

Vorbereitung: Laser A

Axel Müller & Marcel Köpke
Gruppe 30

05.05.2012

Einführung

In diesem Versuch geht es um Laser. Laser steht für «Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation» und heißt soviel wie Licht Verstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung. Laser-Strahlung ist also eine spezielle Form von Licht, die sich von klassischen Lichtquellen ausgesendetem Licht dahingehend unterscheidet, dass sie ein sehr enges Frequenzspektrum (monochromatisch) besitzt, hohe Parallelität und extrem große Kohärenzlänge aufweist und in sehr kurzen Zeitabständen periodisch gepulst werden kann.

Die Kohärenzlänge ist diejenige Länge, die das Licht während der Kohärenzzeit zurücklegt. Die Kohärenzzeit wiederum ist diejenige maximale Zeit für die sich der Phasenunterschied zweier Teilwellen des Lichts einmal um 2π verschiebt.

Ein Laser basiert hauptsächlich auf dem Prinzip der Besetzungsinversion. Dieses besagt, dass das Verhältnis zwischen der Anzahl von Elektronen in niedrigen Niveaus und der Anzahl von Elektronen in hohen Niveaus künstliche umgekehrt werden kann. Dadurch befinden sich also viele Elektronen in einem angeregten Zustand. Durch Stimulation mit Licht können nun diese Elektronen schlagartig abgeregt werden, woraufhin sie Photonen mit gleicher Phase, Energie und Polarisation emittieren. Dieses Licht wird gebündelt und verlässt den Laser durch ein halbdurchlässiges Fenster.

Bei einem He-Ne-Laser werden Helium-Atome durch Gasentladung angeregt. Diese übertragen ihre Energie durch elastische Stöße auf die Neon-Atome, deren Anregungsenergien in etwa denen von Helium entsprechen und sehr langlebig sind, sodass sie nicht «unkontrolliert» abgeregt werden (sondern eben synchron durch Stimulation).

1 Aufgabe 1: Brewsterwinkel

In diesem Versuchsteil geht es um den Brewsterwinkel. Er ist derjenige Einfallswinkel für den ausschließlich senkrecht zur Einfallsebene polarisiertes Licht reflektiert wird (jedoch nicht vollständig). Parallel zur Einfallsebene polarisiertes Licht wird dagegen vollständig transmittiert.

Die Einfallsebene wird durch den Normalenvektor auf der Grenzschicht und den Richtungsvektor \vec{k} der einfallenden Welle aufgespannt. Polarisation bedeutet die Schwingungsrichtung/-art der elektrischen Feldstärke einer Welle.

Die Brewsterbedingung liegt dann vor, wenn Einfallswinkel und Transmissionwinkel genau 90° ergeben:

$$\theta_i + \theta_t = 90^\circ$$

Mit dem Snellius-Brechungsgesetz folgt dann:

$$\begin{aligned} n_i \sin \theta_i &= n_t \sin \theta_t \\ &\Downarrow \\ n_i \sin \theta_i &= n_t \sin (90^\circ - \theta_i) = n_t \cos \theta_i \\ &\Downarrow \\ \tan \theta_i &= \frac{n_t}{n_i} \end{aligned}$$

In Lasern werden sogenannte Brewsterfenster benutzt um den Gasraum abzuschließen. Dies sind solche Fenster, deren Orientierung so gewählt wurde, dass die Lichtstrahlen genau so darauf treffen, dass sie die Brewsterbedingung erfüllen. Dadurch wird sichergestellt, dass p-polarisiertes Licht (parallel zur Einfallsebene polarisiert) keine Reflektionsverluste erfährt. Der s-polarisierte Anteil des Lichts wird jedoch nur teilweise transmittiert und damit bei häufigen Durchgang durch das Brewsterfenster ausgelöscht.

Eine kleine Rechnung ergibt Aufschluss über diesen Sachverhalt. Angenommen es würden pro Durchgang durch das Brewsterwinkel 99% der Intensität des s-polarisierten Lichts transmittiert. Dann ist nach 100 Durchgängen durch das Fenster nur noch rund 36,6% der Anfangsintensität vorhanden. Nach 1000 Durchgängen sogar nur noch 0,0043% ! Man stellt mit dem Brewsterfenster also sicher, dass mindestens eine Polarisationsrichtung des Lichts selbst bei häufigem Durchgang durch das Fenster, wenig an Intensität verliert. So kann eine Lichtstrahl im Gasraum immer weiter «verstärkt» werden. Als Nebeneffekt sind solche Laser dann natürlich linear polarisiert.

1.1 Beobachtung des Brewsterwinkels

In diesem Versuchsteil beobachten wir die Effekte des Brewsterwinkels. Dazu benutzen wir ein Schräg zur Einfallrichtung des Lasers orientiertes Glasplättchen und beobachten die Intensität in Abhängigkeit des Winkels.

1.2 Bestimmung des Brewsterwinkels und des Brechungsindex

Wir beobachten die Intensität von transmittiertem und reflektiertem Licht des obigen Versuchsaufbaus, bestimmen so den Brewsterwinkel und erhalten mit

$$\tan \theta_i = n_t$$

(da $n_i = n_{Luft} = 1$) den Brechungsindex von Glas.

2 Aufgabe 2: Beugung

Beugung bezeichnet den Effekt von Interferenz, d.h. die Überlagerung von verschiedene Lichtwellen zu einem stationären Wellenmuster. Bei diesem Versuchsteil wollen wir Beugung an verschiedenen Objekten wie dem Spalt, Steg, Kreisloch, Kreisblende und der Kante beobachten.

2.1 Einzelspalt

Durch die Bestimmung der Positionen von Intensitätsmaxima und -minima auf einem Schirm kann die Lochbreite eines Einzelspalts bestimmt werden. Die Bedingung im Gangunterschied für konstruktive Interferenz lautet:

$$\Delta s = \left(k + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad k \in \mathbb{N}$$

Die Bedingung für destruktive Interferenz lautet:

$$\Delta s = k\lambda \quad k \in \mathbb{N}$$

Der Gangunterschied zweier Teilwellen kann aus folgender Skizze ¹ ermittelt werden:

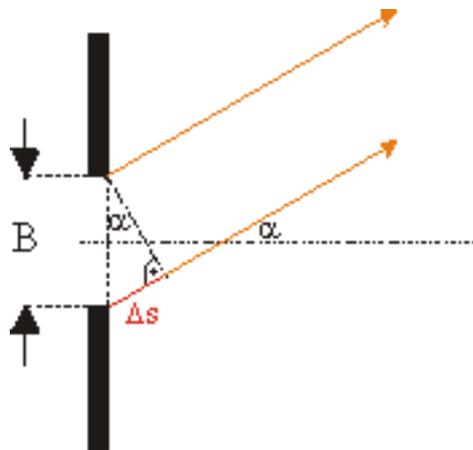


Abbildung 2.1: Gangunterschied

$$\Delta s = B \sin \alpha$$

¹Quelle: http://www.leifiphysik.de/web_ph12/grundwissen/06interferenz/einzel/einzel.htm;
05.05.2012

Nun betrachtet man noch den Abstands des Schirms zum Spalt und die Position eines Maximum/Minimums

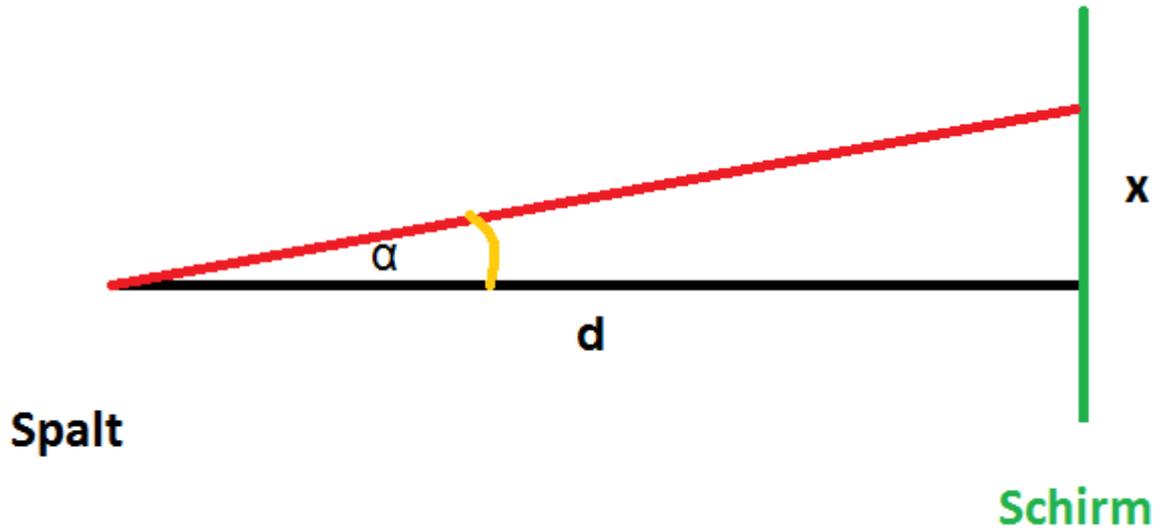


Abbildung 2.2: Spalt-Schirm-Abstand

so folgt:

$$\tan \alpha = \frac{x}{d} \approx \sin \alpha$$

Die Näherung gilt für kleine Winkel. Damit erhält man schließlich:

$$\Delta s = \frac{x B}{d}$$

Für Minima also:

$$B = \frac{d k \lambda}{x} \quad k \in \mathbb{N}$$

und für Maxima:

$$B = \frac{d(k + \frac{1}{2})\lambda}{x} \quad k \in \mathbb{N}$$

2.2 Steg

In diesem Versuch soll das Babinet'sche Theorem gezeigt werden. Es besagt, dass zwei zueinander komplemente Beugungsstrukturen in der Fernzone ($d \gg \frac{b^2}{\lambda}$; d Schirmabstand, b Abmessung der Beugungsstruktur, λ Wellenlänge) das gleiche Beugungsbild hervorruufen. Hier sind damit der Einzelspalt und ein Steg gleicher Dicke gemeint. Man erwartet also für den Steg dasselbe Beugungsbild wie oben.

Erklären kann man sich das Babinet'sche Theorem durch das Huygensprinzip, welches besagt, dass «bestrahlte» Oberflächen wieder Quellen für Elementarwellen sind. Hier sind das die Kanten des Spalts bzw. des Stegs. Die Elementarwellen an diesen Kanten sind maßgeblich für das Beugungsbild. Da die Kanten an der gleichen Positionen sind ergibt sich dasselbe Beugungsbild.

2.3 Kreisöffnung/Kreisblende

Auch in diesem Fall ist das Babinet'sche Theorem anzuwenden, da Kreisöffnung und Kreisblende zueinander komplementäre Beugungsstrukturen sind. Damit ist auch klar warum die Kreisblende in der Mitte ihres Beugungsbilds einen hellen Fleck (Poisson-Fleck) besitzt, da eine Öffnung dieses Intensitätsmaximum auf jeden Fall aufweist.

Zudem kann der Poissonsche Fleck dadurch begründet werden, dass die von den Kanten ausgehenden Elementarwellen im Mittelpunkt der Beugungsstruktur immer einen jeweils gleich langen Weg zurücklegen und damit konstruktiv interferieren.

Man erwartet jeweils folgendes Beugungsbild²:

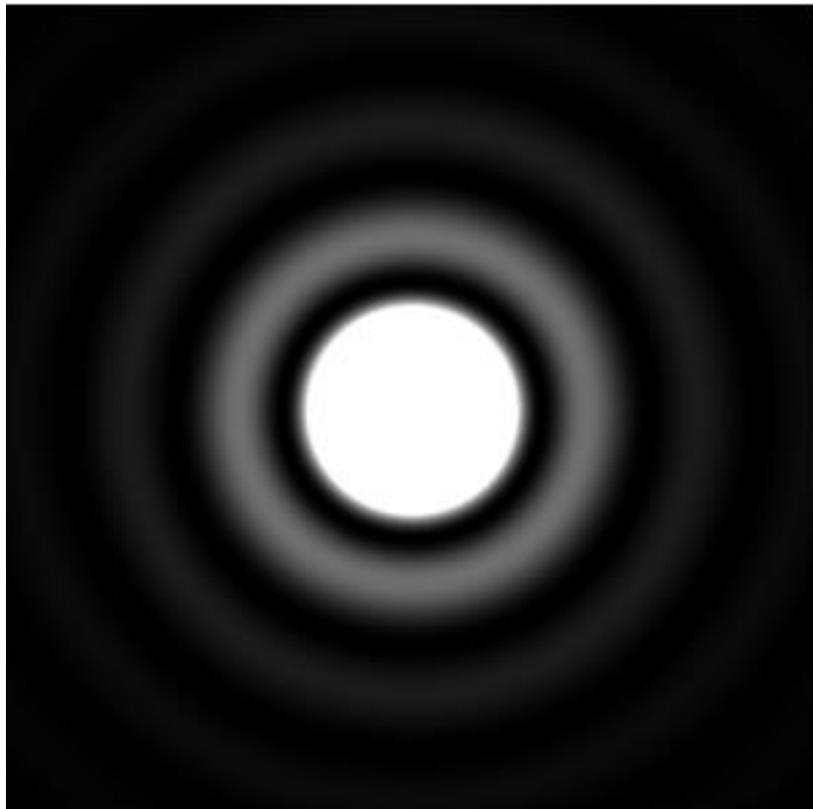


Abbildung 2.3: Kreisblende/Kreisöffnung

²Quelle: <http://www.peter-junglas.de/fh/vorlesungen/physik1/images/bild82.jpg>; 05.05.2012

Für die Beugung an einer Kante erwaite man folgendes Beugungsbild³:

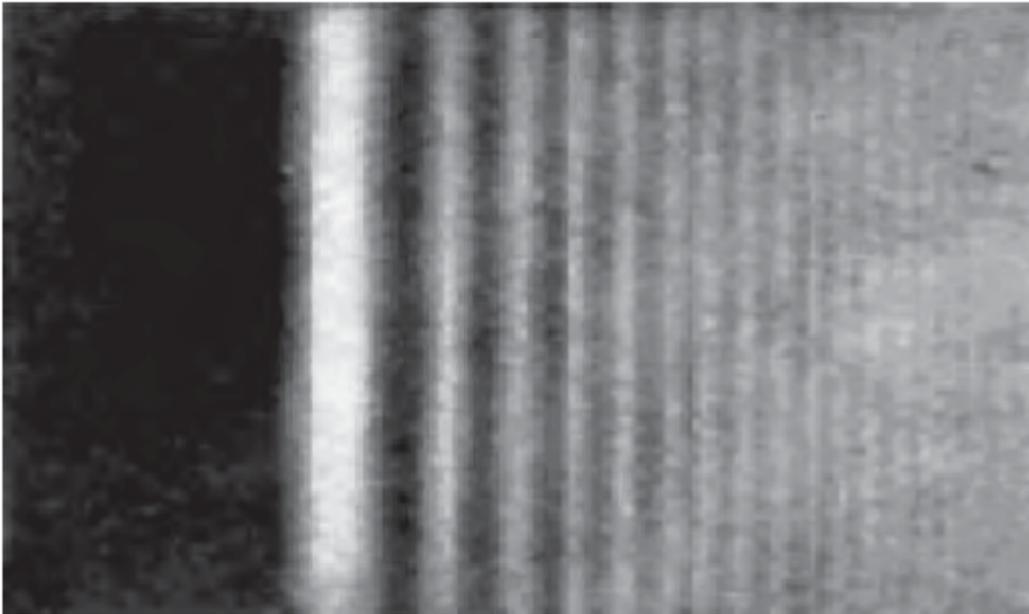


Abbildung 2.4: Kante

2.4 Durchmesser eines Haares

Ein Haar ist äquivalent zu einem Steg und damit komplementär zu einem Einzelspalt. Die Bestimmung des Durchmessers erfolgt also wie oben.

³Quelle: Vorbereitungsliteratur; Demtröder

3 Beugung an Mehrfachspalten und Gittern

Das Beugungsbild eines Mehrfachspalts bzw. eines Gitters besteht aus der Überlagerung zweier Beugungsbilderarten. Die Einhüllende ist das Beugungsbild eines einzelnen Spalts. Die darunter liegende Kurve ist das Beugungsbild eines idealen Mehrfachspalts. Folgende Abbildung¹ zeigt dieses Verhalten:

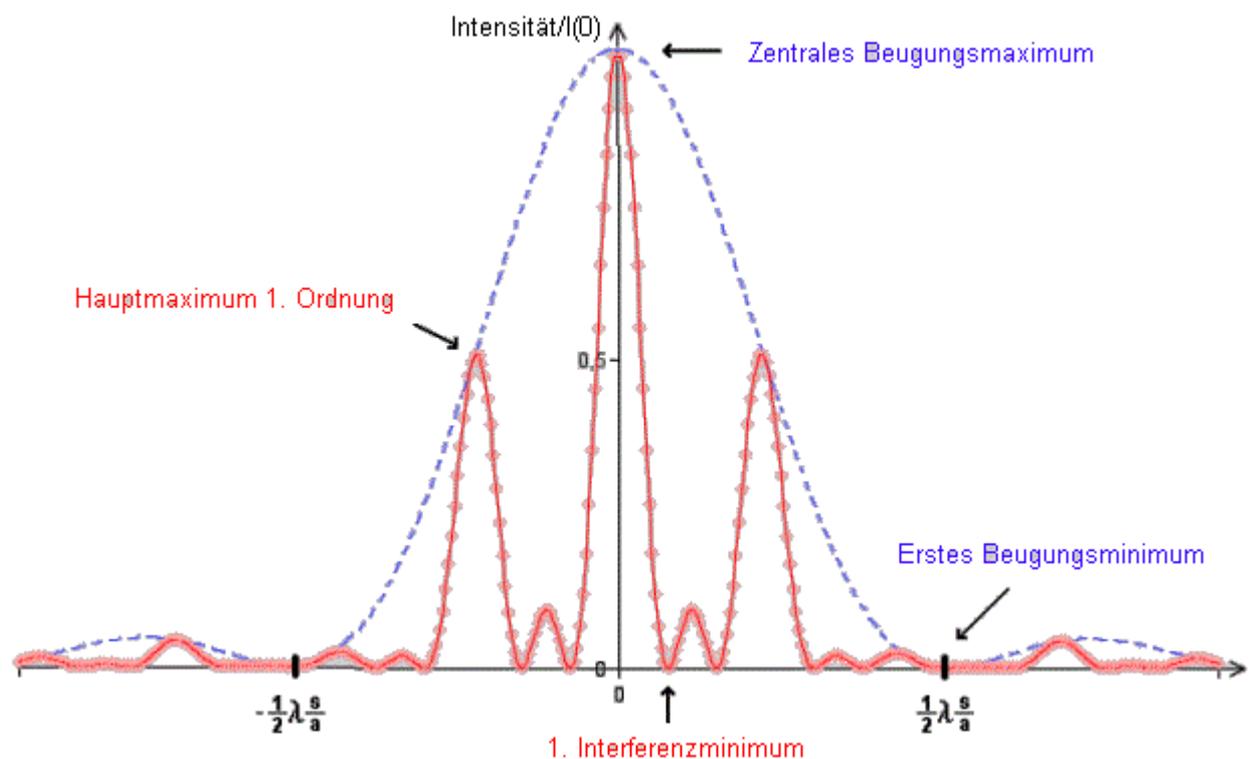


Abbildung 3.1: Mehrfachspalt

Die Idealisierung besteht in der Annahme einer verschwindet geringen Spaltbreite B und damit in der Annahme, dass gerade nur ein Lichtstrahl durch einen Spalt kommt. Dadurch werden folgende geometrische Überlegungen möglich:

¹Quelle: <http://www.chemgapedia.de/vsengine/popup/vsc/de/glossar/m/me/mehrfachspalt.glos.html>; 07.05.2012

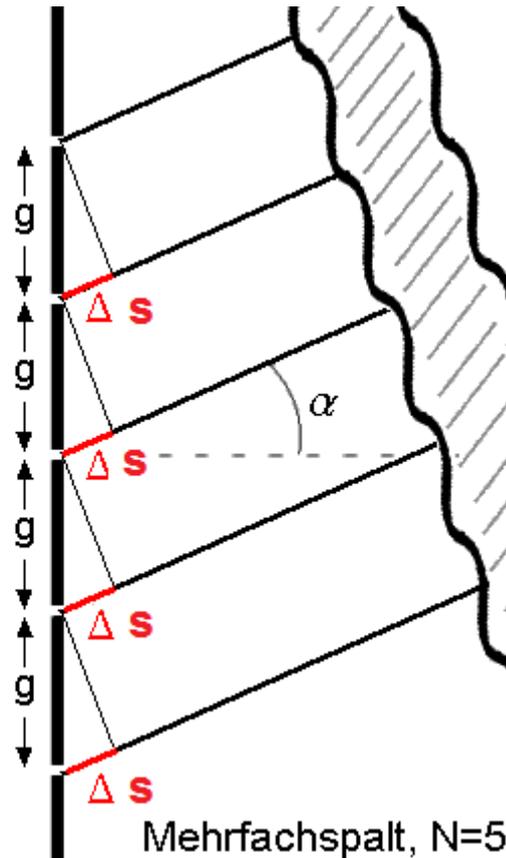


Abbildung 3.2: Mehrfachspalt N=5

Die Abbildung² zeigt 5 Lichtstrahlen, welche die Anordnung unter einem Winkel α verlassen. Der Spaltabstand beträgt jeweils g . Damit gilt

$$\Delta s = g \sin \alpha$$

wobei Δs jeweils der Gangunterschied der Strahlen zueinander ist. Ähnlich wie oben gilt nun

$$\tan \alpha = \frac{x}{d} \approx \sin \alpha$$

Damit folgt:

$$g = \frac{d \Delta s}{x}$$

Hauptmaxima stellen sich ein für

$$\Delta s = m \lambda \quad m \in \mathbb{N}_0$$

²Quelle: http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ph/14/ep/einfuehrung/wellenoptik/interferenz_a.vlu/Page/vsc/07.05.2012

Minima für

$$\Delta s = (m + \frac{1}{2})\lambda \quad m \in \mathbb{N}_0$$

3.1 Bestimmung der Spaltbreite und des Spaltabstandes

Durch Messung der Minima der einhüllenden Kurve kann die Spaltbreite B wie beim Einzelspalt bestimmt werden. Durch Messung der Hauptmaxima der inneren Kurve kann der Spaltabstand g mit obigen Formeln bestimmt werden.

3.2 verschiedene Spalte

a) zweiter Doppelspalt:

Aus

$$B = \frac{dk\lambda}{x} \quad k \in \mathbb{N}$$

liest man ab, dass die Minima der Einhüllenden für eine größere Spaltbreite weiter zusammenrücken und für eine kleinere Spaltbreite weiter auseinanderrücken. Die Einhüllende wird also gestaucht bzw. gedehnt.

Aus

$$g = \frac{dm\lambda}{x} \quad m \in \mathbb{N}$$

liest man ab, dass die Hauptmaxima für einen größeren Spaltabstand weiter zusammenrücken und für kleinere Spaltabstände auseinanderrücken.

b) Dreifachspalt:

Die einhüllende Kurve wird sich nicht verändern (wenn die Spaltbreite konstant ist), da diese nur von den einzelnen Spalten abhängt. Es werden jedoch mehr Maxima/Minima pro Länge im Vergleich zum Doppelspalt beobachtet werden können.

3.3 Strichgitter

Ein Strichgitter ist ein Mehrfachspalt. Die Gitterkonstante G gibt den Spaltabstand $g = \frac{1}{G}$ an. Alle obigen Überlegungen zum Mehrfachspalt gelten damit auch hier.

3.4 Kreuzgitter und Wabengitter

Ein Kreuzgitter ist ein gekreuztes Strichgitter. Das Beugungsbild entspricht damit einer Überlagerung des Beugungsbildes des Strichgitters mit dem gleichen, jedoch um 90° gedrehten Beugungsbild.

Das Wabengitter wird ein für sich spezifisches Beugungsbild zeigen, für das sich jedoch ähnliche Überlegungen wie für das Kreuzgitter ergeben sollten.

4 Abbildung nicht selbstleuchtender Gegenstände

In diesem Versuchsteil werden wir ein Gitter (Strich- oder Wabengitter) mit parallelem Licht beleuchten und das Bild mit einer Linse auf einen Schirm abbilden. Um nach der Abbe'schen Theorie zu demonstrieren, dass alle Beugungsordnungen für eine korrekte Abbildung nötig sind, werden wir nacheinander verschiedene Beugungsordnung ausblenden und das Bild auf dem Schirm beobachten.

Erst wenn genügend viele Beugungsordnungen das Bild auf dem Schirm erzeugen wird die Abbildung des Gitters erkennbar sein, da nur höhere Ordnungen genügend viel Information über den geometrischen Aufbau des Gitters haben.

5 Holographie

Holographie bezeichnet die optische Methode der Abbildung und Bildrekonstruktion, welche Abstandsinformation der abgebildeten Objekte bewahrt. Dies unterscheidet sich grundlegend von normalen Abbildungsverfahren die meist nur Information über Farbe und Kontrast speichern.

Um ein Hologramm zu erstellen wird kohärentes Licht (bei uns Laserlicht, welches vorher aufgeweitet wurde) aufgeteilt. Der eine Teil wird auf das Objekt geleitet um von dort reflektiert und auf die Fotoplatte abgebildet zu werden. Der andere Teil wird direkt auf die Fotoplatte geleitet. Die zwei Strahlen auf der Fotoplatte interferieren miteinander und bilden das Hologramm.

Der Grund für dieses Verfahren ist die Tatsache, dass das reflektierte Licht vom Objekt durch die Reflexion Phasenverschiebungen (durch Abstandsunterschiede am Objekt) im Vergleich zum Ursprungsstrahl aufweist. Diese Phasenverschiebungen werden durch die Interferenz auf der Fotoplatte erhalten und bilden die räumliche Information über das Objekt.

Zur rekonstruktion des Bildes wird die Fotoplatte mit kohärentem Licht der gleichen Wellenlänge belichtet. Dabei ist je nach Blickwinkel ein Teil des Objekts zu erkennen. Auf Grund der Wellennatur des Lichts kann bereits auf einem kleinen Stück der Fotoplatte die gesamte Information des Objekts gespeichert sein (Welle ist ausgedehnt). Dadurch kann die Fotoplatte zum Teil abgedeckt werden und es sollte sich dennoch das gesamte Objekt zeigen.