FAKULTÄT FÜR PHYSIK, Universität Karlsruhe (TH)
Praktikum Klassische Physik

SS/~~WS~~ 20 12 /......

Praktikum: (~~P1~~/P2) (~~Mo~~/Di/~~Mi~~/~~Do~~) Gruppe-Nr: 11

Name: Fleig Vorname: Georg

Name: Krause Vorname: Marcel

Versuch: Laser A **(mit/~~ohne~~)** Fehlerrechnung

Betreuer: Franziska Lambrecht Durchgeführt am: 15.05.12

Abgabe am: ....

Rückgabe am: .... Begründung:

2. Abgabe am: ....

Ergebnis: (+ / 0 / -) Fehlerrechnung: ja / nein

Datum: .... Handzeichen: ....

Bemerkungen:

Zutreffendes einkreisen oder nicht Zutreffendes streichen vom Betreuer auszufüllen

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 unaufgeweiteten 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

Physikalisches Anfängerpraktikum
P2

Versuch:

P2-16,17,18

Laser A

Schriftliche Vorbereitung

von

Georg Fleig (georg@leech.it)
Marcel Krause (mrrrc@leech.it)

Gruppe: Di-11

Datum der Versuchsdurchführung:
15.05.12

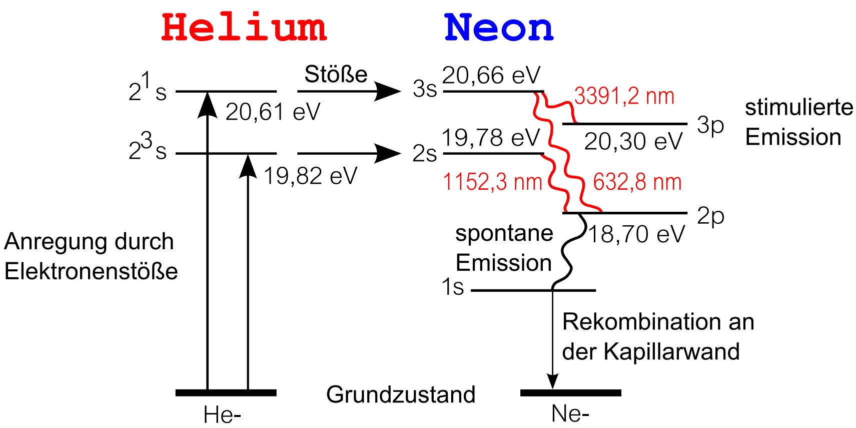
Einführung

In diesem Versuch werden wir das Prinzip eines Lasers kennenlernen und mit Hilfe seiner hohen Energiestromdichte verschiedene Beugungsphänomene an Spalt und Gitter studieren.

Funktionsweise eines Lasers

Bei einem Laser macht man sich die stimulierte Emission zunutze, die bereits 1917 von Einstein vorhergesagt wurde. Er postulierte, dass es mit einem Photon möglich ist, ein Elektron von einem höheren Energieniveau unter Emission eines Photons auf ein energetisch niedrigeres Niveau überzuführen. Im Gegensatz zur Absorption bleibt das ursprüngliche Photon dabei erhalten und kann weitere stimulierte Emissionen hervorrufen.
Das emittierte Photon zeichnet sich durch gleiche Phase, Polarisation und Frequenz aus. So tritt der Effekt der Lichtverstärkung ein. Als Lasermedium können feste, flüssige, sowie gasförmige Stoffe verwendet werden.

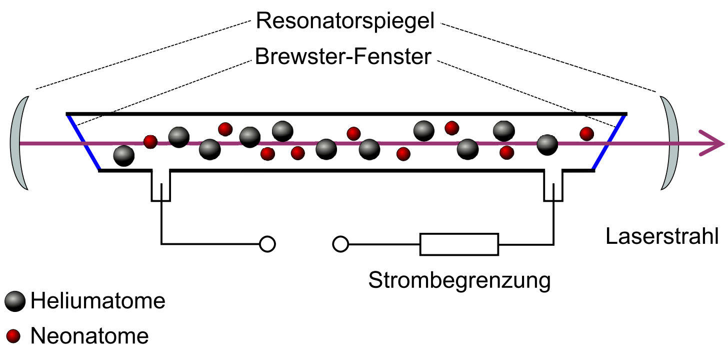
Im Versuch werden wir mit einem He-Ne-Laser arbeiten, welcher der erste kontinuierliche Laser war. Dabei kommen die beiden Edelgase Helium und Neon zum Einsatz. Zunächst wird das Helium durch Gasentladung in einen angeregten Zustand gebracht. Die angeregten Helium-Atome geben durch elastische Stöße einen Teil ihrer Energie an das Neon und sorgen dort für eine Besetzungsinversion. Das bedeutet, dass sich nun mehr Elektronen im einem energetisch höheren Zustand befinden, als es Elektronen im energetisch niedrigeren Zustand gibt. Diese hohen Niveaus sind nötig, damit überhaupt ein Übergang durch stimulierte Emission auf ein niedrigeres Niveau stattfinden kann. Wären alle Elektronen im Grundzustand, könnten wir durch Photonenbeschuss keine weiteren Photonen emittieren.
Die hohen Besetzungsniveaus des Neon-Gases können nun für die stimulierte Emission verwendet werden. Man bezeichnet daher auch das Neon als Lasergas und das Helium als Pumpgas. Nachfolgend ist das Energieschema des Vier-Niveau-Lasers dargestellt.



Hier sind auch bereits die Wellenlängen der Photonen angegeben, welche vom Laser emittiert werden. Im sichtbaren Bereich liegt lediglich $\lambda_1 = 632,8\,\mathrm{nm}$, welches als rotes Licht wahrgenommen wird. Zusätlich gibt es noch Strahlung im infraroten Bereich mit $\lambda_2 = 1152,3\,\mathrm{nm}$ und mit $\lambda_3 = 3391,2\,\mathrm{nm}$.

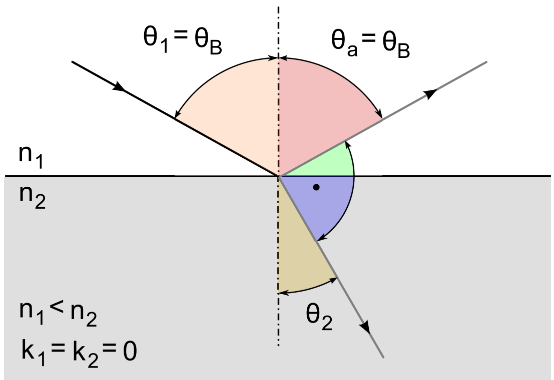
Aufbau des Lasers

Das Gasgemisch befindet sich in einer Glasröhre, welche an den beiden Enden mit Brewster-Fenstern versehen ist. Diese Fenster dienen der Polarisation des transmittierten Lichtes. Sie lassen nur Licht hindurch, das parallel zur Eintrittsebene polarisiert ist. Unmittelbar hinter den Brewster-Fenstern befinden sich Resonatorspiegel, welche die Lichtstrahlen wieder zurück in die Glasröhre schicken. So wird die Lichtverstärkung der stimulierten Emission nochmals verstärkt. Einer der beiden Spiegel ist an einer Stelle halbdurchlässig, wodurch ein Lichtstrahl austreten kann. Man erhält so einen monochromatischen Lichtstrahl mit hoher Energiestromdichte und guter Parallelität, der dann zur Verwendung im Experiment zur Verfügung steht.
In der Röhre befinden sich außerdem noch zwei Elektroden, welche für die Gasentladung des Heliums verantwortlich sind. Nachstehend ist ein Schema des He-Ne-Lasers dargestellt.



Aufgabe 1: Brewsterwinkel

Trifft Licht auf eine Grenzfläche, so werden in der Oberfläche Dipole zur Schwingung angeregt. Diese Schwingungen sorgen wiederum für abgestrahltes Licht, welches wir als den reflektierten Strahl wahrnehmen. Da Dipole nicht entlang ihrer Schwingungsachse abstrahlen, ist es möglich, für parallel polarisiertes Licht vollständige Transmission zu erreichen. Dies geschieht genau dann, wenn die reflektierte Welle senkrecht auf der transmittieren Welle steht. Ist das der Fall, ist die Schwingungsachse der Dipole senkrecht zur transmittierten Welle und damit parallel zur reflektierten Welle. Das reflektierte Licht, für welches die üblichen Brechungsgesetze gelte, ist damit rein senkrecht polarisiert.



Anhand der Grafik lässt sich einfach der Zusammenhang für den Brewster-Winkel, Θ_B herleiten.

$$\Theta_B + \Theta_2 = 90^\circ$$

Nach Snellius gilt außerdem

$$n_1 \sin\Theta_1 = n_2 \sin\Theta_2$$

So ergibt sich Θ_B zu

$$\Theta_B = \arctan\frac{n_2}{n_1} \tag{1}$$

Aufgabe 1.1: Brewster-Fenster beim Laser

Wie in der Einführung bereits beschrieben wurde, setzt man beim Laser an den Enden der Gasröhre Fenster im Brewster-Winkel ein. So ist gewährleistet, dass das Licht im Inneren des Lasers fast ausschließlich p-polarisiert ist und das s-polarisierte Licht an den Fenstern reflektiert wird. Dies macht das durch den Laser erzeugte Licht wesentlich attraktiver für Experimente, die gleichmäßig polarisiertes Licht voraussetzen. Die Fenster sind außerdem für die maximale Transmission des Lichtes notwendig, da es sonst zu Reflexionsverlusten im Laser kommen würde.

Um die Notwendigkeit der Brewster-Fenster zu bestätigen, sollen wir an einem offenen Expermimentier-Gaslaser eine Glasplatte zwischen Resonatorspiegel und Entladungsrohr installieren. Dieser soll nun leicht zum Brewster-Fenster verdreht werden und gleichzeitig die Intensität des Lasers beobachtet werden. Es ist davon auszugehen, dass wir maximale Intensität bei einem Winkel erhalten, der genau dem Brewster-Winkel entspricht. Bei allen anderen Winkeln wird die Intensität durch Reflexionsverluste abnehmen.

Aufhabe 1.2: Bestimmen von Brewster-Winkel und Brechungsindex

Nun gilt es, durch geringe Änderungen des Winkels der Glasplatte den Brewster-Winkel herauszufinden. Dafür stehen uns zwei Methoden zur Verfügung

1. Messung der Intensität des transmittieren Lichtes mittels eines Si-Photoelements

2. Beobachten des Minimums der Reflexion an der Zimmerdecke ohne genaue Intensitätsmessung

Die zweite Methode halten wir trotz Messung mit dem bloßen Auge für genauer, da das menschliche Auge auf geringe Intensitätsänderungen gerade bei geringer Intensität sehr sensibel reagieren kann. Die Photodiode erreicht möglicherweise eine Sättigung bei hoher Intensität, wodurch Schwankungen nicht mehr messbar werden und damit die genaue Auflösung der Intensität verloren geht.

Mit dem eben bestimmten Brewster-Winkel sollen wir nun noch den Brechungsindex des Gases bestimmen. Aus Gleichung (1) und dem Brechungsindex von Luft $(n_1 = 1)$ folgt

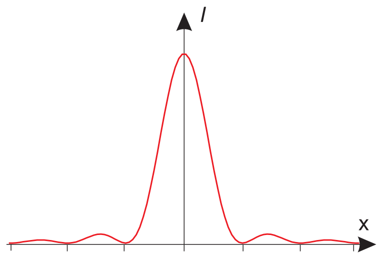
$$n_2 = \tan\Theta_B$$

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

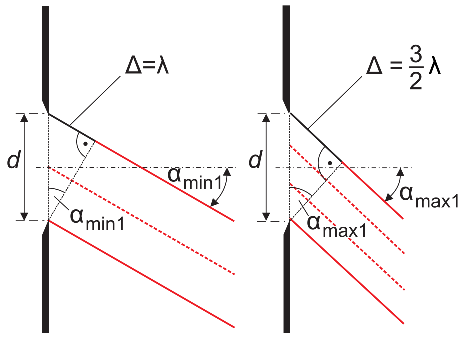
In den folgenden Versuchen wollen wir uns mit Beugungsphänomenen an verschiedenen Gegenstandsformen beschäftigen. Treffen Lichtwellen auf eine kleine Öffnung, z.B. einen Einfachspalt, so kann nach dem Huygenssches Prinzip direkt in der Öffnung jeder Teil der Wellenfront als neuer Ausgangspunkt einer Welle betrachtet werden. Diese Wellen breiten sich hinter der Öffnung mit unterschiedlicher Intensität in alle Richtungen aus. Dies beschreibt die Beugung von Licht an Gegenständen.
Die neuen Elementarwellen können sich überlagern und so zu Interferenz führen. Das lässt sich auf einem Schirm durch eine Verteilung von Beugungsmaxima- und Minima erkennen. Anhand der Abstände einzelner Maxima kann man später auf die Breite des Spaltes schließen. Genau das soll im nächsten Versuchsteil durchgeführt werden.

Aufgabe 2.1: Einfachspalt

Bestrahlen wir einen Einfachspalt mit einem Laser, erwarten wir etwa folgenden Intensitätsverlauf:



Genau gegenüber des Spaltes ist das Hauptmaximum zu erkennen, welches auf den direkten Durchgang des Lichtes durch den Spalt zurückzuführen ist. Die weiteren Minima und Maxima bedürfen genauerer Betrachtung der Interferenzerscheinungen.



In der Skizze lässt sich der folgende Zusammenhang erkennen:

$$\Delta s = d \sin\alpha \tag{2}$$

Beträgt der Gangunterschied zweier Strahlen nun genau

$$\Delta s = n\lambda \qquad n \in \mathbb{N} \tag{3}$$

so lässt sich das Lichtbündel in $2n$ Teilstrahlen aufteilen, wobei sich benachbarte Strahlen genau aufheben. Dies ist auf der linken Seite der Skizze zu sehen.

Entsprechend erhält man mit einem Gangunterschied

$$\Delta s = \frac{2n+1}{2}\lambda \qquad n \in \mathbb{N} \tag{4}$$

die Nebenmaxima. Dafür wurde der Strahl in $2n+1$ Teilbündel aufgeteilt, wovon sich immer $2n$ auslöschen und der verbleibende ein Maximum erzeugt.

Befindet sich ein Schirm im Abstand l vom Spalt entfernt, so gilt für das n-te Maximum auf dem Schirm im Abstand x_n vom Hauptmaximum die Beziehung:

$$x_n = l \tan \alpha_n \tag{5}$$

Hierbei bezeichnet α_n den Beugungswinkel.
Unter Ausschlus großer Winkel gilt zudem die Näherung

$$\tan \alpha \approx \sin \alpha \approx \alpha$$

Aus ihr und Gleichung (2) und (5) folgt

$$\begin{aligned} \frac{x_n}{l} &= \frac{\Delta s_n}{d} \\ \Rightarrow d &= \frac{\Delta s_n \, l}{x_n} \end{aligned}$$

In diese Gleichung setzen wir nun die Forderung für den Gangunterschied für Maxima bzw. Minima ein und erhalten so zwei Gleichungen für die Abstände von Beugungsmaxima und -minima.

$$\begin{aligned} d_{\text{min}} &= \frac{n\lambda l}{x_n} \\ d_{\text{max}} &= \frac{\left(n+\frac{1}{2}\right)\lambda l}{x_n} \end{aligned}$$

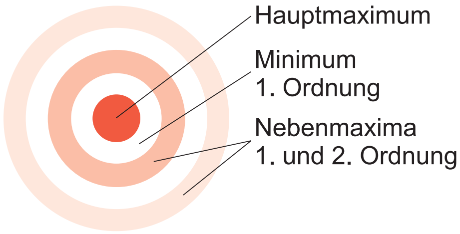
Wir werden die Lage der Maxima und Minima experimentell für einen Spalt der ungefähren Breite $d = 0,2\,\mathrm{mm}$ oder $d = 0,3\,\mathrm{mm}$ bestimmen und so auf die tatsächliche Breite schließen.

Aufgabe 2.2: Vergleich Steg und Spalt

Es soll ein Steg betrachtet werden, dessen Breite genau der Spaltbreite des zuvor verwendeten Einfachspaltes entspricht. Wieder werden wir das Objekt mit dem Laser bestrahlen und das Beugungsmuster auf dem Schirm beobachten. Das Babinet-Theorem besagt, dass wir dabei dieselbe Intensitätsverteilung erkennen, die wir schon beim Einfachspalt hatten.
Erklären lässt sich dieses Phänomen wieder mit dem Huygenssches Prinzip. Da sich die Kanten, an welchen neue Elementarwellen “entstehen“, an derselben Stelle befinden wie beim Spalt, ist das resultierende Interferenzbild dasselbe. Zueinander komplementäre Blenden erzeugen also dieselbe Intensitäsverteilung auf dem Schirm, da die Beugung an derselben Stelle erfolgt.

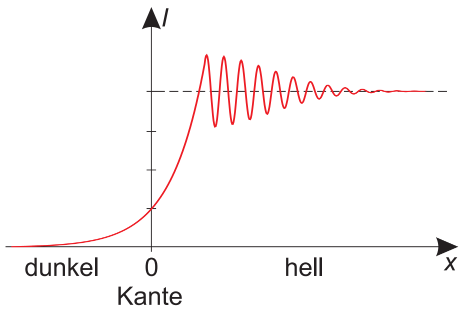
Aufgabe 2.3: Vergleich Kreisöffnung und Kreisscheibe, Kante

Bei dieser Aufgabe betrachten wir die Beugungsbilder von einer Kreisscheibe und einer Kreisöffnung. Aufgrund des oben erklären Babinet-Theorems erwarten wir auch hier wieder zwei gleiche Bilder auf dem Schirm, die ungefähr der nachfolgend gezeigten Verteilung folgen.



Das Hauptmaximum liegt wieder in der Mitte, danach wechseln sich ringförmig Minima und Maxima ab. Die Intensitätsverteilung ist ähnlich wie beim Einfachspalt zu beschreiben, allerdings muss zusätzlich die Rotationssymmetrie der Öffnung berücksichtigt werden.
Wir erwarten dieses Hauptmaximum auch bei der Kreisblende in der Mitte. Einerseits wegen des Babinet-Theorems und dem vorhandenen Maximum bei der Kreisöffnung, andererseits wegen der konstruktiven Interferenz aller Teilstrahlen, da diese genau im Kreismittelpunkt dieselbe Strecke zurückgelegt haben. Dieser helle Punkt wird auch Poisson-Fleck genannt.

Wir sollen schließlich das Beugungsbild einer Kante betrachten. Dabei erwarten wir keinen scharfen Übergang von dunkel zu hell, sondern eine Reihe von Inteferenzstreifen, die wieder auf Beugung an der Kante zurückzuführen sind.



Aufgabe 2.4: Durchmesser eines Haares

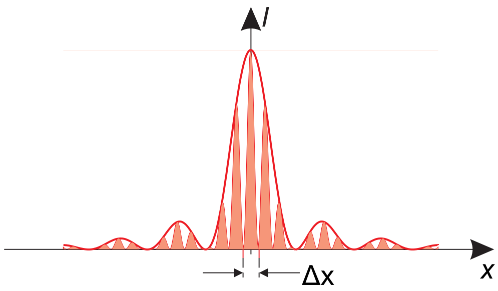
In Aufgabe 2.1 wurde eine Methode zur Bestimmung der Spaltbreite bei einem Einfachspalt vorgestellt. Weiterhin wurde in Aufgabe 2.2 gezeigt, dass Spalt und Steg dasselbe Beugungsbild auf dem Schirm erzeugen. Aus diesen beiden Erkenntnissen können wir auf den Durchmesser eines Haares schließen, indem wir, wie beim Einfachspalt, die Abstände der Maxima und Minima beobachten.
Der so ermittelte Wert soll anschließend mit einer Mikrometerschraube verglichen werden.

Aufgabe 3: Beugung an Mehrfachspalten und Gittern

In den nächsten Versuchen werden wir mit einem Doppelspalt, einem Dreifachspalt sowie verschiedenen Gittern experimentieren. Ebenfalls wie beim Einfachspalt kommt es durch Überlagerung einzelner Elementarwellen zu Interferenz, welche sich am Beugungsbild auf dem Schirm erkennen lässt.

Aufgabe 3.1: Doppelspalt

Bestrahlt man einen Doppelspalt der Spaltbreite d und dem Spaltabstand b mit dem Laser, erwarten wir ein Beugungsbild, welches etwa der nachfolgenden Skizze entspricht.

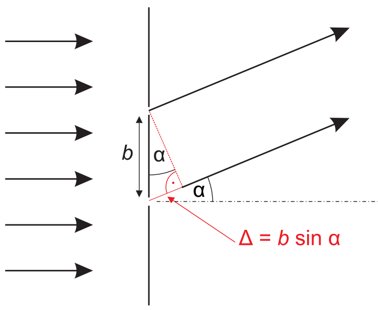


Wieder ist in der Mitte das Hauptmaximum zu sehen, da dort der Gangunterschied der beiden Wellenzüge $\Delta s = 0$ ist. Im Gegensatz zum Einfachspalt setzt sich die Intensitätsverteilung hier jedoch aus zwei Effekten zusammen: Zum einen aus der Interferenz der Lichtstrahlen aus den einzelnen Spalten, zum anderen aus der Beugungsfigur jedes Einfachspaltes. Durch Überlagerung beider Effekte entsteht die obige Intensitätsverteilung. Die Einhüllende wird dabei durch die Einfachspalte beschrieben, die darunterliegende Kurve durch den Doppelspalt.

Mit Hilfe der Einhüllenden können wir analog zum Einfachspalt die Spaltbreite d der Spalte bestimmen:

$$\begin{aligned} d_{\text{min}} &= \frac{n\lambda l}{x_n} \\ d_{\text{max}} &= \frac{\left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda l}{x_n} \end{aligned} \tag{6}$$

Um den Spaltabstand b zu bestimmen, müssen zunächst die Bedingungen des Gangunterschieds für Maxima und Minima hergeleitet werden. Dazu soll nachstehende Skizze dienen.



Wir betrachten nun nicht mehr ganze Wellenbündel, sondern gehen von unendlich dünnen Spalten aus und vernachlässigen so das Beugungsbild des Spaltes selbst. Der Gangunterschied der beiden Wellen ergibt sich entsprechend wie in Gleichung (2) aus der Geometrie der Strahlen zu:

$$\Delta s = b \sin\alpha \tag{7}$$

Da wir nun einzelne Strahlen betrachten und nicht mehr mehrere Teilbündel, ergeben sich neue Bedingungen des Gangunterschieds für Maxima und Minima. So erwarten wir die Maxima mit konstruktiver Interferenz bei:

$$\Delta s = n\lambda \qquad n \in \mathbb{N}$$

Die Minima ergeben sich entsprechend für einen Gangunterschied von:

$$\Delta s = \frac{2n+1}{2}\lambda \qquad n \in \mathbb{N}$$

Die Bedingungen sind also gerade umgekehrt zu denen beim Einfachspalt. Verknüpft man diese Bedingungen mit Gleichung (5) und (7), so erhalten wir wieder zwei Gleichungen für den Spaltabstand b für Beugungsminima und -maxima:

$$\begin{aligned} b_{\text{min}} &= \frac{\left(n+\frac{1}{2}\right)\lambda l}{x_n} \\ b_{\text{max}} &= \frac{n\lambda l}{x_n} \end{aligned} \tag{8}$$

Wir werden die Lage der Maxima und Minima experimentell bestimmen und so auf die Spaltbreite und den Spaltabstand schließen.

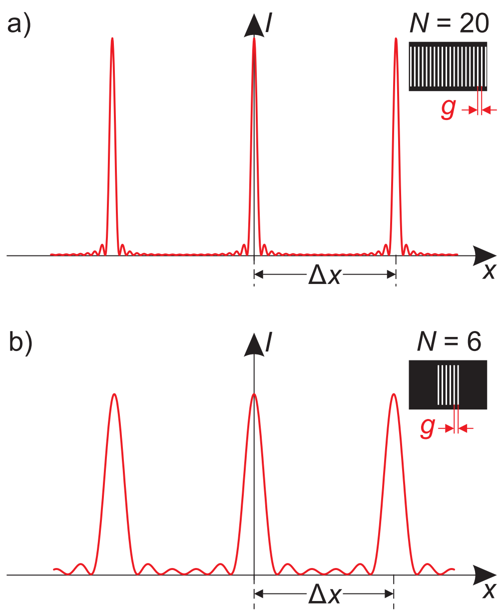
Aufgabe 3.2: Vergleich Doppelspalt und Dreifachspalt

Der eben verwendete Doppelspalt soll nun durch einen anderen ersetzt werden, der voraussichtlich eine andere Spaltbreite sowie einen anderen Spaltabstand aufweist. Die Veränderungen am Beugungsbild lassen sich bereits mit den eben hergeleiteten Gleichungen voraussagen.
Gleichung (6) liefert direkt die Information, dass bei kleinerer/größerer Spaltbreite d die Maxima der Einhüllenden nach außen/innen wandern.
Entsprechend lässt sich aus Gleichung (8) ablesen, dass bei kleinerem/größerem Spaltabstand b die innere Kurve des Doppelspaltes gestreckt/gestaucht wird.

Anschließend sollen wir den Doppelspalt $(d = 0,25\,\text{mm};\ b = 0,5\,\text{mm})$ mit einem Dreifachspalt vergleichen, welcher dieselben Maße besitzt.
Dabei sollte sich die Einhüllende kaum verändern, da diese nur durch die Spaltbreite charakterisiert ist, nicht aber durch die Anzahl der Spalte. Die innere Kurve wird mehr Maxima und Minima aufweisen, da nun drei anstatt nur zwei Strahlen miteinander interferieren. Dies hat zur Folge, dass die Hauptmaxima schärfer abgebildet werden.

Aufgabe 3.3: Strichgitter

Bei einem optischen Gitter handelt sich es um eine Aneinanderreihung von N parallelen Spalten mit dem Abstand g zueinander. Dieser Abstand wird auch Gitterkonstante genannt. Ähnlich wie beim Doppel- und Dreifachspalt setzt sich die Intensitätsverteilung aus Beugung an den Einzelspalten und Interferenz aller Spalte miteinander zusammen. Wie in Aufgabe 3.2 bereits beschrieben, werden die Maxima bei einer höheren Anzahl von Spalten schmaler und schärfer, da ihnen mehr Intensität zur Verfügung steht.



Die Gitterkonstante g entspricht dem Spaltabstand b beim Doppelspalt. Daher kann nach derselben Methode verfahren werden. Wir bestimmen wieder den Abstand der Maxima zur Mittelachse und schließen so auf die Gitterkonstante.

$$g = \frac{n\lambda l}{x_n}$$

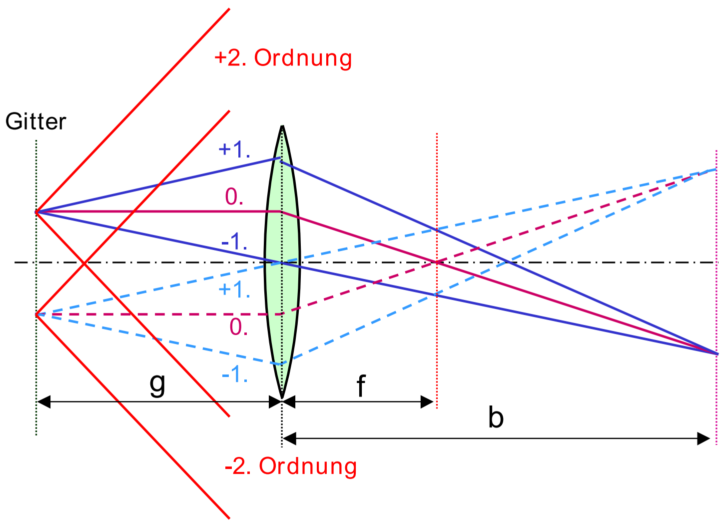
Um den Versuch erfolgreich durchzuführen, ist auf eine gleichmäßige Ausleuchtung des Gitters zu achten, damit alle Spalte zum Tragen kommen.

Aufgabe 3.4: Kreuz- und Wabengitter

Schließlich sollen wir noch die Intensitätsverteilungen beim Bestrahlen eines Kreuz- und eines Wabengitters betrachten. Dabei erwarten wir im Gegensatz zu den Spalten und dem Strichgitter, dass sich das Bild am Schirm nicht nur auf einer Achse befindet, sondern eine Ebene von Interferenzmustern aufgespannt wird. Auf eine Auswertung darf verzichtet werden.

Aufgabe 4: Abbildung nicht selbstleuchtender Gegenstände

In diesem Versuchsteil werden wir das Abbe'sche Theorem bestätigen. Es besagt, dass für eine korrekte Abbildung eines Gegenstandes durch ein optisches Instrument neben der nullten Ordnung auch weitere Beugungsordnungen verantwortlich sind.
Wir beleuchten ein Waben- oder Strichgitter mit $100\,\frac{\text{Striche}}{\text{cm}}$ mit parallelem Licht und bilden es mittels einer Linse mit $f = 150\,\text{mm}$ auf einer Mattscheibe ab. Zwischen Bild und Linse befindet sich eine Beugungsordnungsblende, mit deren Hilfe wir jeweils die nullte, erste und zweite Ordnung des gebeugten Lichts passieren lassen können. Die nullte Ordnung lässt sich außerdem mittels einer Kreisblende ausblenden. Der Strahlengang ist schematisch in dieser Skizze dargestellt:



Wir erwarten, dass wir lediglich einen Fleck sehen werden, wenn nur die 0. Beugungsordnung durchgelassen wird, da diese Strahlen nicht vom Gitter beeinflusst wurden. Erst beim Durchlassen höherer Ordnungen entsteht das Abbild des Gitters, welches nach und nach an Schärfe gewinnt.

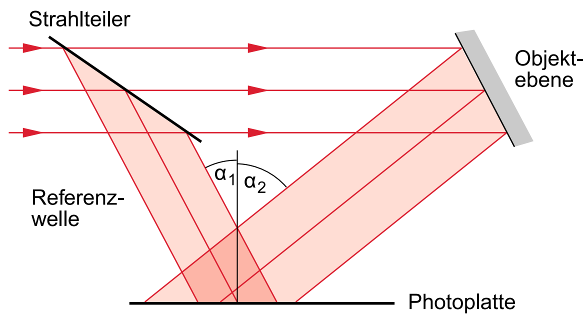
Es sollen dabei die folgenden Fälle untersucht werden:

- Nur nullte Ordnung zugelassen
- Nullte und erste Ordnung zugelassen
- Nur erste Ordnung zugelassen
- Nur zweite Ordnung zugelassen

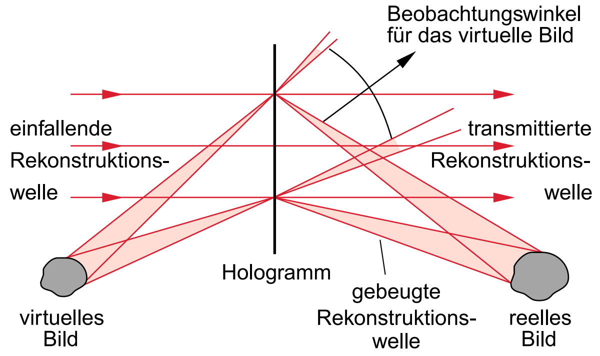
Es gilt noch die Frage zu beantworten, wie man sich den beobachteten Effekt zur Verbesserung eines digitalisiert empfangenen Zeitungsbildes machen könnte. Solche Bilder wirken meist etwas verpixelt, wenn sie nur mit geringer Auflösung digitalisiert wurden. Durch Ausblenden höherer Ordnungen könnte man das Bild etwas verwaschen aber dadurch glatter wirken lassen.

Aufgabe 5: Holographie

Bei der Holographie handelt es sich um eine dreidimensionale Abbildung eines Objekts. Im Gegensatz zu Fotografien, die Farben und Strukturen abbilden, stehen hier Informationen zu Abständen durch Phasendifferenzen zur Verfügung. Bei der Aufnahme wird kohärentes Licht durch einen Strahlteiler in zwei Teilbündel aufgespalten. Das eine Teilbündel wird am Objekt reflektiert und auf eine Fotoplatte gestrahlt. Das zweite Teilbündel dient als Referenzstrahl und wird direkt auf der Fotoplatte fokussiert. Dort kommt es zur Interferenz beider Wellenzüge und somit erhält das Bild Informationen über Phase und Amplitude des am Objekt gestreuten Lichtes. Die Phasenverschiebung liefert zudem die Information zur dreidimensionalen Struktur des Objekts.



Zur Betrachtung eines Hologramms muss dieses mit kohärentem Licht derselben Wellenlänge, welche zur Aufnahme benutzt wurde, bestrahlt werden. Dabei wird die Ursprüngliche Wellenfront wieder rekonstruiert. Es entstehen zwei Bilder, ein reelles und ein virtuelles. Das reelle Bild wird durch Beugung der Transmissionswelle erzeugt und befindet sich hinter dem Speichermedium. Das virtuelle Bild ist vor dem Medium sichtbar.



Da jeder Teil des Hologramms zum Gesambild beiträgt, lässt sich auch mit einem nur noch teilweise vorhandenen Hologramms das ganze Bild darstellen, jedoch mit geringerer Qualität.
Durch Überlagerung mehrerer Hologramme können bei Aufnahme mit unterschiedlichen Wellenlängen auch farbige Hologramme hergestellt werden.

Im Versuch werden wir zunächst das Laserlicht aufweiten und damit das zu betrachtende Hologramm bestrahlen. Durch Bewegen des Kopfes und damit Betrachtung aus verschiedenen Blickwinkeln können wir uns von der Dreidimensionalität des Bildes überzeugen.
Abschließend sollen wir noch Teile des Hologramms abdecken um so festzustellen, dass dennoch das gesamte Bild dargestellt wird.

Quellenverzeichnis

Skizze Energieschema, Aufbau He-Ne-Laser
https://de.wikipedia.org/wiki/Helium-Neon-Laser, abgerufen am 11.05.2012

Skizze Brewster-Winkel
https://de.wikipedia.org/wiki/Brewster-Winkel, abgerufen am 11.05.2012

Skizze Aufnahme eines Hologramms, Rekonstruktion eines Hologramms
Demtröder, W.: Experimentalphysik, Band 2 - Elektrizität und Optik

Skizze Strahlengang Abbe’sches Theorem
http://www.wmi.badw.de/teaching/Lecturenotes/Physik3/Gross_Physik_III_Kap_7.pdf
abgerufen am 12.05.2012

Alle anderen Grafiken
Eichler, Kronfeldt, Sahm: Das neue physikalische Grundpraktikum

Eichler, Kronfeldt, Sahm: Das neue physikalische Grundpraktikum

Vorbereitungsmappe

Physikalisches Anfängerpraktikum P2

Versuch:

P2-16,17,18

Laser A

Auswertung inklusive
ausführlicher Fehlerrechnung

von

Georg Fleig (georg@leech.it)
Marcel Krause (mrrrc@leech.it)

Gruppe: Di-11

Datum der Versuchsdurchführung:
15.05.12

Aufgabe 1: Brewsterwinkel

In der ersten Versuchsreihe haben wir uns mit dem Brewsterwinkel und dessen Anwendung in Lasern, den Brewster-Fenstern, beschäftigt. Da es sich hierbei um einen Demonstrationsversuch handelt, führten wir diesen zusammen mit den anderen Gruppen durch.

Aufgabe 1.1: Brewster-Fenster beim Laser

Wir betrachteten einen Demonstrationslaser, dessen Resonatorspiegel außerhalb der Gasküvette lagen, sodass sie uns direkt zugänglich waren. Es wurde dann von unserer Betreuerin eine planparallele Glasscheibe so in den Strahlengang gebracht, dass die Platte zwischen Küvette und dem teiltransparenten Spiegel lag. Die Platte selbst war auf einer Halterung befestigt, die es relativ leicht ermöglichte, den Winkel der Platte zu verdrehen.
Die Platte war zunächst im Brewsterwinkel eingestellt. Es war uns also möglich, den an der Wand gestreuten Laserfleck zu beobachten, denn der Laserstrahl konnte, wie in der Vorbereitung ausführlich diskutiert, unter Einfall im Brewsterwinkel die Platte nahezu ungeschwächt durchdringen.
Wir haben dann mit Hilfe einer Justierschraube den Einfallswinkel auf die planparallele Glasscheibe variiert. Wir haben gesehen, dass selbst kleine Veränderungen des Winkels ausreichten, um den Laserfleck stark abzuschwächen. Damit konnten wir eindrucksvoll zeigen, dass die Verwendung von Brewster-Fenstern in einem Gaslaser unabdingbar für dessen korrekten Betrieb ist.
Zusätzlich haben wir noch am Plattenhalter den von uns eingestellten Winkel abgelesen, bei dem wir eine maximale Intensität des Laserflecks wahrgenommen haben. Dieser lag etwa bei $\Theta_\mathrm{B} \approx 55°$.

Aufgabe 1.2: Bestimmen von Brewster-Winkel und Brechungsindex

Als nächste Teilaufgabe wollten wir den oben grob abgeschätzten Brewsterwinkel noch genauer messen. Dazu haben wir den Plattenhalter mit der planparallelen Glasscheibe nun hinter dem Resonatorspiegel positioniert, also gänzlich außerhalb des Lasersystems. Dies ermöglichte uns nun zwei verschiedene Messmethoden zur Brewsterwinkel-Bestimmung. Aus dem Winkel erhalten wir dann über die in der Vorbereitungshilfe hergeleitete Formel

$$n_2 = \tan \Theta_\mathrm{B}$$

den Brechungsindex n_2 des Glases, wobei wir den Brechungsindex n_1 der Luft zu $n_1 \approx 1$ genähert haben.

Aufgabe 1.2.1: Beobachtung des Reflexionsminimums

Zunächst haben wir den Brewsterwinkel mit bloßem Auge feststellen wollen. Da wir die Glasscheibe nun hinter dem Laser platziert haben, ist es uns je nach eingestelltem Winkel möglich, eine verhältnismäßig starke Reflexion zu beobachten, denn die Abschwächung durch einen vom Brewsterwinkel abweichenden Winkel innerhalb des Lasersystems entfällt nun. Daher ist die Intensität eines möglicherweise reflektierten Strahls sehr viel größer als in Aufgabe 1.1.
Wir haben nun den Winkel variiert und den reflektierten Laserfleck beobachtet, welcher sich an der Zimmerdecke befand. Dessen Intensität variierte mit dem eingestellten Glasscheiben-Winkel. Bei einem Winkel von $\Theta_\mathrm{B} \approx 58°$ verschwand der Laserfleck völlig.
Es handelt sich hierbei um den Brewsterwinkel, denn das Laserlicht ist stets linear polarisiert. Wie in

der Vorbereitung diskutiert, findet man unter diesem Winkel einen reflektierten und einen transmittierten Strahl vor, die orthogonal zueinander stehen und unterschiedliche Polarisation besitzen. Da der einfallende Laserstrahl aber a priori linear polarisiert ist, entfällt unter diesem Winkel gerade die reflektierte Komponente völlig.
Für den Brechungswinkel n_2 des Glases erhalten wir für den gemessenen Brewsterwinkel den Wert:

$$n_2 = \tan(58°) \approx 1,60$$

Dies liegt in der Größenordnung des Brechungsindex von Glas.

Aufgabe 1.2.2: Beobachtung des Transmissionsmaximums

Als zweite Messmethode diente uns die direkte Messung der Intensität des transmittierten Strahls mit Hilfe eines Photoelements und einem geeigneten Messinstrument. Auch hier haben wir den Winkel der Glasscheibe variiert, bis wir auf dem Messgerät eine maximale Spannung ablesen konnten. Dies war bei $\Theta_{\mathrm{B}} \approx 60°$ der Fall. Als Brechungsindex erhalten wir hier:

$$n_2 = \tan(60°) \approx 1,73$$

Auch dieser Wert liegt noch in der zu erwartenden Größenordnung, scheint uns für Glas aber zu hoch. Wir erkennen auch hier nochmal schön, dass die eigentlich als schlechter zu erwartende Messung mit dem bloßen Auge genauere Ergebnisse liefert als die Messung über die Photodiode.

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

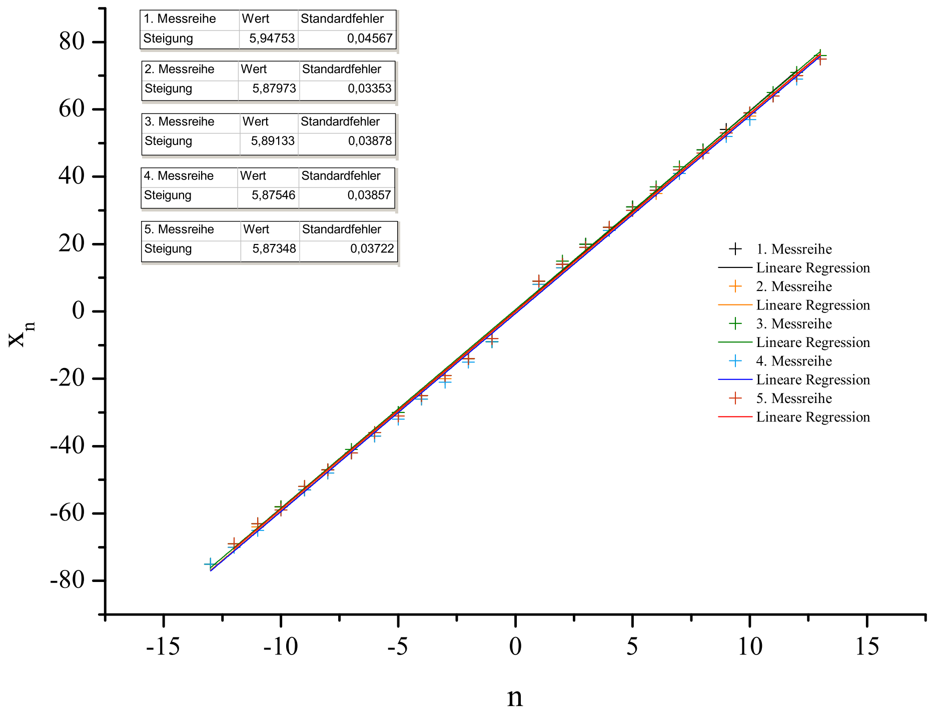
Die folgenden Experimente führten wir wieder in einzelnen Gruppen mit einem geschlossenen He-Ne-Laser der Wellenlänge $\lambda = (632,8 \pm 0,1)\,\mathrm{nm}$ durch. Generell bestand der Aufbau nun aus dem Laser, gefolgt von einem zu untersuchenden Objekt und schließlich einem Schirm mit Millimeterpapier im Abstand $l = (2258 \pm 1)\,\mathrm{mm}$ zum Objekt. Auf diesem konnten wir die entstehenden Intensitätsmaxima markieren und später ihren Abstand zum Mittelpunkt bestimmen.

Aufgabe 2.1: Einfachspalt

Wir wählten zunächst einen Einfachspalt mit der Spaltbreite $d = 0,3\,\mathrm{mm}$ und bestrahlten diesen mit dem Laser. Wie erwartet konnten wir auf dem Schirm ein Beugungsbild mit Maxima und Minima erkennen. Wir beschlossen für diese und alle weiteren Messungen die Abstände der Maxima zum Mittelpunkt zu messen. Die Messergebnisse der fünf durchgeführten Messreihen sind am Ende des Protokolls aufgeführt. Da wir abwechselnd die Messung durchführten, kann es sein, dass die Anzahl der bestimmten Maxima nicht immer übereinstimmt. Durch Umstellen der Gleichung für die Spaltbreite d aus der Vorbereitung, erhalten wir eine Geradengleichung:

$$d = \frac{\left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda l}{x_n}$$
$$\Rightarrow x_n = \underbrace{\frac{l\lambda}{d}}_{m} n + \frac{\lambda l}{2d}$$

Wir tragen also x_n über n auf und führen für die jeweiligen Messreihen eine lineare Regression durch.



Die Geraden liegen alle dicht beieinander, teilweise sogar aufeinander. Die Messreihen weichen also nur im geringen Maße voneinander ab. Das Programm Origin liefert uns direkt die Steigungen m der Ausgleichsgeraden, sowie deren Standardabweichungen ($\widehat{=}$ statistischem Fehler) σ_m. Wir bilden den Mittelwert der einzelnen Steigungen und erhalten so

$$m = (5,894\ \pm\ 0,046)\,\mathrm{mm}$$

Mit Hilfe dieser Steigung können wir nun auf die Spaltbreite d schließen:

$$d = \frac{\lambda l}{m} = 0,2424\,\mathrm{mm}$$

Systematischer Fehler

Wir verwenden die Gaußsche Fehlerfortpflanzung für die unkorrelierten Fehler von λ und l.

$$\begin{aligned}\Delta d &= \sqrt{\left(\frac{\partial d}{\partial \lambda}\,\Delta\lambda\right)^2 + \left(\frac{\partial d}{\partial l}\,\Delta l\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{l}{m}\,\Delta\lambda\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{m}\,\Delta l\right)^2} \\ &= 0,0001\,\mathrm{mm}\end{aligned}$$

Statistischer Fehler

Lediglich m weißt einen statistischen Fehler auf.

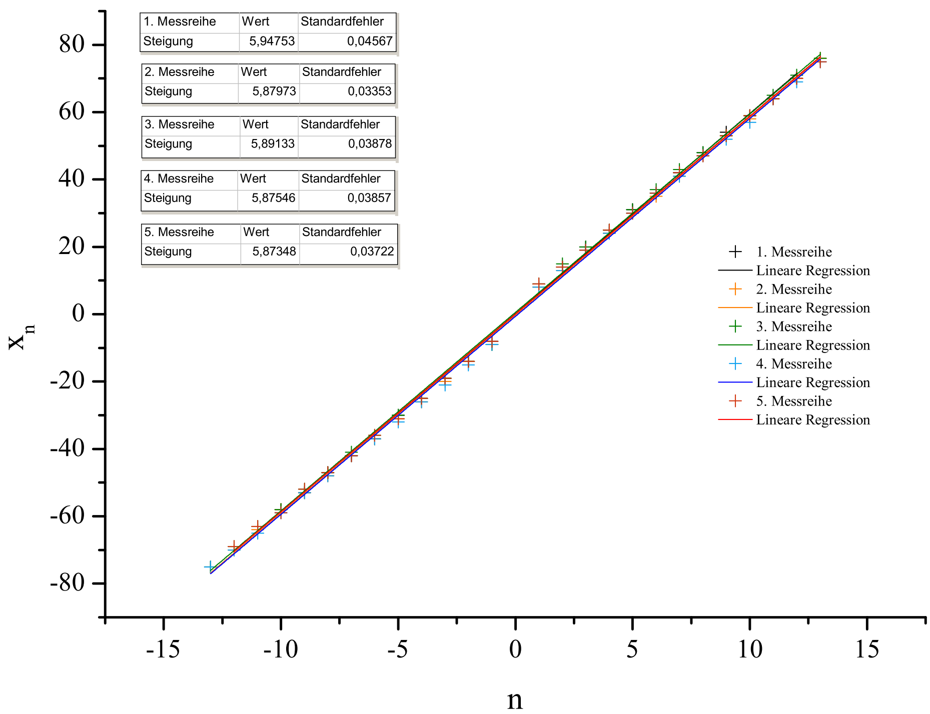
$$\begin{aligned}\sigma_d &= \sqrt{\left(\frac{\partial d}{\partial m}\,\sigma_m\right)^2} \\ &= \frac{\lambda l}{m^2}\,\sigma_m \\ &= 0{,}0019\,\mathrm{mm}\end{aligned}$$

So ergibt sich die von uns bestimmte Spaltbreite d zu

$$d = (0{,}2424\ \pm\ 0{,}0001\ \pm\ 0{,}0019)\,\mathrm{mm}$$

Die Breite des Spalts war mit $d = 0{,}3\,\mathrm{mm}$ angegeben. Das entspricht einer Abweichung von -19,2%. Zum einen ist es möglich, dass der Spalt tatsächlich eine leicht andere Spaltbreite besitzt als angegeben, aber viel mehr vermuten wir Ungenauigkeiten beim Markieren der Maxima auf dem Millimeterpapier. Die Minima waren etwas deutlicher zu lokalisieren und hätten daher wohl einen genaueren Wert geliefert.

Dieselbe Messung führten wir anschließend mit einem weiteren Einfachspalt der Breite $d = 0{,}2\,\mathrm{mm}$ durch. Im Folgenden sind wieder die Messergebnisse (Tabelle am Ende des Protokolls) im Schaubild aufgetragen.



Wieder bilden wir den Mittelwert der Steigungen

$$m = (6{,}600\ \pm\ 0{,}074)\,\mathrm{mm}$$

und erhalten so einen Wert für die Spaltbreite

$$d = \frac{\lambda l}{m} = 0,2165\,\mathrm{mm}$$

Systematischer Fehler

$$\begin{aligned}\Delta d &= \sqrt{\left(\frac{\partial d}{\partial \lambda}\,\Delta\lambda\right)^2 + \left(\frac{\partial d}{\partial l}\,\Delta l\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{l}{m}\,\Delta\lambda\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{m}\,\Delta l\right)^2} \\ &= 0,0001\,\mathrm{mm}\end{aligned}$$

Statistischer Fehler

$$\begin{aligned}\sigma_d &= \sqrt{\left(\frac{\partial d}{\partial m}\,\sigma_m\right)^2} \\ &= \frac{\lambda l}{m^2}\,\sigma_m \\ &= 0,0024\,\mathrm{mm}\end{aligned}$$

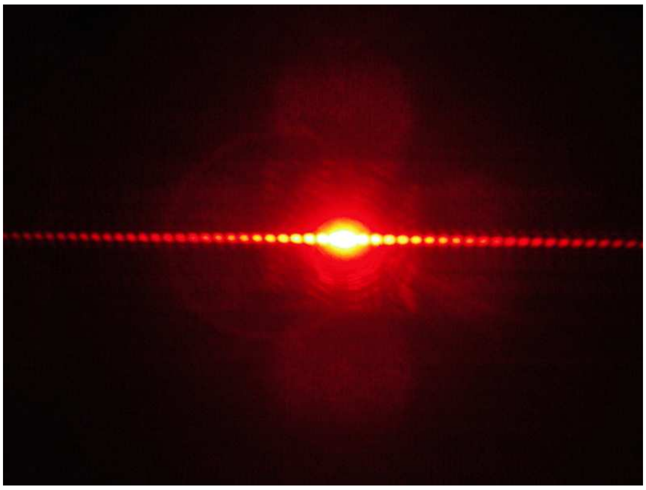
So ergibt sich die von uns bestimmte Spaltbreite d zu

$$d = (0,2165\ \pm\ 0,0001\ \pm\ 0,0024)\,\mathrm{mm}$$

Unser Wert weicht um 8,25% von der Herstellerangabe ab. Das ist wieder eine recht große Abweichung, jedoch wesentlich besser als der Wert beim anderen Spalt. Auch hier vermuten wir, dass die Abweichungen vom ungenauen Abtragen der Maxima sowie von der recht ungenauen Angabe des Herstellers selbst herrühren.

Aufgabe 2.2: Vergleich Steg und Spalt

Nachdem wir uns in der vorigen Aufgabe mit den Beugungsfiguren eines Spalts beschäftigt haben, betrachteten wir nun die Intensitätsverteilung, die sich ergibt, wenn das Laserlicht an einem Steg beugt. Die Stegbreite von $d \approx 0,3\,\mathrm{mm}$ wurde dabei passend zu einem der beiden Spalte in Aufgabe 2.1 gewählt. Es ergab sich dann auf dem Schirm die nachfolgend gezeigte Intensitätsverteilung.



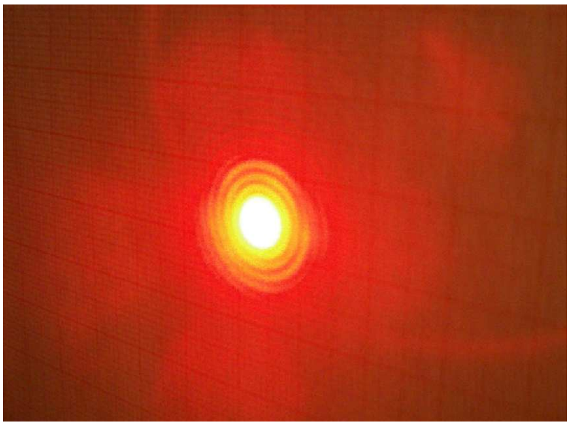
Ein Vergleich mit den von uns in Aufgabe 2.1 angebrachten Markierungen ergab, dass sich die Intensitätsmaxima bei Beugung am Steg an ungefähr derselben Stelle ergeben wie bei einem gleichbreiten Spalt. Damit konnten wir das Babinetsche Theorem bestätigen, nach dem zueinander komplementäre Blenden dasselbe Beugungsbild erzeugen. Die genaue Diskussion zur Entstehung von ein- und demselben Beugungsbild erfolgte von uns im Zuge der Vorbereitung.

Aufgabe 2.3: Vergleich Kreisöffnung und Kreisscheibe, Kante

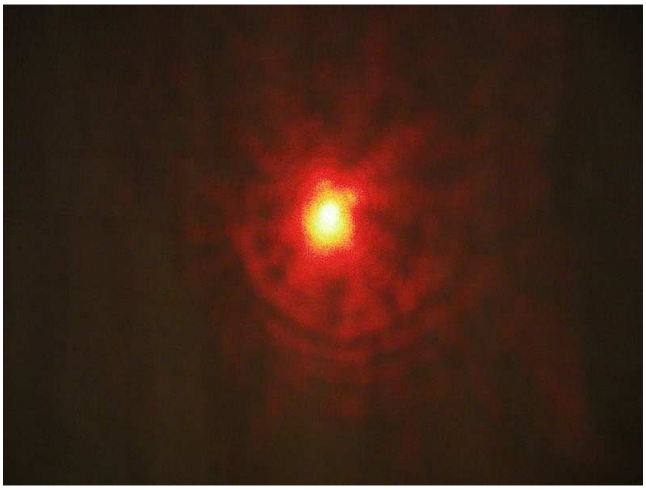
Wir beschäftigten uns in diesem Teilversuch weiter mit der qualitativen Beschreibung der Beugungsfiguren komplementärer Blenden, nämlich einer Kreisöffnung und einer gleichgroßen Kreisscheibe, sowie anschließend der Beugungsfigur an einer Kante.

Aufgabe 2.3.1: Kreisöffnung und Kreisscheibe

Wir haben zunächst eine Blende mit kreisförmiger Öffnung in den Strahlengang gestellt und darauf geachtet, dass die Blende möglichst gleichmäßig vom Laser ausgeleuchtet wird. Wir fanden dabei das nachfolgende Beugungsbild vor:



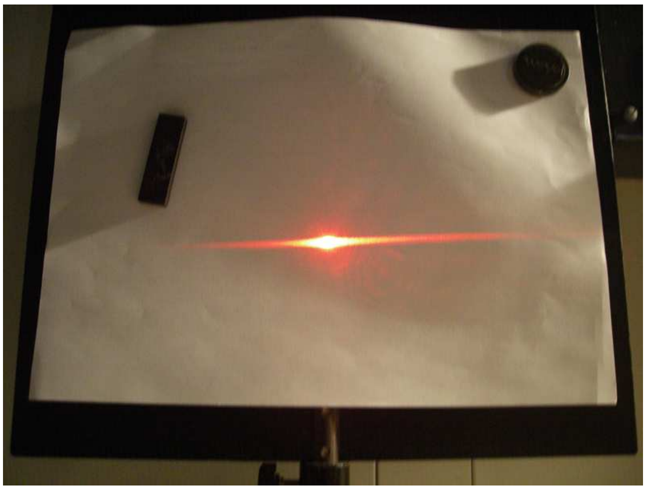
Wie wir es erwartet haben, fanden wir auf dem Schirm in der Mitte ein sehr helles Maximum vor, welches umgeben war von Ringen abnehmender Intensität. Die Existenz des Poissonschen Flecks wurde von uns bereits in der Vorbereitung diskutiert.
Formal finden wir bei der Kreisöffnung also dasselbe Bild vor wie bei einem Einzelspalt, allerdings müssen wir zusätzlich noch die Rotationssymmetrie der Anordnung beachten. Daher ergeben sich die typischen Interferenzringe.
Anschließend haben wir die Kreisöffnung mit einer Kreisscheibe ersetzt und wieder das sich ergebende Beugungsbild aufgenommen:



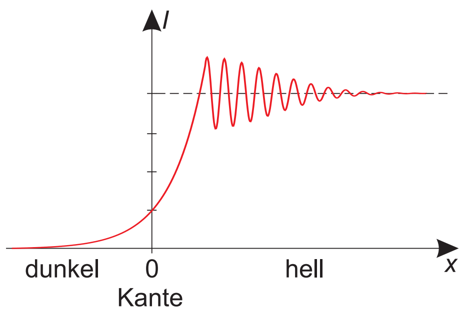
Es war für uns hier sehr viel schwieriger, ein qualitativ hochwertiges Beugungsbild auf dem Schirm zu erzeugen. Dies führen wir auf die relativ starke Verschmutzung der Blendenfassung zurück, die wie auf dem Bild zu erkennen für ausgeprägte Beugungsflecke außerhalb der erwarteten Bereiche sorgte.
Nichtsdestotrotz erkennen wir auch in diesem Beugungsbild die charakteristischen Interferenzringe, deren Position und Intensität ungefähr mit dem Beugungsbild der Kreisöffnung übereinstimmen. Auch hier konnten wir also wieder das Babinetsche Theorem bestätigen.

Aufgabe 2.3.2: Kante

Wir brachten eine Beugungskante in den Strahlverlauf des Lasers und betrachteten auch hier das sich auf dem Schirm einstellende Beugungsbild:



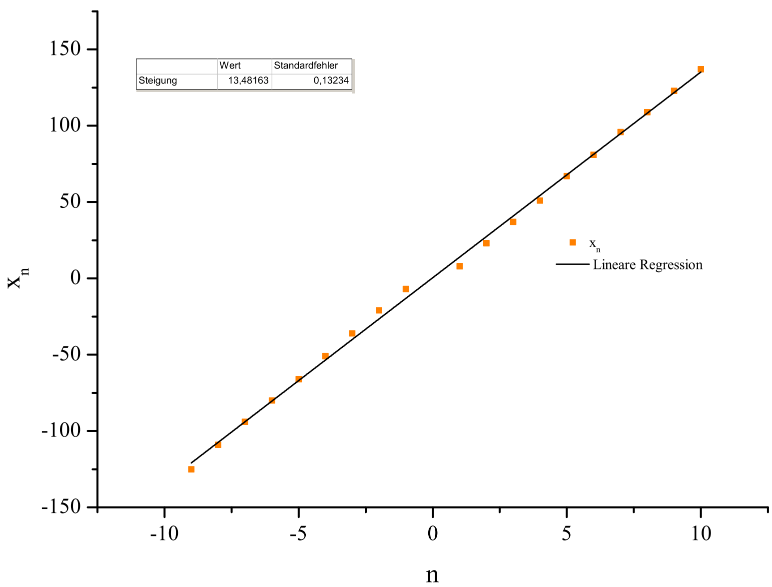
Das Beugungsbild konnte leider nicht gut von unserer Kamera aufgenommen werden, sodass auf dem Foto die sich auf Höhe der Kante einstellenden Intensitätsschwankungen nicht aufgenommen werden konnten, sie waren lediglich mit bloßem Auge zu sehen.
Wir führen dies auf die Tatsache zurück, dass in unserem Versuchsplatz keine eingefasste Beugungskante vorhanden war und wir stattdessen auf die Kante eines verfügbaren Dias zurückgegriffen haben.



Der eigentlich zu erwartende Intensitätsverlauf, der noch einmal oben abgedruckt wurde, stellte sich also nur sehr schwach ein, sodass er selbst mit bloßem Auge kaum beobachtbar war.

Aufgabe 2.4: Durchmesser eines Haares

Nachdem wir in Aufgabe 2.1 die Beugungsfigur eines Einzelspalts quantitativ ausgewertet und so auch die Spaltbreite des Einzelspalts bestimmen konnten und in Aufgabe 2.2 gezeigt haben, dass nach dem Babinetschen Theorem ein komplementäres System aus Steg und Spalt zu demselben Beugungsbild führen, wollen wir nun mit Hilfe dieser Erkenntnisse den Durchmesser eines Haares bestimmen.
Wir fassen dazu das Haar als einen Steg der Breite d auf, welcher ein Beugungsbild erzeugt, das analog zu einem Einzelspalt entsprechender Spaltbreite ist. Wir haben die Maxima der Ordnung n des sich einstellenden Beugungsbilds auf dem Millimeterpapier abgezeichnet und deren Abstände x_{n} vom nullten Hauptmaximum gemessen. Da in dieser Aufgabe keine Fehlerrechnung sinnvoll wäre, haben wir uns auf die Aufnahme einer einzelnen Messreihe beschränkt.
Es wurde nun, wie zuvor, der Abstand der Maxima über der Beugungsordnung aufgetragen. Die aufgenommenen Messwerte sind am Ende des Protokolls angehängt. In Origin ergab sich dabei folgendes Schaubild:



Wie in der Vorbereitung hergeleitet nehmen wir nun die Formel:

$$d = \frac{\left(n + \frac{1}{2}\right) \lambda l}{x_\text{n}} \Leftrightarrow x_\text{n} = \frac{\left(n + \frac{1}{2}\right) \lambda l}{d} = m \cdot n + c$$

Mit der Steigung m aus der Regressionsgeraden erhalten wir so die Dicke d des Haares:

$$m = \frac{\lambda l}{d} \Leftrightarrow d = \frac{\lambda l}{m}$$

Setzen wir die Steigung der Regressionsgeraden mit $m = 13,48163 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{m}$ ein, so erhalten wir:

$$d_\text{beug} \approx 105,96\,\mu\mathrm{m}$$

Wir haben die Dicke des verwendeten Haares außerdem mit einer Mikrometerschraube bestimmt. Dabei ergab sich ein Wert von:

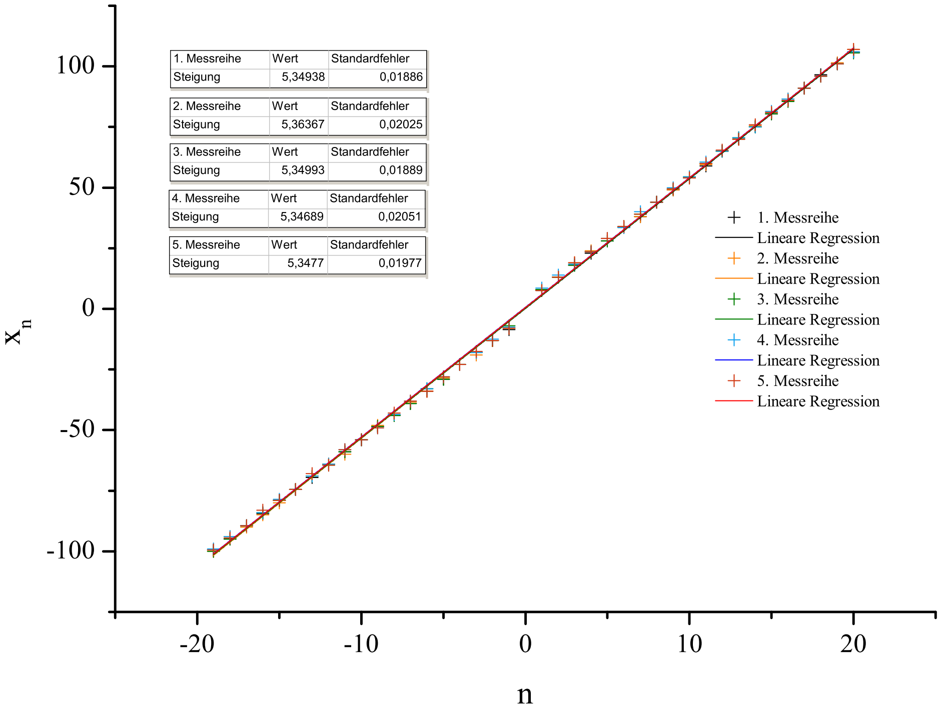
$$d_\text{schr} \approx 78\,\mu\mathrm{m}$$

Die Abweichung von der über das Beugungsbild bestimmten Dicke zur mit der Mikrometerschraube gemessenen beträgt etwa $35,85\%$, die Ergebnisse weichen also nicht unerheblich voneinander ab. Prinzipiell liegt die Dicke des menschlichen Haares in Bereichen zwischen $\approx 40\,\mu\mathrm{m}$ und $\approx 90\,\mu\mathrm{m}$, daher halten wir den über die Mikrometerschraube bestimmten Wert für realistischer.
Es ergeben sich allerdings in den Messungen auch zahlreiche Fehlerquellen, welche die relativ großen Abweichungen hervorrufen könnten. So ist es zunächst einmal möglich, dass wir für die Erzeugung des Beugungsbilds und bei der Messung mit der Schraube nicht exakt dieselbe Stelle des Haares benutzt haben. Haare haben nicht überall exakt dieselbe Dicke, daher könnten sich hier durchaus Abweichungen ergeben.
Zum anderen ist es möglich, dass das Haar bei der Messung mit der Mikrometerschraube komprimiert wurde, sodass der dadurch bestimmte Wert unterhalb der tatsächlichen Haardicke lag.
Nicht zuletzt war auch die Bestimmung der Intensitätsmaxima auf dem Beugungsbild nicht ganz einfach, da das sich einstellende Bild nicht so sauber wie beispielsweise beim Steg in Aufgabe 2.2 war.

Aufgabe 3: Beugung an Mehrfachspalten und Gittern

Aufgabe 3.1: Doppelspalt

Wir wählten einen Doppelspalt der Spaltbreite $d = 0,25\,\mathrm{mm}$ und dem Spaltabstand $b = 0,5\,\mathrm{mm}$. Auf dem Schirm konnten wir das erwartete Beugungsbild erkennen, wie es bereits in der Vorbereitung skizziert wurde. Um zunächst die Spaltbreite zu bestimmen, deckten wir einen der Spalte mit einem Stück Papier ab und fokussierten den Laser auf den anderen Spalt. So konnten wir analog zu Aufgabe 2.1 vorgehen. Nachfolgend sind die Messwerte in einem Schaubild aufgetragen.



Für den Mittelwert der Steigungen ergibt sich:

$$m = (5,352 \ \pm \ 0,021)\,\mathrm{mm}$$

Damit können wir wieder auf die Spaltbreite schließen:

$$d = \frac{\lambda l}{m} = 0,2670\,\mathrm{mm}$$

Systematischer Fehler

$$\begin{aligned}\Delta d &= \sqrt{\left(\frac{\partial d}{\partial \lambda}\,\Delta\lambda\right)^2 + \left(\frac{\partial d}{\partial l}\,\Delta l\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{l}{m}\,\Delta\lambda\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{m}\,\Delta l\right)^2} \\ &= 0,0001\,\mathrm{mm}\end{aligned}$$

Statistischer Fehler

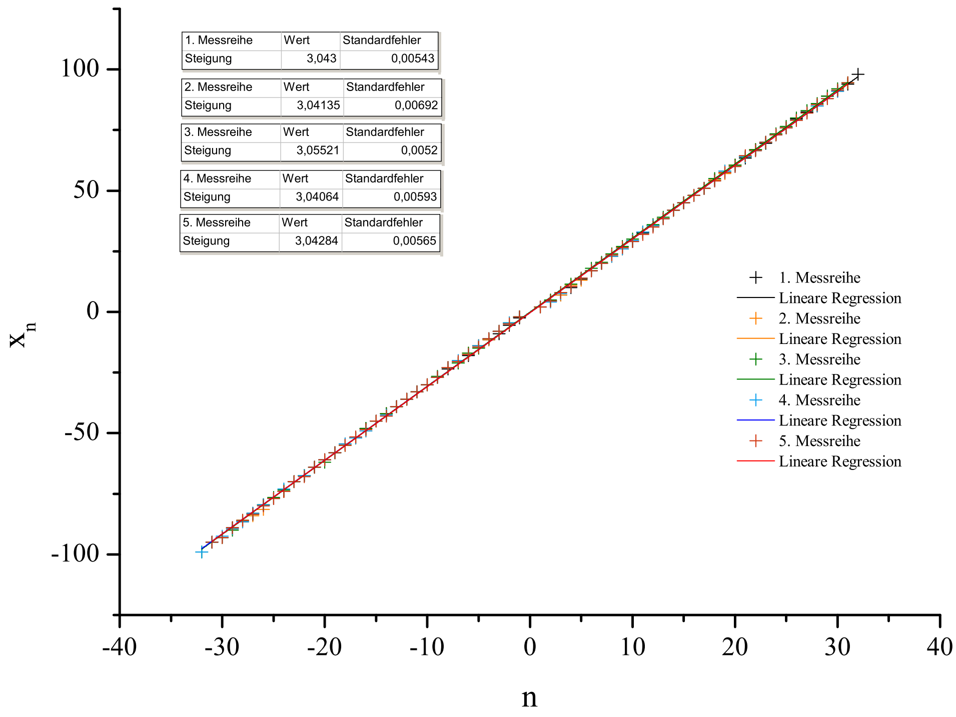
$$\begin{aligned}\sigma_d &= \sqrt{\left(\frac{\partial d}{\partial m}\,\sigma_m\right)^2} \\ &= \frac{\lambda l}{m^2}\,\sigma_m \\ &= 0,0010\,\mathrm{mm}\end{aligned}$$

So ergibt sich die von uns bestimmte Spaltbreite d zu

$$d = (0,2670 \ \pm \ 0,0001 \ \pm \ 0,0010)\,\mathrm{mm}$$

Dieser Wert weicht um 6,8% von der Herstellerangabe ab. Die möglichen Fehler sind wieder dieselben wie bei der Messung des Einfachspalts.

Schließlich sollten wir noch den Spaltabstand b bestimmen. Dazu entfernten wir den Papierstreifen vom zweiten Spalt und richteten den Laser so aus, dass beide Spalte gleichmäßig ausgeleuchtet wurden. Wieder maßen wir die Abstände der Maxima zum Mittelpunkt. Die Messwerte der fünf Messreihen befinden sich am Ende des Protokolls. Durch Auftragen von x_n über n ergibt sich folgendes Schaubild.



Für den Mittelwert der Steigungen ergibt sich hier:

$$m = (3,045 \ \pm \ 0,007)\,\mathrm{mm}$$

Für den Abstand der beiden Spalte haben wir so:

$$b = \frac{\lambda l}{m} = 0,4692\,\mathrm{mm}$$

Systematischer Fehler

$$\begin{aligned}\Delta b &= \sqrt{\left(\frac{\partial b}{\partial \lambda}\,\Delta\lambda\right)^2 + \left(\frac{\partial b}{\partial l}\,\Delta l\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{l}{m}\,\Delta\lambda\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{m}\,\Delta l\right)^2} \\ &= 0,0002\,\mathrm{mm}\end{aligned}$$

Statistischer Fehler

$$\sigma_b = \sqrt{\left(\frac{\partial b}{\partial m}\,\sigma_m\right)^2}$$
$$= \frac{\lambda l}{m^2}\,\sigma_m$$
$$= 0,0011\,\mathrm{mm}$$

So ergibt sich die von uns bestimmte Spaltbreite b zu

$$b = (0,4692 \;\pm\; 0,0002 \;\pm\; 0,0011)\,\mathrm{mm}$$

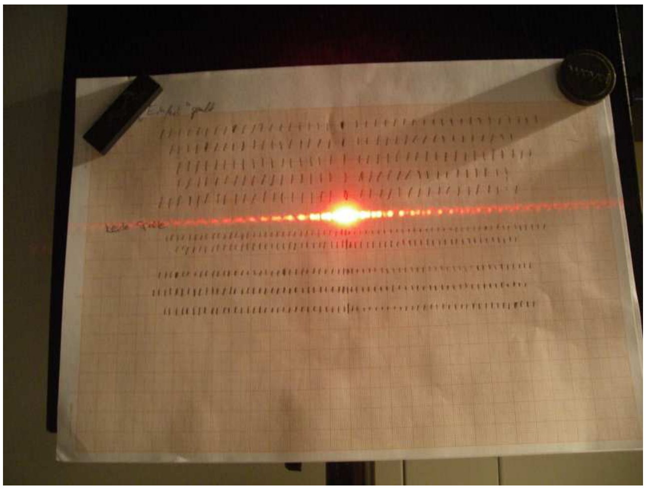
Damit haben wir eine relative Abweichung von -6,2% von der Angabe des Herstellers. Auch hier führen wir die Abweichung auf das relativ ungenaue Abtragen der Maxima zurück.

Aufgabe 3.2: Vergleich Doppelspalt und Dreifachspalt

Nachdem wir in Aufgabe 3.1 das Beugungsbild eines Doppelspalts mit dem Spaltabstand $b = 0,50\,\mathrm{mm}$ untersucht haben, betrachten wir nun qualitativ die Beugungsbilder des zweiten, vorhandenen Doppelspalts sowie eines Dreifachspalts.

Aufgabe 3.2.1: Zweiter Doppelspalt

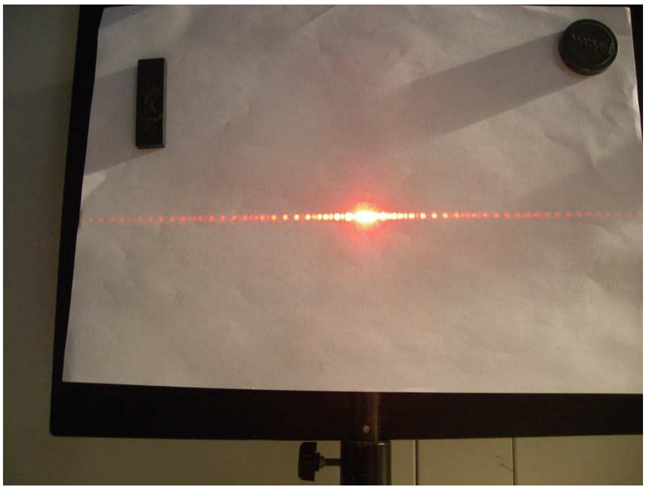
Der zweite Doppelspalt hatte den Spaltabstand $b = 0,75\,\mathrm{mm}$ bei ansonsten gleicher Spaltbreite d. Auf dem Schirm fanden wir dann folgendes Bild vor:



In der Vorbereitung haben wir vorausgesagt, dass sich bei größerem Spaltabstand kleinere Abstände der Maxima ergeben werden. Dies konnten wir hier deutlich bestätigen. Leider war auch hier die Aufnahme mit der Kamera nicht ideal, mit bloßem Auge lies sich aber gut erkennen, dass die Maxima nun näher aneinander lagen.
Da sich die Spaltbreite im Vergleich zu Aufgabe 3.1 nicht verändert hat, sagten wir in der Vorbereitung ebenfalls voraus, dass sich die Einhüllende nicht wesentlich verändern dürfte. Auch dies konnten wir bestätigen, womit sich unsere Voraussagen alle erfüllt haben.

Aufgabe 3.2.2: Dreifachspalt

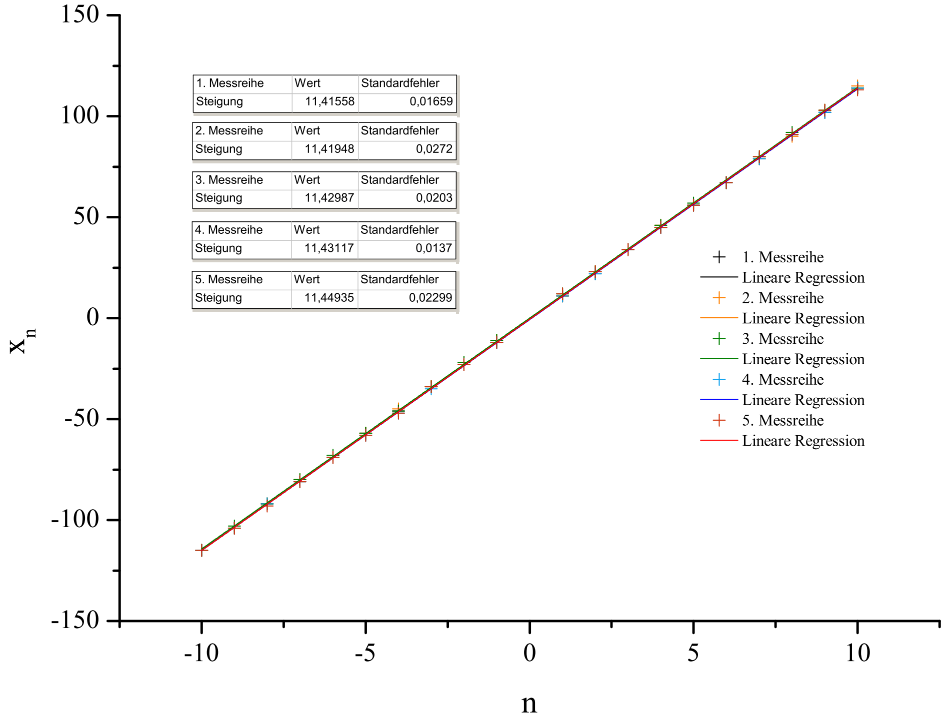
Wir haben nun den Doppelspalt mit einem Dreifachspalt ersetzt, dessen Spaltabstände und -breiten mit denen des Doppelspalts aus Aufgabe 3.2.1 übereinstimmen. Als Beugungsbild fanden wir vor:



Wir haben vorhergesagt, dass die Einhüllende einzig von der Spaltbreite abhängt, nicht aber von der Anzahl der Spalte. Da wir die Spaltbreite unverändert ließen, müsste sich so auch dieselbe Einhüllende ergeben. Außerdem haben wir vorausgesagt, dass sich nun noch mehr Maxima vorfinden müssten, da nun drei anstatt zwei Teilstrahlen miteinander interferieren.
Diese Beobachtungen ließen sich von uns auch hier, vor allem im Vergleich mit den Ergebnissen aus Aufgabe 3.1 auf dem Millimeterpapier, gut bestätigen.

Aufgabe 3.3: Strichgitter

Nachdem wir den Doppelspalt und einen Dreifachspalt untersucht haben, sollten wir uns noch mit einem Strichgitter beschäftigen. Wir wählten ein Gitter mit 100 Spalten pro cm. Auf dem Schirm konnten wir nun sehr scharfe und helle Maxima ausmachen, von welchen wir wieder den Abstand zur Mittelachse maßen. Analog zu den vorigen Aufgaben können wir über die Steigung der Regressionsgeraden auf die Gitterkonstante g schließen. Dazu wird zunächst wieder x_n über n der fünf Messreihen aufgetragen.



Als Mittelwert der Steigung erhalten wir:

$$m = (11,429 \ \pm \ 0,027)\,\mathrm{mm}$$

Für den Abstand der Spalte ergibt sich so:

$$g = \frac{\lambda l}{m} = 0,1250\,\mathrm{mm}$$

Systematischer Fehler

$$\begin{aligned}\Delta g &= \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial \lambda}\,\Delta\lambda\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial l}\,\Delta l\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{l}{m}\,\Delta\lambda\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{m}\,\Delta l\right)^2} \\ &= 0,0001\,\mathrm{mm}\end{aligned}$$

Statistischer Fehler

$$\begin{aligned}\sigma_g &= \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial m}\,\sigma_m\right)^2} \\ &= \frac{\lambda l}{m^2}\,\sigma_m \\ &= 0,0003\,\mathrm{mm}\end{aligned}$$

So ergibt sich die von uns bestimmte Spaltbreite b zu

$$g = (0,1250 \ \pm \ 0,0001 \ \pm \ 0,0003)\,\mathrm{mm}$$

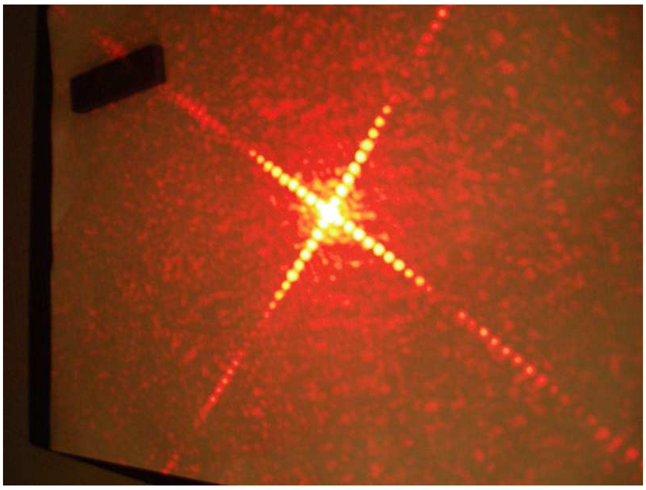
Das verwendete Gitter war mit $\frac{1}{g} = 10\,\frac{1}{\mathrm{mm}}$ angegeben. Damit besitzt unser gemessener Wert eine Abweichung von 25%. Da der Herstellerwert trotz unserer angenommenen Fehler nicht im gemessenen Bereich liegt, liegt der Verdacht nahe, dass die Angabe auf dem Gitter nicht korrekt ist.

Aufgabe 3.4: Kreuz- und Wabengitter

Als abschließende Teilaufgabe sollten wir noch andere Gitterformen sowie deren typische Beugungsbilder betrachten. Es standen uns dabei ein Kreuzgitter sowie zwei verschiedene Wabengitter zur Verfügung.

Aufgabe 3.4.1: Kreuzgitter

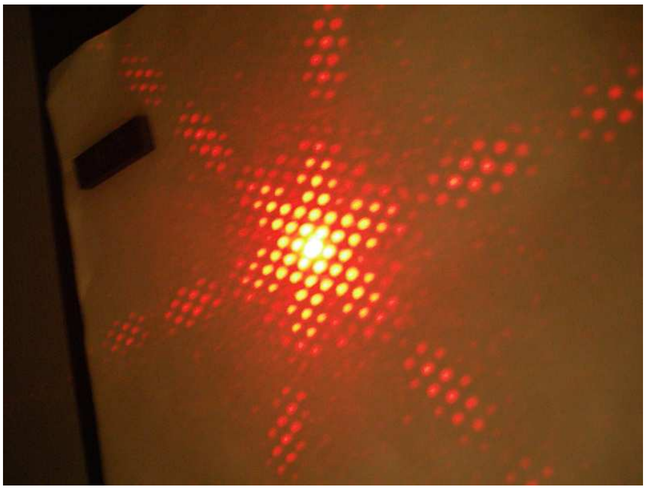
Da man sich das Kreuzgitter aus zwei orthogonalen Spalten zusammengesetzt vorstellen kann, erwarteten wir, dass sich hier als Beugungsbild ebenfalls eine typische Überlagerung der Beugungsbilder der Einzelspalte ergeben wird. Das von uns aufgenommene Beugungsbild ist nachfolgend dargestellt.

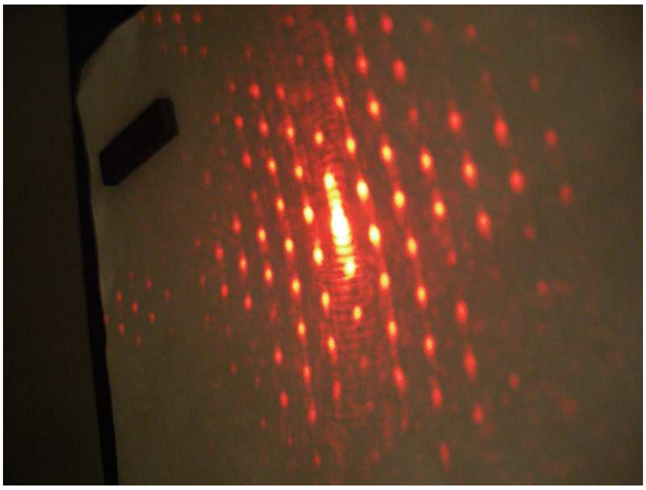


Die vielen Artefakte auf dem Bild stammen größtenteils von Verunreinigungen des Kreuzgitters. Wie man schön sieht, haben sich unsere Vorhersagen bestätigt.

Aufgabe 3.4.2: Wabengitter

Die Wabengitter stellten anspruchsvollere Blendenstrukturen dar. Auch hier konnte man eine Überlagerung diverser Beugungsstrukturen erwarten. Nachfolgend sind die Beugungsbilder der zwei verschiedenen, vorhandenen Wabengitter dargestellt.





Auch hier bestätigte sich die Vermutung, obgleich die einzelnen Bestandteile des Beugungsbilds nicht mehr trivial differenzierbar sind.

Aufgabe 4: Abbildung nicht selbstleuchtender Gegenstände

In dieser Aufgabe Abbesche Abbildungstheorie bestätigen. Ziel war die Abbildung eines Kreuzgitters in Abhängigkeit von der Ordnung der ausgeblendeten Beugungsstrahlen. Wir haben dazu das Kreuzgitter geeignet mit einer Linse der Brennweite $f = 150\,\mathrm{mm}$ abgebildet und über einen Spiegel an die Wand geworfen. In Absprache mit der Betreuerin haben wir eine Irisblende in der bildseitigen Brennebene positioniert, die es uns ermöglichte, Beugungsordnungen über der Nullten auszublenden.
Der uns so vorliegende Versuchsaufbau entspricht formal einer Fouriertransformation. Durch die Beugung transformieren wir das Bild des Gitters zunächst in das entsprechende Beugungsbild. Da wir dieses aber mit einer Linse in geeignetem Abstand erneut abbilden, findet so eine Rücktransformation auf das Muster des Gitters statt. So erhalten wir ein Abbild des verwendeten Gitters.
Wir haben zu Beginn die Irisblende maximal geöffnet, um ein gutes Abbild des Kreuzgitters zu erhalten. Es waren schön sowohl horizontale wie auch vertikale Striche zu sehen. Wir haben dann die Irisblende

kontinuierlich geschlossen und bemerkt, wie das Abbild des Kreuzgitters stets unschärfer wurde. Dabei fiel uns besonders auf, dass vor allem die horizontalen Streifen immer verwaschener wurden, wohingegen die vertikalen noch halbwegs deutlich erkennbar blieben.
Als wir die Iris maximal verschlossen hatten, waren nur noch sehr wenige Ordnungen vorhanden. Das Bild des Kreuzgitters war sehr unscharf, einzelne Linien waren kaum noch auszumachen.
Wir konnten somit die Theorie bestätigen, dass zur deutlichen Abbildung eines Objekts stets mindestens eine Beugungsordnung vorhanden sein muss. Das bloße Vorhandensein der nullten Beugungsordnung reicht zwar zur Beleuchtung, nicht aber zur Detailierung eines Objekts.

Aufgabe 5: Holographie

Als abschließende Demonstrationsaufgabe haben wir zwei verschiedene Hologramme rekonstruiert. Wir haben die Hologramme dabei jeweils geeignet in den Strahlengang des Lasers gebracht und dessen Lichtstrahl zunächst großzügig aufgeweitet, um das gesamte Hologramm gleichmäßig zu beleuchten. Wir machten uns dann an die Beobachtung des reellen sowie virtuellen Bildes.
Das virtuelle Bild war zu sehen, als wir frontal auf das Hologramm, gegen den einfallenden, aufgeweiteten Strahl, geblickt haben. Zu sehen war der zweizeilige Schriftzug „Laser Focus“, der bei Bewegung des Kopfes dreidimensional erschien. Das reelle Bild war ebenfalls zu erkennen, wenn auch schwächer und etwas schlechter. Wir konnten es beobachten, indem wir das Hologramm von der dem Laser zugewandten Seite aus beobachteten.
Wir haben anschließend die Linse aus dem Strahlengang genommen und damit nur kleine Bereiche des Hologramms beleuchtet. Mit einem Schirm haben wir dann auf der dem Laser abgewandten Seite des Hologramms das reelle Bild aufgefangen und konnten so eindrucksvoll zeigen, dass auch kleine Teile des Hologramms die vollständige Information über das ganze Bild enthalten. Es war außerdem zu sehen, dass sich nun durch den konzentrierten Laserstrahl das reelle Bild sehr viel schärfer zeigte als zuvor.
Das zweite Hologramm zeigte ein Automobil. Wir konnten an ihm dieselben Beobachtungen wie zuvor machen. Unsere Erwartungen haben sich also auch hier erfüllt.

Messwerttabellen

Messwerttabelle: Aufgabe 2.1, Einfachspalt $d = 0,3\,\mathrm{mm}$

	1. Messreihe	2. Messreihe	3. Messreihe	4. Messreihe	5. Messreihe
Ordnung n	x_n in mm	x_n in mm	x_n in mm	x_n in mm	x_n in mm
-13		-75	-75	-75	
-12		-70	-69	-70	-69
-11		-64	-63	-65	-63
-10	-58	-58	-58	-59	-59
-9	-53	-53	-52	-53	-52
-8	-47	-48	-47	-48	-47
-7	-42	-42	-41	-42	-42
-6	-37	-37	-36	-37	-36
-5	-30	-31	-30	-32	-31
-4	-25	-26	-25	-26	-25
-3	-19	-20	-19	-21	-19
-2	-14	-14	-14	-15	-14
-1	-8	-9	-9	-9	-8
1	9	8	9	8	9
2	14	13	15	13	14
3	20	19	20	19	19
4	25	24	25	24	25
5	31	30	31	30	30
6	36	35	37	36	36
7	42	41	43	41	42
8	48	47	48	47	47
9	54	53	53	52	53
10	59	58	59	57	59
11	64	64	65	64	64
12	70	70	71	69	70
13		76	76	75	75

Messwerttabelle: Aufgabe 2.1, Einfachspalt $d = 0,2\,\mathrm{mm}$

	1. Messreihe	2. Messreihe	3. Messreihe	4. Messreihe	5. Messreihe
Ordnung n	x_n in mm	x_n in mm	x_n in mm	x_n in mm	x_n in mm
-10	-75				
-9	-60	-58	-59	-59	-58
-8	-53	-52	-53	-53	-52
-7	-47	-46	-46	-46	-45
-6	-40	-39	-39	-40	-39
-5	-34	-34	-33	-34	-34
-4	-29	-27	-27	-27	-27
-3	-22	-22	-22	-22	-21
-2	-16	-17	-15	-15	-15
-1	-10	-9	-9	-10	-9
0	0	0	0	0	0
1	9	10	10	10	10
2	15	16	16	17	17
3	22	22	23	22	23
4	27	28	28	28	28
5	33	33	34	34	35
6	39	39	40	40	40
7	45	46	47	46	47
8	52	52	53	53	53
9	58	58	59	58	59
10	64	65	65	64	66
11	71	71	71		71

Messwerttabelle: Aufgabe 3.1, Doppelspalt Spaltbreite

	1. Messreihe	2. Messreihe	3. Messreihe	4. Messreihe	5. Messreihe
Ordnung n	x_n in mm	x_n in mm	x_n in mm	x_n in mm	x_n in mm
-20					
-19	-100	-100	-100	-99	-100
-18	-95	-94	-95	-94	-95
-17	-90	-90	-90	-90	-90
-16	-85	-85	-84	-84	-83
-15	-79	-80	-79	-79	-79
-14	-75	-75	-75	-75	-75
-13	-70	-69	-69	-69	-68
-12	-64	-64	-65	-64	-65
-11	-59	-60	-59	-58	-58
-10	-54	-54	-54	-54	-54
-9	-49	-48	-49	-49	-49
-8	-44	-44	-44	-44	-43
-7	-39	-39	-39	-38	-38
-6	-34	-34	-33	-33	-34
-5	-29	-29	-29	-28	-28
-4	-23	-23	-23	-23	-23
-3	-18	-19	-18	-18	-18
-2	-13	-13	-13	-13	-13
-1	-9	-8	-7	-8	-8
0	0	0	0	0	0
1	8	8	8	9	8
2	13	13	13	14	13
3	18	19	18	19	19
4	23	24	24	24	24
5	28	29	28	29	29
6	34	34	34	34	34
7	38	38	39	40	39
8	44	44	44	44	44
9	49	49	50	50	50
10	54	54	55	55	54
11	59	60	60	61	60
12	65	65	65	65	66
13	70	70	71	71	70
14	75	76	75	75	76
15	81	81	81	82	81
16	86	87	86	87	86
17	91	91	91	91	91
18	97	96	96	96	96
19	101	102	101	101	101
20	106	107	106	106	107

Messwerttabelle: Aufgabe 3.1, Doppelspalt Spaltabstand

	1. Messreihe	2. Messreihe	3. Messreihe	4. Messreihe	5. Messreihe
Ordnung n	x_n in mm	x_n in mm	x_n in mm	x_n in mm	x_n in mm
-32			-99	-99	
-31	-95		-95	-95	-95
-30	-93		-93	-92,5	-93
-29	-89	-89,5	-90	-89,5	-89
-28	-86,5	-86	-86	-86,5	-86
-27	-83	-84	-83,5	-83	-83,5
-26	-79,5	-81,5	-79,5	-79,5	-80
-25	-77	-77	-76,5	-77	-77
-24	-74	-74	-73,5	-73	-74
-23	-70	-70	-70	-70	-70
-22	-67,5	-67,5	-67,5	-67,5	-68
-21	-64	-64	-64	-64	-64
-20	-61	-61	-62	-61	-61
-19	-58	-58	-58	-58	-58
-18	-54,5	-55	-55	-54,5	-55
-17	-52	-52	-52	-52	-51,5
-16	-48	-49	-48	-49	-48,5
-15	-45	-45	-45	-45	-45
-14	-42	-42	-42	-42,5	-43
-13	-39	-39	-39	-39	-39
-12	-36	-36	-36	-36	-36
-11	-33	-33	-33	-33	-33
-10	-30	-30	-30	-30	-30
-9	-27	-27	-26,5	-27	-27
-8	-23,5	-23	-23	-23	-23
-7	-21	-20,5	-21	-20	-20,5
-6	-18	-17	-17	-17,5	-17,5
-5	-14	-14	-15	-14	-14,5
-4	-11,5	-11,5	-11	-11	-11
-3	-9	-8	-8	-8	-8
-2	-5,5	-5	-4,5	-4,5	-5
-1	-2,5	-2	-2	-2	-2
0	0	0	0	0	0
1	2	2	2	2	2
2	4,5	4,5	5	4	4,5
3	7	7	8	7,5	8
4	10	11	11,5	10,5	10,5
5	13,5	13	14	14	14
6	17	17	18	17	17
7	20	20	20,5	20	20
8	23	23	24	23	23,5
9	26	26	27	26	26,5
10	29	29,5	30	29,5	29
11	32,5	33	33	33	32
12	35,5	35,5	36	35,5	35
13	38,5	38,5	39	38,5	38,5
14	42	42	42	42	42

Messwerttabelle: Aufgabe 2.4, Haar

Ordnung n	x_n in mm
-9	-125
-8	-109
-7	-94
-6	-80
-5	-66
-4	-51
-3	-36
-2	-21
-1	-7
0	
1	8
2	23
3	37
4	51
5	67
6	81
7	96
8	109
9	123
10	137

Messwerttabelle: Aufgabe 3.3, Gitter

	1. Messreihe	2. Messreihe	3. Messreihe	4. Messreihe	5. Messreihe
Ordnung n	x_n in mm	x_n in mm	x_n in mm	x_n in mm	x_n in mm
-10	-115	-115	-115	-115	-115
-9	-104	-104	-103	-104	-104
-8	-92	-92	-92	-92	-93
-7	-81	-80	-80	-81	-81
-6	-69	-69	-68	-69	-69
-5	-57	-57	-57	-58	-58
-4	-46	-45	-46	-47	-47
-3	-34	-34	-34	-35	-34
-2	-23	-22	-22	-23	-23
-1	-12	-11	-11	-12	-12
0	0	0	0	0	0
1	11	11	12	11	12
2	22	23	23	22	23
3	34	34	34	34	34
4	45	46	46	45	45
5	56	56	57	56	56
6	67	67	67	67	67
7	79	79	80	79	80
8	91	90	92	91	91
9	102	103	103	102	103
10	114	115	114	114	113