

# Versuch: P2-17

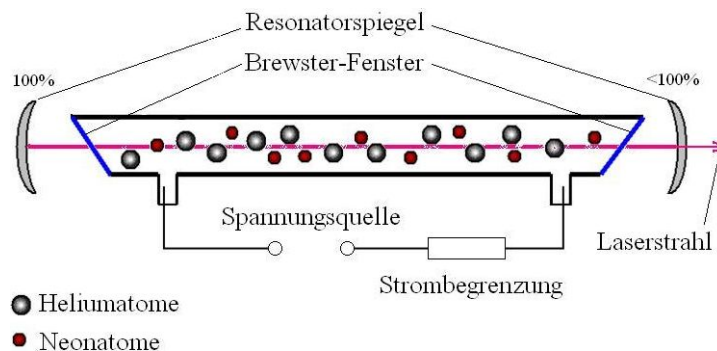
# Laser-Optik A

## - Vorbereitung -

### Vorbemerkung

Bereits 1917 berichtete Albert Einstein von der theoretischen Existenz der „stimulierten Emission“, die als Umkehrung der Absorption existieren müsse. „Stimulierte Emission“ nannte Einstein den durch ein Photon angeregten Übergang eines Elektrons von einem höheren in ein tieferes Energieniveau unter Aussendung eines Photons. Im Gegensatz zur Absorption bleibt bei der „stimulierten Emission“ allerdings das auslösende Photon erhalten. Die Eigenschaften des zusätzlich ausgesandten Photons wie Phase, Frequenz und Ausbreitungsrichtung sind dem ersten identisch, so dass eine Lichtverstärkung eintritt. Erst 1954 konnte dieses Phänomen experimentell nachgewiesen werden.

1960 gelang es, sich den Effekt der „stimulierten Emission“ zu Nutze zu machen, um eine Lichtquelle zu bauen, die eine extrem große Kohärenzlänge, sehr gute Parallelität und große „Energiestromdichte“ erreicht: den LASER („light amplification by stimulated emission of radiation“ - Lichtverstärkung durch erzwungene Aussendung von Strahlung). Im Praktikum verwenden wir einen Helium-Neon-Laser, dessen Funktionsweise wir im Folgenden erläutern möchten.



*Schema des He-Ne-Lasers, Quelle: wikipedia.de*

Der Helium-Neon-Laser besteht aus einem dünnen Glasröhrchen von 1mm Durchmesser und einigen 10cm Länge, in dem sich ein Helium-Neon-Gasgemisch befindet. Das Glasröhrchen, in dessen Innere ein Druck von ca. 100 Pa herrscht, wird von zwei Brewster-Fenstern abgeschlossen, auf die in der 1. Aufgabe näher eingegangen wird. Links und rechts des Glasröhrchens ist je ein Spiegel angebracht. Diese Anordnung dient als Resonator, d.h. das Licht wird zwischen diesen beiden Spiegeln sehr oft hin und her reflektiert, so dass sich aufgrund von Interferenz eine stehende Welle ausbildet. Einer der Resonatorspiegel ist aber zu ca. 2% durchlässig, durch ihn tritt das Laser-Lichtbündel aus.

Was passiert jetzt aber genau im Glasröhrchen? Die zwei Elektroden einer Spannungsquelle bringen mittels einer Gasentladung die Heliumatome in einen angeregten Zustand, dieser Prozess wird als „Pumpen“ bezeichnet. Erst im angeregten Zustand ist nämlich die stimulierte Emission möglich, da für diese mehr Elektronen im höheren Energieniveau als im niedrigeren vorliegen müssen. Das zwischen den Resonatorspiegeln hin und her reflektierte Licht wird durch die stimulierte Emission weiterer Photonen verstärkt, bis schließlich durch den halbdurchlässigen Spiegel ein kohärenter, energiereicher Lichtstrahl austreten kann. Diesen kann man vielfältig nutzen, im Folgenden (und im Versuch Laser B) werden wir uns mit einigen Anwendungen des Lasers befassen, unter anderem:

- Beugungs- und Interferenzexperimente
- Holographie
- Nachrichtenübermittlung mit Licht

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Brewsterwinkel</b>	<b>3</b>
1.1 Brewster-Fenster beim Laser . . . . .	3
1.2 Messung des Brewsterwinkels und Bestimmung des Brechungsindex des Brewster-Fenster-Glases . . . . .	3
<b>2 Beugung an Spalt, Steg, Kreisloch, Kreisblende und Kante</b>	<b>4</b>
2.1 Beugung am Einzelspalt . . . . .	4
2.2 Babinet-Theorem . . . . .	5
2.3 Beugungsbilder von Kreisöffnung, Kreisscheibe und Kante . . . . .	5
2.4 Bestimmung des Durchmessers eines Haares . . . . .	5
<b>3 Beugung an Mehrfachspalten und Gittern</b>	<b>6</b>
3.1 Beugung am Doppelspalt . . . . .	7
3.2 Dreifachspalt und Vierfachspalt . . . . .	7
3.2.1 Erhöhung der Anzahl der Spalte . . . . .	7
3.2.2 Veränderung von Spaltabstand und Spaltbreite . . . . .	7
3.3 Bestimmung der Gitterkonstanten eines Strichgitters . . . . .	8
3.4 Kreuz- und Wabengitter . . . . .	8
<b>4 Abbildung nichtselbstleuchtender Gegenstände</b>	<b>8</b>
<b>5 Holographie</b>	<b>9</b>
5.1 Herstellung . . . . .	9
5.2 Rekonstruktion . . . . .	9
5.3 Besonderheiten des Hologramms . . . . .	10

# 1 Brewsterwinkel

## 1.1 Brewster-Fenster beim Laser

Bei der Konstruktion eines Lasers tritt das Problem auf, dass an den Glasscheiben, die das Entladungsrohr abschließen, Reflexionsverluste auftreten können. Um dies zu vermeiden, bringt man die Glasplatten in einem bestimmten Winkel an, dem Brewster-Winkel. Für diesen Winkel trifft das einfallende Licht gerade so auf die Glasfläche, dass reflektierter und gebrochener Strahl einen Winkel von  $90^\circ$  einschließen. In diesem Fall ist der reflektierte Strahl immer senkrecht zur Einfallsebene linear polarisiert. Das hat zwei erfreuliche Auswirkungen:

1. Senkrecht zur Einfallsebene polarisiertes Licht wird zu 100% durchgelassen, es treten also keine Reflexionsverluste auf.
2. Anders polarisiertes Licht wird in die Gasentladungsröhre zurück reflektiert, so dass ein sauber linear polarisierter Lichtstrahl den Laser verlässt.

Im Versuch soll nun die Notwendigkeit der Brewster-Fenster demonstriert werden. Hierzu gehen wir wie folgt vor:

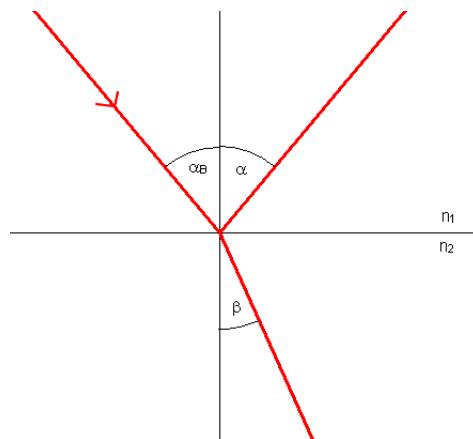
- Glasscheibe sorgfältig putzen und den Laser optimal justieren
- Drehbaren Plattenhalter mit planparalleler Glasscheibe zwischen Entladungsrohr und Resonatorspiegel montieren
- Einfallswinkel des Lichtes verändern und die Strahlintensität beobachten.

Für einen senkrechten Einfall des Strahls beträgt der Reflexionskoeffizient nach Fresnel  $R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2}$  ( $n$ : Brechungsindex des verwendeten Glases), so dass wir in diesem Fall angesichts der starken Reflexionsverluste mit einem Verlöschen des Lasers rechnen müssen. Maximale Intensität erwarten wir für den Brewsterwinkel  $\alpha_B$ , siehe unten.

## 1.2 Messung des Brewsterwinkels und Bestimmung des Brechungsindex des Brewster-Fenster-Glases

Nun soll die Glasscheibe außerhalb des Lasers in den Strahlengang montiert und der Brewsterwinkel  $\alpha_B$  bestimmt werden. Hierfür gibt es zwei Möglichkeiten:

1. Man sucht mit Hilfe des Si-Photoelements den Winkel, unter dem die maximale Lichtintensität transmittiert wird.
2. Man beobachtet das reflektierte Licht an der Decke des Labors und sucht den Winkel, für den keine Reflexion mehr zu beobachten ist.



Methode Nr. 2 eignet sich besser, da eine Null-Einstellung selbst mit dem bloßen Auge ziemlich exakt möglich ist. Fällt der Strahl nun unter dem Brewster-Winkel  $\alpha = \alpha_B$  ein, wird er nach dem Reflexionsgesetz im Winkel  $\alpha$  reflektiert und nach Snellius  $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}$  gebrochen. Mit der Brewster-Bedingung  $\alpha + \beta = 90^\circ$  folgt:

$$\frac{\sin \alpha_B}{\sin(90^\circ - \alpha_B)} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$

$$\Rightarrow \frac{\sin \alpha_B}{\cos \alpha_B} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2)$$

$$\Rightarrow \tan \alpha_B = \frac{n_2}{n_1} \quad (3)$$

$$(4)$$

Für Luft ( $n_1 \approx 1$ ) lässt sich also der Brechungsindex des Glases aus dem experimentell bestimmten Brewster-Winkel zurückrechnen:

$$n = \tan(\alpha_B) \quad (5)$$

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

### 2.1 Beugung am Einzelspalt

Ziel dieses Aufgabenteils ist die Bestimmung der Breite eines der Spalte, die nur grob mit  $b \sim 0,2$  mm oder  $b \sim 0,3$  mm angegeben ist. Hierfür beugen wir das Laserlicht am Spalt und betrachten die Intensitätsverteilung auf dem Schirm. Für das in Richtung  $\theta$  abgebeugte Licht gilt die Beziehung

$$I(\theta) = I_0 \cdot \frac{\sin^2\left(\frac{\pi \cdot b}{\lambda} \cdot \sin \theta\right)}{\left(\frac{\pi \cdot b}{\lambda} \cdot \sin \theta\right)^2} \quad (6)$$

Minima erhalten wir, wenn der Zähler von (6) Null wird, also:

$$\sin^2\left(\frac{\pi \cdot b}{\lambda} \cdot \sin \theta\right) = 0 \quad (7)$$

Dies ist genau dann der Fall, wenn gilt (ohne Berücksichtigung des Hauptmaximums,  $k = 0$ ):

$$\sin \theta = \frac{k \cdot \lambda}{b}, \quad k = 1, 2, \dots \quad (8)$$

Um nun aus dem Minimum  $k$ -ter Ordnung die Spaltbreite zu bestimmen, gehen wir folgendermaßen vor:

1. Zunächst messen wir den Abstand  $a$  vom Schirm zum Spalt und den Abstand  $x$  des  $k$ -ten Minimums vom Hauptmaximum.
2. Damit berechnen wir den Winkel, in dem das Licht gebeugt wurde:

$$\tan \theta = \frac{x}{a} \quad (9)$$

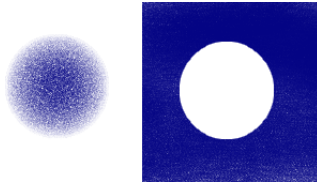
3. Löst man (8) nach  $b$  auf, lässt sich durch Einsetzen von  $k$ , der bekannten Wellenlänge  $\lambda$  und des gerade berechneten Winkels  $\theta$  die Spaltbreite bestimmen:

$$b = \frac{k \cdot \lambda}{\sin \theta} \quad (10)$$

Auch in diesem Versuchsteil eignet sich die Betrachtung der Minima besser als die der Maxima, da die Nullstellen exakter zu lokalisieren sind.

## 2.2 Babinet-Theorem

Nach dem Babinet-Theorem erzeugen komplementäre Gegenstände identische Beugungsbilder (abgesehen von den geometrischen Schatten). Komplementär im Sinne der Optik sind zwei Gegenstände, wenn bei beiden gerade die lichtdurchlässigen und die nicht lichtdurchlässigen Stellen vertauscht sind, wie z.B. bei Einzelspalt und Steg oder Kreisöffnung und Kreisscheibe:



## 2.3 Beugungsbilder von Kreisöffnung, Kreisscheibe und Kante

Nach dem Babinet-Theorem aus Teil 2.2 besitzen Kreisöffnung (Lochblende) und Kreisscheibe außerhalb des geometrischen Schattens identische Beugungsmuster, da es sich um komplementäre Objekte handelt. Offensichtlich befindet sich bei der Kreisöffnung beim Beugungswinkel von  $\theta = 0^\circ$  das Hauptmaximum (0. Ordnung), weil das Licht direkt durch die Öffnung hindurchlaufen kann und die einzelnen Teilwellen keinen Gangunterschied erhalten.

Bei der Kreisscheibe tritt natürlich ein sehr viel dunklerer geometrischer Schattenraum auf, da die Scheibe ja in der Mitte den Lichtweg versperrt. Das Babinet-Theorem hat trotzdem Gültigkeit: genau im Zentrum ist ein heller Punkt (Poissonscher Fleck) zu beobachten. Dieser entsteht dadurch, dass dort alle am Rand der Scheibe gebeugten Wellen die gleiche Phase haben, also konstruktiv zum 0. Maximum interferieren.

Das an der Kante gebeugte Licht ergibt keine scharfe Abbildung auf dem Schirm, sondern ein von Interferenzstreifen durchzogenes Bild. Für den Abstand  $x_k$  der dunklen Streifen außerhalb des geometrischen Schattens gilt:

$$x_k = \sqrt{y \cdot \lambda \cdot \left(k - \frac{1}{4}\right)}, \quad k = 1, 2, \dots \quad (11)$$

$y$  ist hierbei der Abstand von Kante und Schirm,  $\lambda$  bezeichnet wie üblich die Wellenlänge.

## 2.4 Bestimmung des Durchmessers eines Haares

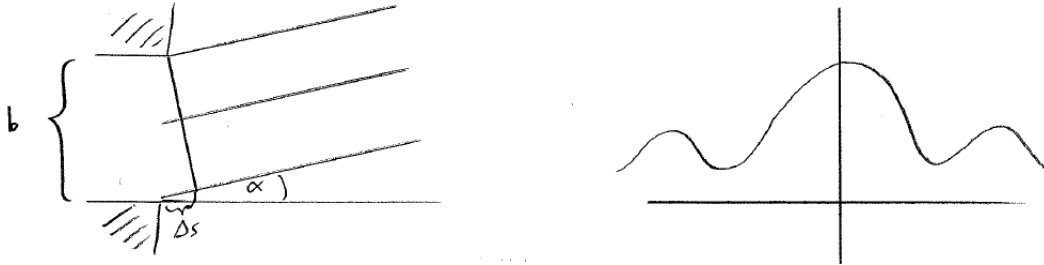
Nach dem Babinet-Theorem entspricht das Interferenzmuster eines Haares dem eines Einzelspalts, da diese Objekte komplementär zueinander sind. Die Dicke des Haares entspricht dabei der Spaltbreite des Einzelspalts. Im Versuch beugen wir das Laserlicht am Haar und erhalten ein Interferenzmuster ähnlich zu dem in Aufgabe 2.1 (wir erwarten wie in 2.3 einen zusätzlichen Schatten in der Mitte des Musters, der beim Einzelspalt nicht zu beobachten ist). Die tatsächliche Haardicke lässt sich analog zur Einzelspaltbreite mit Formel (10) durch Ausmessen der Minima bestimmen. Überprüft werden soll das Ergebnis mit der Messung per Mikrometerschraube.

### 3 Beugung an Mehrfachspalten und Gittern

In Aufgabe 2 haben wir uns mit dem Beugungsbild eines Einzelspalts beschäftigt. Minima ergaben sich hier für die folgende Beziehung zwischen Beugungswinkel  $\alpha$ , die Wellenlänge  $\lambda$  und die Spaltbreite  $b$ :

$$b \cdot \sin \alpha = k \cdot \lambda \quad (12)$$

Diese Beziehung lässt sich auch aus Überlegung zum Gangunterschied  $\Delta s$  herleiten: für  $\Delta s = b \cdot \sin \alpha = k \cdot \lambda$  ergibt sich ein Minimum, weil sich jeweils der halbe Spalt auslöscht. Das Interferenzmuster ist relativ breit:



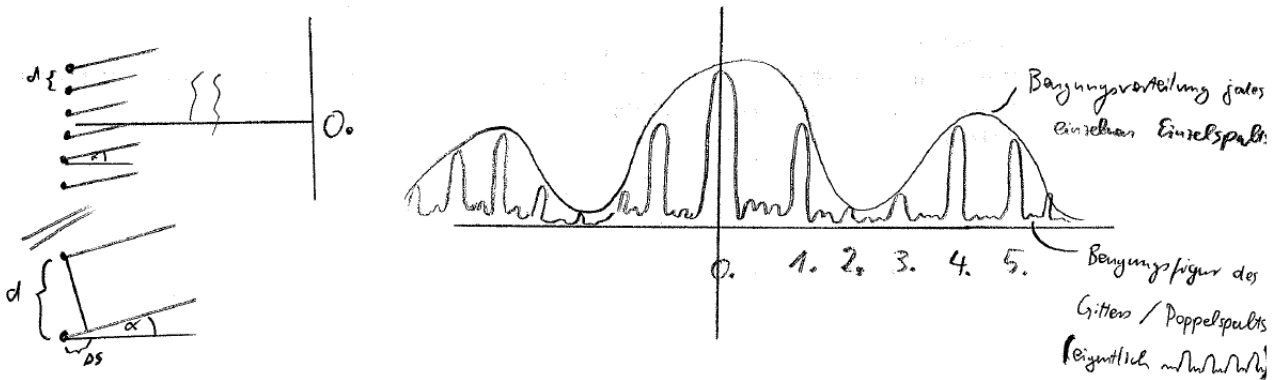
Beim Gitter bzw. Doppelspalt mit Spaltabstand  $d$  ergeben sich Maxima für den Gangunterschied:

$$\Delta s = d \cdot \sin \alpha = k \cdot \lambda \quad (13)$$

In diesem Fall interferieren die Teilwellen konstruktiv. Für Minima gilt die Beziehung:

$$\Delta s = d \cdot \sin \alpha = \frac{2k + 1}{2} \lambda \quad (14)$$

Diese Bedingungen allein würden ein Interferenzmuster ergeben, wie es in der folgenden Skizze ganz rechts unten angedeutet ist. In der Realität haben die einzelnen Spalte, aus denen das Gitter aufgebaut ist, aber nicht die Breite Null, sondern müssen als Einzelspalte berücksichtigt werden. Es gilt: wo schon von den Einzelspalten kein Licht hinkommt, kann auch kein Maximum des Gitters liegen. Es werden also einige Gitter-Maxima ausgelöscht. Das Beugungsbild des Einzelspalts ergibt deshalb die Einhüllende des Interferenzmusters des Gitters.



### 3.1 Beugung am Doppelspalt

Der Doppelspalt kann als Gitter mit lediglich zwei Öffnungen angesehen werden, was zur Folge hat, dass sich im obigen Interferenzbild keine kleinen Gitter-Nebenmaxima zeigen. Die Vorgehensweise zur Bestimmung von Spaltbreite  $b$  und Spaltabstand  $d$  aus dem Beugungsbild ist die Folgende (Abstand Schirm - Spalt:  $a$ ):

- Bestimmung der Spaltbreite  $b$ 
  1. Minima der Einhüllenden suchen und Entfernung  $x$  zur Mitte (bzw. zum 0. Maximum) messen
  2. Wie in Aufgabe 2.1 über den Tangens den Beugungswinkel  $\alpha = \arctan \frac{x}{a}$  bestimmen
  3. Mit Formel (12) nach  $b$  aufgelöst lässt sich die gewünschte Größe errechnen.
  4. Um größere Fehler zu vermeiden (Minima der Einhüllenden ist evtl. nur schwer zu erkennen), bietet es sich an, einfach eine Hälfte des Doppelspalt abzudecken und eine genau Messung am Einzelspalt durchzuführen.
- Bestimmung des Spaltabstands  $d$ 
  1. Intensitätsmaximum oder -minimum suchen und Entfernung  $x$  zur Mitte (bzw. zum 0. Maximum) messen
  2. Den Beugungswinkel  $\alpha = \arctan \frac{x}{a}$  bestimmen
  3. Mit Formel (13) [für Maxima] oder Formel (14) [für Minima] lässt sich der Spaltabstand  $d$  berechnen.

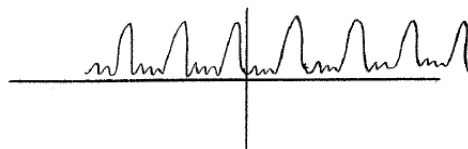
### 3.2 Dreifachspalt und Vierfachspalt

#### 3.2.1 Erhöhung der Anzahl der Spalte

Setzt man neben den Doppelspalt einen weiteren Doppelspalt mit gleicher Spaltbreite, erhält man einen Vierfachspalt. Auf dem Schirm beobachtet man, dass die Maxima zwar an der gleichen Stelle bleiben, dafür aber schärfer werden. Zwischen den Maxima treten mit steigender Spaltanzahl immer mehr Nebenmaxima auf, wie sie in obiger Skizze (Einführung in Aufgabe 3, Gitter) aufgemalt sind.

#### 3.2.2 Veränderung von Spaltabstand und Spaltbreite

- Bei geringerem Spaltabstand  $d$  vergrößert sich der Abstand der Hauptmaxima, was sich aus Formel (13) herleiten lässt
- Bei geringerer Spaltbreite  $b$  wird das Beugungsbild (bzw. die Einhüllende) breiter, siehe Formel (12)
- Geht der Spaltabstand gegen 0, wird das Interferenzmuster des Gitters vernachlässigbar, so dass sich nur noch die Einzelspalt-Beugungsverteilung beobachten lässt
- Geht die Spaltbreite gegen 0, können wir die Auswirkungen des Einzelspalt vernachlässigen. Ergebnis ist die reine Gitter-Intensitätsverteilung:



### 3.3 Bestimmung der Gitterkonstanten eines Strichgitters

Die Gitterkonstante  $g$  bezeichnet die Anzahl der Spalte pro Meter. Um  $g$  zu bestimmen, bestimmten wir aus dem Interferenzmuster den Spaltabstand  $d$  wie in 3.1 erläutert. Die Gitterkonstante  $g$  ist gerade der Kehrwert des Spaltabstands.

- Die Lage der Maxima hängt nicht von der Anzahl der beleuchteten Spalte ab. Aber: je mehr Spalte interferieren, desto schärfer und intensiver werden die Maxima, und desto einfacher und exakter wird die Messung.

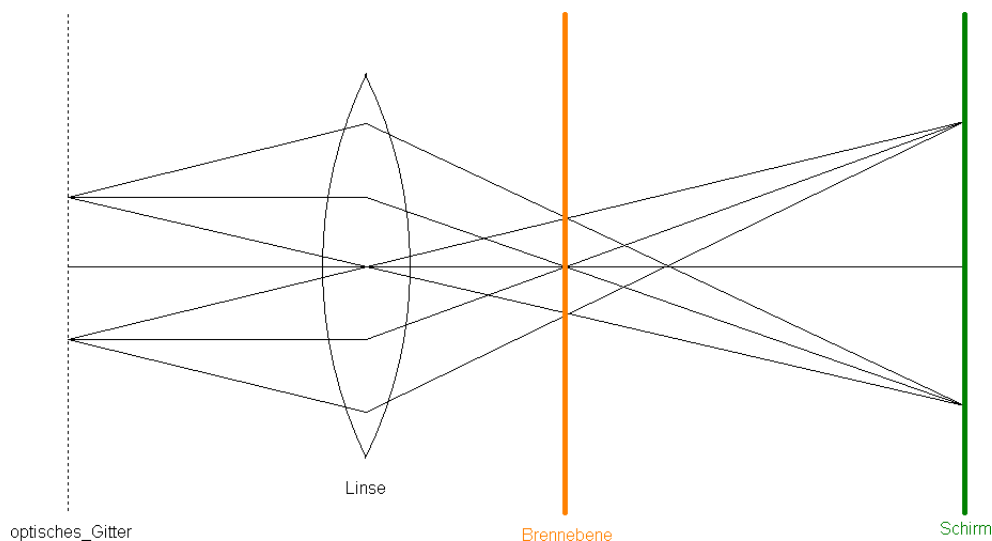
### 3.4 Kreuz- und Wabengitter

Die oben angestellten Überlegungen sind natürlich auch für das Kreuz- und das Wabengitter gültig. Bei diesen Gittertypen muss allerdings die zusätzliche Raumkomponente berücksichtigt werden, was sich aber durch Überlagerung der oben aufgeführten Beugungsrichtungen bewerkstelligen lässt.

## 4 Abbildung nichtselbstleuchtender Gegenstände

In diesem Versuchsteil soll ein Gitter mit ca. 100 Strichen pro Zentimeter mit dem Laser beleuchtet und einer 150mm-Linse auf einem Schirm abgebildet werden. Nach den Regeln der geometrischen Optik schneiden sich alle Strahlen der 0. Beugungsordnung im Brennpunkt. Die Strahlen höherer Beugungsordnung schneiden sich ebenfalls, aber nicht im Brennpunkt, sondern in der Brennebene ober- und unterhalb des Brennpunkts. Mit Hilfe einer Beugungsordnungsblende in der Brennebene kann man die gewünschte Beugungsordnung ausblenden:

- Lässt man lediglich die 0. Ordnung durch, so erhält man auf dem Schirm das Bild einer gleichmäßig beleuchteten Fläche, was der Abbildung der Lichtquelle ohne Gitter entspricht.
- Lässt man zusätzlich eine der ersten beiden Beugungsordnungen passieren, ist auf dem Schirm das Bild des Gitters erkennbar.
- Blendet man die 0. Ordnung aus und lässt nur die höheren Ordnungen durch, so ergibt sich zwar ein Bild mit Gitterstruktur, jedoch mit gegenüber dem Originalgitter deutlich größerer Spaltanzahl. Möchte man ein digitalisiertes Bild von den störenden Rastern befreien, so könnte das also mittels Ausblenden höherer Beugungsordnungen bewerkstelligt werden.



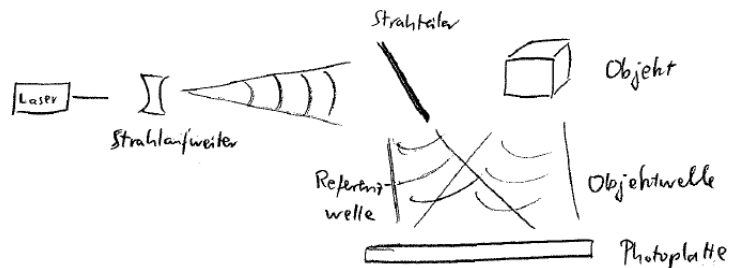


## 5 Holographie

Die Darstellung von Objekten ist mit herkömmlichen Abbildungsmethoden nicht sehr befriedigend. In der Regel ist (z.B. auf einem Schirm) nur eine zweidimensionale Darstellung möglich, oder 3D-Bilder erweisen sich als sehr lichtschwach. Mit der Holographie besteht aber die Möglichkeit, ein echtes dreidimensionales Bild eines Objektes zu erzeugen, das visuell nicht vom realen Objekt zu unterscheiden ist.

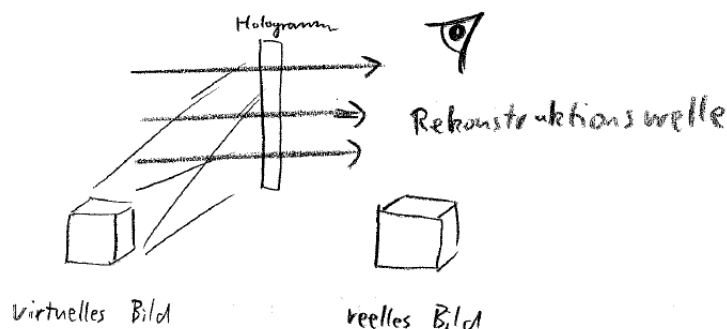
### 5.1 Herstellung

Sämtliche optische Informationen über einen Gegenstand sind in einer von ihm ausgehenden Wellenfront (in den Werten von Amplitude, Phase, Intensität...) enthalten. Bei der „normalen“ Photographie ist die Schwärzung der Photoplatte nur abhängig von der Intensität des eintreffenden Lichts, alle Informationen über die Phase der Welle (und damit die räumliche Wahrnehmung) gehen deshalb verloren. Um die Phase ebenfalls auf der Photoplatte festzuhalten, benutzt man folgenden Versuchsaufbau:



- Kohärentes Licht eines Lasers wird aufgeweitet und mittels Strahlteiler aufgeteilt
- Ein Teil des Lichts fällt auf das Objekt, so dass von diesem die sogenannte Objektwelle ausgeht
- Die Objektwelle wird mit dem übrig gebliebenen Teil der Ursprungswelle, die als Referenz dient, interferiert.
- Das Interferenzbild wird auf einer hochauflösenden Photoplatte abgebildet. Die Schwärzungsverteilung auf dieser Photoplatte nennt man Hologramm und hat keinerlei Ähnlichkeit mit dem herkömmlichen Bild.

### 5.2 Rekonstruktion



Um das Hologramm sichtbar zu machen, geht man folgendermaßen vor:

- Beleuchtung des Hologramms mit kohärenter Lichtwelle (Laser) gleicher Frequenz wie bei der Herstellung des Hologramms, jetzt genannt Rekonstruktionswelle.
- Die Beugung am Hologramm erzeugt ein täuschend echtes 3D-Bild des Gegenstands (zum einen ein virtuelles Bild hinter dem Hologramm, zum anderen ein reelles seitenverkehrtes Bild vor dem Hologramm, das mit einem Schirm sichtbar gemacht werden kann).

### 5.3 Besonderheiten des Hologramms

- Auch ein Teilstück des Hologramms enthält Informationen über das gesamte Objekt. Dies lässt sich im Versuch feststellen, in dem man einen Teil des Hologramms beim Betrachten verdeckt, und erstaunlicherweise trotzdem weiterhin das gesamte Objekt sehen kann.
- Es ist möglich, mehrere Hologramme zu überlagern, so dass man das selbe Objekt zu verschiedenen Zeitpunkten abbilden kann
- Mehrfachbelichtungen mit verschiedenen Wellenlängen ermöglichen die Herstellung von Farbhologrammen