

# Physikalisches Anfängerpraktikum (P2)

## P2-16,17,18: Laser A

Matthias Faulhaber, Matthias Ernst (Gruppe 19)

Karlsruhe, 18.11.2009

---

Ziel des Versuchs ist die Erkenntnis der Nützlichkeit des LASERs für die Durchführung von Experimenten zur Beugung, Abbildung und Holographie.

### 0 Theoretische Grundlagen

#### 0.1 Funktionsweise des LASERs

Der LASER (Abkürzung für *Light amplification by stimulated emission of radiation*) ist eine in den 1960er Jahren entwickelte Lichtquelle. Wie der Name besagt, besteht das Wirkungsprinzip in der stimulierten Lichtemission und der damit verbundenen Verstärkung der Lichtintensität. Dabei werden die Atome des Mediums des LASERs kontinuierlich in höhere elektronische Zustände angeregt, wobei ein Teil der Atome bei Relaxation der Elektronen spontan Licht emittiert. Das Medium befindet sich in einem Resonator, der im einfachsten Fall aus zwei Spiegeln besteht. Zwischen diesen werden das spontan emittierte Licht propagieren. Dabei ist es in der Lage, bei Atomen in angeregten Zuständen die Emission von Licht zu stimulieren. Wenn der überwiegende Teil der Atome im angeregten Zustand vorliegt, also bei Besetzungsinversion, wird auf diese Weise das Licht immer weiter verstärkt. Einer der Spiegel ist geringfügig durchlässig, sodass das Licht dem Resonator entweichen und außerhalb zur Anwendung kommen kann. Für eine Besetzungsinversion ist mindestens ein sog. „Dreinevensystem“ als Medium nötig, da sonst der angeregte Zustand aufgrund der Boltzmannstatistik nie so stark besetzt sein kann, dass eine nennenswerte Verstärkung des Lichts auftritt. Aufgrund der stimulierten Emission haben alle Photonen dieselbe Phase und Frequenz, weshalb der LASER eine wichtige Quelle kohärenten Lichts darstellt. LASER finden heutzutage in der Forschung, in der Industrie und im Alltag reichlich Anwendung, von der Spektroskopie über das präzise Bearbeiten von Materialien bis hin zur Signalübertragung.

#### 0.2 Brewsterwinkel

Fällt Licht auf die Grenzfläche zwischen zwei Medien, so kommt es i.A. zu einer teilweisen Reflexion und Transmission. Das Reflexionsvermögen hängt sowohl vom Einfallswinkel und der Polarisation des einfallenden Lichts als auch von den Brechungsindices der beiden Medien ab. Fällt das Licht in einem bestimmten Winkel, dem Brewsterwinkel  $\theta_B$ , ein (bei diesem beträgt der Winkel zwischen reflektiertem transmittiertem Strahl  $90^\circ$ ), so wird die parallel zur Oberfläche polarisierte Komponente vollständig transmittiert, die senkrecht polarisierte Komponente wird teilweise reflektiert

(die reflektierte Strahlung ist somit vollständig senkrecht polarisiert). Praktische Anwendung findet diese Tatsache bei Gaslasern, bei denen die Spiegel außerhalb des Resonators (also des Gases) angebracht werden müssen. Die Fenster, die den Resonator einschließen, werden im Brewsterwinkel angebracht. Dadurch wird das parallel polarisierte Licht bei jedem Durchgang vollständig transmittiert, das senkrecht polarisierte Licht wird jedoch teils reflektiert und abgeschwächt. Somit ist das vom LASER emittierte Licht fast vollständig linear polarisiert.

Weil der reflektierte und der transmittierte Strahl einen Winkel von  $90^\circ$  einschließen, folgt aus dem Snelliusschen Brechungsgesetz bei Einfall aus einem Medium mit Brechungsindex  $n_1$  auf ein Medium mit Brechungsindex  $n_2$  für den Brewsterwinkel:

$$\theta_B = \arctan \frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$

### 0.3 Beugung

Unter Beugung von Wellen versteht man nach Auftreffen auf ein Hindernis die Ausbreitung einer Welle in eine andere Richtung als zuvor. Auch Licht zeigt Beugung, weshalb es nicht allein durch die geometrische Optik beschrieben werden kann. Daher kann bei Auftreffen von Licht auf entsprechende Hindernisse Beugung und damit Interferenzmuster beobachtet werden.

#### 0.3.1 Beugung am Einzelspalt

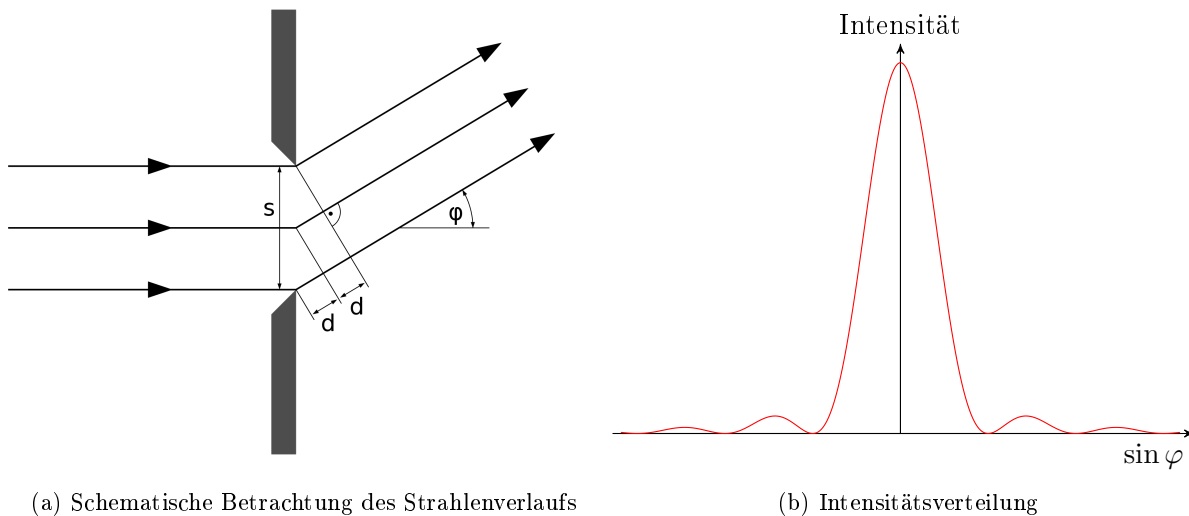


Abbildung 1: Beugung am Einzelspalt

Bei Betrachtung der Beugung in einem Abstand vom Schirm im sog. Fernfeld kann man in guter Näherung davon ausgehen, dass die gebeugten Lichtstrahlen parallel verlaufen. Man spricht in diesem Fall von Fraunhofer-Beugung. Für die Intensitätsverteilung der gebeugten Welle gilt dann mit dem Winkel  $\varphi$ , um den die Strahlen abgelenkt werden, und der Spaltbreite  $s$ :

$$I(\varphi) = I_0 \frac{\sin^2 \left( \pi \frac{s}{\lambda} \sin \varphi \right)}{\left( \pi \frac{s}{\lambda} \sin \varphi \right)^2} \quad (2)$$

Daraus kann die Lage der Maxima und der Minima berechnet werden. Für Maxima muss  $\sin^2\left(\pi \frac{s}{\lambda} \sin \varphi\right) = 1$ , der Zähler also maximal sein. Dies ist genau dann der Fall, wenn mit ganzzahligem  $k$  gilt:

$$\sin \varphi = \left(k + \frac{1}{2}\right) \cdot \frac{\lambda}{\pi}. \quad (3)$$

Analog muss der Zähler für die Minima verschwinden, also muss gelten:

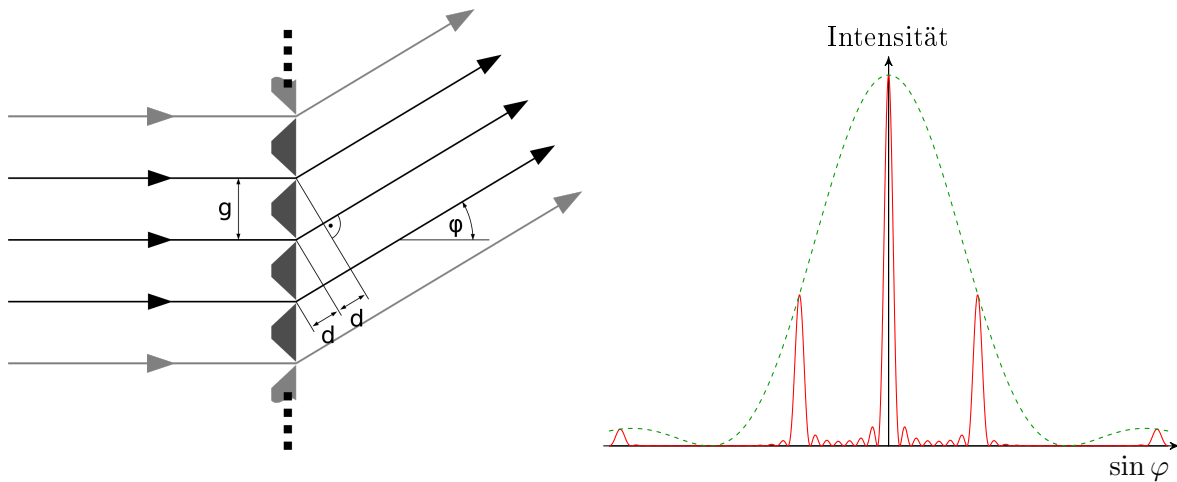
$$\sin \varphi = k \cdot \frac{\lambda}{\pi}. \quad (4)$$

### 0.3.2 Babinetsches Theorem

Das Babinetsche Theorem besagt, dass ein Beugungsbild eines Objekts und dessen komplementären Objekts (dieses lässt überall dort Licht durch, wo das ursprüngliche Objekt dieses blockierte und umgekehrt) mit Ausnahme des nach der geometrischen Optik erwarteten Bildes durch den Primärstrahl dasselbe Beugungsbild aufweisen. Dies erklärt die auf den ersten Blick verblüffende Tatsache, dass beispielsweise eine Kreisscheibe und eine Blende mit kreisförmigem Loch desselben Durchmessers ein fast gleiches Beugungsbild zeigen.

### 0.4 Beugung an Doppelspalt und Gitter

Beugung kann auch an mehreren Spalten oder an einem Gitter beobachtet werden. Dabei treten kompliziertere Interferenzmuster auf als beim Einzelspalt. Für die Intensitätsverteilung bei der



(a) Schematische Betrachtung des Strahlenverlaufs (b) Intensitätsverteilung eines Achtfachspaltes mit  $\frac{g}{s} = 2$  (durchgezogen) und des Einzelspaltes (gestrichelt)

Abbildung 2: Beugung am Gitter

Beugung an  $N$  Spalten der Breite  $s$  im Abstand  $g$  gilt

$$I(\varphi) = I_0 \frac{\sin^2\left(\pi \frac{s}{\lambda} \sin \varphi\right)}{\left(\pi \frac{s}{\lambda} \sin \varphi\right)^2} \cdot \frac{\sin^2\left(N \pi \frac{g}{\lambda} \sin \varphi\right)}{\sin^2\left(\pi \frac{g}{\lambda} \sin \varphi\right)^2}. \quad (5)$$

Die Intensität setzt sich also im Wesentlichen aus zwei Faktoren zusammen, wobei der erste identisch zur in Gl. 2 angegebenen Intensitätsverteilung des Einzelspaltes ist. Diese bildet hier die

Einhüllende des Interferenzmusters. Der zweite Quotient weist gemäß der Anzahl an Spalte mehrere Extrema auf, es handelt sich also um die Interferenz der einzelnen Spalte. Diese stellt sich als eine im Prinzip gleichförmige Verteilung von großen Haupt- und kleinen Nebenmaxima dar, wobei die Nebenmaxima mit steigender Anzahl, also steigendem  $N$ , kleiner, die Hauptmaxima jedoch größer und schärfer werden. Aufgrund der Minima der Einhüllenden sind jedoch einige Hauptmaxima unterdrückt.

Für den Abstand der Minima der Einhüllenden vom 0. Hauptmaximum gilt wie oben:

$$\sin \varphi = k \cdot \frac{\lambda}{s}. \quad (4)$$

Für die Abstände der Minima der Interferenz vom 0. Hauptmaximum gilt:

$$\sin \varphi = k \cdot \frac{\lambda}{N \cdot g}. \quad (6)$$

Die Minima der gesamten Intensitätsverteilung sind aufgrund der vielen kleinen Nebenmaxima bei Gittern mit großem  $N$  schwer zu erkennen, leichter fällt dies bei den Abstände der Hauptmaxima vom 0. Hauptmaximum. Für diese gilt:

$$\sin \varphi = k \frac{\lambda}{g} \quad (7)$$

Die Höhe der Hauptmaxima an diesen Stellen wird durch die Intensitätsverteilung des Einzelspalts bestimmt. Außerdem ist dieser Term analog zu dem der Minima des Einzelspalts, jedoch mit der Gitterkonstante statt der Spaltbreite. Der Vollständigkeit halber hier noch die Bedingung für die Nebenmaxima zwischen den Hauptmaxima:

$$\sin \varphi = \left(k + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{Ng} \quad (8)$$

## 0.5 Abbildung beleuchteter Gegenstände

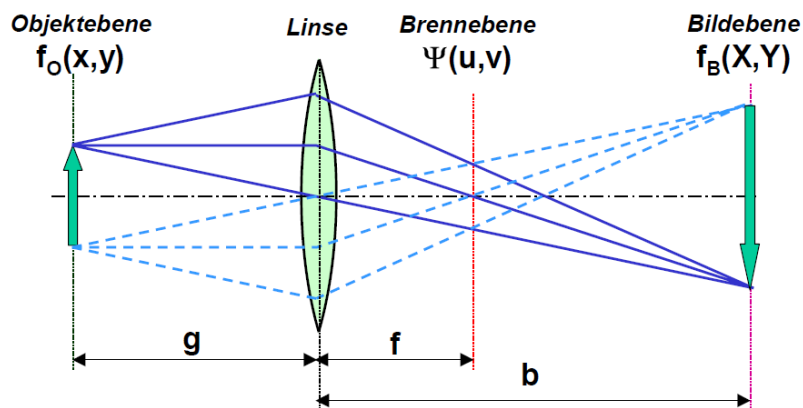


Abbildung 3: Strahlengang bei Abbildung eines Objekts mittels einer Linse

Bei der Abbildung nichtselbstleuchtender Gegenstände spielt die Beugung eine wesentliche Rolle. Der Strahlengang bei Abbildung eines Objekts mittels einer Linse auf einem Schirm ist schematisch in Abb. 3 dargestellt. Wenn die Linse zu klein ist nur das ungebeugte Licht propagieren kann,

so wird der Gegenstand nicht scharf abgebildet, es ist dann keine Information über dessen Größe im Bild vorhanden. Erst, wenn mindestens die  $\pm 1$ . Beugungsordnung an der Linse gebrochen wird, ist diese wieder vorhanden. Folglich kann mit einer Beugungsordnungsblende durch sukzessive Reduktion der noch durchgelassenen Beugungsordnung die Qualität des Bildes einer scharfen Quelle verschlechtert werden. Im Gegensatz dazu kann ein verpixeltes Bild möglicherweise durch Ausblendung der Beugungsstrahlen höherer Ordnung etwas „verwaschen“ und in diesem Fall von der Verpixelung befreit werden.

## 0.6 Holographie

Holographie ist ein Verfahren zur dreidimensionalen bildlichen Wiedergabe eines dreidimensionalen Objekts. Im Gegensatz zur normalen Photographie, bei der höchst inkohärente Lichtquellen wie Blitze oder die Umgebung zum Einsatz kommen, ist der Einsatz von Licht aus einer kohärenten Quelle zwingend. Aufgenommen wird nicht nur das vom Objekt gestreute Licht, sondern auch die von derselben Lichtquelle stammenden Referenzwelle bzw. das Interferenzmuster aus beiden. Somit enthält das Bild Informationen über Amplitude und Phase des am Objekt gestreuten Lichts und aufgrund der Phasenverschiebung auch über dessen dreidimensionale Struktur. Zur Rekonstruktion

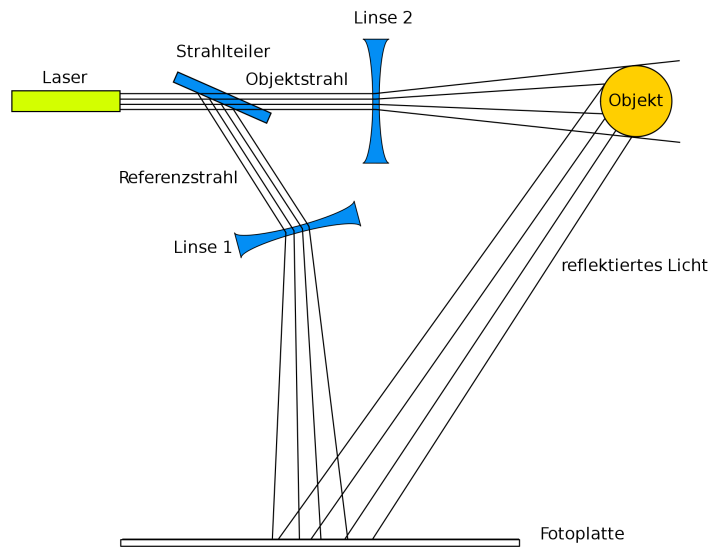


Abbildung 4: Möglicher schematischer Aufbau für die Aufnahme eines Hologrammes

bzw. Betrachtung des Hologramms strahlt man kohärentes Licht derselben Wellenlänge wie bei der Erzeugung ein. Dabei wird die ursprüngliche Wellenfront rekonstruiert und es treten zwei Bilder auf, ein reelles Bild in Einstrahlrichtung gesehen hinter dem Speichermedium durch Transmission und ein virtuelles Bild davor. Bei Betrachtung des durchleuchteten Hologramms entsteht ein echtes dreidimensionales Bild im Raum. Im Gegensatz zu normalen photographischen Abbildungen, bei denen jeder Punktppunkt genau eine Information enthält, enthält prinzipiell jeder Teil des Hologramms die gesamte Information. Auch aus einem nur teilweise erhaltenen Hologramm lässt sich also die gesamte dreidimensionale Information gewinnen, jedoch mit geringerer Qualität des Bildes.

Hologramme lassen sich überlagern, sodass beispielsweise ein Objekt zu mehreren Zeiten dargestellt werden kann. Außerdem können durch die Überlagerung von Hologrammen, die mit Licht

unterschiedlicher Wellenlängen aufgenommen wurden, auch Farbhologramme erzeugt werden.

## 1 Durchführung

### 1.1 Messungen zum Brewsterwinkel

#### 1.1.1 Demonstration des Brewsterwinkels

Um den Brewsterwinkel sowie den Einsatz von „Brewsterfenstern“ in LASERn zu verstehen, wird zunächst eine sorgfältig geputzte planparallele Glasscheibe in den Strahlengang eines offenen Demonstrationslasers zwischen das Entladungsrohr und den Resonatorspiegel eingebracht. Die Platte ist drehbar gelagert, sodass die Intensität bei Variation des Winkels beobachtet werden kann.

Das erwartete Ergebnis ist, dass die Intensität bei Einstellung des Brewsterwinkels maximal ist und bei davon abweichenden Winkeln stark nachlässt, bis der LASER verlischt.

### 1.2 Messung des Brewsterwinkels sowie des Brechungsindex von Glas

Die Platte wird außerhalb des Lasers angebracht, mit diesem bestrahlt und der Brewsterwinkel bestimmt. Dies kann entweder durch Beobachtung des Minimums der Reflexion an der Decke des Raums mit bloßem Auge oder durch Messung der Intensität des Maximums der Transmission mittels einer Photodiode geschehen.

Die Beobachtung des Minimums wird als genauer angenommen, da das Auge auf Intensitätsänderungen insbesondere bei kleiner Intensität (also im abgedunkelten Raum) sehr sensibel reagiert, die Photodiode am Maximum jedoch möglicherweise nicht fein genug auflöst oder einen Bereich der Sättigung in dessen Nähe erreicht, sodass es nicht genau aufgelöst werden kann.

Aus dem Brewsterwinkel wird, da das Medium, aus dem der Strahl auf das Glas fällt, Luft mit  $n_{\text{Luft}} = 1$  ist, nach  $\tan \theta_B = n_{\text{Glas}}$  der Brechungsindex der Glasscheibe berechnet.

### 1.3 Beugung an einfachen Objekten: Spalt, Steg, Kreisloch, -blende und Kante

#### 1.3.1 Messung der Lage von Beugungsmaxima bzw. -minima eines Spaltes

Auf einen einfachen Spalt wird mit einem LASER eingestrahlt. Es wird sowohl der Abstand  $d$  des Spaltes vom Schirm als auch der Abstand  $a$  des  $k$ -ten Minimums vom Hauptmaximum auf gleiche Weise wie zuvor gemessen. Aus diesen beiden Größen kann nach Gl. 4 und mit  $\tan \varphi = \frac{a}{d}$  die Breite  $s$  des Spaltes berechnet werden:

$$s = \frac{1}{\sin(\arctan \frac{a}{d})} k\lambda \approx \frac{d}{a} k\lambda \quad (9)$$

Für große Abstände vom Schirm, also kleine Winkel, gilt  $\tan \frac{a}{d} \approx \sin \frac{a}{d}$ , dies wurde bei der Näherung verwendet.

#### 1.3.2 Vergleich des Beugungsbildes von Spalt und Steg: Babinet-Theorem

Das Beugungsbild bei Einstrahlung mit dem LASER auf einen Spalt und einen Steg wird aufgenommen und qualitativ verglichen. Zu erwarten sind nach dem Babinet-Theorem, da es sich um komplementäre Objekte handelt, nahezu identische Beugungsbilder.

### 1.3.3 Vergleich des Beugungsbildes von Kreisöffnung, -scheibe und einer Kante

Nun wird das Beugungsbild bei Einstrahlung auf eine Kreisöffnung, eine Kreisscheibe und eine Kante beobachtet. Auch hier sind für Kreisöffnung und -scheibe nach dem Babinet-Theorem fast identische Beugungsbilder zu erwarten, für die Kante wird ein streifenförmiges Interferenzmuster erwartet.

Bemerkenswert ist, dass auch bei Beugung an der Kreisscheibe ein heller Fleck, der sog. Poissonsche Fleck, an der Stelle auftritt, auf der der Strahl ohne Objekt bzw. bei Beugung an der kreisförmigen Öffnung (wo der Strahl zentral ungehindert propagieren kann) auftritt.

### 1.3.4 Bestimmung des Durchmesser eines Haares

Nach dem Babinetschen Theorem ist bei Beugung von Laserlicht an einem Haar ein zu einem entsprechenden Spalt identisches Beugungsmuster zu erwarten. Daher kann nach Gl. 9 auf gleiche Weise wie oben die Dicke des Haares bestimmt werden. Zur Kontrolle wird die Dicke des Haares noch mit einer Mikrometerschraube bestimmt.

## 1.4 Beugung an Mehrfachspalten und Gittern

### 1.4.1 Bestimmung von Spaltbreite und -abstand eines Doppelspalts

Aus dem Beugungsbild eines Doppelspalts kann nach Gl. 4 aus den Minima der Einhüllenden die Breite der Spalte bestimmen. Unter Umständen ist eine genauere Messung möglich, wenn je ein Spalt abgedeckt wird und so direkt die Spaltbreite der Einzelspalte aus dem jeweiligen Beugungsbild bestimmt wird. Der Abstand der Spalte kann entweder mit Gl. 7 aus dem Abstand der Hauptmaxima zum 0. Hauptmaximum bestimmt werden oder mit Gl. 7 aus dem Abstand der Minima zum Hauptmaximum. Da diese jedoch möglicherweise aufgrund ihrer Anzahl und der geringen Intensität der Nebenmaxima dazwischen schlecht zu erkennen sind, ist die Bestimmung über die Hauptmaxima vorzuziehen.

Mit derselben Näherung wie oben,  $\tan \frac{a}{d} \approx \sin \frac{a}{d}$  folgt nun für den Spaltabstand:

$$g = \frac{1}{\sin(\arctan \frac{a}{d})} k\lambda \approx \frac{d}{a} k\lambda \quad (10)$$

### 1.4.2 Effekt der Änderung der Spaltanzahl

Es wird die Beugung an einem Dreifach- und an zwei Doppelspalten, also einem Vierfachspalt untersucht. Zu erwarten ist, dass die Anzahl der Nebenmaxima, aber auch die Schärfe der Hauptmaxima mit steigender Spaltanzahl steigt. Die berechnete Intensitätsverteilung ist in Abb. 5 dargestellt.

### 1.4.3 Bestimmung der Gitterkonstante eines Strichgitters

Die Gitterkonstante kann wie oben mit Gl. 7 aus dem Abstand der Hauptmaxima zum 0. Hauptmaximum bestimmt werden. Da die Hauptmaxima beim Gitter stärker hervortreten und die Nebenmaxima deutlich an Intensität abnehmen, ist die Bestimmung über die Minima jetzt nicht mehr möglich. Die Berechnung der Gitterkonstanten erfolgt wieder mit Gl. 10.

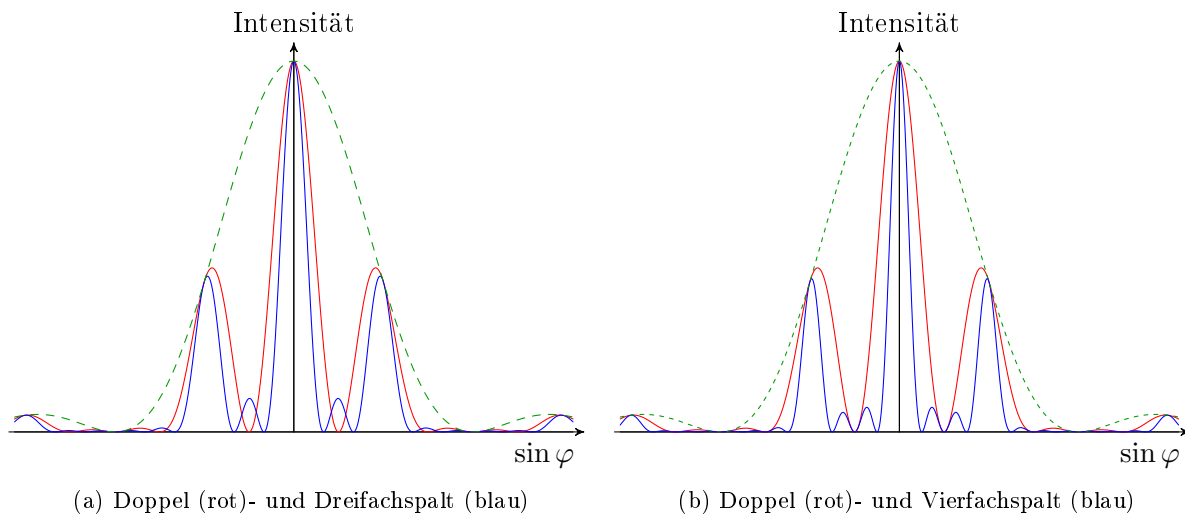


Abbildung 5: Erwartete Intensitätsverteilungen im Vergleich

#### 1.4.4 Beobachtung der Beugung an Kreuz- und Wabengitter

### 1.5 Abbildung beleuchteter Gegenstände

Ein gegebenes Gitter soll durch eine Linse mit einem LASER bestrahlt werden. Das Licht wird auf einem Schirm aufgefangen und dann mittels einer Beugungsordnungsblende selektiv nur Licht bis zu einer bestimmten Beugungsordnung durchgelassen. Beobachtet werden soll das Bild bei Durchlass nur nullter, nullter und erster sowie nur erster und nur zweiter Ordnung.

### 1.6 Holographie

Bei einem gegebenem Hologramm sollen sowohl das reelle als auch das virtuelle Bild aus verschiedenen Blickwinkeln beobachtet werden. Es soll auch ein Teil des Hologramms verdeckt werden.

## Anhang

### 1.7 Quellenangaben

Die folgenden Grafiken wurden nicht selbst erstellt:

- Abbildung 1a: <http://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Beugungsspalt.svg> (abgerufen am 15.11.2009)
- Abbildung 2: <http://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Beugungsgitter.svg> (abgerufen am 15.11.2009)
- Abbildung 3: R. Gross, Physik III (Vorlesungsskript), online im Internet: [http://www.wmi.badw.de/teaching/Lecturenotes/Physik3/Gross\\_Physik\\_III\\_Kap\\_7.pdf](http://www.wmi.badw.de/teaching/Lecturenotes/Physik3/Gross_Physik_III_Kap_7.pdf) (abgerufen am 17.11.2009)
- Abbildung 4: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hologramm\\_aufnahme.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hologramm_aufnahme.svg) (abgerufen am 17.11.2009)