

Vorbereitung: Laser A

Christine Dörflinger und Frederik Mayer, Gruppe Do-9

29. Mai 2012

Inhaltsverzeichnis

0	Einleitung: Was ist ein Laser?	3
0.1	Namensgebung und Anwendung	3
0.2	Funktionsweise	3
0.2.1	Arten von Emission	3
0.2.2	Besetzungsinversion	4
0.2.3	Resonator	4
0.2.4	Drei-Niveau-System	4
0.2.5	Lasermedium	5
1	Brewsterwinkel	5
1.1	Brewsterfenster	5
1.2	Brechungsindex eines Glases aus Brewsterwinkel	5
2	Beugung an Spalt, Steg, Kreisloch, Kreisblende und Kante	6
2.1	Bestimmung der Breite eines Spalts aus der Lage der Intensitätsminima	6
2.2	Vergleich des Beugungsbildes eines Stegs mit dem des Spalts	6
2.3	Beugungsbilder einer Kreisöffnung, einer Kreisscheibe und einer Kante	6
2.4	Durchmesser eines Haares	7
3	Beugung an Mehrfachspalten und Gittern	7
3.1	Spaltbreite und Spaltabstand eines Doppelspalts	7
3.2	Zweiter Doppelspalt, Dreifachspalt	9
3.3	Strichgitter	9
4	Abbildung nicht selbstleuchtender Gegenstände, Abbé'sche Abbildungstheorie	9
5	Holographie	10
6	Quellen	10

0 Einleitung: Was ist ein Laser?

0.1 Namensgebung und Anwendung

Laser ist die Abkürzung von 'Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation', also 'Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung'. Die theoretische Grundlage für die stimulierte Emission von Strahlung wurde 1917 durch Einstein (Umkehrung der Absorption) gegeben, allerdings erst 1954 experimentell nachgewiesen (Maser: Analogon zum Laser im Mikrowellenbereich) und seit 1960 (Rubinlaser) nutzbar.

Vorteile:

- a) kurze Kohärenzlänge:
Die Kohärenzzeit ist definiert als das Zeitintervall, in dem die Summe aus Wellenpaketen in einem vorhersehbaren Muster schwingt. Somit ist die Kohärenzlänge die Strecke über die sich das Licht innerhalb der Kohärenzzeit ausbreitet, also der maximale optische Weglängenunterschied, den zwei Lichtstrahlen aus einer Quelle haben, ohne dass sich das Interferenzmuster ändert. Im Gegensatz zur Glühbirne (sendet Licht mit verschiedenen Wellenlängen und Phasen aus) sind beim Laser die Phasen fast gleich.
- b) sehr gute Parallelität:
Da das emittierte Licht eines Lasers praktisch parallel ist, kann man sehr exakt damit 'arbeiten'.
- c) große 'Energiedichte':
Es wird eine hohe Leistung erreicht.

Ein paar Anwendungsbeispiele:

- a) Laserspektroskopie
- b) Medizin: Messung von Blutstrom, Laserskalpell
- c) Materialien bearbeiten: Schneiden, Schweißen
- d) Entfernungsmessgeräte

0.2 Funktionsweise

Im folgenden werden die 'Bauteile' (siehe Abbildung 1) sowie grundlegende Begriffe, die für das Verständnis notwendig sind, erläutert.

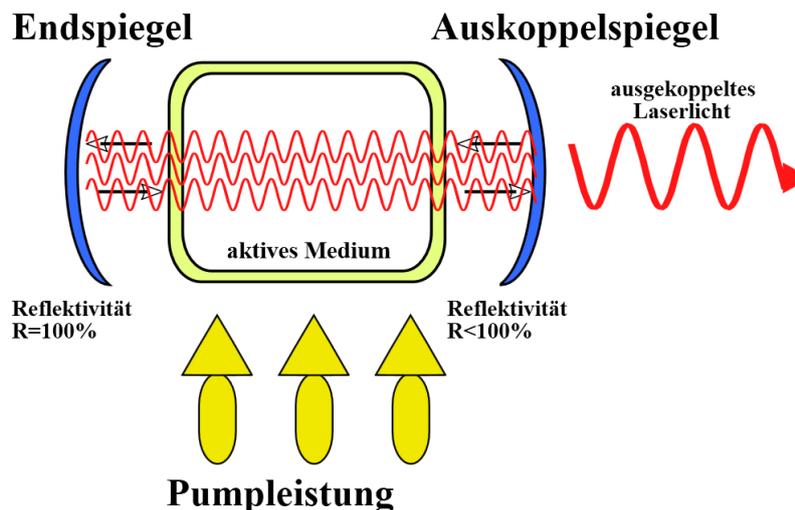


Abbildung 1: schematisch: Funktionsweise eines Lasers

0.2.1 Arten von Emission

- a) Spontane Emission:
Die spontane Emission findet ohne äußere Einflüsse statt. Daher kann nicht genau vorhergesagt werden, wann der Übergang eines Elektrons in ein niedrigeres Energieniveau (dabei wird ein Photon emittiert), stattfinden wird.

b) Stimulierte Emission:

Die sogenannte stimulierte Emission bildet die Grundlage für die Funktionsweise eines Lasers. Anders als bei der spontanen Emission, erfolgt der Übergang von einem höheren in ein niedrigeres Energieniveau eines Elektrons nicht spontan, sondern wird durch ein Photon induziert.

Wird ein Photon von einem Atom absorbiert, geht das Atom in einen angeregten Zustand über. Sobald ein Photon auf das bereits angeregte Atom trifft und die Energiedifferenz ΔE zwischen angeregtem Zustand und dem ursprünglichen Zustand mit niedrigerer Energie der Energie des 2. Photons entspricht, kann zu dem 2. Photon ein weiteres Photon (3. Photon) emittiert werden und das Atom fällt in den Grundzustand zurück. Das 3. Photon hat die gleiche Energie, Wellenlänge und Frequenz wie das 2. Photon, da die Energie des 2. Photons genau ΔE entspricht. Außerdem besitzt das 'neue' Photon die gleiche Richtung, Polarisationsrichtung und Phase (siehe Vorteile Laser).

Für die Kreisfrequenz des Photons gilt

$$\omega = \frac{\Delta E}{\hbar} \quad (1)$$

Somit hängt die Frequenz und damit die Farbe des Lasers vom gewählten Lasermedium ab.

0.2.2 Besetzungsinversion

Wenn mehr Elektronen sich in einem energetisch höheren Zustand E_2 (angeregter Zustand) befinden als in dem energetisch niedrigerem Zustand E_1 spricht man von Besetzungsinversion. Da jedes System versucht seine Entropie zu maximieren, also die freie Energie zu minimieren, ist die Besetzungsinversion nicht stabil und kann nur unter Energiezufuhr aufrecht erhalten werden ('optisches Pumpen').

N_1 : Anzahl Elektronen im Zustand E_1 ; N_2 : Anzahl Elektronen im Zustand E_2 :

$$\Delta N = N_1 - N_2 \quad (2)$$

d.h. Besetzungsinversion bei $\Delta N < 0 \rightarrow$ Bedingung für Laser.

Pumpen beim Laser:

Beim Laser wird das Lasermedium im Resonator durch einen zweiten Laser oder eine Blitzlichtlampe (äußere Energiequelle) angeregt (siehe 1. Photon bei stimulierter Emission). Die 'Pumpfähigkeit' hängt hierbei ab von: Temperatur (Besetzung der Niveaus nach Boltzmann-Verteilung), Anregungsrate und der Lebensdauer der Zustände im angeregten Niveau.

0.2.3 Resonator

Ein Resonator ist eine geschickte Anordnung von zwei Spiegeln, sodass die initiierten Strahlen (Photonen haben ja immer die gleiche Richtung, siehe oben) immer wieder durch das Lasermedium (dort herrscht Besetzungsinversion) geleitet werden. Folglich wird der Weg durch das Lasermedium verlängert und ein Photon kann häufiger stimulierende Emission hervorrufen. Es handelt sich hierbei also um eine Art Verstärker. Damit der Laser funktioniert muss diese Verstärkung größer sein als Verluste, die beispielsweise durch spontane Emission oder Streuung auftreten.

Es werden die Frequenzen verstärkt die die Resonanzbedingungen $L = \frac{n \cdot \lambda}{2}$ (L: Resonatorlänge, λ : Wellenlänge, n: natürliche Zahl) erfüllen, alle anderen werden durch destruktive Interferenz ausgelöscht.

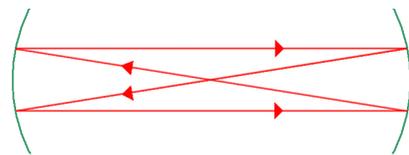


Abbildung 2: schematischer Strahlenverlauf: konfokaler Resonator

0.2.4 Drei-Niveau-System

Für die Konstruktion eines Lasers sind mindestens drei stabile Energieniveaus nötig, da sich erst ab einem Drei-Niveau-System realistisch die Besetzungsinversion 'hergestellt' werden kann.

Es existieren 3 Energieniveaus für die gilt: $E_1 < E_2 < E_3$. Außerdem findet der Übergang $E_3 \rightarrow E_2$ schneller statt als $E_2 \rightarrow E_1$. Daher gilt für die Anzahl angeregter Teilchen N: $N_3 \approx 0 \rightarrow N = N_1 + N_2 + N_3 \approx N_1 + N_2$. Das optische Pumpen erfolgt hierbei von E_1 nach E_3 .

0.2.5 Lasermedium

Lasermedien können Gase (He-Ne-Gemisch, Argon), Festkörper (dotierte Gläser und Kristalle) oder auch Flüssigkeiten (Farbstofflösungen) sein. Als Lasermedium können nur Materialien verwendet werden, bei denen Besetzungsinversion durch Pumpen hervorgerufen werden kann. Je nach verwendetem Material variiert die Wellenlänge ('Farbe') und die Leistung des Lasers.

In den folgenden Versuchen werden Helium-Neon-Gemische verwendet.

1 Brewsterwinkel

Der Brewsterwinkel ist definiert als der Winkel, bei dem nur die senkrecht zur Einfallsebene polarisierten Anteile des Lichts reflektiert werden (die parallel polarisierten Anteile werden vollständig transmittiert). Somit ist das reflektierte Licht linear polarisiert.

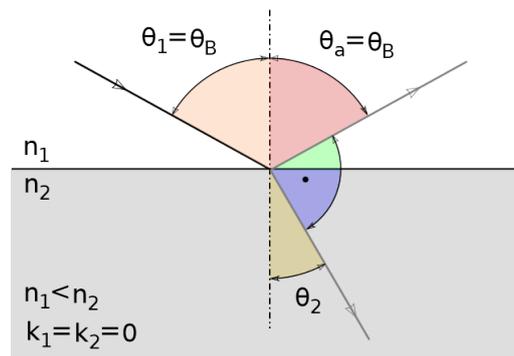


Abbildung 3: Skizze zum Brewsterwinkel

Aus Abbildung 3 ablesbar:

$$\Theta_B + \Theta_2 = 90^\circ \quad (3)$$

Herleitung aus dem snelliusschen Brechungsgesetz (n : Brechungsindex):

$$n_1 \sin(\Theta_1) = n_2 \sin(\Theta_2) \implies n_1 \sin(\Theta_B) = n_2 \sin(90^\circ - \Theta_B) = n_2 \sin(\Theta_B) \quad (4)$$

Es gilt :

$$\Theta_B = \arctan\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (5)$$

1.1 Brewsterfenster

Hier wird ein Experimentierlaser untersucht, bei dem außerhalb des Entladungsrohrs 'Brewsterfenster' angebracht sind. Die Ausrichtung der Brewsterfenster kann verändert werden, sodass verschiedene Einfallswinkel betrachtet werden können.

Dieses Verfahren wird verwendet, damit nur noch senkrecht polarisiertes Licht hin- und her reflektiert wird. Auf diese Weise wird ein möglichst gleich polarisierter Laserstrahl erreicht. Folglich ist die Intensität des Strahls dann am höchsten, wenn die auf die Brewsterfenster treffenden Strahlen, genau unter dem Brewsterwinkel einfallen.

1.2 Brechungsindex eines Glases aus Brewsterwinkel

Ohne Intensitätsmessung wird hier zunächst das Minimum (bei welcher Ausrichtung der Brewsterfenster) an der Zimmerdecke bestimmt.

Zur Bestimmung des Brewsterwinkels wird ein Si-Photoelement verwendet (Brewsterwinkel, wenn Intensität maximal wird).

Aus Gleichung (5) lässt sich nun der Brechungsindex des Glases bestimmen (für Luft ist $n_1 = 1$):

$$n_{\text{Glas}} = \tan(\Theta_B) \cdot n_1 \quad (6)$$

Die Beobachtung mit dem Auge ist genauer, da in dem Bereich der niedrigen Intensitäten sehr genau Veränderungen der Intensität wahrnehmen kann. Im Gegensatz dazu ist es möglich, dass das Si-Photoelement eine Sättigung bei hohen Intensitäten erreicht (Schwankungen sind dann nicht mehr messbar).

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

2.1 Bestimmung der Breite eines Spalts aus der Lage der Intensitätsminima

Es soll eine Formel für die Lage der Intensitätsminima beim Einfachspalt hergeleitet werden. Der Strahlengang eines Einfachspalts sieht folgendermaßen aus:

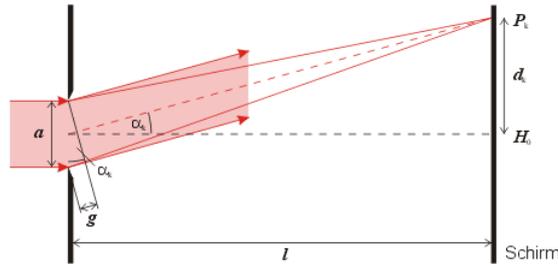


Abbildung 4: Strahlengang beim Einfachspalt

Aus dem 'großen' Dreieck lässt sich ablesen:

$$\tan(\alpha) = \frac{d}{l} \quad (7)$$

wobei l den Abstand des Einfachspalts vom Schirm und d die Position auf dem Schirm bezeichnet. Aus dem 'kleinen' Dreieck lässt sich weiterhin ablesen:

$$\sin(\alpha) = \frac{g}{a} \quad (8)$$

wobei g den Gangunterschied und a die Spaltbreite bezeichnet.

Für kleine Winkel α kann man mit der Kleinwinkelnäherung $\sin(\alpha) = \tan(\alpha)$ die obigen Gleichungen gleichsetzen:

$$\frac{d}{l} = \frac{g}{a} \quad (9)$$

Für destruktive Interferenz gilt beim Einfachspalt:

$$g = k \cdot \lambda \quad (10)$$

Die Lage der Minima auf dem Schirm ist also durch

$$d = k \cdot \lambda \frac{l}{a} \quad (11)$$

bestimmt. Mit dieser Gleichung lässt sich die Breite eines Spalts durch Bestimmung der Lage der Intensitätsminima, der Wellenlänge und dem Abstand des Spalts vom Schirm bestimmen.

2.2 Vergleich des Beugungsbildes eines Stegs mit dem des Spalts

Bei der Beleuchtung eines Stegs, der die selbe Breite wie der Einfachspalt hat, ist nach dem Babinet'schen Theorem das selbe Beugungsbild zu erwarten:

Einfachspalt und Steg sind komplementäre Beugungsstrukturen. Es entstehen also an den selben Stellen (die Kanten des Stegs und des Spalts befinden sich an den selben Stellen) Huygensche Elementarwellen, die sich dann überlagern und miteinander interferieren. Komplementäre Beugungsstrukturen erzeugen also identische Interferenzmuster.

2.3 Beugungsbilder einer Kreisöffnung, einer Kreisscheibe und einer Kante

In diesem Versuch sollen weitere Interferenzmuster betrachtet werden.

Erwartungsgemäß sollten Kreisscheibe und Kreisöffnung gleicher Größe nach dem bereits erwähnten Babinet'schen Theorem identische Muster erzeugen, die ungefähr so aussehen:

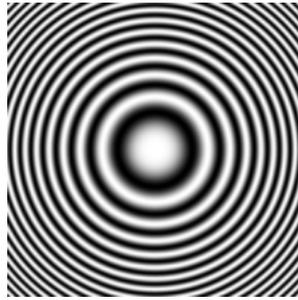


Abbildung 5: Interferenzmuster von Kreisscheibe und Kreisöffnung

In der Mitte des Interferenzmusters ist ein heller Punkt ('Poisson-Fleck') zu erwarten, da alle von der Kante der Kreisscheibe bzw. Kreisöffnung ausgehenden Elementarwellen dort keinen oder einen geringen Gangunterschied aufweisen.

Beleuchtet man eine Kante mit einem Laser, ist auf dem Schirm ebenso keine 'scharfe' Kante in der Intensität zu erwarten, sondern auch ein Interferenzmuster:

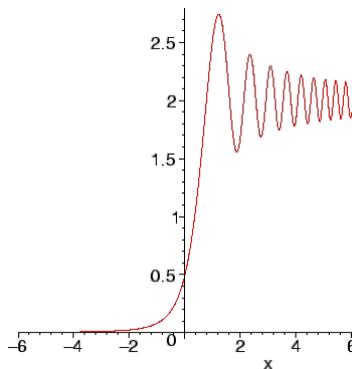


Abbildung 6: Intensitätsverteilung bei Beugung an einer Kante

2.4 Durchmesser eines Haares

In diesem Versuch soll der Durchmesser eines Haares bestimmt werden. Da ein Haar als Steg angesehen werden kann, kann dieser Versuch wie die Bestimmung der Spaltbreite beim Einfachspalt durchgeführt werden. Das Ergebnis soll mit dem bei der Messung mit einer Mikrometerschraube verglichen werden.

3 Beugung an Mehrfachspalten und Gittern

3.1 Spaltbreite und Spaltabstand eines Doppelspalts

Im Folgenden soll die Lage der Beugungsmaxima und -minima beim Doppelspalt hergeleitet werden. Dazu betrachtet den Strahlengang durch einen Doppelspalt:

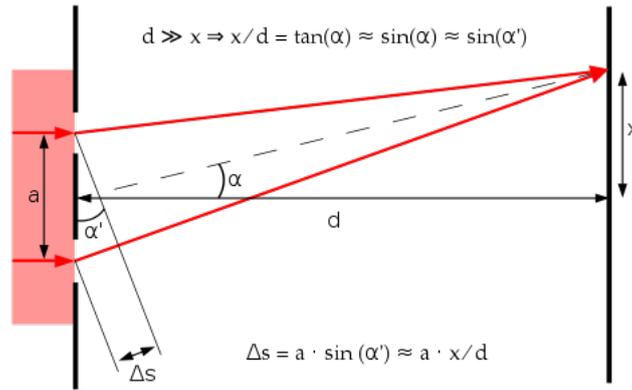


Abbildung 7: Strahlengang beim Doppelspalt

Betrachtet man das 'große' Dreieck (mit gestrichelter Linie, x und d), so erhält man

$$\tan(\alpha) = \frac{x}{d} \quad (12)$$

wobei d den Abstand des Doppelspalts vom Schirm und x den Abstand eines beliebigen Punktes vom Mittelpunkt auf dem Schirm bezeichnet.

Außerdem erhält man für den Gangunterschied zweier Strahlen, die durch unterschiedliche Spalte gehen und die Spalte im selben Winkel verlassen:

$$\sin(\alpha) = \frac{\Delta s}{a} \quad (13)$$

wobei a den Spaltabstand und Δs den Gangunterschied der beiden Strahlen verlassen. Nimmt man nun an, dass $d \gg x$ ist, so kann man die Kleinwinkelnäherung $\tan(\alpha) \approx \sin(\alpha)$ verwenden und die beiden Gleichungen gleichsetzen:

$$\frac{\Delta s}{a} = \frac{x}{d} \Leftrightarrow x = \frac{d\Delta s}{a} \quad (14)$$

Möchte man nun die Lage der Maxima bestimmen, so setzt man für den Gangunterschied $\Delta s = k \cdot \lambda$ mit $k \in \mathbb{N}_0$ ein:

$$x = \frac{kd\lambda}{a} \quad (15)$$

Um die Lage der Intensitätsminima zu bestimmen, setzt man $\Delta s = (k + \frac{1}{2})\lambda$ ein:

$$x = \frac{(k + \frac{1}{2})d\lambda}{a} \quad (16)$$

Die Lage der Hauptmaxima und -minima ist bei Gittern und Mehrfachspalten gleich wie beim Doppelspalt, sodass diese Herleitung nicht erneut durchgeführt werden muss.

Die Intensitätsverteilung beim Doppelspalt sieht folgendermaßen aus:

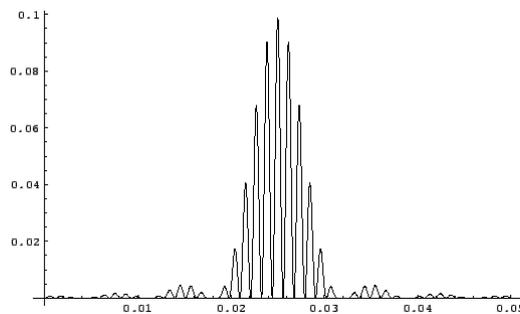


Abbildung 8: Intensitätsverteilung beim Doppelspalt

Dabei resultieren die 'schmalen' Peaks aus der Herleitung oben. Die Einhüllende der Kurve resultiert aus der Intensitätsverteilung der Einfachspalte.

Die Intensitätsverteilungen von Spalten oder Gittern lassen sich auch durch Fouriertransformationen herleiten: Man definiert die Transmissionsfunktion $T = \delta(x + \frac{a}{2}) + \delta(x - \frac{a}{2})$, die dann fouriertransformiert wird. Das Ergebnis ist ein Term, dessen Betragsquadrat proportional zur Intensitätsverteilung auf dem Schirm ist.

Im Versuch sollen Spaltbreite und Spaltabstand im Versuch experimentell bestimmt werden. Dies ist durch Bestimmung der Intensitätsminima und -maxima und Verwendung der Formeln für Einfach- und Doppelspalt möglich.

3.2 Zweiter Doppelspalt, Dreifachspalt

Der zweite Doppelspalt hat einen größeren Spaltabstand (0.75mm gegenüber 0.5mm). Mit den oben hergeleiteten Formeln ergibt sich, dass das Interferenzmuster beim zweiten Doppelspalt um den Faktor $\frac{2}{3}$ schmaler ist.

Verwendet man einen Dreifachspalt statt dem Doppelspalt, so bleibt die Lage der Hauptmaxima gleich. Es treten zwischen den Hauptmaxima jedoch noch schmale Nebenmaxima auf, zwischen denen jeweils auch Minima liegen. Die Hauptmaxima werden so schärfer abgebildet. Die Überlagerung des Einfachspalts (also die Einhüllende) verändert sich ebenso nicht.

3.3 Strichgitter

Nun soll die Gitterkonstante (Abstand zweier Spalte zueinander) von einem Strichgitter bestimmt werden. Hierfür geht man analog vor wie beim Doppelspalt, denn die Lage der Hauptmaxima ist bei Gittern identisch wie bei Doppelspalten.

Das Beugungsbild eines Gitters zeichnet sich dadurch aus, dass die Hauptmaxima sehr hell und schmal sind. Nebenmaxima werden mit steigender Anzahl an Spalten so niedrig, dass sie kaum zu erkennen sind. Das Beugungsbild wird optimal dargestellt, wenn alle Spalte gleichmäßig ausgeleuchtet werden.

4 Abbildung nicht selbstleuchtender Gegenstände, Abbé'sche Abbildungstheorie

In diesem Versuch soll gezeigt werden, dass für die Abbildung durchstrahlter Objekte das abgebeugte Licht eine wesentliche Rolle spielt.

Als durchleuchtetes Objekt wird im Versuch ein Waben- oder Strichgitter verwendet, das mit parallelem Licht beleuchtet und mit einer Linse ($f=150\text{mm}$) auf einen Schirm abgebildet wird. In der Brennebene der Linse ist außerdem eine Blende eingebaut. Schematisch sieht der Versuchsaufbau folgendermaßen aus:

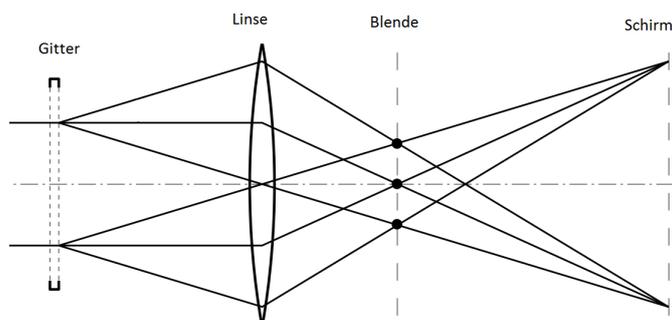


Abbildung 9: Schematischer Versuchsaufbau. Linse bildet folgendermaßen ab: Senkrecht einfallende Strahlen werden zu Brennpunktstrahlen, Strahlen durch den Mittelpunkt passieren die Linse gerade.

Mithilfe der Blende kann, wie aus der Skizze ersichtlich ist, gesteuert werden, welche Hauptmaxima des Gitters zum Schirm 'durchgelassen' werden. Lässt man nur das 0. Hauptmaximum durch, so ist auf dem Schirm nur ein Punkt zu sehen. Die Linse ist eingebaut, um die Fouriertransformation des Gitters wieder rückgängig zu machen. Der Schatten des Gitters ist erst zu erkennen, wenn man mindestens das 1. Hauptmaximum des Gitters durchlässt. Informationen über das Gitter sind also erst vorhanden, wenn mehrere Hauptmaxima 'durchgelassen' werden.

Analog kann man auch nur das 2. oder nur das 3. Beugungsmaximum durchlassen. Auch hier ist zu erwarten, dass das Abbild des Gitters nicht zu erkennen ist.

Je mehr Maxima durchgelassen werden, desto mehr ähnelt das Bild dem Umriss des Gitters. Damit ist die Aussage der Abbe'schen Abbildungstheorie bestätigt: Für korrekte Abbildung eines durchleuchteten Gegenstands sind alle Beugungsordnungen verantwortlich.

Diesen Effekt könnte man nutzen, um das Raster eines digitalisierten Zeitungsausschnittes verschwinden zu lassen: Baut man Zeitungsausschnitt als 'Gitter' ein und lässt an der Blende nur die 0. Ordnungen durch, so sollte bei der Abbildung auf den Schirm kein Raster mehr zu erkennen sein.

5 Holographie

Dieser Versuch beschäftigt sich mit Hologrammen: Im Gegensatz zur klassischen Fotografien werden bei Hologrammen nicht nur Lichtintensitäten oder Farben auf einem Film erfasst, sondern auch räumliche Strukturen (genauer: die Phase des Lichtes), sodass ein dreidimensionales Bild wiedergegeben werden kann.

Ein Hologramm wird aufgenommen, indem ein kohärenter Lichtstrahl mit einem Strahlteiler aufgeteilt wird. Mit dem einen Teil des Lichtes wird ein Objekt beleuchtet, das dann Licht auf eine holografische Fotoplatte reflektiert ('Objektwelle'). Der andere Teil des Lichtes wird direkt ('Referenzwelle') auf die Fotoplatte gespiegelt. Die holografische Fotoplatte ist an sich nur intensitätsempfindlich, durch Interferenz der Objekt- und der Referenzwelle wird jedoch auch die relative Phase der Wellen zueinander aufgezeichnet.

Schematisch sieht der Strahlengang folgendermaßen aus:

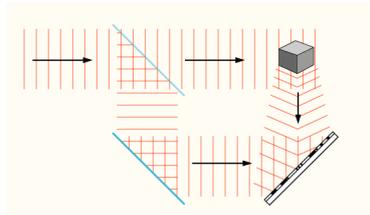


Abbildung 10: Aufnahme eines Hologramms: Objekt- und Referenzwellenfront

Möchte man nun das Hologramm rekonstruieren, so muss die holografische Fotoplatte im Gegensatz zu einer 'normalen' Fotoaufnahme mit einer Referenzwelle beleuchtet werden, um überhaupt ein Bild erkennen zu können. Durch Interferenz entsteht dann an der Fotoplatte die ursprüngliche Objektwelle, die dann beobachtet werden kann. Deckt man Teile der Fotoplatte ab, ist trotzdem das Bild trotzdem noch zu erkennen, da die Interferenz dadurch nicht gestört wird. Zerbricht man ein Hologramm, so ist trotzdem noch das ganze Bild zu erkennen, da die Bildinformationen 'überall' im Hologramm vorhanden sind.

Im Versuch soll ein Hologramm wie oben beschrieben betrachtet werden. Außerdem soll noch das reelle Bild des Hologramms betrachtet werden: Das reelle Bild wird vom Hologramm in den Raum projiziert und kann beispielsweise auf einem weißen Blatt Papier angesehen werden. Im Gegensatz zum virtuellen Bild ist es nicht dreidimensional.

6 Quellen

- <http://de.wikipedia.org/wiki/Laser>
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Besetzungsinversion>
- http://de.wikipedia.org/wiki/Optisches_Pumpen
- http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/84/Confokal_Resonator.png
- <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/cc/Laserschema.svg>
- http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/83/Brewster_angle.svg
- Strahlengang Einfachspalt: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/34/Beugungsspalt.svg/500px-Beugungsspalt.svg.png>
- Intensitätsverteilung Kreisscheibe: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/66/Zonenplatte_Cosinus.png/220px-Zonenplatte_Cosinus.png
- Beugung an einer Kante: <http://wwwex.physik.uni-ulm.de/lehre/gk3a-2002/img735.gif>
- Strahlengang Doppelspalt: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/d7/Double-slit_schematic.svg/500px-Double-slit_schematic.svg.png
- Intensitätsverteilung beim Doppelspalt: <http://www.uni-giessen.de/~gd1186/F-Prak/img1681.gif>

- Abbildung Hologramm: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/eb/Holograph-record-notext.png>