Karlsruher Institut für Technologie (KIT) SS 2012

Physikalisches Anfängerpraktikum - P2

Laser A

P2-16

Auswertung von
Tobias Renz und **Raphael Schmager**

Gruppe: **Do-28**

Durchgeführt am 29. Mai 2012

Versuch P2-16,17,18 **Laser A** **Raum F1-29**

Obwohl A.Einstein schon 1917 von der theoretischen Existenz stimulierter Emission berichtet hat, wurde erst 1954 dieses Phänomen experimentell nachgewiesen. Mit dem darauf basierenden optischen Laser stehen der Forschung und der Technik seit 1960 Lichtquellen zur Verfügung, die sich durch extrem große Kohärenzlänge, sehr gute Parallelität und große 'Energiestromdichte' auszeichnen.

Sie verwenden bei diesem Versuch den Laser als ideale Lichtquelle für Beugungs- und Interferenzexperimente und lernen Anwendungen wie z.B. die Holographie kennen.

SICHERHEITSHINWEISE:

DER LASERSTRAHL IST GEFÄHRLICH FÜR DIE AUGEN!
NIE DIREKT IN DEN STRAHL HINEINSEHEN!
Bei allen Justier- und Aufbauarbeiten Laserschutzbrillen tragen!

Da beim Experimentieren spiegelnde Flächen im Strahl unvermeidlich sind und die Strahllage nicht festliegt, ist besondere Vorsicht geboten. Bleiben Sie beim Experimentieren in der Regel stehen, mit den Augen also weit über der Strahlhöhe. Stark aufgeweitetes oder gestreutes Laserlicht, z.B. von matten Flächen, vom Schirm, vom Hologramm etc., ist bei den verwendeten, relativ schwachen Lasern ungefährlich. Die Grundjustierung eines verstellten und nicht mehr zündenden Lasers (nur bei den Lasern mit externen Spiegeln) ist sehr zeitraubend. Verstellen Sie deshalb die Justierschrauben an den Spiegeln nicht. Der Laser verlischt schon bei sehr geringen Drehwinkeln!

Für Fehlerrechnung sind die Aufgaben 2.1, 3.1 und 3.3 geeignet. Jedes Beugungsbild sollte hier fünfmal abgezeichnet werden, um eine ausreichende Statistik für die Auswertung zu erhalten.

Aufgaben:

1. Brewsterwinkel (Gemeinsam bearbeiten, weil leider nur noch 1x vorhanden!)

1.1 Bei einem Experimentier-Gaslaser mit externen Spiegeln wird das Entladungsrohr mit 'Brewster-Fenstern' abgeschlossen. Überlegen Sie sich den Sinn dieses Verfahrens und demonstrieren Sie die Notwendigkeit: Montieren Sie einen drehbaren Plattenhalter mit planparalleler Glasscheibe zwischen Entladungsrohr und Resonatorspiegel, verändern Sie den Einfallswinkel und beobachten Sie die Strahlintensität. Die Glasscheibe muß sorgfältig geputzt und der Laser optimal justiert sein. Beim Nachjustieren des Lasers den Betreuer hinzuziehen. Die Spiegeljustierschrauben nur um wenige Grad verdrehen und sofort zurückdrehen, wenn der Laser verlischt.

1.2 Messen Sie den Brewsterwinkel, und bestimmen Sie daraus den Brechungsindex des Glases.
Der Plattenhalter wird außerhalb des Lasers montiert. Das Minimum der Reflexion wird ohne Intensitätsmessung an der Zimmerdecke beobachtet. Für die Beobachtung des Maximums der Transmission kann ein Si-Photoelement mit Meßinstrument benutzt werden. Das ist aber ungenauer als die Beobachtung des Minimums. (Warum?)

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

2.1 Bestimmen Sie aus der Lage der Beugungsmaxima und -minima die nur grob bekannte Breite der beiden Spalte, d ~ 0,2mm oder 0,3mm.

2.2 Vergleichen Sie die Beugungsfigur eines gleichbreiten Steges mit der des Spaltes (Babinet-Theorem).

2.3 Betrachten Sie die Beugungsbilder einer Kreisöffnung, einer gleichgroßen Kreisscheibe sowie einer Kante.
Frage: Warum ist die Mitte der Beugungsfigur einer Scheibenblende stets hell? (Poissonscher Fleck)

2.4 Bestimmen Sie aus seiner Beugungsfigur den Durchmesser eines Haares. Vergleichen Sie das Ergebnis mit dem einer Messung mit Mikrometerschraube.

3. Beugung an Mehrfachspalten und Gittern

3.1 Bestimmen Sie die Spaltbreite und den Spaltabstand eines der Doppelspalte aus seinem Beugungsbild.

3.2 Sagen Sie voraus und beobachten Sie dann, a) wie sich das Beugungsbild bei Verwendung des zweiten Doppelspalts charakteristisch ändern wird und b) wie sich das Beugungsbild des Dreifachspalts (0,25 / 0,5) von dem des Doppelspalts (0,25 / 0,5) charakteristisch unterscheidet.

3.3 Bestimmen Sie die Gitterkonstante eines der Strichgitter. Beobachten Sie das Beugungsbild. Welche Rolle spielt die Ausleuchtung?

3.4 Beobachten Sie Beugungsbilder von Kreuz- und Wabengittern. Demonstrationsversuch ohne Auswertung.

4. Abbildung nichtselbstleuchtender Gegenstände (vergl. 'Abbésche Theorie der Bildentstehung im Mikroskop'). **Zeigen Sie, daß für die Abbildung durchstrahlter Objekte das abgebeugte Licht eine wesentliche Rolle spielt.**
Beleuchten Sie ein Gitter (Wabengitter oder Strichgitter 100 Striche/cm) mit parallelem Licht und bilden Sie es mit Hilfe einer 150mm-Linse nach Umlenkung mit einem fernen Planspiegel auf eine Mattscheibe in Lasernähe neben der optischen Bank ab, d.h. in Ihrer Nähe, damit Sie beim Justieren beobachten können. Eine Beugungsordnungsblende in der bildseitigen Brennebene der Linse gestattet das Durchlassen von nur nullter oder von nullter und erster Ordnung des gebeugten Lichts, denn parallel in die Linse einfallendes Licht (Licht derselben Beugungsordnung!) wird in der Brennebene gesammelt. Da die Beugungsordnungsblende schwierig zu justieren ist, können Sie die nullte Ordnung auch mit der Kreisblende (1mm) ausblenden. Beobachten Sie das auf der Mattscheibe jeweils entstehende Bild. Versuchen Sie auch die Beobachtung der zwei weiteren Fälle: Nur die erste oder nur die zweite Ordnung passieren die Beugungsordnungsblende. Gitter, Linse und die dazu passende Beugungsordnungsblende werden in einem Justieraufbau montiert, die Beugungsordnungsblende kommt dabei in die nach allen Richtungen transversal zum Strahl verschiebliche Fassung. Zeichnen Sie zu diesem Versuch bei der Vorbereitung den Strahlengang. Wie könnte man den beobachteten Effekt benutzen, um etwa bei einem digitalisiert empfangenen Zeitungsbild das störende Raster verschwinden zu lassen? ('Image Enhancement'; Literatur: Hecht/Zajac)

5. Holographie: Reproduzieren Sie ein Hologramm. Beobachten Sie sowohl das reelle als auch das virtuelle Bild.
Weiten Sie den Laserstrahl dabei jeweils geeignet auf. Überzeugen Sie sich davon, daß Sie wirklich dreidimensional beobachten können, daß sich nämlich beim Bewegen des Kopfes die Perspektive ändert und Sie zunächst Verborgenes dann sehen können. Das reelle Bild kann auf einem Schirm (weißes Papier) aufgefangen werden. Bewegen Sie den Schirm durch das Strahlungsfeld. Zeigen Sie auch, daß die Information über ein Gegenstandsdetail nicht nur an einer bestimmten Stelle des Hologramms gespeichert ist. Decken Sie verschiedene Bereiche des zunächst weit ausgeleuchteten Hologramms ab.

ZUBEHÖR: (Das Zubehör befindet sich teils an den Versuchsplätzen, teils im Schrank. Es ist mit wenigen Ausnahmen für jeden Versuchsplatz vorhanden.)

- Zur Demonstration: offener He-Ne-Laser, Spindler&Hoyer Typ 500, 2mW (632,8 nm, Entladungsrohr mit Brewsterfenstern, die um eine horizontale Achse gekippt sind, zwei separate Resonatorspiegel, R=99,7% und R=98%, Schutzkappen, Versorgungsgerät, Filterkappen und Justierkreuz; Bereich zwischen Spiegel und Brewsterfenster für Experimente zugänglich**) Nur einfach vorhanden!**

- He-Ne-Laser, Polytec PL-610P, 5mW (geschlossene Bauform mit integriertem Netzteil, polarisiert). **An allen Plätzen.**
- Experimentiertisch (mit 3m-Zeißschiene), diverse Reiter, Verschiebereiter,

- Lichtdetektor mit Phototransistor (kleinflächig, mit ausgeprägter Richtcharakteristik durch Frontlinse, in

Gehäuse mit Anschlussbuchsen für Betriebsgleichspannung, 9V bis 15V, und für Messinstrument, sehr lichtempfindlich und leicht übersteuerbar, deshalb nur für geringe Lichtintensität vorgesehen),
- Netzgerät (2 X 15V, für Phototransistor 1 X 15V an roter und schwarzer Buchse verwenden), Lichtdetektor Si-Photoelement (großflächige Photodiode, d=12mm, wird nur im Elementbetrieb verwendet, d.h. ohne Betriebsspannung direkt an Spannungs- oder Strommessgerät angeschlossen),
- Vielfachmessinstrument (Metex 3800, digitale LCD-Anzeige, alle benötigten Messbereiche verfügbar, gleicher Innenwiderstand bei allen Gleichstrombereichen, deshalb intensitätsproportionale Anzeige mit Si-Photoelement auch über die Bereichsgrenzen hinaus; Achtung: Bei einer der Schalterstellungen 20A-Bereich für spezielle 20A-Buchse, jedoch nur 20-Mikroampere-Bereich für allgemeine A-Buchse !),
- Strahlaufweitungssystem (Mikrobank auf Stift, in Haltern spezielle, für die Laserlicht-Wellenlänge korrigierte Linsen f1=10mm und f2=150mm im f1+f2-Abstand, telezentrisches System), Justieraufbau (Mikrobank auf Stift mit drei verschiebbaren 25mm-Bauteil-Haltern, davon mindestens einer transversal justierbar), Halter (diverse, für Linsen, Blenden, Hologramme und Sonstiges),
- Schirm (Fe, groß, mit Haftmagneten für Papierbefestigung), Planspiegel (auf Stift mit Kugelgelenk),
- Mattscheibe (in Halter auf Stift), Glasplatte (in Halter, drehbar um hor. Achse, mit Winkelskala),
- Polarisationsfilter (d=10cm, auf Stift, drehbar, mit Winkelskala, **nicht im unaufgeweiten Strahl benutzen!**),
- Hologramm (8,5cm X 10cm, in Halter auf Stift),
- Gitter (Dia-Format: Strichgitter 570/mm, Kreuzgitter 13,4/mmX15/mm, Kreuzgitter 2,6/mm x 3,8/mm; in 25 mm-Fassung: Strichgitter 100/cm; Kreuzgitter und Wabengitter (= Hexagonalgitter) ohne Dimensionsangabe),
- Kreisblende 1 – 1.5 – 2 mm als Dia
- Tischlampe, Taschenlampe, Maßband, Reinigungsutensilien.

Folgende Elemente in 25mm-Fassungen:
- Beugungsordnungsblende mit 5 speziellen Öffnungen, Beugungskante, Lochblende 1mm,
- Scheibenblende 1mm, Beugungssteg 0,3mm, Spalte 0,2mm und 0,3mm und 0,4mm,
- Doppelspalte 0,25/0,5mm und 0,25/0,75mm, Dreifachspalt 0,25/0,5mm, Vierfachspalt 0,2/0,3mm,
- Einstellspalt, Irisblende, Polarisationsfilter ohne Skala,
- Achromate f=10mm und f=20mm, Sammellinsen f=30mm und f=50mm und f=100mm und f=150mm.

Literatur:

Demtröder, *Experimentalphysik 2*, Elektrizität und Optik, Springer-Verlag, 2006
F. Pedrotti et al., *Optik für Ingenieure*, Grundlagen, Springer-Verlag, 2002
Bergmann, Schäfer: *Experimentalphysik*, Bd.3, Optik
Hecht, Zajac: *Optics*
Koppelmann: *Der Laser - Eine elem. Darst.*, Praxis der Naturwiss., Heft 1/35 (1986), S.37
Koppelmann: *Die Grundidee der Holographie* - Eine elem. Einf., Praxis der Naturwiss., Heft 1/35 (1986), S.2
Koppelmann: *Erzeugung echt räuml. Bilder mit Hologr.* - Eine elem. Darst., Praxis der Naturwiss., Heft 1/35 (1986)
Mallwitz (Firma Spindler & Hoyer): *Arbeitsunterlagen zum He-Ne-Laser*, Versuche mit kohärentem Licht
Tradowsky: *Laser, kurz und bündig*
Brändli, Dändliker, Hatz: *Laserphysik*

Version: Jul 11

Karlsruher Institut für Technologie (KIT) SS 2012

Physikalisches Anfängerpraktikum - P2

Laser A

P2-16,17,18

Versuchsvorbereitung von

Tobias Renz und **Raphael Schmager**

Gruppe: **Do-28**

Durchgeführt am 29. Mai 2012

Einführung

Wir wollen uns im Versuch ”Laser A” zunächst das Prinzip eines Lasers anschauen. Ein Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) hat die Eigenschaft, dass er eine extrem große Kohärenzlänge sowie eine hohe Energiestromdichte besitzt. Aufgrund der hohen Parallelität, großen Kohärenzlängen sowie periodisch sehr exakt gepulstes Licht werden Laser heutzutage in vielen Bereichen eingesetzt. Beispielsweise dienen sie als einfache Präsentationshilfe (Laserpointer), Entfernungsmessgeräte, Schneid- und Schweißwerkzeug. Sogar in der Medizin werden sie als Laserskalpell benutzt.
Im Versuch verwenden wir den Laser als ideale Lichtquelle um Beugungs- und Interferenzexperimente am Spalt und Gitter durchzuführen. Zunächst wollen wir jedoch einigen theoretischen Grundlagen zu diesem Versuch näher erläutern.

Funktionsweisen und Aufbau eines Lasers

Schon 1916 beschrieb Einstein die Möglichkeit einer Umkehrung der Absorption von Photonen durch Elektronen. Diese Umkehrung wird stimulierte Emission genannt. Hierbei ist es möglich, dass ein Photon ein Elektron, welches sich in einem höheren Energieniveau befindet, unter Emission eines Photons, in ein niedrigeres Energieniveau überführt. Interessant hierbei ist die Tatsache, dass nicht wie bei der Absorption das einfallende Photon "verschwindet", sondern erhalten bleibt. Das durch den Übergang erzeugte und ursprüngliche Photon besitzen außerdem die gleiche Phase, Polarisation und Frequenz.
In einem Laser macht man sich dieses Prinzip der Verstärkung von Strahlung durch stimulierte Emission zu nutzen. Dazu benötigt man ein Lasermedium, welches durch Energiezufuhr (Pumpen) in einen angeregten Zustand versetzt wird. Als Lasermedium können sowohl feste (Rubinkristall), flüssige (Farbstofflösungen) oder gasförmige Stoffe verwendet werden. Wir verwenden im Versuch einen He-Ne-Laser. Dieser besitzt also die zwei Edelgase Helium und Neon als Lasermedium.

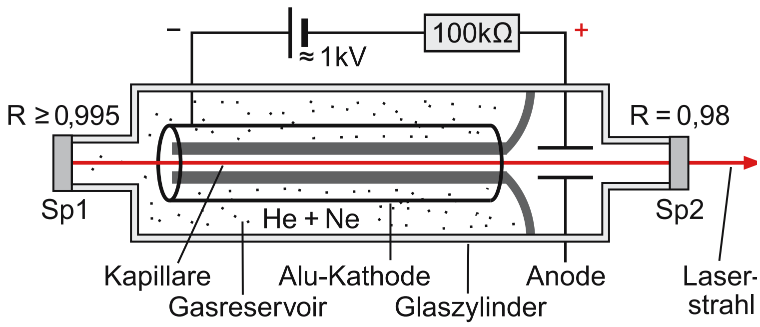

Abbildung 1: Aufbau eines Helium-Neon-Lasers

Das Lasermedium befindet sich nun in einer Glasröhre, welche an beiden Enden mit Brewsterfenster versehen ist. Die Brewsterfenster dienen zur Polarisation des transmittierten Lichts. Sie lassen nur parallel zur Eintrittsebene polarisiertes Licht hindurch. Die Glasröhre befindet sich zwischen zwei Spiegeln (Sp1 und Sp2). Diese Anordnung entspricht einem optischen Resonator.

Die Resonatorspiegel dienen der Verstärkung von Licht in axialer Richtung. In der Anordnung (Abbildung 1) ist der Spiegel Sp2 halbdurchlässig. Hier tritt der monochromatische Lichtstrahl aus.

Ist das Lasermedium im thermodynamischen Gleichgewicht, so überwiegt die induzierte Absorption. Ein Atom/Elektron kann in einem Strahlungsfeld in einen höheren Zustand gebracht werden, sobald ein Photon mit der Energie, welche der Differenz der Zustände entspricht, absorbiert wird. Dabei wird das Photon vernichtet und das Strahlungsfeld somit abgeschwächt.
Nun möchte man jedoch bei einem Laser das Strahlungsfeld verstärken. Dazu benötigt man mehr Teilchen im angeregten Zustand E2, als in E1. Dies wird **Besetzungsinversion** genannt. Man benötigt eine externen Energiezufuhr. Diese wird **optisches Pumpen** genannt.
Bei unserem Laser wird dies durch eine Gasentladung zwischen zwei Elektroden bewerkstelligt. Durch die Gasentladung werden die Heliumatome (Helium=Pumpgas) in einen angeregten Zustand gebracht. Die angeregten Heliumatome übertragen nun durch elastische Stöße Energie auf die Neonatome (Neon=Lasergas) und erzeugen dort die Besetzungsinversion.

Eine solche Besetzungsinversion ist jedoch nicht erreichbar, wenn zum Pumpen die gleichen zwei Energieniveaus benutzt werden, welche auch als Laserübergang verwendet werden. Man erreicht somit in einem Zwei-Niveau-System durch optisches Pumpen maximal eine Gleichbesetzung der Energieniveaus.
Erweitert man des zu einen Drei-Niveau-System, so kann nun bei genügend langer Lebensdauer im Niveau 2, durch schnelle Anregung von Niveau 1 nach 3 eine Überbesetzung im Niveau 2 erzeugt werden. Dabei werden die Atome vom Energieniveau 1 über 3 in Niveau 2 gepumpt.
Des weiteren kann auch ein Vier-Niveau-System zum Einsatz kommen. Hier ist die Anforderung an die Pumpquelle geringer, da das untere Laser-Niveau nun soweit oberhalb des Grundzustandes liegt, dass die thermische Besetzung dieses Niveaus vernachlässigbar gleich wird. Schematische kann man sich dies so vorstellen:

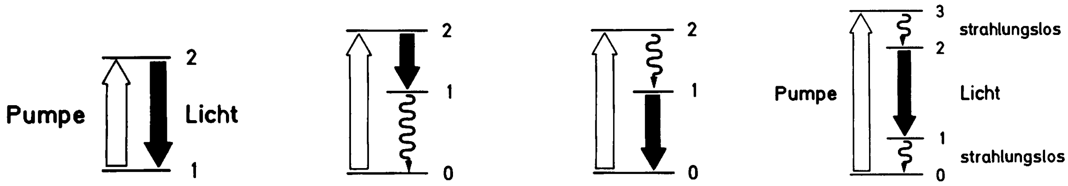

Abbildung 2: Zwei-Niveau (links), Drei-Niveau (Mitte), Vier-Niveau (rechts)

Ist durch diesen Vorgang eine beträchtliche Anzahl an Atomen in den Angeregten Zustand übergegangen, so können zunächst Photonen durch spontane Emission ausgesandt werden. Trifft ein solches Photon auf ein angeregtes Atom, so kann es dieses zur induzierten Emission veranlassen. Die beiden Photonen setzten diesen Vorgang fort. Es kommt zur Photolawine. Die Atome gehen dabei zurück in den Grundzustand. Durch das Pumpen bildet sich nun ein Gleichgewicht.

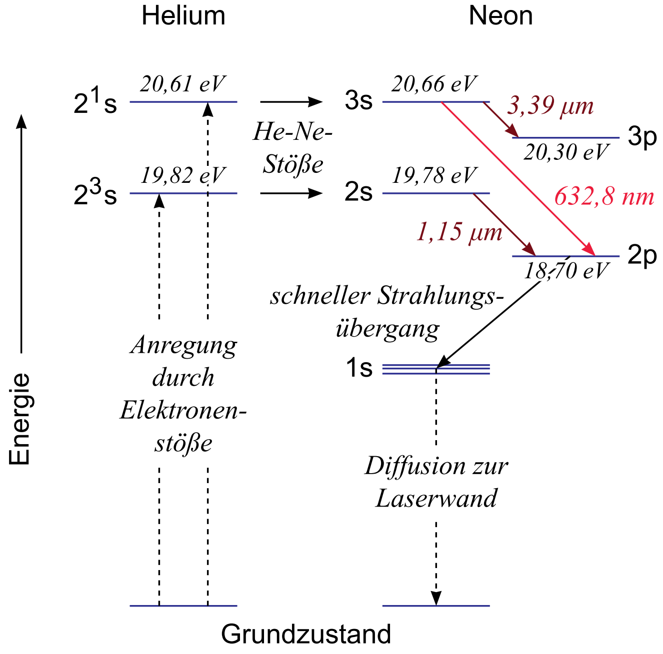

Abbildung 3: Niveauschema eines Helium-Neon-Lasers

Im Energieschema erkennt man drei Wellenlängen, welche der He-Ne-Laser emittiert. Im sichtbaren Bereich liegt nur $\lambda_1 = 632,8nm$ (rot). Die beiden anderen Wellenlängen von $\lambda_2 = 1150nm$ und $\lambda_3 = 3390nm$ liegen im infraroten Bereich.

1 Brewsterwinkel

Trifft Licht auf eine Grenzfläche, so regt es die Elektronen an der Oberfläche des Materials zum Schwingen an (Verschiebungspolarisation). Dadurch entsteht eine Ansammlung von atomaren Dipolen, welche in Polarisationsrichtung schwingen und so Sekundärwellen ausstrahlen. Da die Dipole nun nicht entlang ihrer Schwingungsachse abstrahlen können, ist es möglich ab einem bestimmten Winkel (Brewsterwinkel) vollständige Transmission des parallel polarisierten Lichts zu erreichen. So dass ausschließlich senkrecht polarisiertes Licht reflektiert wird. Das besondere am Brewster Winkel ist, dass der gebrochene (transmittierte) Strahl senkrecht auf dem reflektierten steht.

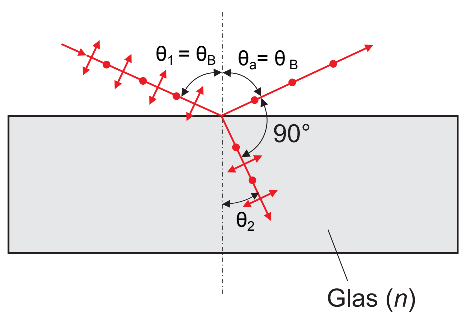

Abbildung 4: Brewster Winkel

Der Brewsterwinkel lässt sich leicht aus dem Snellius-Gesetz ableiten. Nach Snellius (einfache Geometrieüberlegung in Abbildung 4) gilt:

$$n_1 \cdot \sin(\theta_1) = n_2 \cdot \sin(\theta_2) \tag{1}$$

Mit der Bedingung für den für den Brewsterwinkel:

$$\theta_B + \theta_2 = 90° \tag{2}$$

folgt:

$$\theta_B = \arctan(\frac{n_2}{n_1}) \tag{3}$$

1.1 Bedeutung des Brewsterwinkels

Bei einem Brewsterfenster stehen die Fensterflächen genau im Brewsterwinkel zur optischen Achse. So wird in der Einfallsebene parallel polarisiertes Licht vollständig durchgelassen, senkrecht polarisiertes hingegen zum Großteil reflektiert. Für die parallele Komponente gilt $R_p = 0$ und $T_p = 1$.

Es wird bei einem Experimentier-Gaslaser mit externen Spiegeln ein drehbarer Plattenhalter mit planparalleler Glasscheibe zwischen Entladungsrohr und Resonatorspiegel gebracht. Durch drehen der Glasscheibe verändert sich die Intensität des Lasers. Der Grund dafür liegt in der Abstrahlcharakteristik eines Dipols, die weiter oben schon diskutiert wurde. Das Maximum der Intensität erreichen wir, wenn der Einfallswinkel gerade dem Brewsterwinkel entspricht.

1.2 Bestimmung von Brewsterwinkel und Brechungsindex

Nun haben wir in etwa den Winkel gefunden, für den wir ein Maximum der Intensität feststellen können. Der Plattenhalter soll nun außerhalb des Lasers montiert werden und so gedreht, dass die Reflexion minimal / Transmission maximal wird. Der Brewsterwinkel soll nun genau bestimmt werden. Dazu stehen uns zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Zum einen können wir an der Zimmerdecke die Reflexion beobachten. Der Brewsterwinkel liegt hierbei bei einem Minimum an Intensität. Des Weiteren können wir die Intensität des transmittierten Lichts mittels einer Si-Photodiode messen. Letztere Messung dürfte jedoch, wie auch schon in der Aufgabenstellung erwähnt, schlechter ausfallen. Ein Grund hierfür könnte sein, dass wir bei hoher Intensität in den gesättigten Bereich der Photodiode gelangen oder das Maximum so breit (verschwommen) ist, das wir es nicht genau lokalisieren können. Die Messung mit dem menschlichen Auge wird die bessere Wahl sein, da wir auch noch sehr wenige Photonen wahrnehmen können und unser Auge bei geringer Intensität sehr empfindlicher ist.
Anschließend können wir mit dem bestimmten Brewster Winkel θ_B den Brechungsindex des Gases bestimmt. Unter der Annahme, dass der Brechungsindex von Luft $n_L = 1$ ist, ergibt sich:

$$n_G = \tan\theta_B \tag{4}$$

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

Im zweiten Aufgabenteil geht es darum Beugungsphänome an verschiedenen Gegenständen / Formen zu beobachten. Zur Beugung kommt es durch Entstehung neuer Wellen entlang einer Wellenfront gemäß dem huygens-fresnelschen Prinzip. Diese Wellen breiten sich hinter der Öffnung in alle Richtungen (jedoch mit unterschiedlicher Intensität) aus. Dabei kann es durch Überlagerung der Wellen zu Interferenzerscheinungen auf einem entfernten Schirm kommen. Man beobachtet Maxima und Minima der Intensität. Aus den Abständen zwischen den Maxima/Minima lässt sich auf die Geometrie des Gegenstands/Spalts schließen.

2.1 Breite eines Einfachspalts

Betrachten wir zunächst einen Einfachspalt. Dieser lässt sich schematisch folgendermaßen darstellen.

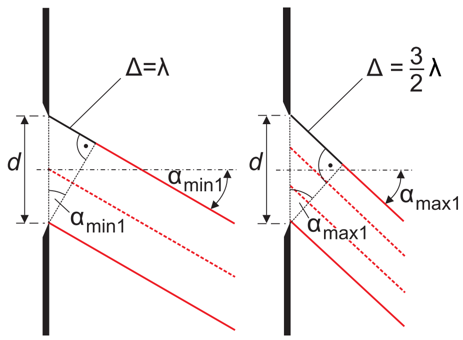

Abbildung 5: Bündelaufteilung am Einfachspalt

Aus der Skizze lesen wir folgenden Zusammenhang zwischen Gangunterschied Δs und Winkel α ab. Der Winkel α entspricht dem Winkel zwischen ursprünglicher Ausbreitung und Beobachtungspunkt auf dem Schirm.

$$\Delta s = d \cdot \sin \alpha \tag{5}$$

Beträgt nun der Gangunterschied zwischen zwei Strahlen genau $\Delta s = n\lambda$ so heben sich die Lichtbündel (vgl. links) genau auf. Man erhält Intensitätsminima auf dem Schirm. Beträgt der Gangunterschied $\Delta s = \frac{2n+1}{2}\lambda$ so löschen sich wieder zwei aus; jedoch bleibt ein Strahl übrig und es entstehen Intensitätsmaxima auf dem Schirm. Es ergibt sich folgende Intensitätsverteilung:

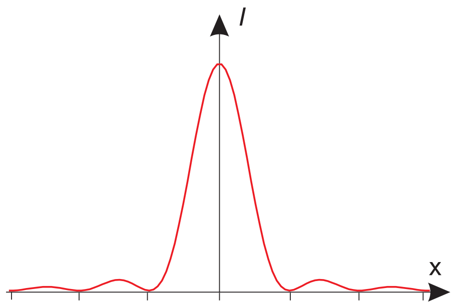

Abbildung 6: Intensitätsverteilung am Einfachspalt

Das mittlere Maximum heißt Hauptmaximum, die anderen Maxima werden Nebenmaxima genannt. Die Stellen an denen die Intensität auf Null geht sind die Nebenminima.

Befindet sich nun einer Schirm im Abstand l vom Spalt entfernt, so beträgt der Abstand des n-ten Nebenmaximums zum Hauptmaximum:

$$x_n = l \cdot \tan(\alpha_n) \tag{6}$$

Mit der Kleinwinkelnäherung erhält man durch Gleichsetzten von $\tan(\alpha_n) \approx \sin(\alpha_n)$:

$$\frac{x_n}{l} = \frac{\Delta s_n}{d} \quad \Rightarrow \quad d = \frac{\Delta s_n \cdot l}{x_n} \tag{7}$$

Durch die Vermessung der Lage der Minima und Maxima lässt sich so auf die Breite des Spaltes schließen. Dieser ist mit $d \approx (0,2..0,3)mm$ gegeben.

2.2 Vergleich mit einem Steg gleicher Breite

Nun soll die soeben beobachtete Beugungsfigur mit einem gleich breiten Steg verglichen werden. Das Babinet-Theorem lässt uns vorab schon auf eine identische Intensitätsverteilung schließen. Erklären lässt sich dieser Sachverhalt mit dem Huygensschen Prinzip. Bei komplementären Objekten befinden sich die Kanten, an welchen die Elementarwellen entstehen an den gleichen Stellen. Dies bedeutet ferner, dass wir auch das gleiche Beugungsbild erhalten. Somit erzeugen also zueinander komplementäre Blenden die selbe Interferenzverteilung.

2.3 Vergleich von Kreisöffnung und -scheibe sowie Kante

Nun sollen die Beugungsbilder einer Kreisöffnung, Kreisscheibe sowie einer Kante verglichen werden. Es ist zu erwarten, dass die komplementären Objekte (Kreisscheibe und -öffnung) die identischen Beugungsbilder produzieren (Babinet-Theorem). Zu erwarten ist dabei folgende Interferenzfigur:

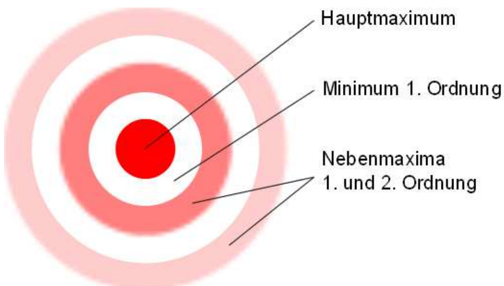

Abbildung 7: Intensitätsverteilung einer Kreisöffnung bzw Kreisscheibe

In der Mitte befindet sich das Hauptmaximum. Kreisförmig um dieses liegen nun abwechselnd die Minima und Maxima. Die Minima verlieren nach außen an Intensität. Bei der Scheibenblende erwarten wir, wie schon erwähnt, das gleiche Bild. Grund ist einerseits das Babinet-Theorem, andererseits kann man sich veranschaulichen, dass gerade die Strahlen am Rand der

Kreisblende, den gleichen Gangunterschied im Zentrum auf dem Schirm hervorrufen. Dies wird Poissonscher Fleck genannt.

Nun soll das Beugungsbild einer Kante beobachtet werden.

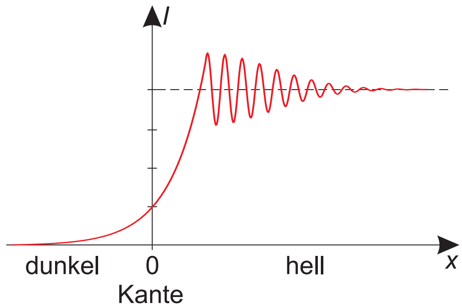

Abbildung 8: Intensitätsverteilung einer Kante

Wird der Abstand zwischen Kante und Schirm vergrößert, so lässt sich kein scharfer Übergang mehr auf dem Schirm beobachten. Stattdessen wird eine Reihe von hellen Streifen zu erkennen sein. Die Intensitätsverteilung auf dem Schirm wird durch Abbildung 8 gut beschrieben.

2.4 Bestimmung der Breite eines Haares

Das Beugungsbild eines Haares entspricht gerade dem eines Spalts mit gleicher Spaltdicke, wie das Haar breit ist. Aus dem Beugungsbild, welches durch einbringen in den Strahlengang entsteht, kann nach Formel 7 die Dicke d, des Haares bestimmt werden.
Zu Vergleichen ist dieser Wert durch Messung mit einer Mikrometerschraube. Zu beachten ist hier, dass man im etwa gleichen Bereich des Haares misst und die Mikrometerschraube nicht zu fest zudreht.

3 Beugung an Mehrfachspalten und Gittern

Im folgenden werden wir mit einen Doppelspalt, Dreifachspalt sowie mit Gittern experimentieren.

3.1 Beugungsmuster eines Doppelspalts

Aus dem Beugungsmuster eines Doppelspalts soll die Spaltbreite und der Spaltabstand bestimmt werden.

Wie auch schon beim Einzelspalt lässt sich hier eine Beziehung zwischen den Abständen im Beugungsbild auf dem Schirm, dessen Abstand von den Spalten und der Spaltbreite herleiten. Betrachten wir das folgende Schema eines Doppelspalts:

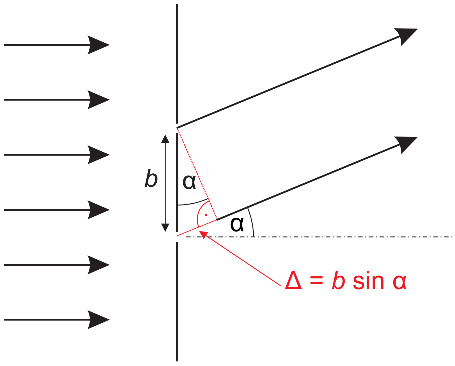

Abbildung 9: Schema eines Doppelspalts

Der Gangunterschied zwischen den zwei Strahlen beträgt nun:

$$\Delta s = b \cdot \sin(a) \tag{8}$$

Die Bedingung für konstruktive Interferenz der Strahlen ist nun: $\Delta s = n \cdot \lambda$. Die Minima ergeben sich bei destruktiver Interferenz bei der Bedingung: $\Delta s = \frac{2n+1}{2}\lambda$. Hier ist Vorsicht geboten. Da wir nun den Strahlen nicht mehr, wie beim Einzelspalt, in Teilbündel zerlegen, drehen sich die Bedienungen für Minima und Maxima gerade um.
Analog zu Formel 7 lässt sich wieder eine Beziehung zwischen dem Spaltabstand und den Bergungsminima und -maxima aufstellen.

$$\textit{Minimum:} \quad b_{min} = \frac{n + \frac{1}{2}}{x_n} \cdot \lambda l \qquad \textit{Maximum:} \quad b_{max} = \frac{n}{x_n} \cdot \lambda l \tag{9}$$

Für den Doppelspalt erhalten wir ein leicht anderes Interferenz Bild als beim Einzelspalt. Zu erkennen ist eine einhüllende Intensitätsverteilung die einem Einzelspalt entspricht. Darunter/Darin befindet sich nun die Interferenzfigur des Doppelspalts. In der Mitte erhalten wir wieder ein Maximum mit dem Gangunterschied $\Delta s = 0$.

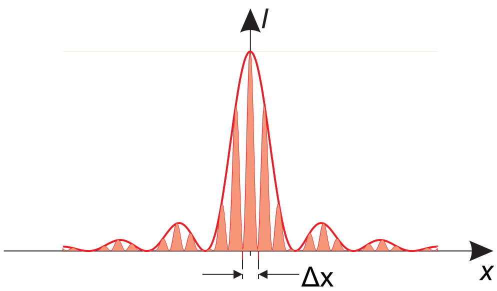

Abbildung 10: Intensitätsverteilung eines Doppelspalts

Durch Vermessung der Minima und Maxima lässt sich nun wie beim Einzelspalt auf die Spaltbrite und den Spaltabstand schließen.

3.2 Vergleich von Doppelspalt und Dreifachspalt

Es soll nun ein anderer Doppelspalt verwendet werden. Dieser hat vermutlich eine andere Spaltbreite und/oder einen andere Spaltabstand. Durch Formel 9 lässt sich nun vorhersagen, wie sich die Minima/Maxima bei anderer Spaltgeometrie verteilen.

Bei kleinerer / größerer Spaltbreite d wandern die Maxima der Einhüllenden nach außen / innen. Bei kleinerem / größerem Spaltabstand b wird die innere Kurve des Doppelspalts gestreckt / gestaucht.

Zuletzt soll noch der Doppelspalt mit einen Dreifachspalt, gleicher Maße für Spaltbreit und Spaltabstand, verglichen werden. Es wird sich die Einhüllende wohl kaum verändern, da diese durch die Spaltbreite (welche gleich bleibt) charakterisiert wird. Die innere Kurve wird mehr Maxima und Minima aufweisen. Grund dafür ist, dass nun nicht nur 2 Strahlen, sondern 3 miteinander interferieren und es so öfters zu konstruktiver und destruktiver Interferenz auf dem Schirm kommt.
Eine Folge bei höherer Spaltzahl ist außerdem, dass die schärfe der Hauptmaxima mit der Spaltanzahl steigt.

3.3 Gitterkonstante eines Strichgitters

Ein Gitter besteht aus N parallelen Spalten, welche den gleichen Abstand g zueinander haben. Diesen Abstand bezeichnet man üblicher Weise als Gitterkonstante. Wie schon erwähnt werden die Maxima schärfer, je mehr Spalte ein Gitter besitzt. Die Intensitätsverteilung bei einem Gitter sieht in etwa so aus:

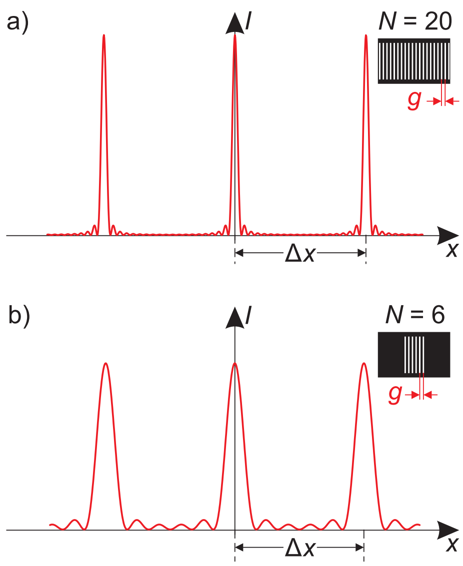

Abbildung 11: Intensitätsverteilung eines Gitters

Oben ist ein Gitter mit N=20 Spalten zu erkennen. Darunter ist die Verteilung für ein Gitter mit nur N=6 Spaten gezeigt. Man erkennt deutlich, dass je bei größerer Anzahl der Spalten, die Maxima schärfer werden.

Die Gitterkonstante lässt sich erneut durch vermessen der Lage der Maxima auf dem Schirm bestimmen. Aufgrund der Analogie zum Doppelspalt ergibt sich die Formel:

$$g = \frac{nl}{x_n} \cdot \lambda l \tag{10}$$

Die Gitterkonstante entspricht also gerade dem Spaltabstand b bei einem Doppelspalt.

Es ist wichtig, dass wir das Gitter gut ausleuchten, da sonst nicht alle Spalten zum Interferenzbild beitragen. Dies wollen wir natürlich nicht, da es unser Ergebnis verfälschen würde.

3.4 Beugungsbilder von Kreuz- und Wabengittern

Nun sollen noch die Beugungsbilder von Kreuz- und Wabengittern beobachtet werden. Es ist zu erwarten, dass die Intensitätsverteilung auf dem Schirm nun nicht mehr nur auf einer Achse zu beobachten ist, sondern ein 2D Bild zu erkennen ist. Vermutlich erhalten wir ein Interferenzbild welches aus zwei Achsen besteht die zu einem Ursprung (hellem Maximum) symmetrisch sind. Da wir ein Gitter benutzten werden wir nur Punkte beobachten können.

4 Abbildung nicht selbstleuchtender Gegenstände

In diesem Aufgabenteil werden wir das Theorem von Abbe näher untersucht. Wir beleuchten ein Gitter mit parallelem Licht und bilden mit Hilfe einer Linse auf einer Mattscheibe ab. Seine Theorie zu Abbildung besagt, dass für die Bildentstehung die höheren Ordnungen notwendig sind. Mindestens jedoch die erste Ordnung. Die nullte Ordnung bringt keine Information über den Spaltabstand.

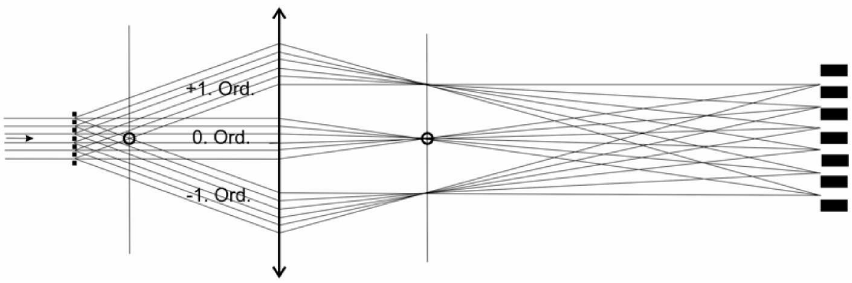

Abbildung 12: Auflösungsvermögen nach Abbe

Zwischen Bild und Linse befindet sich nun eine Beugungsordnungsblende, mit derer Hilfe wir jeweils die nullte, erste oder zweite Ordnung des gebeugten Lichts passieren lassen können. Da diese recht kompliziert zu justieren ist, kann man für die nullten Ordnung auch eine einfachen Kreisblende verwenden.

Es sollen nun verschiedenen Fälle untersucht werden.

- Fall 1) Nur die nullte Ordnung kann passieren
- Fall 2) Nur die erste Ordnung kann passieren

- Fall 3) Nur die zweite Ordnung kann passieren
- Fall 4) Nullte und erste Ordnung können passieren

Wird nur die nullte Ordnung durchgelassen, so ist zu erwarten, dass wir nur einen Fleck sehen können. Erst beim Durchlassen höherer Ordnungen wird das Bild mit Information versorgt.
Lässt man hingegen die nullte Ordnung weg; also blendet diese aus, so wird man ein Gitter beobachten, welches mehr Striche, als das abzubildende, hat. Wir haben nun ein sekundäres Bild erzeugt, dass zwar eine Gitterstruktur hat, jedoch nicht mehr identische mit dem Objekt ist. Diesen Effekt lässt sich verstärken, indem wir die nullte und erste Ordnung ausblenden und nur zweite (und eventuelle höhere) beobachten.

Außerdem soll an dieser Stelle noch geklärt werden, wie man den beobachteten Effekt benutzen kann, um bei einem digitalisierten Zeitungsbild ein störendes Raster entfernen kann. Um den Effekt der Verpixelung könnte man höhere Ordnungen ausblenden, dies bringt ein etwas verwascheneres Bild, welches etwas geglättet erscheint.

5 Holographie

Es soll ein Hologramm reproduziert werden. Dazu muss der Laserstrahl aufgeweitet werden. Bei einem Hologramm handelt es sich um eine Darstellungsform eines reellen Bildes mit mehr als nur der räumlichen Darstellung. Hier wird nicht wie bei einem Foto nur Farbe und Struktur zwei dimensional Abgebildet, sondern man speichert zusätzlich die Information der Phase.
Zur Aufnahme eines Hologramms benötigt man einen genügend starken Laser mit kohärentem Licht. Dieses wird zunächst aufgeweitet und durch einen Strahlteiler in zwei Teilbündel zerlegt. Der das erste Strahlenbündel ist direkt auf die Photoplatte gerichtet, das zweite wird am Objekt gestreut und trägt somit die Information der Phase, beim eintreffen auf der Photoplatte. Somit auch die dreidimensionale Struktur.

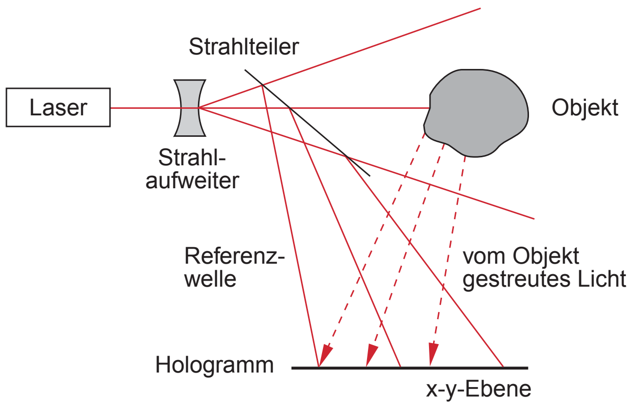

Abbildung 13: Optischer Aufbau zur Aufnahme eines Hologramms

Will man das Hologramm nun betrachten, muss man es mit kohärentem Licht der selben Wellenlänge bestrahlen, mit dem es aufgenommen wurde. Die einfallende Rekonstruktionswelle erzeugt ein virtuelles und reelles Bild. Letzteres kommt durch Beugung der Transmissionswelle zustande. Hinter dem Hologramm könnte man das Bild also auf einem Schirm abbilden; jedoch nur in 2D. Das virtuelle Bild ist vor dem Medium zu beobachten. Es erscheint jedoch, schaut man von dort auf die Hologrammebene hinter diesem.

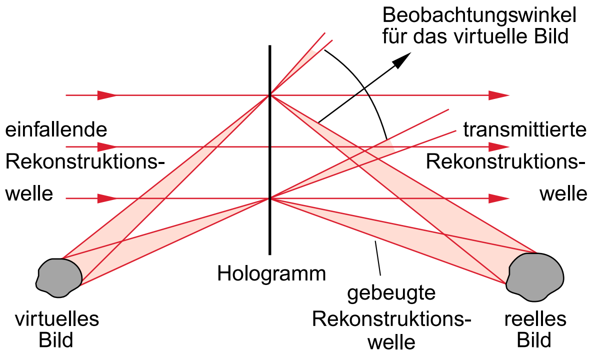

Abbildung 14: Rekonstruktion des Hologramms

Von der Dreidimensionalität kann man sich nun durch leichte Blickwinkeländerung (Position) vergewissern. Dies soll auch im Praktikum gemacht werden.
Schließlich ist noch zu zeigen, dass die Information des Hologramms nicht an einer bestimmten Stelle, sondern an jeder, gespeichert ist. Dazu sollen verschiedene Bereiche nicht beleuchtet werden.

6 Quellen

- Vorbereitungsmappe zum Laser A Versuch
- Abbildung 1 - Demtröder 3, Seite 258
- Abbildung 2 - Hacken Wolf - Atom und Quantenphysik
- Abbildung 3 - https://lp.uni-goettingen.de/get/text/1804 - 17.05.2012, 11:32Uhr
- Abbildungen 4-11, 13-14 - Das Neue Physikalische; Eichler, Kornfeld, Sahm
- Abbildung 12- https://www.uni-graz.at/exp8www/Praktikum/p3-10-abbe.pdf - 18.05.2012, 23.10Uhr

Karlsruher Institut für Technologie (KIT) SS 2012

Physikalisches Anfängerpraktikum - P2

Laser A
P2-16

Auswertung von
Tobias Renz und **Raphael Schmager**

Gruppe: **Do-28**

Durchgeführt am 29. Mai 2012

1 Brewsterwinkel

1.1 Brewster-Fenster

In dieser Aufgabe haben den Brewesterwinkel eines Experimentier-Gaslaser untersucht. Dieser Gaslaser dient zu Demonstrationszwecken und deshalb liegen die Resonatorspiegel außerhalb der Gasküvette. Zwischen Entladungsrohr und Spiegel wird nun eine planparallele Glasscheibe als Brewsterfenster eingebracht. Die Glasscheibe war drehbar und der Drehwinkel gut ablesbar.

Zuerst haben wir den transmittierten Strahl, also den Laserstrahl beobachtet. Dazu wurde der Drehwinkel variiert und die Intensität beobachtet. Der Winkel wurde nun so eingestellt, dass der Laserstrahl maximale Intensität hatte. Dies war bei einem Winkel $\alpha = 55°$ der Fall.

1.2 Brechungsindex

Um den Brechungsindex der Brewster-Fenster bestimmen zu können, müssen wir zuerst den Brewsterwinkel noch genauer bestimmen. Dazu wird der Plattenhalter mit der planparallelen Glasscheibe nun außerhalb des Lasers montiert. Dies ermöglicht uns die Untersuchung des transmitterten sowie des reflektierten Strahls, da die Abschwächung durch einen vom Brewsterwinkel abweichenden Winkel innerhalb des Lasers entfällt.

Beim transmittierten Strahls sollten wir mit Hilfe eines Si-Photoelements das Maximum in Abhängigkeit des Winkels messen. Dieser Winkel entspricht dann gerade dem Brewsterwinkel. Da die mit dem Photoelement gemessene Spannung (proportional zur Intensität) auch ohne Veränderung des Winkels stark variierte, konnten wir diese Messung nicht durchführen.

Bei der zweiten Methode beobachteten wir den reflektierten Strahl in Abhängigkeit vom Winkel. Wobei wir hier den Winkel suchten, bei dem die Intensität null wurde. Dies ist genau der Brewsterwinkel. Der reflektierte Strahl wurde mit dem Auge beobachtet und der Winkel zweimal gemessen. Und haben folgende zwei Winkel für den Brewsterwinkel gemessen:

$$\alpha_1 = 58,0° \tag{1}$$

$$\alpha_2 = 59,5° \tag{2}$$

Nehmen wir für den Brechungsindex von Luft $n_L = 1$ an, so ergibt sich laut Vorbereitung folgender Brechungsindex:

$$n = tan(\alpha) \tag{3}$$

Für unsere Messwerte ergeben sich dann folgende Werte:

$$n_1 = 1,6 \tag{4}$$

$$n_2 = 1,7 \tag{5}$$

Durch Bildung des Mittelwerts finden wir den Brechungsindex n = 1,65 ±0,5 . Dieser Wert liegt in dem erwarteten Bereich für den Brechungsindex von Glas.

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

In diesem Versuch haben wir nun die Beugung an Spalt, Steg, Kreisloch, Kreisblende und Kante untersucht. Wobei wir um die Spalt- bzw. Stegbreite immer den Abstand x_n der Nebenmaxima n zum Hauptmaxima gemessen haben. Der Abstand l vom Spalt zur Blende beträgt l = (192,5 ± 1)cm und die Wellenlänge des Lasers λ = 632,8 nm. Die Abweichung der Wellenlänge ist sehr gering und darf im folgenden für die Fehlerbetrachtung vernachlässigt werden. Für die Abstände x_n ergibt sich eine Abweichung, durch das Abzeichnen der Maxima auf das Millimeterpapier und durch das Abmessen der Abstände. Die gesamte Abweichung schätzen wir aud Δx_n = 1,5mm.

2.1 Einzelspalt

Zuerst haben wir einen Einzelspalt mit einer Spaltbreite von b ≈ 0,3mm untersucht. Die Spaltbreite soll im folgenden verifiziert werden. Beleuchten wir den Spalt mit dem Laser, so ergibt sich folgendes Beugungsmuster:

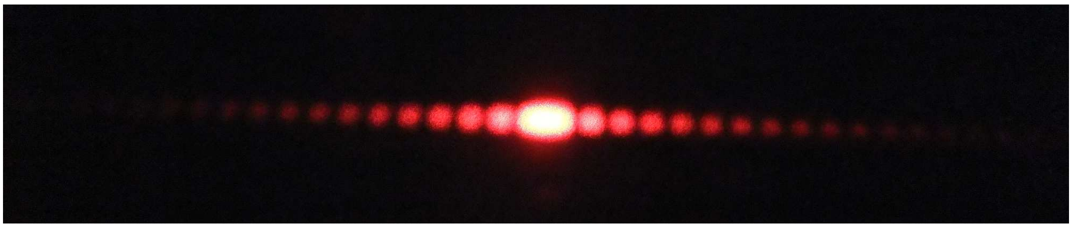

Abbildung 1: Einzelspalt d = 0,3mm

Nun haben wir die Abstände der n-ten Nebenmaxima zum Hauptmaxima gemessen. Diese Messung haben wir viermal durchgeführt um einen genaueren Messwert zu erhalten.

Ordnung n / 1	Messreihe 1 x_n / cm	Messreihe 2 x_n / cm	Messreihe 3 x_n / cm	Messreihe 4 x_n / cm	systematischer y-Fehler / cm
-4	-1,86	-1,75	-1,8	-1,8	0,15
-3	-1,45	-1,4	-1,4	-1,45	0,15
-2	-1,05	-1	-1,05	-1	0,15
-1	-0,55	-0,6	-0,6	-0,6	0,15
0	0	0	0	0	0,15
1	0,65	0,65	0,65	0,6	0,15
2	1,1	1,1	1,05	1	0,15
3	1,5	1,5	1,5	1,45	0,15
4	1,9	1,9	1,85	1,85	0,15

Tabelle 1: Einfachspalt - d=0,3mm

Wie in der Vorbereitung gezeigt wurde, gilt für die Breite d Spalts in Abhängigkeit von den

Abständen x_n:

$$d = \frac{(n + \frac{1}{2}) \cdot \lambda \cdot l}{x_n} \tag{6}$$

$$=> x_n = \frac{\lambda \cdot l}{d} \cdot n + \frac{\lambda \cdot l}{2d} = m \cdot n + \frac{\lambda \cdot l}{2d} \tag{7}$$

Wir tragen nun die Abstände x_n über die Ordnung n auf und bilde mit Hilfe des Programms Origin für jede der vier Messreihen eine lineare Regression. Aus der Steigung m der Geraden können wir dann den Abstand d berechnen.

$$d = \frac{\lambda \cdot l}{m} \tag{8}$$

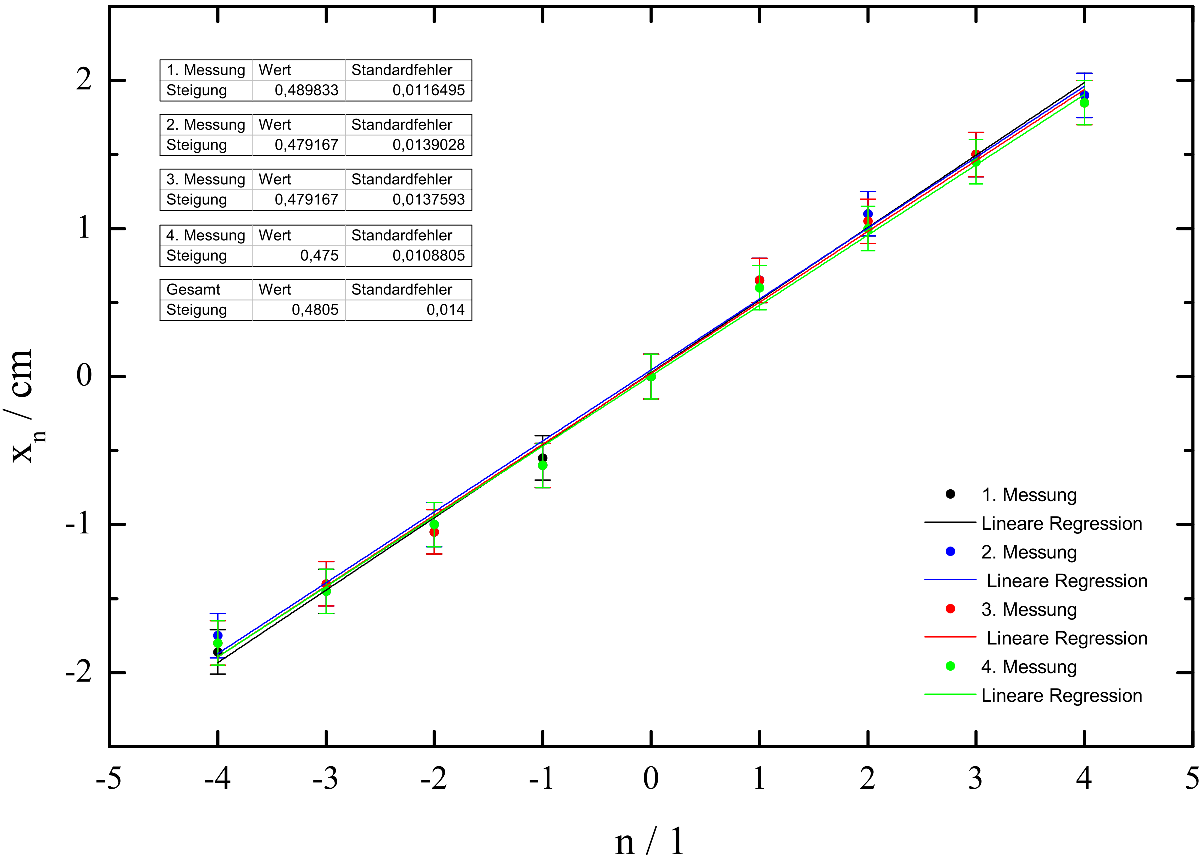

Abbildung 2: Einzelspalt d = 0,3mm

Bilden wir den Mittelwert für die Steigung aus den vier Messreihen erhalten wir:

$$m = (4,8 \pm 0,14 \pm 1,5)mm \tag{9}$$

Daraus können wir nun den Spaltabstand d berechnen (8) und erhalten:

$$d = \frac{632,8nm \cdot 192,5cm}{4,8mm} = 0,25mm \tag{10}$$

Nun müssen wir noch den statistischen und den systematischen Fehler für d berechnen. Für die Fehlerfortpflanzung betrachten wir die Gauß'sche Fehlerfortpflanzung, da unsere Messwerte nicht korrelieren.

systematischer Fehler:

$$\begin{aligned} \Delta d &= \sqrt{\left(\frac{\partial d}{\partial l}\ \Delta l\right)^2 + \left(\frac{\partial d}{\partial m}\ \Delta m\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{\lambda}{m}\ \Delta l\right)^2 + \left(\frac{\lambda \cdot l}{m^2}\ \Delta m\right)^2} \\ &= 0,08mm \end{aligned} \tag{11}$$

statistischer Fehler

Da nur die Steigung m einen statistischen Fehler besitzt, ergibt sich der statistische Fehler zu:

$$\begin{aligned} \sigma_d &= \sqrt{\left(\frac{\partial d}{\partial m}\ \sigma_m\right)^2} \\ &= \frac{\lambda \cdot l}{m^2} \cdot \sigma_m \\ &= 0,007mm \end{aligned} \tag{12}$$

Somit erhalten wir für unseren Abstand d folgenden Wert:

$$d = (0,25 \pm 0,007 \pm 0,08)mm \tag{13}$$

Vergleichen wir unseren Wert mit dem angegebenen Wert von 0,3mm sieht man, dass dieser Wert in dem Bereich unseres Messwertes mit Fehler liegt. Wir können damit nachweisen, dass die Spaltbreite ungefähr stimmt. Um den Wert genauer bestimmen zu können, müssen wir den systematischen Fehler verkleinern und dabei vor allem die Ablesegenauigkeit der Maxima verbessern.

2.2 Steg

Nun untersuchen wir das Beugungsmuster eines Stegs, der auch die eine Breite d von 0,3mm hat. Das Beugungsmuster sollte laut dem Babinet-Theorem sollte dieses Beugungsmuster identisch sein mit dem des Einzelspalts aus Aufgabe 2.1.

Bei Beleuchtung des Stegs ergab sich folgendes Muster:

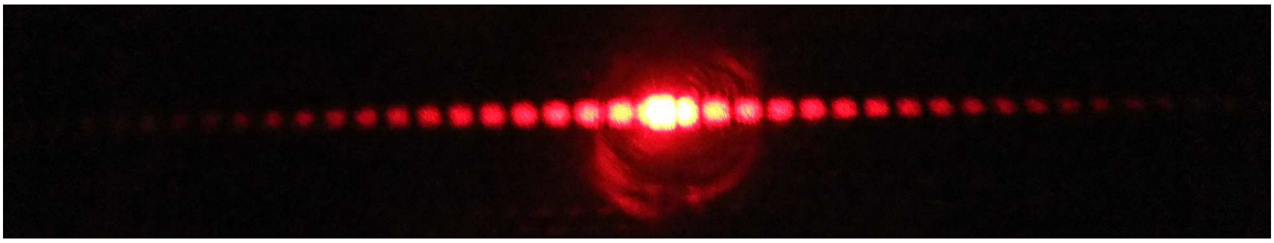

Abbildung 3: Steg d = 0,3mm

Vergleicht man dieses Muster mit dem des Einzelspalts (Abbildung 1) so sehen diese recht identisch aus. der einzige markante Unterschied erkennt man am Hauptmaxima. Beim Einzelspalt ist dieses gleichmäßig hell, wobei hingegen beim Steg im Hauptmaxima eine Art Minima zu erkennen ist. Wodurch diese Veränderung zustande kommt, ist uns nicht ersichtlich.

Nun wollen wir noch aus den Abständen x_n der Nebenmaxima zum Hauptmaxima die breite des Stegs analog zu Aufgabe 2.1 bestimmen.
Wie in Aufgabe 2.1 haben wir dafür die Abstände viermal gemessen.

Ordnung n / 1	Messreihe 1 x_n / cm	Messreihe 2 x_n / cm	Messreihe 3 x_n / cm	Messreihe 4 x_n / cm	systematischer y-Fehler / cm
-4	-1,75	-1,8	-1,7	-1,8	0,15
-3	-1,4	-1,4	-1,35	-1,45	0,15
-2	-0,95	-1	-0,95	-1	0,15
-1	-0,55	-0,55	-0,5	-0,6	0,15
0	0	0	0	0	0,15
1	0,6	0,65	0,6	0,6	0,15
2	1,05	1	1,05	1	0,15
3	1,45	1,45	1,45	1,5	0,15
4	1,85	1,9	1,9	1,85	0,15

Tabelle 2: Steg - d=0,3mm

Wir tragen nun wieder für die vier Messreihen die Abstände x_n über der Ordnung auf und bilden die Regressionsgeraden.

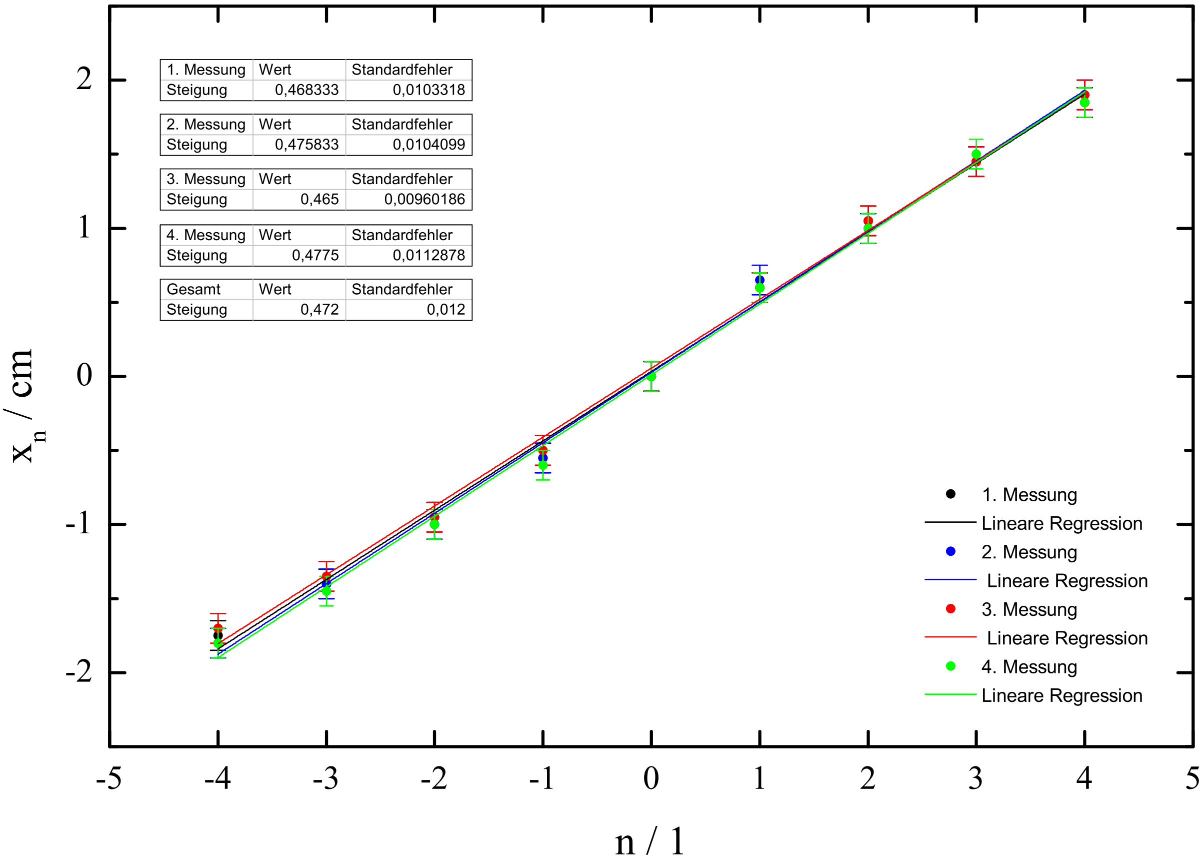

Abbildung 4: Steg d = 0,3mm

Für den Mittelwert m der Steigung erhalten wir nun:

$$m = (4,72 \pm 0,12 \pm 1,5)mm \tag{14}$$

Daraus können wir die Stegbreite d berechnen (8) und erhalten:

$$d = 0,26mm \tag{15}$$

Nun müssen wir noch die Fehler berechnen:

systematischer Fehler:

$$\begin{aligned}\Delta d &= \sqrt{\left(\frac{\partial d}{\partial l}\,\Delta l\right)^2 + \left(\frac{\partial d}{\partial m}\,\Delta m\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{\lambda}{m}\,\Delta l\right)^2 + \left(\frac{\lambda \cdot l}{m^2}\,\Delta m\right)^2} \\ &= 0,08mm\end{aligned} \tag{16}$$

statistischer Fehler

Da nur die Steigung m einen statistischen Fehler besitzt, ergibt sich der statistische Fehler zu:

$$\begin{aligned}\sigma_d &= \sqrt{\left(\frac{\partial d}{\partial m}\,\sigma_m\right)^2} \\ &= \frac{\lambda \cdot l}{m^2} \cdot \sigma_m \\ &= 0,007mm\end{aligned} \tag{17}$$

Somit erhalten wir für unseren Abstand d folgenden Wert:

$$d = (0,26 \pm 0,007 \pm 0,08)mm \tag{18}$$

Man sieht somit, dass die Stegbreite fast genau mit der Spaltbreite aus Aufgabe 2.1 übereinstimmt. Da wir die Stegbreite so bestimmt haben, indem wir den Steg als Spalt betrachten, ist damit gezeigt, dass das Beugungsmuster eines Stegs identisch zu einem gleich breiten Spalt. Der Wert stimmt auch einigermaßen gut mit dem angegebenen Wert überein.

2.3 Kreisscheibe und Kreisöffnung

Wir sollen nun das Beugungsbild einer Kreisöffnung und einer Kreisscheibe beobachten und vergleichen. Da die Kreisscheibe gerade das komplementäre der Kreisöffnung ist, erwarten wir identische Beugungsmuster. Dies besagt gerade das Babinet-Theorem.
Es war schwer die Beugungmuster der Kreisscheibe und Kreisöffnung deutlich sichtbar zu machen. Eigentlich wollten wir eine Kreisscheibe und eine Kreisöffnung mit dem selbem Durchmesser benutzen, dies war aber leider nicht möglich. Wir haben eine Kreisscheibe mit Durchmesser d = 1,5mm und eine Kreisöffnung mit d = 1mm verwendet.

Es ergaben sich folgende Beugungsmuster:

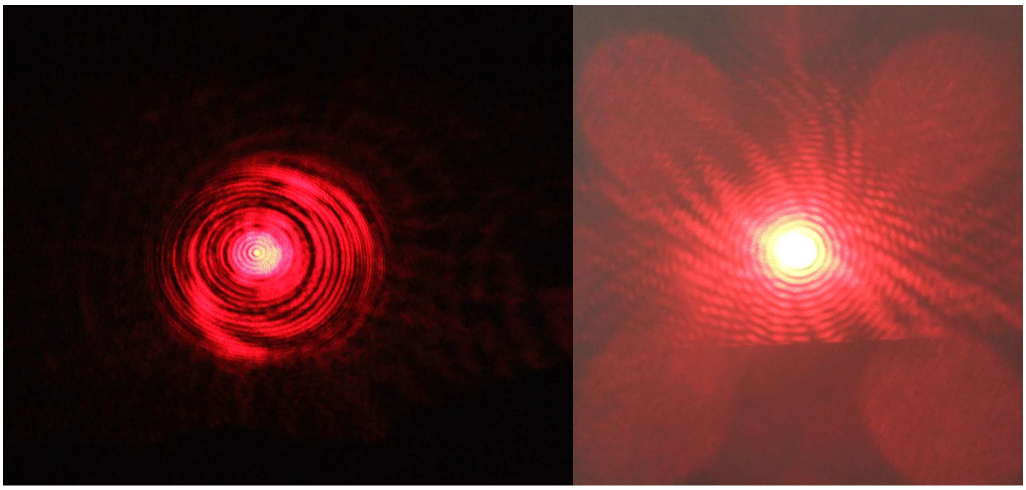

Abbildung 5: Kreisscheibe d = 1,5mm und Kreisöffnung d = 1mm

Bei beiden Bildern sieht man die erwarteten Beugungsringe. Die beiden Beugungsmuster sehen qualitativ auch gleich aus, eine genaue Aussage lässt sich aber aus diesen Bildern nicht machen.

2.4 Haardurchmesser

Nun sollte noch der Durchmesser eines Haares aus dessen Beugungsfigur bestimmt werden. Ein Haar mit Durchmesser d entspricht einem Steg mit Breite d. Da wir in Aufgabe 2.1 gezeigt haben, dass das Beugungsmuster eines Stegs identisch ist mit dem Beugungsmuster eines Spalts mit Breite d, können wir das Beugungsmuster des Haares als das eines Einzelspalts auffassen und erhalten somit den Durchmesser d.

Das Beugungsmuster des Haares sah folgendermaßen aus:

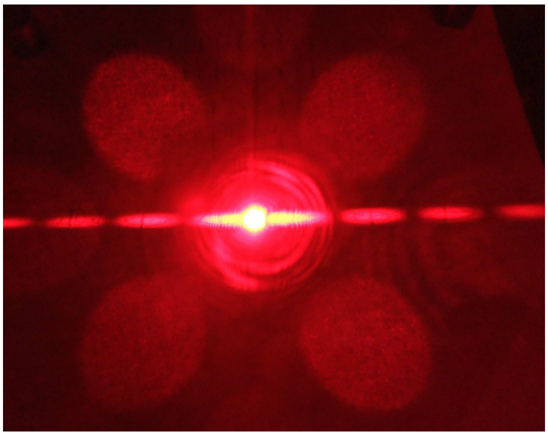

Abbildung 6: Beugungsmuster: Haar

Wie bei den vorherigen Aufgaben haben wir die Abstände x_n der Nebenmaxima zum Hauptmaxima viermal gemessen:

Ordnung n / 1	Messreihe 1 x_n / cm	Messreihe 2 x_n / cm	Messreihe 3 x_n / cm	Messreihe 4 x_n / cm	systematischer y-Fehler / cm
-3	-4,05	-4,1	-4,1	-4,2	0,15
-2	-2,55	-2,5	-2,45	-2,45	0,15
-1	-0,8	-0,7	-0,7	-0,85	0,15
0	0	0	0	0	0,15
1	0,75	0,7	0,9	0,9	0,15
2	2,5	2,45	2,5	2,45	0,15
3	4,2	4,2	4,15	4,1	0,15

Tabelle 3: Bestimmung der Dicke eines Haares

Aus den Steigungen der Regressionsgeraden können wir wieder den Durchmesser d bestimmen.

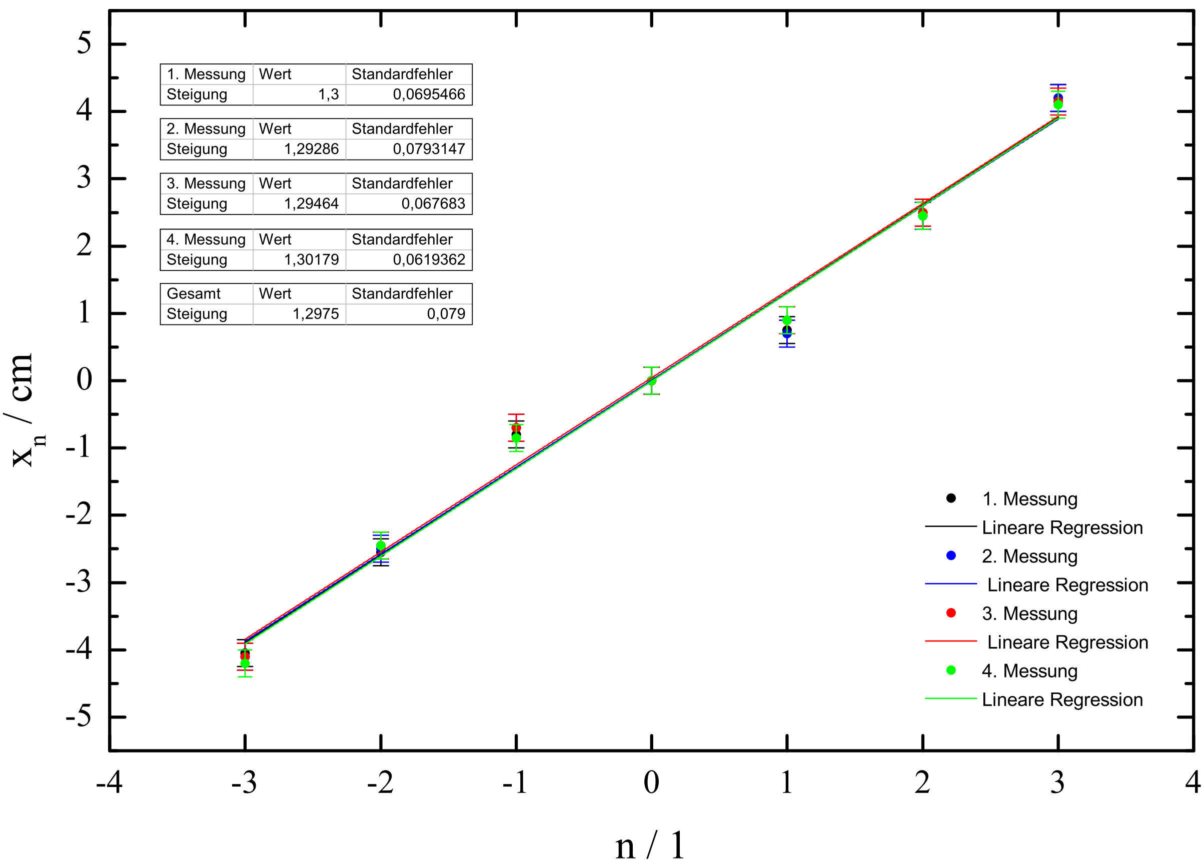

Abbildung 7: Beugungsmuster: Haar

Für die Steigung m erhalten wir nun folgenden Wert:

$$m = (12,98 \pm 0,8 \pm 1,5)mm \tag{19}$$

Damit ergibt sich ein Durchmesser d von:

$$d = 93,8\mu m \tag{20}$$

Nun berechnen wir noch den Fehler:

systematischer Fehler:

$$\begin{aligned} \Delta d &= \sqrt{\left(\frac{\partial d}{\partial l}\ \Delta l\right)^2 + \left(\frac{\partial d}{\partial m}\ \Delta m\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{\lambda}{m}\ \Delta l\right)^2 + \left(\frac{\lambda \cdot l}{m^2}\ \Delta m\right)^2} \\ &= 10\mu m \end{aligned} \tag{21}$$

statistischer Fehler

$$\sigma_d = \sqrt{\left(\frac{\partial d}{\partial m}\,\sigma_m\right)^2} = \frac{\lambda \cdot l}{m^2} \cdot \sigma_m = 5mm \tag{22}$$

Somit erhalten wir für den Durchmesser d des Haares folgenden Wert:

$$d = (93 \pm 5 \pm 10)mm \tag{23}$$

Den Haardurchmesser haben wir noch mit Hilfe einer Mikrometerschraube gemessen. Die Messung ergab:

$$d = 77\mu m \tag{24}$$

Der Wert, der mit der Mikrometerschraube bestimmt wurde ist etwas kleiner, dies liegt vermutlich daran, dass beim messen mit der Mikrometerschauraube das Haar leicht gequetscht wurde.
Der Haardurchmesser liegt auf jeden Fall im erwarteten Bereich.

3 Beugung an Mehrfachspalten und Gittern

In dieser Aufgabe wurde nun das Beugungsbild eines Doppelspaltes, eines Drehfachspaltes sowie verschiedener Gitter untersucht.

3.1 Doppelspalt

Wir sollten die Spaltbreite d der einzelnen Spalte, sowie den Spaltabstand g der beiden Spalte berechnen. Der Spaltabstand g lässt sich aus den einzelnen Nebenmaxima und die Spaltbreite aus der Einhüllenden berechnen.
Folgendes Beugungsmuster erhalten wir für den Doppelspalt:

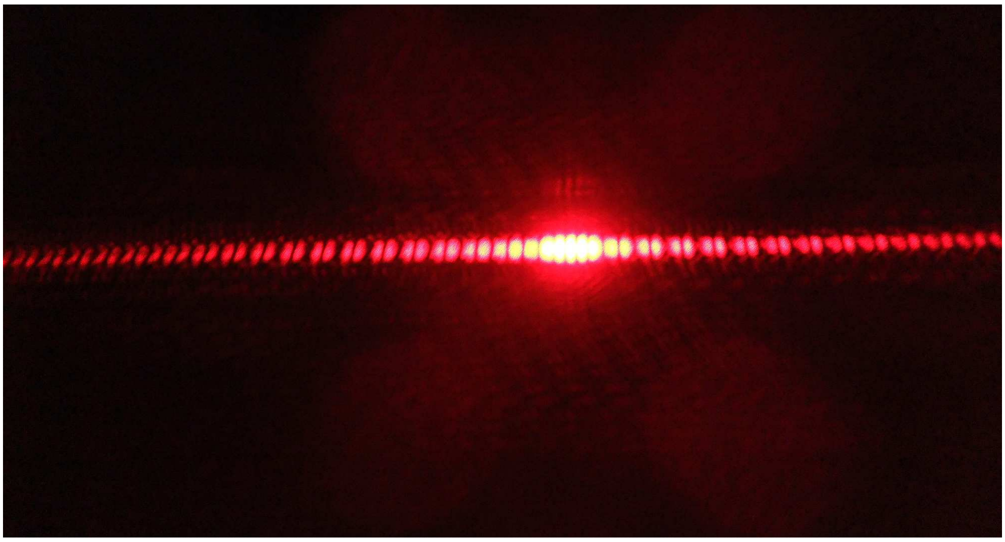

Abbildung 8: Doppelspalt d = 0,25mm und g = 0,75mm

Man sieht, dass die Abstände der Einhüllenden schwer messbar sind, deshalb haben wir aus diesem Beugungsmuster nur die Abstände der Nebenmaxima zum Hauptmaxima bestimmt um g zu berechnen, die Spaltbreite berechnen wir anschließend aus dem Beugungsmuster eines der beiden Einzelspalte des Doppelspalts.

Ordnung n / 1	Messreihe 1 x_n / cm	Messreihe 2 x_n / cm	Messreihe 3 x_n / cm	Messreihe 4 x_n / cm	y-Fehler systematisch
-9	-2	-2,1	-2,15	-2,05	0,15
-8	-1,85	-1,9	-1,95	-1,7	0,15
-7	-1,55	-1,6	-1,6	-1,55	0,15
-6	-1,35	-1,4	-1,4	-1,3	0,15
-5	-1,05	-1,15	-1,1	-1,05	0,15
-4	-0,7	-0,9	-0,85	0,85	0,15
-3	-0,6	-0,6	-0,55	-0,6	0,15
-2	-0,35	-0,45	-0,35	-0,4	0,15
-1	-0,15	-0,2	-0,2	-0,2	0,15
0	0	0	0	0	0,15
1	0,18	0,15	0,15	0,15	0,15
2	0,4	0,3	0,4	0,35	0,15
3	0,55	0,6	0,65	0,65	0,15
4	0,85	0,7	0,85	0,85	0,15
5	1,15	1,1	1,15	1,1	0,15
6	1,35	1,25	1,3	1,35	0,15
7	1,65	1,45	1,6	1,6	0,15
8	1,85	1,75	1,8	1,8	0,15
9	2,15	2,1	2,1	2,1	0,15

Tabelle 4: Doppelspalt

Der Abstand g ergibt sich in Abhängigkeit von x_n zu (siehe Vorbereitung):

$$g = \frac{l \cdot \lambda}{x_n} \cdot n \tag{25}$$

$$=> x_n = \frac{l \cdot \lambda}{g} \cdot n \tag{26}$$

Wir tragen für die vier Messreihen also wieder x_n über n auf und bilden Regressionsgeraden.

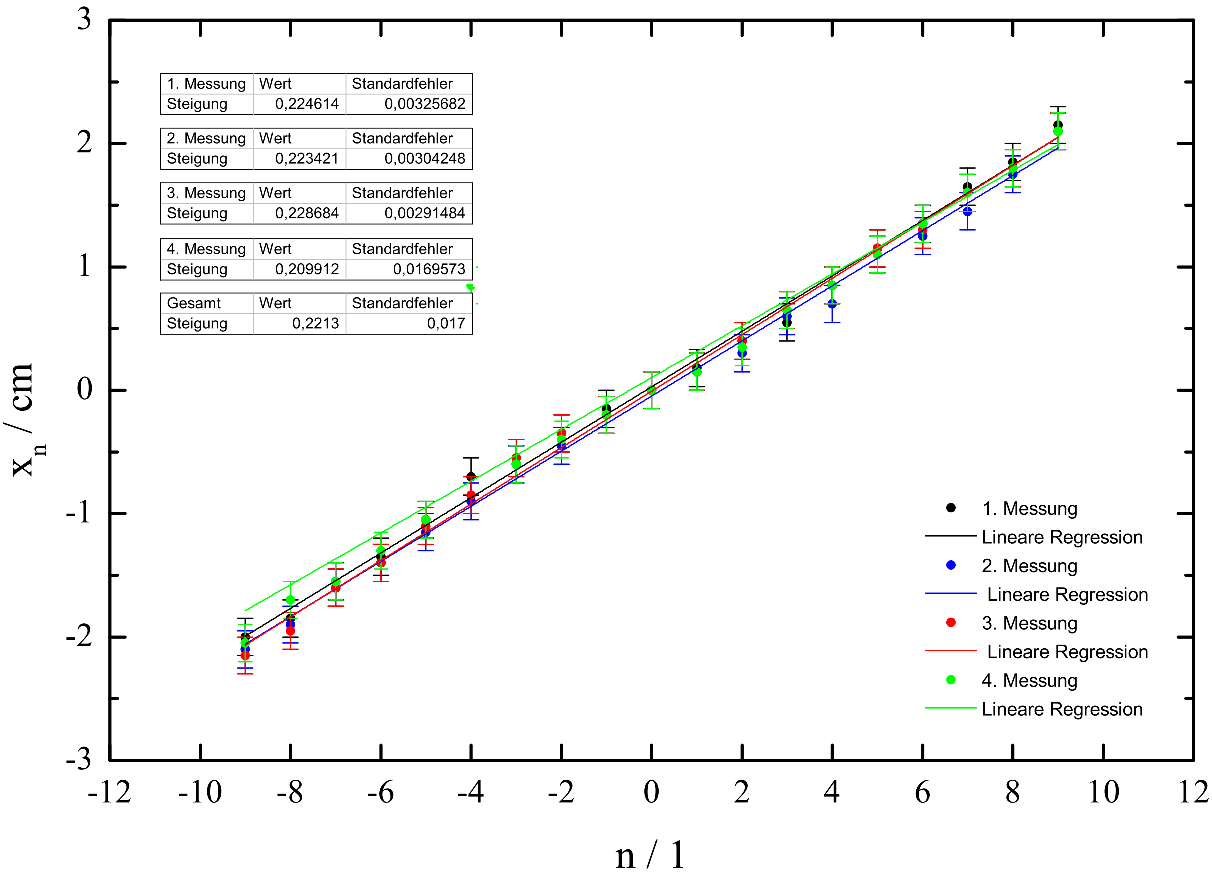

Abbildung 9: Doppelspalt d = 0,25mm und g = 0,75mm

Für den Mittelwert der Steigung erhalten wir dann folgenden Wert:

$$m = (2,21 \pm 0,17 \pm 1,5)mm \tag{27}$$

Damit können wir nun g berechnen:

$$g = \frac{l \cdot \lambda}{m} = 0,55mm \tag{28}$$

Und die Fehler ergeben sich zu:

systematischer Fehler:

$$\begin{aligned} \Delta g &= \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial l}\ \Delta l\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial m}\ \Delta m\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{\lambda}{m}\ \Delta l\right)^2 + \left(\frac{\lambda \cdot l}{m^2}\ \Delta m\right)^2} \\ &= 0,37m \end{aligned} \tag{29}$$

statistischer Fehler

$$\sigma_d = \sqrt{\left(\frac{\partial d}{\partial m}\ \sigma_m\right)^2} = \frac{\lambda \cdot l}{m^2} \cdot \sigma_m = 0,04mm \tag{30}$$

Somit erhalten wir für den Spaltabstand g folgenden Wert:

$$d = (0,55 \pm 0,04 \pm 0,37)mm \tag{31}$$

Dieser Wert liegt doch recht deutlich vom erwarteten Wert von 0,75mm entfernt. Man sieht aber auch, dass der systematische Fehler sehr groß ist. Dies liegt daran, dass bei einem Doppelspalt die Maxima näher aneinander rücken, und somit es sehr schwierig wird die Werte genau abzulesen.

Nun soll noch die Spaltbreite d der einzelnen Spalte des Doppelspalts bestimmt werden. Dazu haben wir einen Spalt mit Hilfe eines Stücks Alufolie verdeckt und somit nur einen der beiden Spalte beleuchtet. Wir erhalten somit das Beugungsmuster eines Einzelspalts und gehen analog zu Aufgabe 2 vor.

Dazu haben wir wieder die Abstände x_n der Nebenmaxima n gemessen:

	Messreihe 1	Messreihe 2	Messreihe 3	Messreihe 4	y-Fehler
Ordnung n / 1	x_n / cm	x_n / cm	x_n / cm	x_n / cm	systematisch
-4	-2,2	-2,2	-2,2	-2,2	0,15
-3	-1,7	-1,65	-1,7	-1,65	0,15
-2	-1,35	-1,15	-1,2	-1,2	0,15
-1	-0,72	-0,65	-0,7	-0,75	0,15
0	0	0	0	0	0,15
1	0,7	0,85	0,7	0,75	0,15
2	1,2	1,35	1,25	1,3	0,15
3	1,75	1,8	1,68	1,75	0,15
4	2,25	2,3	2,2	2,25	0,15

Tabelle 5: Einzelspalt des Doppelspalts

Dann haben wir wieder die Steigung der Regressionsgeraden bestimmt:

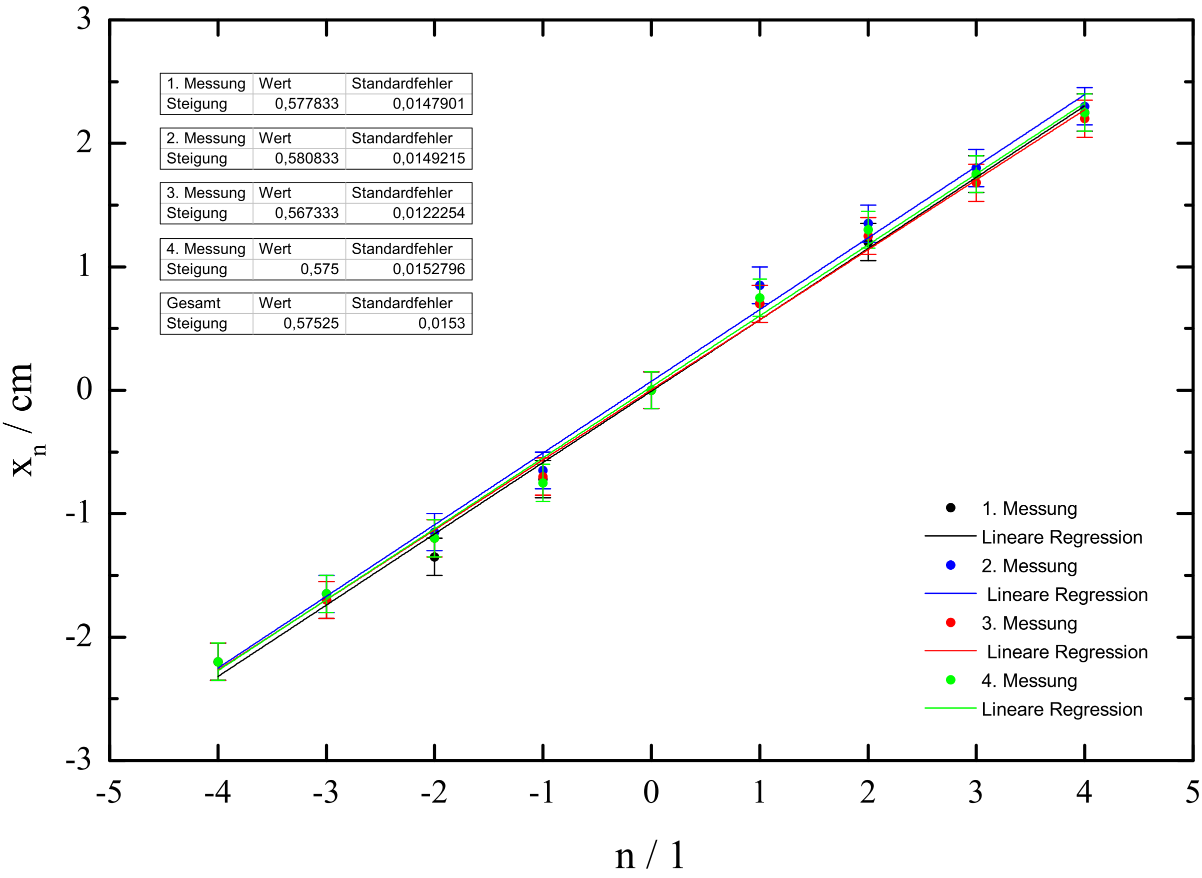

Abbildung 10: Doppelspalt d = 0,25mm und g = 0,75mm

Die Steigung ergibt sich dann zu:

$$m = (5,75 \pm 0,15 \pm 1,5)mm \tag{32}$$

Daraus lässt sich nun die Spaltbreite d berechnen:

$$d = 0,21mm \tag{33}$$

Und die Fehler ergeben sich zu:

systematischer Fehler:

$$\begin{aligned} \Delta d &= \sqrt{\left(\frac{\partial d}{\partial l}\ \Delta l\right)^2 + \left(\frac{\partial d}{\partial m}\ \Delta m\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{\lambda}{m}\ \Delta l\right)^2 + \left(\frac{\lambda \cdot l}{m^2}\ \Delta m\right)^2} \\ &= 0,06mm \end{aligned} \tag{34}$$

statistischer Fehler

$$\sigma_d = \sqrt{\left(\frac{\partial d}{\partial m}\,\sigma_m\right)^2} = \frac{\lambda \cdot l}{m^2} \cdot \sigma_m = 0,0006mm \tag{35}$$

Somit erhalten wir für den Durchmesser d des Spalts folgenden Wert:

$$d = (0,21 \pm 0,006 \pm 0,06)mm \tag{36}$$

Der Wert liegt im Bereich des erwarteten Wertes von 0,25mm.

4 Doppelspalt und Dreifachspalt

Nun haben wir einen anderen Doppelspalt gewählt und die in der Versuchsvorbereitung diskutierten Veränderungen im Interferenzmuster durch Variation der Spaltbreite und des Spaltabstandes überprüft. Unsere Vorüberlegungen haben sich soweit bestätigt.
Nun verwendeten wir einen Doppel- und Dreifachspalt mit gleicher Spaltbreite d=0,25mm und gleichem Spaltabstand g=0,5mm. Durch Vergleich der beiden Interferenzbilder war zu erkennen, dass wie vermutet, die Anzahl der Bergungsmaxima anstieg. Die Abstände zwischen den Maxima haben sich nun verkürzt, so dass sich die Einhüllende nicht wesentlich verändert hat. Leider konnten wir hier kein brauchbares Foto machen. Mit dem Auge war dies jedoch erkennbar. Auf dem Millimeterpapier kann man beim Dreifachspalt gut erkennen, dass sich die Anzahl der Maxima (auf gleichen Raum) vermehrt hat.

5 Gitterkonstante eines Strichgitters

Nachdem wir nun schon den Einzelspalt, und den Doppelspalt untersucht haben soll noch ein Strichgitter untersucht werden. Dazu haben wir wieder das Beugungsmuster des Gitters untersucht.

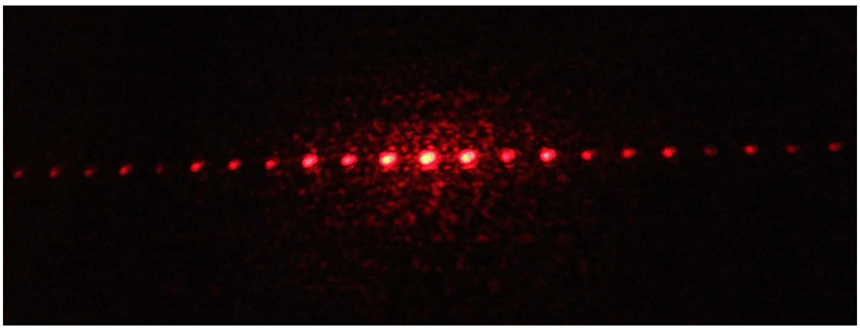

Abbildung 11: Strichgitter

Nun haben wir wieder die Abstände der Nebenmaxima zum Hauptmaxima ausgemessen und über der Ordnung dargestellt.

Ordnung n / 1	Messreihe 1 x_n / cm	Messreihe 2 x_n / cm	Messreihe 3 x_n / cm	Messreihe 4 x_n / cm	y-Fehler systematisch
-5	-4,8	-4,8	-4,8	-4,75	0,15
-4	-3,8	-3,85	-3,8	-3,8	0,15
-3	-2,85	-2,9	-2,9	-2,9	0,15
-2	-1,95	-1,95	-1,9	-1,9	0,15
-1	-0,95	-1	-1	-0,95	0,15
0	0	0	0	0	0,15
1	0,95	1	0,95	1,05	0,15
2	1,95	1,95	1,95	1,85	0,15
3	2,8	2,9	2,9	2,9	0,15
4	3,85	3,7	3,9	3,85	0,15
5	4,8	4,75	4,85	4,8	0,15

Tabelle 6: Stichgitter mit $g = 100cm^{-1}$

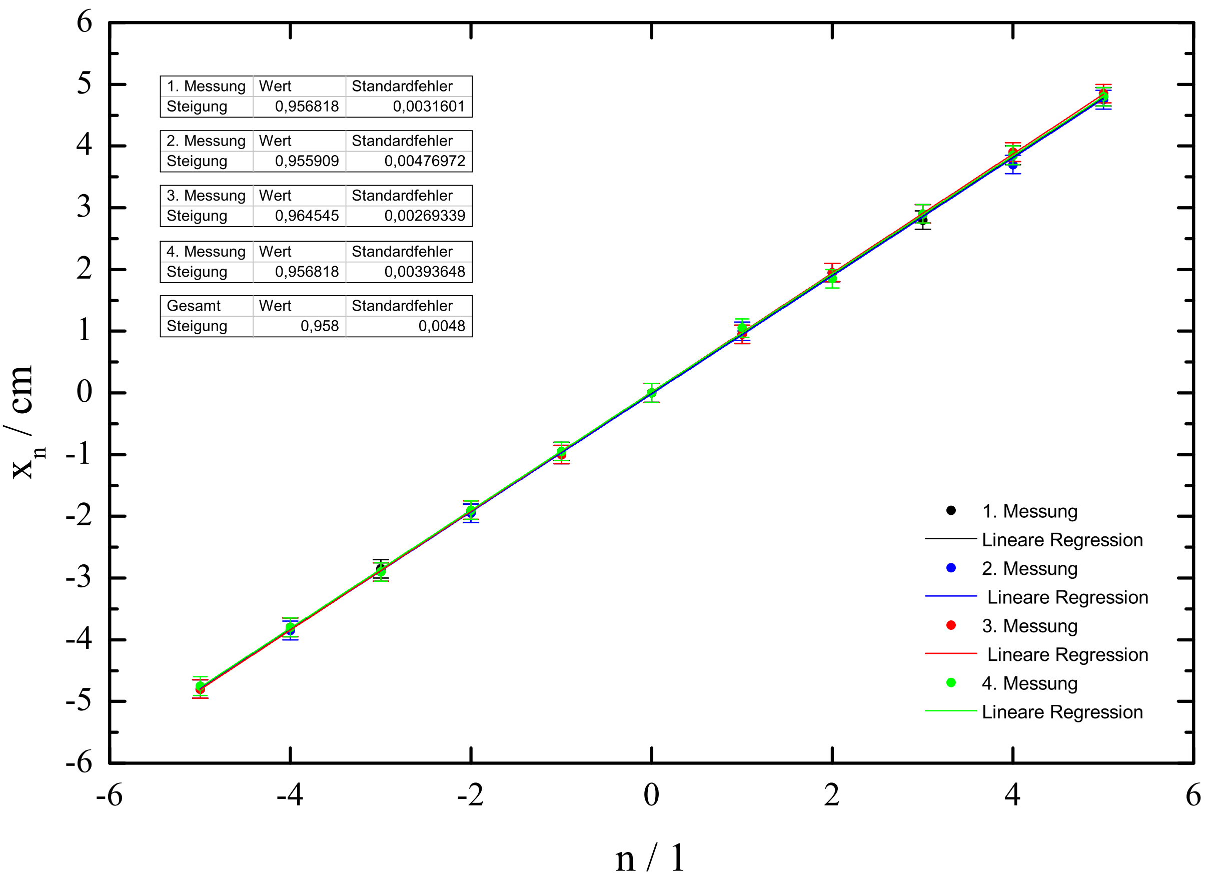

Abbildung 12: Strichgitter

Die mittlere Steigung m ergibt sich dann zu:

$$m = (9,58 \pm 0,05 \pm 1,5)mm \tag{37}$$

Daraus lässt sich dann g bestimmen zu:

$$g = 0,12mm \tag{38}$$

mit folgenden Fehlern:

systematischer Fehler:

$$\begin{aligned}
\Delta g &= \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial l}\ \Delta l\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial m}\ \Delta m\right)^2} \\
&= \sqrt{\left(\frac{\lambda}{m}\ \Delta l\right)^2 + \left(\frac{\lambda \cdot l}{m^2}\ \Delta m\right)^2} \\
&= 0,02mm
\end{aligned} \tag{39}$$

statistischer Fehler

$$\begin{aligned}
\sigma_g &= \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial m}\ \sigma_m\right)^2} \\
&= \frac{\lambda \cdot l}{m^2} \cdot \sigma_m \\
&= 0,0007mm
\end{aligned} \tag{40}$$

Für die Gitterkonstante g erhalten wir also folgenden Wert:

$$g = (0,12 \pm 0,0007 \pm 0,02)mm \tag{41}$$

Der angegebene Wert von g = 0,1mm liegt somit noch im Bereich unserer Fehler.

6 Kreuz- und Wabengitter

Zum Abschluss dieser Aufgabe sollten wir noch das Beugungsmuster eines Kreuz- und Wabengitters beobachten.

Zuerst zum Keuzgitter. Das Beugungsmuster des Kreuzgitters haben wir zweimal fotografiert; einmal direkt und einmal haben wir vor den Laser ein Schutzbrille gehalten um das Bild etwas abzudunkeln. Es ergaben sich folgende zwei Muster:

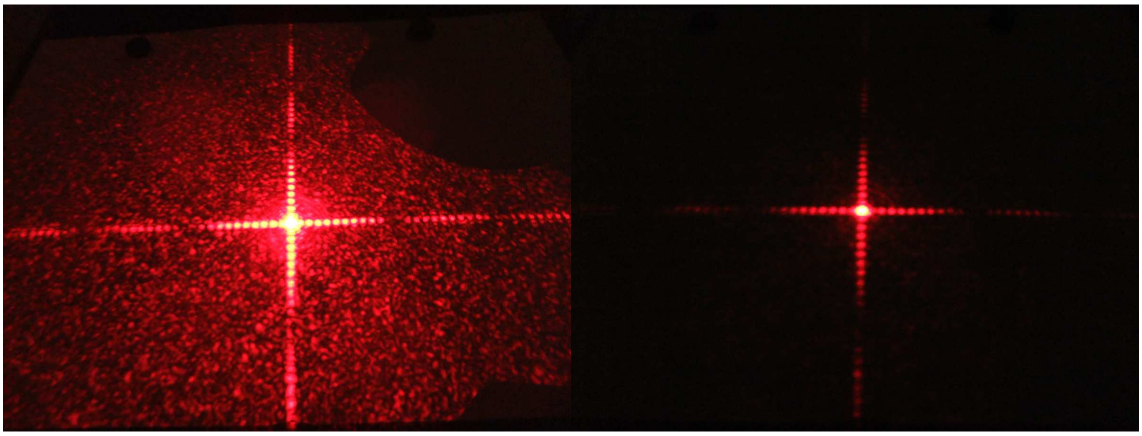

Abbildung 13: Kreuzgitter - ohne Abdunklung - mit Brille

Bei dem Beugungsmuster sieht man schön die erwartete Kreuzform, sowie die einzelnen Maxima, hier ist auch die Einhüllende schön zu erkennen.

Nun noch zum Wabengitter. Das Beugungsmuster sah folgendermaßen aus:

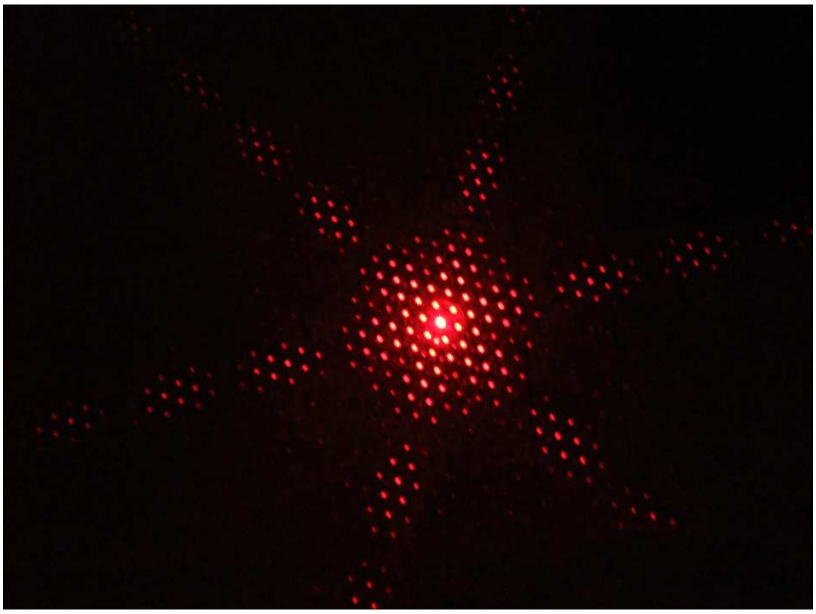

Abbildung 14: Wabengitter

Auch beim Wabengitter ist die Form, sowie die einzelnen Maxima und die Einhüllende sehr schön zu erkennen.

7 Abbildung nicht selbstleuchtender Gegenstände

In dieser Aufgabe haben wir versucht die Abbésche Theorie der Bildentstehung näher zu untersuchen. Dazu verwendeten wir ein Wabengitter mit n=100 Striche/cm. Nachdem wir mit dem

Versuchsaufbau (nach Vorbereitung) aufgebaut hatten - die Beugungsordnungsblende wurde durch eine Irisblende ersetzt - konnten wir jedoch auch durch leichte Justierung der Abstände von Linse und Gitter keine verwertbares Bild erzeugen.
Nach Absprache mit der Betreuerin wurden die Abstände Linse und Gitter zu Irisblende vergrößert. Es war nun ein großes Interferenzbild auf der Wand zu sehen.
Durch langsames schließen der Blende verdunkelte sich langsam die äußeren Stellen, bis wir nur noch das mittlere Maximum erkannten. Dies verwunderte uns schon bei der Durchführung, jedoch ließen wir uns durch den Einwand, dass dieser Versuch so gehen würde und dass andere Gruppen dieses Problem auch schon hatten, besänftigen.
Nach etwas genauerer Überlegung bei der Auswertung sind uns jedoch erneut Zweifel gekommen, daher nun noch einmal die Theorie zur Abbéschen Bildentstehung, sowie die unserer Meinung richtige Durchführung.
Bilden wir ein Objekt mit Hilfe einer Sammellinse ab, so kann das entstehende Bild (sekundäre Bild) durch Eingriffe in das sogenannte primäre Bild, welches in der Brennebene liegt, manipuliert werden. Das primäre Bild entspricht gerade dem Fraunhofer Beugungsmuster des Objekts. Das Beugungsbild entspricht gerade der zweifachen Fourier-Transformation des Objekts. Die Bildentstehung von primär Bild zum sekundär Bild entspricht einer Rücktransformation. Nun können wir durch Ausblenden verschiedener Beugungsordnungen das sekundäre Bild auf dem Schirm beeinflussen (vgl. Vorbereitung).
Befindet sich nun das Gitter in einem Abstand, der etwas größer als die Brennweite ist, von der Linse entfernt, so entsteht ein reelles Bild. Die Linse weitet das Bild auf und es entsteht oben beschriebenes. Die Irisblende steht nun im anderem Brennpunkt der Linse und mit ihr kann man durch allmähliches schließen die einzelnen Beugungsordnungen ausblenden. Dabei sollte das Bild mit abnehmenden höheren Beugungsordnungen, zunehmend verschwimmen. Erreichen wir es, dass nur die nullte Ordnung hindurch gelassen wird, so haben wir keine Information über das Objekt und sehen nur einen verwaschenen Fleck.

8 Holographie

Nun beobachteten wir zwei Hologramme. Zunächst wurde ein "normales" Hologramm beleuchtet, anschließend noch ein Weißlichthologramm.
Das erste Hologramm brachten wir in den durch eine Linse aufgeweiteten Strahlengang des Lasers ein. Man konnte nun hinter dem Hologramm mit Blickrichtung auf dieses in Richtung der Laser-Quelle ein virtuelles Bild beobachten. Interessant dabei war, dass sich dies bei Blickwinkelveränderung veränderte. Man hatte den Eindruck ein 3D Objekt zu sehen. Zu lesen war der Schriftzug "Laser Focus' und eine Schachfigur.
Anschließend nahmen wir die Linse aus dem Strahlengang und konnten nun durch Beleuchten eines Bereichs des Hologramm (dabei war egal welchen Bereich man auswählte) ein reelles Bild auf dem Schirm dahinter erzeugt werden.
Zuletzt haben wir noch ein Weißlichthologramm beobachtet. Dazu wurde dies von hinten mit weißem Licht beleuchtet. Man konnte nun sehr deutlich ein buntes dreidimensionales Bild (Auto) beobachten, welches sich erneut unter Blickwinkelveränderung "veränderte". Die Farbe ver-

änderte sich mit dem Blickwinkel.