnung (Lochblende) hat die Beugungsfigur ihr Maximum bei $\theta = 0^\circ$, da die Strahlen hier einen Gangunterschied von 0° haben. Mittels des Babinet'schen Theorems erklärt sich, dass die Kreisscheibe genauso wie die Lochblende im Zentrum ein Beugungsmaximum hat. Dieser Punkt wird Poisson'scher Fleck genannt. Auch an der Kante wird das Licht gebeugt. Es ergibt sich somit keine scharfe Abbildung auf dem Schirm, sondern ein von Interferenzstreifen durchzogenes Bild.

3.4. Der Durchmesser eines Haares. Es soll der Durchmesser eines Haars bestimmt werden. Da nach dem Babinetischen Theorem für das Haar das gleiche Beugungsbild wie bei einem Spalt zu erwarten ist, kann man die Formel wie beim Einfachspalt verwenden. Zur Kontrolle soll die Breite des Haars auch noch mit einer Mikrometer-schraube bestimmt werden.

4. BEUGUNG AN MEHRFACHSPALTEN UND GITTERN

4.1. Doppelspalt. Für das an einem Doppelspalt mit Spaltbreite b und Spaltabstand d auftretende Beugungsmuster ergibt sich folgende Intensitätsverteilung auf dem Schirm:

$$I = I_0 \cdot \frac{\sin^2(\pi \frac{b}{\lambda} \sin(\theta))}{(\pi \frac{b}{\lambda} \sin \theta)^2} \cdot \frac{\sin^2(2\pi \frac{d}{\lambda} \sin(\theta))}{\sin^2(\pi \frac{d}{\lambda} \sin(\theta))}$$

Die Gleichung ist aus zwei Quotienten zusammengesetzt, wobei der erste Teil die im ersten Abschnitt von 3.1 diskutierte Beugungsfunktion des Einzelspalt beschreibt, die hier die Einhüllende des Interferenzmuster bildet.

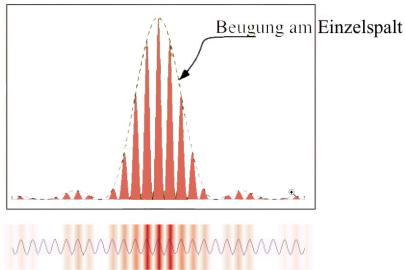


ABBILDUNG 2. Beugungsbild des Doppelspalts

Es ergibt sich qualitativ ein Beugungsbild wie in Abbildung 2 dargestellt.

Für die Intensitätsminima mit Abstand x_n vom Maximum 0. Ordnung auf dem Schirm (Abstand Spalt-Schirm = y) ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\sin(\alpha) = (n + \frac{1}{2}) \cdot \frac{\lambda}{d} \approx \frac{x_n}{y}$$

Aus der Messung der Abstände x_n der Minima auf dem Schirm lässt sich damit auf den Abstand d der Spalte schließen. Um die Breite eines der beiden Spalte bestimmen zu können, misst man nun die Minima der Einhüllenden. Diese sind durch die Beugungsfunktion der Einzelspalte gegeben. Man verfährt wie im ersten Abschnitt von 3.1 gezeigt. Da diese Minima aber nur schwer zu erkennen sind und somit die Messung mit einem großen Ablesefehler behaftet sein wird, sollte eine genauere Messung mit einem Einzelspalt durchgeführt werden (einer der beiden Spalte könnte z.B. abgedeckt werden). Dabei ergibt sich eindeutiger die schon oben erwähnte Beugungsfunktion des

Einzelspalts. Wie im ersten Abschnitt von 3.1 kann aus dem Interferenzmuster auf dem Schirm die Spaltbreite bestimmt werden.

4.2. Dreifachspalt. Wird anstelle des Doppelspalts ein Dreifachspalt verwendet, so werden die Maxima schmäler und schärfer. Die Hauptmaxima treten schärfer hervor und die Nebenmaxima werden zahlreicher aber auch schwächer.

Vergleicht man die Beugungsbilder verschiedener Doppelspalte miteinander, so lassen sich qualitativ folgende Aussagen treffen:

- Spaltabstand kleiner: größerer Abstand der Maxima
- Spaltbreite kleiner: Beugungsbild wird größer

4.3. Strichgitter. Bei einem Strichgitter werden die Hauptmaxima noch wesentlich schärfer abgebildet. Es treten auch wesentlich mehr Nebenmaxima auf, die aber schwächer sein werden und daher auch kaum zu beobachten sind. Um die Gitterkonstante zu bestimmen, braucht man die Abstände der Hauptmaxima, die durch konstruktive Interferenz entstehen. Ihr Gangunterschied ist gerade ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge λ . Für die Gitterkonstante erhält man:

$$\begin{aligned}\tan \theta &= \frac{x_n}{y} \\ \sin \theta &= \frac{n\lambda}{d} \\ \sin \theta &\approx \tan \theta \\ d &= y \cdot \frac{n\lambda}{x_n}\end{aligned}$$

Es wurden die gleichen Variablenbezeichnungen wie beim Doppelspalt verwendet. Um die Beziehungen herzuleiten wurde für die Abbildungsgeometrie die Kleinwinkel Näherung verwendet.

4.4. Kreuz- und Wabengitter. Die oben angestellten Überlegungen gelten ebenso beim Kreuz- und beim Wabengitter. Allerdings muss bei den Beugungsbildern beachtet werden, dass eine zusätzliche Raumkomponente hinzukommt. Werden nun die schon behandelten Beugungsrichtungen überlagert, so erhält man das Beugungsbild mit dieser zusätzlichen Richtung.

5. ABBILDUNG NICHTSELBSTLEUCHTENDER GEGENSTÄNDE

Ein Gitter (100 Striche/ cm) wird mit parallelem Licht beleuchtet und mithilfe einer 150 mm Linse über einen Umlenkspiegel auf eine Mattscheibe abgebildet. Das Gitter wird dadurch seitenverkehrt auf den Schirm abgebildet. Wenn man nun in die Brennebene eine Beugungsordnungsblende einbringt ist es möglich höhere Ordnungen des

Interferenzmusters auszublenden. Dies ist möglich, da sich dort alle zur optischen Achse parallelen Strahlen, welche durch das Gitter gegangen sind schneiden. Abbildung 3 zeigt schematisch den Weg des Lichts durch das Gitter und die Linse bis zum Schirm.

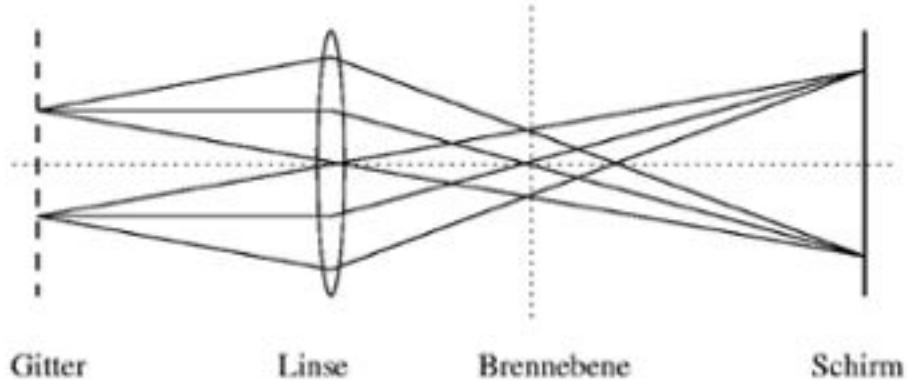


ABBILDUNG 3. Strahlengang des Lichts

Es soll nun ein digitalisiertes bzw. gerastertes Bild (Pixel) anstatt des Gitters in den Strahlengang eingebracht werden. Es ist nun möglich mit der Beugungsordnungsblende höhere Ordnungen auszublenden. Dadurch gehen Informationen über das Bild verloren. Wird nun das Bild mit einer Linse scharf auf den Schirm abgebildet, entsteht ein Bild ohne die störenden Pixel.

6. HOLOGRAPHIE

Die Holografie ist ein fotografisches Verfahren zur Aufzeichnung von (u.A.) Bildinformation eines abgelichteten Objekts inklusive seiner räumlichen (dreidimensionalen) Information. Mittels Laserlicht wird dabei das gesamte Wellenfeld auf eine geeignete Fotoplatte abgebildet. Da das direkte Laserlicht mit dem vom Objekt reflektierten Laserlicht (auch) auf der Bildplatte überlagert wird und interferiert, enthält die holographische Bildplatte Informationen über Amplitude und Phase des vom Objekt kommenden Wellenfeldes und damit die Rauminformation über das Objekt.

Im Gegensatz zur Stereografie (Aufzeichnung von räumlichen Bildern mit konventioneller Fotografie) wird dabei kohärentes Laserlicht verwendet, um die Interferenzmuster, die ein Objekt im Strahlengang erzeugt, auf einem fotografischen Film abzubilden.

Durchleuchtet man diese Bildplatte wieder mit monochromatischem Laserlicht und wählt die gleiche Wellenlänge, wie der bei der Aufnahme, so wird die ursprüngliche Wellenfront rekonstruiert. So erscheint nicht ein perspektivisches sondern ein echtes dreidimensionales Bild des aufgezeichneten Objektes. Verändert also ein Betrachter den Blickwinkel auf das Hologramm, so kann er Teile des Objekts erkennen, was bei einer perspektivischen Zeichnung oder Bild nicht der Fall ist. Ein so entstandenes Abbild, manchmal aber auch die Fotoplatte selbst, wird als Hologramm bezeichnet.

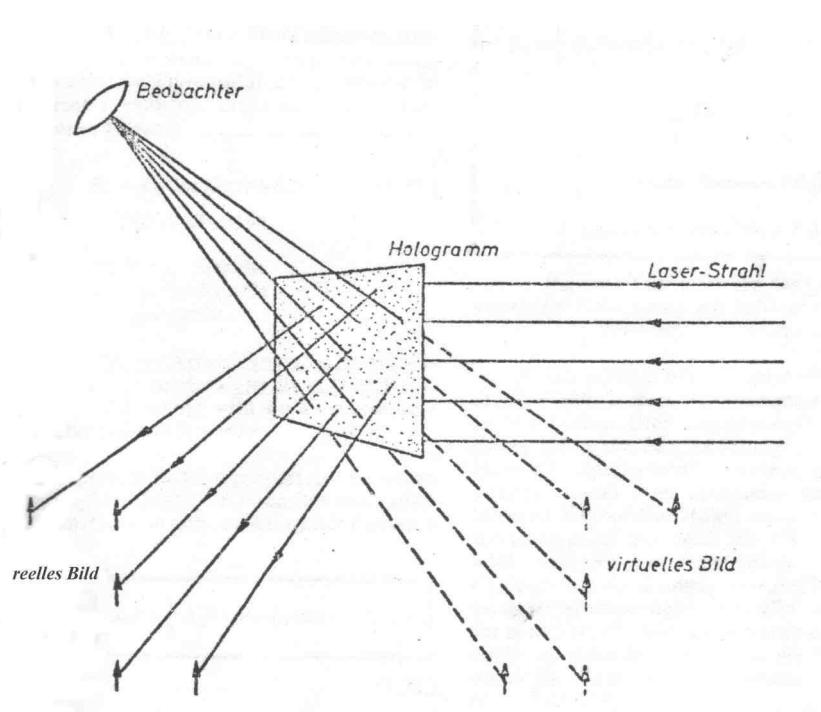


ABBILDUNG 4. Hologramm

Während bei einem herkömmlichen Bild ein einzelner Punkt auf dem Bild einen Punkt des abgelichteten Objekts wiedergibt ist es bei der holografischen Platte so, dass jeder Punkt der holografischen Platte Informationen über das Objekt enthält. Schneidet man eine holografische Platte in zwei Stücke, so kann man in jeder der beiden Hälften (je nach Blickwinkel) noch das gesamte Objekt betrachten, lediglich die Bildqualität nimmt ab.