Versuche P2-16,17,18

Laser A
Versuchsauswertung

Thomas Keck und Marco A. Harrendorf, Gruppe: Mo-3
Karlsruhe Institut für Technologie, Bachelor Physik

Versuchstag: 18.04.2011

1 Aufgabe 1: Brewsterwinkel

1.1 Demonstration der Brewsterfenster

Die Demonstration der Brewsterfenster, wie in der Aufgabenstellung beschrieben, wurde vom Betreuer durchgeführt. Der Effekt war nicht vollständig ersichtlich. Die Brewsterfenster an den Enden des Entladungsrohres sorgen jedoch für eine einheitliche lineare Polarisation des Laserstrahls bei jeder Zündung. Eine Glasplatte im Strahlengang zwischen den Resonatoren verändert nicht nur die optische Länge, was ein Nachjustieren erforderlich macht, sondern schlägt sich in der Theorie auch als Abnahme in der Lichtintensität des Lasers wieder. Da bei jedem Durchlauf Photonen aus dem Strahlengang des Resonators herausreflektiert werden, falls die Glasplatte nicht exakt unter dem Brewsterwinkel in den Strahlengang eingeführt wird.

1.2 Messung des Brewsterwinkels

Zur Messung des Brewsterwinkels kamen zwei Methoden, wie bereits in der Vorbereitung erläutert, zum Einsatz:

1.2.1 Methode der minimalen Reflexion

Die **minimale Reflexion** konnte mithilfe der Glasplatte bei einem Winkel $\Theta_{Brewster}$ gemessen werden. Die Reflexion an der Zimmerdecke war gut zu beobachten, sodass der Fehler als klein, im Vergleich zur nachfolgenden Messmethode, angesehen werden kann.

$$\Theta_{Brewster} = 57° \pm 2° \tag{1}$$

Dieser Wert stimmt sehr gut mit dem Literaturwert in Luft von $\Theta_{Literatur} = 57,17°$ überein.

1.2.2 Methode der maximalen Transmission

Die **maximale Transmission** wurde mit einer Photodiode, welche die Lichtintensität I in Form einer über der Diode abfallenden Spannung $U \sim I$ misst, bestimmt. Das Messinstrument erwies sich während des Versuches als extrem ungenau. Die gemessenen Werte liegen im Bereich zwischen $85\mathrm{mV}$ und $42\mathrm{mV}$, bei konstanter Messanordnung gab es schwankende Werte von $\pm 10\mathrm{mV}$ an der Messanzeige. Das Verfahren ist nicht brauchbar aus folgenden Gründen:

1. Nur etwa 4% des Lichts werden überhaupt durch die Reflexion an der Glasplatte aus dem Strahl herausreflektiert. Die Veränderung der Lichtintensität des transmitierten Lichtes ist daher minimal.

2. Die Schwankung des Messgeräts bei konstanter Messanordnung liegt in der Größenordnung des zu messenden Effekts.

3. Eine nicht komplett fettfreie Glasplatte, welches der Platte insgesamt eine inhomogenen Oberfläche verleiht, führt zu einer systematischen Unsicherheit, denn durch die Drehung im Laserstrahl verändert sich die bestrahlte Oberfläche in Abhängigkeit zum Winkel.

4. Schatten und Lichtreflexionen können an der Photodiode auftreten, verursacht durch die große Anzahl an Experimentatoren.

Der Vollständigkeit halber sind die rohen Messwerte hier noch angegeben:

Grad$\Theta°$	Spannung UmV $\sim I$
0	85
10	82
20	80
30	79
40	60
50	60
52	58
54	58
56	57
58	57
60	57
70	53
80	42

Tabelle 1: Messdaten der Photodiode: Lichtintensität in Abhängigkeit vom Winkel der Glasplatte zum Strahl

Zu erwarten war ein Maximum der Transmission, wenn die Glasplatte unter $\Theta_{Brewster}$ in den Strahlengang gehalten wird. Stattdessen erkennt man bereits ohne weitere Auswertung eine monoton fallende Kurve.

1.2.3 Fazit

Die sehr ungenaue Methode der maximalen Transmission wird auch bei sorgfältiger Durchführung nicht an die Genauigkeit der minimalen Reflexion heranreichen. Das Messresultat der minimalen Reflexion überrascht hingegen mit einer sehr guten Übereinstimmung mit dem Literaturwert.

1.3 Berechnung des Brechungsindexes von Glas

Zur Berechnung verwenden wir den Wert nach der ersten Messmethode „minimale Reflexion". Der Brechungsindex von Luft wird mit 1 approximiert. Der Fehler ist die Differenz zwischen maximalem und minimalem Brechungsindex bei gegebenem maximalen und minimalen Brewsterwinkel. Mit der in Vorbereitung erläuterten Formel (1) erhalten wir den Brechungsindex von Luft:

$$n_1 \cdot \tan\left(\Theta_{Brewster}\right) = n_2 = 1.53 \pm 0.12 \tag{2}$$

Dieser Wert entspricht im Rahmen der Unsicherheiten dem bekannten Wert eines Objektträgers für Mikroskope, welche auf $n = 1.5255$ [ISO 8255-1:1986 (E)] genormt sind.

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

2.1 Bestimmung der Breite eines Spaltes

2.1.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Zur Bestimmung der Spaltbreite b wurde ein Spalt mit Breite $0.3\ mm$ in ausreichender Entfernung vom Laser (Polytec PL-610P He-Ne-Laser) aufgebaut, sodass der Spalt vollständig ausgeleuchtet war. Der Abstand zwischen Spalt und Schirm betrug dann $L\ =\ 2.29\ m$, wobei die Unsicherheit dieses Abstands in Folge der Positionierung auf $\Delta L\ =\ 0.01\ m$ geschätzt wird.
Am Schirm wurden auf einem Millimeterpapier die Minima und Maxima eingezeichnet sowie die Position des Nullten Maximums markiert. Der Abstand des n-ten Minimums vom Mittelpunkt des Nullten Maximums wird nachfolgend mit dem Abstand x_n bezeichnet. Die Unsicherheit dieser Abstandsmessung wird zu $\Delta x = 1\ mm$ angenommen, da zum einen beim Einzeichnen Messunsicherheiten als auch beim späteren Ausmessen mit dem Geodreieck in dieser Größenordnung auftreten können.

2.1.2 Auswertung

Zur Bestimmung der Spaltbreite b können sowohl die Abstände der Minima als auch Maxima vom Nullten Maximum verwendet werden. Da es bei der Beugung am Einzelspalt allerdings leichter ist, die Minima zu erkennen, wird zur Bestimmung der Spaltbreite b der Abstand der Minima zum Nullten Maximum x benutzt.
Die Formel zur Bestimmung der Spaltbreite b wurde bereits in der Vorbereitung hergeleitet:

$$b\ =\ \frac{n\ \cdot\ L\ \cdot\ \lambda}{x_n}$$

Hierbei finden folgende Größen Anwendung:

n:	Nummer des Minimums
L:	Abstand zwischen Spalt und Schirm, $L\ =\ 2.29\ m$
λ:	Wellenlänge des Lasers, $\lambda\ =\ 632.8\ nm$
x_n:	Abstand des n-ten Minimums zum Mittelpunkt des Nullten Maximums

Die Spaltbreite b und deren statistische Unsicherheit Δb_{stat} lässt sich durch ein Umformen der oben genannten Formel zu

$$b\ \cdot\ x_n\ =\ n\ \cdot\ L\ \cdot \lambda$$

direkt über die Steigung der Regressionsgerade ($y\ =\ a\ *\ x$) im Datenanalyse-Paket ROOT bestimmen.
Die Abbildung 1 zeigt die Regressionsgerade und die einzelnen Messwerte, währenddessen sind

in der Tabelle 2 die gemessenen und berechneten Werte aufgeführt.
Für die Spaltbreite b ergibt sich folgender Wert:

$$b \;=\; 0.304009\,mm$$

Für die statistische Unsicherheit der Spaltbreite Δb_{stat} erhält man durch die Regression:

$$\Delta b_{stat} \;=\; 0.004656\,mm$$

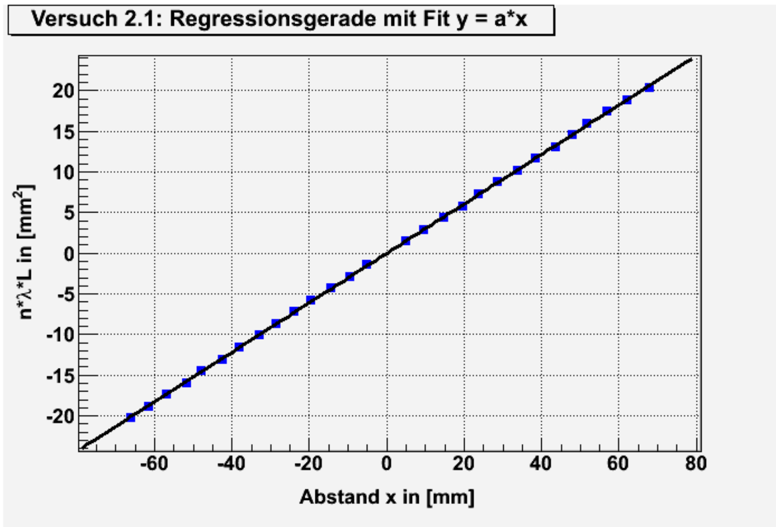


Abbildung 1: Regressionsgerade für die Bestimmung der Spaltbreite b und deren statistischer Unsicherheit Δb_{stat}

2.1.3 Berechnung der systematischen Unsicherheit

Zur Berechnung der systematischen Unsicherheit der Spaltbreite Δb_{sys} wurde zunächst unter Verwendung der Gaußschen Fehlerfortpflanzung die systematische Unsicherheit für jeden einzelnen Messwert $\Delta b_{n,sys}$ über nachfolgende Formel bestimmt:

$$\begin{aligned}\Delta b_{n,sys} &= \sqrt{\left(\frac{\partial b}{\partial L}\right)^2 \cdot \Delta L^2 + \left(\frac{\partial b}{\partial x_n}\right)^2 \cdot \Delta x_n^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{\lambda}{x_n}\right)^2 \cdot \Delta L^2 + \left(\frac{\lambda \cdot L}{x_n^2}\right)^2 \cdot \Delta x_n^2}\end{aligned}$$

Die berechneten systematischen Unsicherheiten $\Delta b_{n,sys}$ sind für jeden einzelnen Messwert in der Tabelle 2 ebenfalls aufgeführt.

Die systematische Unsicherheit der Spaltbreite Δb_{sys} wurde dann über Mittelwertbildung aus den einzelnen systematischen Unsicherheiten $\Delta b_{n,sys}$ berechnet:

$$\Delta b_{sys} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\Delta b_{j,sys}$$
$$\Delta b_{sys} = 0.006742\,mm$$

n	x_n	$n \cdot \lambda \cdot L$	b_n	$\Delta b_{n,sys}$
-1	-5 mm	-1.44911 mm^2	0.289822 mm	0.0579783 mm
-2	-9.5 mm	-2.89822 mm^2	0.305076 mm	0.0160705 mm
-3	-14.5 mm	-4.34734 mm^2	0.299816 mm	0.00690613 mm
-4	-19.5 mm	-5.79645 mm^2	0.297254 mm	0.00382474 mm
-5	-24 mm	-7.24556 mm^2	0.301898 mm	0.0025296 mm
-6	-28.5 mm	-8.69467 mm^2	0.305076 mm	0.00179783 mm
-7	-32.8 mm	-10.1438 mm^2	0.309262 mm	0.00136071 mm
-8	-38 mm	-11.5929 mm^2	0.305076 mm	0.00101726 mm
-9	-42.5 mm	-13.042 mm^2	0.306871 mm	0.000815976 mm
-10	-47.8 mm	-14.4911 mm^2	0.303162 mm	0.000647898 mm
-11	-51.5 mm	-15.9402 mm^2	0.309519 mm	0.000560017 mm
-12	-56.9 mm	-17.3893 mm^2	0.305612 mm	0.000461197 mm
-13	-61.5 mm	-18.8385 mm^2	0.306316 mm	0.000396711 mm
-14	-66.2 mm	-20.2876 mm^2	0.306459 mm	0.000344203 mm
1	5 mm	1.44911 mm^2	0.289822 mm	0.0579783 mm
2	9.5 mm	2.89822 mm^2	0.305076 mm	0.0160705 mm
3	14.9 mm	4.34734 mm^2	0.291768 mm	0.00654104 mm
4	19.7 mm	5.79645 mm^2	0.294236 mm	0.00374775 mm
5	23.9 mm	7.24556 mm^2	0.303162 mm	0.0025507 mm
6	28.8 mm	8.69467 mm^2	0.301898 mm	0.00176086 mm
7	34 mm	10.1438 mm^2	0.298347 mm	0.0012673 mm
8	38.5 mm	11.5929 mm^2	0.301114 mm	0.000991364 mm
9	43.6 mm	13.042 mm^2	0.299129 mm	0.000775999 mm
10	47.9 mm	14.4911 mm^2	0.302529 mm	0.000645252 mm
11	51.8 mm	15.9402 mm^2	0.307726 mm	0.000553705 mm
12	56.9 mm	17.3893 mm^2	0.305612 mm	0.000461197 mm
13	62.3 mm	18.8385 mm^2	0.302383 mm	0.000386928 mm
14	67.8 mm	20.2876 mm^2	0.299227 mm	0.000328767 mm

Tabelle 2: Gemessene und berechnete Werte für die Bestimmung der Spaltbreite b in Aufgabe 2.1: Negative n-Werte bezeichnen Minima links vom Nullten Maximum, Positive n-Werte Minima rechts davon

2.1.4 Fazit

Für die Spaltbreite b sowie deren systematischer Unsicherheit Δb_{sys} und deren statistischer Unsicherheit Δb_{stat} erhält man also:

$$(b \pm \Delta b_{sys} \pm \Delta b_{stat}) = (0.304009 \pm 0.006742 \pm 0.004656)\, mm$$

Das Messergebnis stimmt folglich im Rahmen der Unsicherheiten mit der angegebenen Spaltbreite ($b = 0.3\, mm$) überein.

2.2 Vergleich der Beugungsfigur eines Steges mit einem Spalt

2.2.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Für den Vergleich der Beugungsfigur eines Steges mit einem Spalt wurde der gleiche Versuchsaufbau wie in Aufgabe 2.1 gewählt, allerdings wurde statt des Spalts mit Spaltbreite $b = 0.3\, mm$ ein Steg mit Breite $b = 0.3\, mm$ benutzt.

2.2.2 Auswertung

Ein Vergleich der für den Steg auf dem Millimeterpapier (siehe Anhang) eingezeichneten Maxima und Minima zeigt, dass die Beugungsfiguren nahezu gleich sind.
Geringfügige Abweichungen sind zum einen auf Fertigungstoleranzen und das mangelnde zeichnerische Geschick des Protokollanten zurückzuführen. Allerdings ist die Intensität der Beugungsfigur beim Steg deutlich geringer als beim Spalt, weswegen auch eine geringe maximale Ordnung von Minima und Maxima aufgezeichnet werden konnte.

2.3 Beugungsbilder einer Kreisöffnung, einer gleichgroßen Kreisscheibe sowie einer Kante

2.3.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

In ausreichendem Abstand vom Laser (Polytec PL-610P He-Ne-Laser), damit der Strahl genügend aufgeweitet war, wurden nacheinander eine Kreisöffnung (1 mm), eine Kreisblende (ebenfalls 1 mm) sowie eine Beugungskante eingebracht. Anschließend wurde die jeweilige Beugungsfigur auf einem 2.29 Meter entfernten Schirm betrachtet.

2.3.2 Auswertung

Im Beugungsbild der Kreisöffnung waren – wie in der Vorbereitung vorhergesagt – kreisförmige Interferenzmuster sehr gut zu erkennen, wie die Abbildung 2 zeigt.
Im Vergleich dazu wies das Beugungsbild der Kreisblende weniger symmetrische Interferenzmuster auf, wie die Abbildung 3 deutlich zu machen versucht. Der in der Vorbereitung bereits angesprochene Poissonsche Fleck war jedoch erkennbar.
Wenn man die Beugungsfiguren von beiden Einbauten vergleicht, wären nach dem Babinetschen Theorem nahezu gleiche Interferenzmuster zu erwarten. Allerdings zeigt die Auswertung der auf

Millimeterpapier (siehe Anhang) eingezeichneten Maxima und Minima, dass diese für die beiden Einbauten unterschiedlich liegen. Die Übereinstimmung der Beugungsfiguren der beiden Einbauten ist quantitativ also nicht gegeben, lässt sich allerdings qualitativ vermuten.
Für die Interferenz an einer Beugungskante (offene Seite links) erhielten wir ein Beugungsmuster, dass auf der linken, offenen Seite dem Muster eines Einzelspalts entsprach. Minima und Maxima verschiedener Ordnung waren dort gut erkennbar.
Auf der rechten, geschlossenen Seite ergab sich ein durchgehender Lichtstrahl, dessen Intensität allerdings zunehmend und rasch abnahm, die Abbildung 4 gibt dies qualitativ wieder.

Abbildung 2: Darstellung des Beugungsmusters an der Kreisöffnung

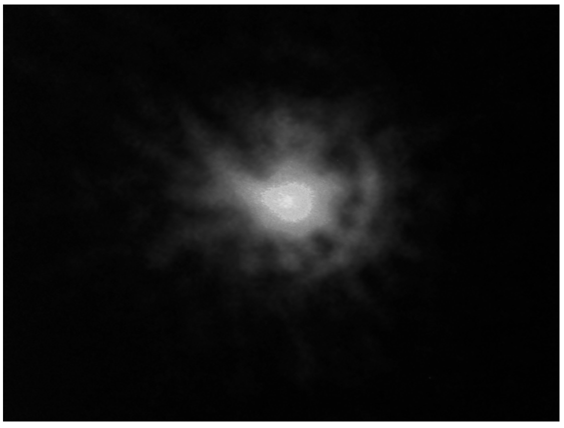


Abbildung 3: Darstellung des Beugungsmusters an der Kreisblende

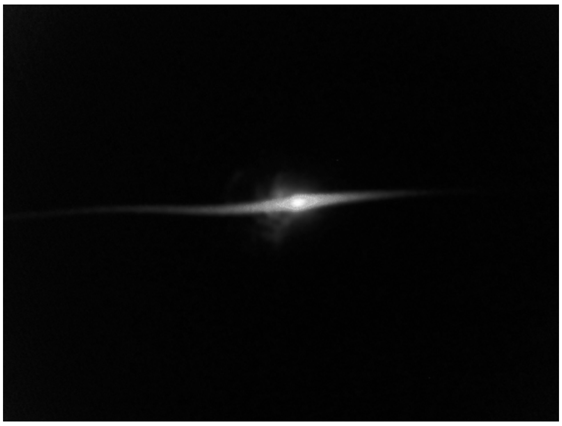


Abbildung 4: Darstellung des Beugungsmusters an der Beugungskante

2.4 Bestimmung des Durchmesser eines Haares aus seiner Beugungsfigur

2.4.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Jeweils ein Haar der beiden Praktikanten (Marco A. Harrendorf, Thomas Keck) wurde zunächst mit einer Mikrometerschraube vermessen und anschließend in gespanntem Zustand, sodass es sich wie ein Steg verhielt, in den Strahlengang zwischen Laser (Polytec PL-610P He-Ne-Laser) und Schirm eingebracht. Hierbei wurde der Abstand zwischen Laser und Haar so gewählt, dass der Laserstrahl ausreichend aufgeweitet war, und der Abstand zwischen Haar und Schirm betrug $L = 2.37\,m$.
Am Schirm wurden dann die Minima sowie das Nullte Maximum eingezeichnet.

2.4.2 Auswertung

Die Auswertung zur Bestimmung der Haarbreite b an Hand der Beugungsfigur erfolgte analog zur Bestimmung der Spaltbreite in 2.1.2. Lediglich der Abstand zwischen Beugungsobjekt und Schirm wurde verändert zu $L = 2.37\,m$.

Für das Haar von Marco A. Harrendorf konnten mittels der Beugungsfigur folgende Werte für die Haarbreite b sowie deren systematische Unsicherheit Δb_{sys} und deren statistische Unsicherheit Δb_{stat} bestimmt werden:

$$(b \pm \Delta b_{sys} \pm \Delta b_{stat}) = (90.1461 \pm 2.5659 \pm 11.3682)\,\mu m$$

Die einzelnen hierbei gemessenen und berechneten Größen sind in der Tabelle 3 aufgeführt und auch aus der in Abbildung 5 dargestellten Regressionsgerade ersichtlich.
Im Vergleich dazu wurde mit der Mikrometerschraube eine Breite von 50 μm für das Haar von Marco A. Harrendorf ermittelt.

n	x_n	$n \cdot \lambda \cdot L$	b_n	$\Delta b_{n,sys}$
-1	-16.5 mm	-1.49974 mm^2	90.8931 μm	5.52201 μm
-2	-31.8 mm	-2.99947 mm^2	94.3230 μm	1.49636 μm
-3	-48 mm	-4.49921 mm^2	93.7335 μm	0.66414 μm
1	16 mm	1.49974 mm^2	93.7335 μm	5.87168 μm
2	34.5 mm	2.99947 mm^2	86.9412 μm	1.27330 μm
3	52 mm	4.49921 mm^2	86.5232 μm	0.56783 μm

Tabelle 3: Gemessene und berechnete Werte für die Bestimmung der Breite b des Haares von Marco A. Harrendorf: Negative n-Werte bezeichnen Minima links vom Nullten Maximum, Positive n-Werte Minima rechts davon

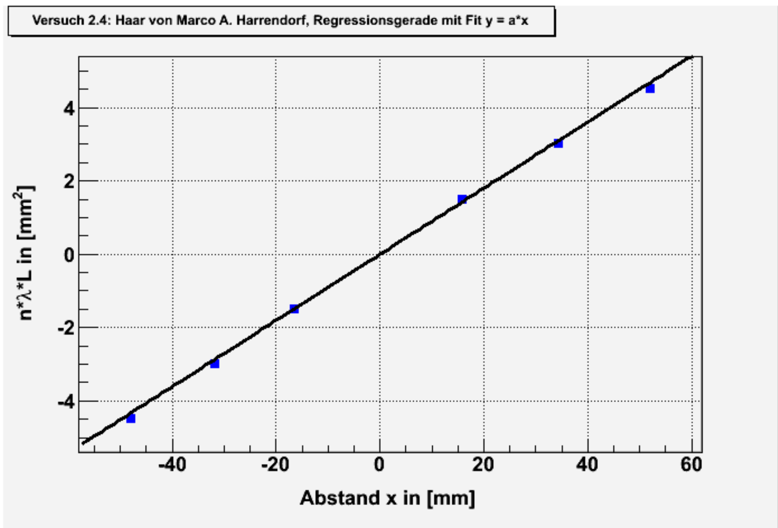


Abbildung 5: Regressionsgerade für die Bestimmung der Breite b des Haares von Marco A. Harrendorf

Für das Haar von Thomas Keck konnten mittels der Beugungsfigur folgende Werte für die Haarbreite b sowie deren systematische Unsicherheit Δb_{sys} und deren statistische Unsicherheit Δb_{stat} bestimmt werden:

$$(b \pm \Delta b_{sys} \pm \Delta b_{stat}) = (54.6148 \pm 1.2039 \pm 11.5264)\, \mu m$$

Die einzelnen hierbei gemessenen und berechneten Größen sind in der Tabelle 4 aufgeführt und auch aus der in Abbildung 6 dargestellten Regressionsgerade ersichtlich.
Im Vergleich dazu wurde mit der Mikrometerschraube eine Breite von 42 μm für das Haar von Thomas Keck ermittelt.

n	x_n	$n \cdot \lambda \cdot L$	b_n	$\Delta b_{n,sys}$
-1	-27.5 mm	-1.49974 mm^2	54.5359 μm	1.99643 μm
-2	-56.6 mm	-2.99947 mm^2	52.9942 μm	0.481312 μm
1	29.2 mm	1.49974 mm^2	51.3608 μm	1.77223 μm
2	52.1 mm	2.99947 mm^2	57.5714 μm	0.565702 μm

Tabelle 4: Gemessene und berechnete Werte für die Bestimmung der Breite b des Haares von Thomas Keck: Negative n-Werte bezeichnen Minima links vom Nullten Maximum, Positive n-Werte Minima rechts davon

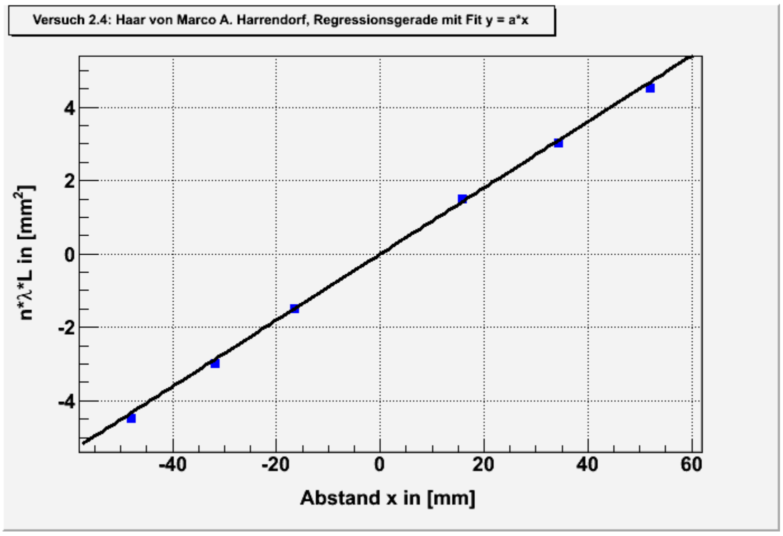


Abbildung 6: Regressionsgerade für die Bestimmung der Breite b des Haares von Thomas Keck

2.4.3 Fazit

Der gemessene und berechnete Wert für die Haarbreite des Praktikumsteilnehmers Thomas Keck stimmen im Rahmen der Unsicherheiten überein.
Betrachtet man hingegen die Werte für das Haar des Praktikumsteilnehmers Marco A. Harrendorf so fällt die große Abweichung zwischen beiden Werten von nahezu 40 μm auf. Da diese Abweichung bereits während des Praktikums auffiel, konnte durch mehrmaliges Nachmessen mit der Mikrometerschraube als auch wiederholte Kontrolle der Beugungsfigur ein Fehler bei der Messwertaufnahme ausgeschlossen werden. Auch eine falsche Kalibrierung der Mikrometerschraube konnte ausgeschlossen werden. Die wahrscheinlichste Ursache für die Abweichung ist wohl darin zu begründen, dass das Haar von Marco A. Harrendorf mit einer Schicht Haargel überzogen war, wodurch es an der Grenzschicht zwischen Haar und Haargel zu Interferenzen kam, die zu einem veränderten Beugungsmuster führten.
Der Zahlenwert von 90 μm kann nämlich weitestgehend ausgeschlossen werden, weil nach [Wikipedia - Kopfhaar] das normale menschliche Kopfhaar etwa zwischen 50 bis 70 μm dick ist und zum anderen der Vergleich der Haare der beiden Praktikumsteilnehmer keine nennenswerten Größenunterschiede aufzeigte.

3 Aufgabe 3: Beugung an Mehrfachspalten und Gittern

3.1 Spaltbreite und Spaltabstand der Doppelspalte

3.1.1 Aufbau

Der Versuch wurde entsprechend der Aufgabenstellung und der Vorbereitung aufgebaut und durchgeführt.

Bei einem Abstand $L = 2.35 \pm 0.01\mathrm{m}$ zwischen Gitter und Schirm ist die Bedingung $L \gg g$ für die Fraunhofernäherung erfüllt. Aus dem auf Millimeterpapier abgezeichneten Beugungsbild soll nun die Spaltbreite b und der Spaltabstand g bestimmt werden. Das festgehaltene Beugungsbild besteht aus den Positionen der beobachteten Minima, da die eigentlich benötigten Maxima nur schwer exakt zu positionieren waren.

Der verwendete Laser war der He-Ne-Laser von Polytec PL-610P mit einer Wellenlänge von $\lambda = 632.8\mathrm{nm}$.

3.1.2 Messdaten

Die Doppelspalte (0.25/0.5) und (0.25/0.75) wurden zur Beugung verwendet, gemessen wurde der Abstand vom Abbildungsmittelpunkt der Minima (Fehlerabschätzung $\pm 0.5\mathrm{mm}$) und die daraus resultierenden Maxima und Spaltabstände berechnet. Die Maxima befinden sich jeweils in der Mitte der benachbarten Minima, die Fehlerabschätzung ist durch diese Mittelwertbildung nicht beeinträchtigt.

Für die Fehlerrechnung benutzen wir die Fehlerfortpflanzung:

$$g = \frac{m \cdot \lambda \cdot L}{x_m} \tag{3}$$

$$\Delta g = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial L} \cdot \Delta L\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial x_m} \cdot \Delta x_m\right)^2} \tag{4}$$

$$\Delta g = g \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta x_m}{x_m}\right)^2} \tag{5}$$

$$\tag{6}$$

In der Formel für g wurde für m die jeweilige Ordnung eingesetzt, wobei die theoretisch durch den Einzelspalt ausgelöschten Maxima mitgezählt wurden. Aufgrund einer großen Abweichung zum erwarteten Ergebnis beim Doppelspalt (0.25/0.5), wurde dieser 2 mal berchnet. Einmal wurden die ausgelöschten Maxima mitgezählt g_1, das andere Mal wurde die Annahme, dass der Einzelspalt Maxima auslöscht, verworfen und nur die sichtbaren Ordnungen gezählt g_2.

Minima mm	Maxima mm	Spaltabstand $g_1$mm	Spaltabstand $g_2$mm
-13.0			
	-12.0	0.8675 ± 0.0363	0.4957 ± 0.0208
-10.5			
	-8.75	0.8498 ± 0.0487	0.5099 ± 0.0292
-7.0			
	-6.25	0.7138 ± 0.0572	0.4759 ± 0.0381
-5.5			
	-3.1	0.4797 ± 0.0774	0.4797 ± 0.0774
-1.7			
	0		
1.7			
	3.1	0.4797 ± 0.0774	0.4797 ± 0.0774
5.5			
	6.25	0.7138 ± 0.0572	0.4759 ± 0.0381
7.0			
	9.0	0.8262 ± 0.0460	0.4957 ± 0.0276
11.0			
	12.0	0.8675 ± 0.0363	0.4957 ± 0.0208
13.0			

Tabelle 5: Doppelspalt (0.25/0.5) Abstand der Minima und Maxima, des Doppelspaltes vom Abbildungsmittelpunkt, sowie der daraus resultierende Spaltabstand

Minima mm	Maxima mm	Spaltabstand $g\mathrm{mm}$
-13.5		
	-12.3	0.8463 ± 0.0346
-11.0		
	-10.0	0.7435 ± 0.0373
-9.0		
	-7.5	0.7931 ± 0.0530
-6.0		
	-4.5	0.6609 ± 0.0735
-3.0		
	-2.0	0.7435 ± 0.1859
-1.0		
	0	
1.0		
	2.0	0.7435 ± 0.1859
3.0		
	4.3	0.6917 ± 0.0805
5.5		
	7.0	0.8498 ± 0.0608
8.5		
	9.8	0.7587 ± 0.0388
11.0		
	12.3	0.8463 ± 0.0346
13.5		

Tabelle 6: Doppelspalt (0.25/0.75) Abstand der Minima und Maxima, des Doppelspaltes vom Abbildungsmittelpunkt, sowie der daraus resultierende Spaltabstand

3.1.3 Auswertung

Beachtet werden muss, das bei dem (0.25/0.75) Doppelspaltes jedes 3. und bei (0.25/0.5) jedes 2. Maxima durch die Minima des Einzelspaltes ausgelöscht wurde, dies ging bereits in die Berechnung des Spaltabstandes ein. Der Spaltabstand kann ohne Intensitätsmessung durch die bereits erwähnte Tatsache, dass bestimmte Maxima des Doppelspaltes nicht vorhanden sind, nur indirekt bestimmt werden.

Für den Mittelwert dieser Messung und dessen systematischen Fehler gilt nach der Größtfehlerabschätzung, da die Fehler korreliert sind:

$$\bar{g} = \frac{\sum_{i=1}^{n} g_i}{n} \tag{7}$$

$$\Delta\bar{g}_{sys} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} \Delta g_i \tag{8}$$

Für den statistischen Fehler geben wir die Standardabweichung an:

$$\Delta\bar{g}_{stat} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} (g_i - \bar{g})^2} \tag{9}$$

Insgesamt ergibt sich für die beiden Doppelspalte:

$$\bar{g} \pm \Delta\bar{g}_{sys} \pm \Delta\bar{g}_{stat} = (0.7677 \pm 0.0785 \pm 0.1969)\,\mathrm{mm} \qquad (0.25/0.75) \tag{10}$$

$$\bar{g_1} \pm \Delta\bar{g_1}_{sys} \pm \Delta\bar{g_1}_{stat} = (0.7247 \pm 0.0546 \pm 0.4324)\,\mathrm{mm} \qquad (0.25/0.5) \tag{11}$$

$$\bar{g_2} \pm \Delta\bar{g_2}_{sys} \pm \Delta\bar{g_2}_{stat} = (0.4885 \pm 0.0412 \pm 0.0329)\,\mathrm{mm} \qquad (0.25/0.5) \tag{12}$$

Das Ergebniss für den Doppelspalt (0.25/0.75) passt im Rahmen der Unsicherheiten sehr gut zu der Angabe des Doppelspalts auf dem Aufgabenblatt. Auch die Annahme über die ausfallenden Maxima, die bei der Berechnung der Spaltabstände benutzt wurde, bestätigt sich damit.

Die Ergebnisse für den Doppelspalt (0.25/0.5) g_1 enttäuschen dagegen, bereits beim Abzeichnen des Beugungsbildes war die Unregelmäßigkeit der Minima und die zum Teil sehr ausgedehnten Maxima aufgefallen. **Die Annahme das die Spaltbreite exakt dem halben Spaltabstand entspricht, bestätigt sich damit nicht.** Auch erkennt man, dass die grundlegende Messung wahrscheinlich keine nicht erkannten Fehler beinhaltet, da dass vom Einzelspalt unbeeinflusste 1. Maxima des Doppelspaltes innerhalb der Fehler den Spaltabstand richtig wiedergibt.

Unter der Annahme, dass der Einzelspalt keine Maxima auslöscht, ergibt sich damit auch folgerichtig ein sehr gutes Ergebnis g_2, dass die Angabe auf dem Übungsblatt bestätigt. Lediglich die Spaltbreite scheint damit nich exakt dem halben Spaltabstand zu entsprechen. Womit die hohen Abweichungen bei g_1 erklärt sind.

3.1.4 Charakteristische Änderungen

Wie in der Vorbereitung bereits vorausgesagt, konnte beobachtet werden, dass das Beugungsbild des (0.25/0.75) Doppelspaltes gegenüber dem (0.25/0.5) horizontal gestaucht ist. Auch fielen infolge der Einzelspaltbeugung, jedes 3. anstatt jedes 2. Beugungsmaxima des Doppelspaltes aus.

Beim Vergleich des (0.25/0.5) Doppelspaltes mit dem entsprechenden Dreifachspalt, konnte die Vorhersage der Vorbereitung auch verifiziert werden. Die Nebenmaxima waren erkennbar.

3.2 Gitterkonstante eines Strichgitters

Der Abstand $L = 2.35 \pm 0.01\text{m}$ und der benutze Laser $\lambda = 632.8\text{nm}$ blieben gleich. Anstelle der Doppelspalte wurde ein Strichgitter verwendet. Bei besserer Ausleuchtung wurden die Maxima schärfer und intensiver, wie in der Vorbereitung bereits festgestellt.

3.2.1 Messdaten

Das Beugungsbild wurde wiederum auf Millimeterpapier festgehalten, diesmal konnten direkt die Maxima bestimmt werden. Es kam die gleiche Fehlerabschätzung wie bereits bei den Doppelspalten zum Einsatz.

Maxima mm	Gitterkonstante $g$mm
-69.0	0.1293 ± 0.0011
-58.0	0.1282 ± 0.0012
-46.0	0.1293 ± 0.0015
-35.0	0.1275 ± 0.0019
-23.5	0.1266 ± 0.0027
-12.0	0.1239 ± 0.0052
0	
11.5	0.1293 ± 0.0056
23.0	0.1293 ± 0.0029
34.5	0.1293 ± 0.0020
46.5	0.1279 ± 0.0015
57.5	0.1293 ± 0.0013
69.0	0.1293 ± 0.0011

Tabelle 7: Positionen der Maxima des Strichgitters und die daraus resultierende Gitterkonstante

3.2.2 Auswertung

Das Strichgitter besitzt also eine Gitterkonstante von:

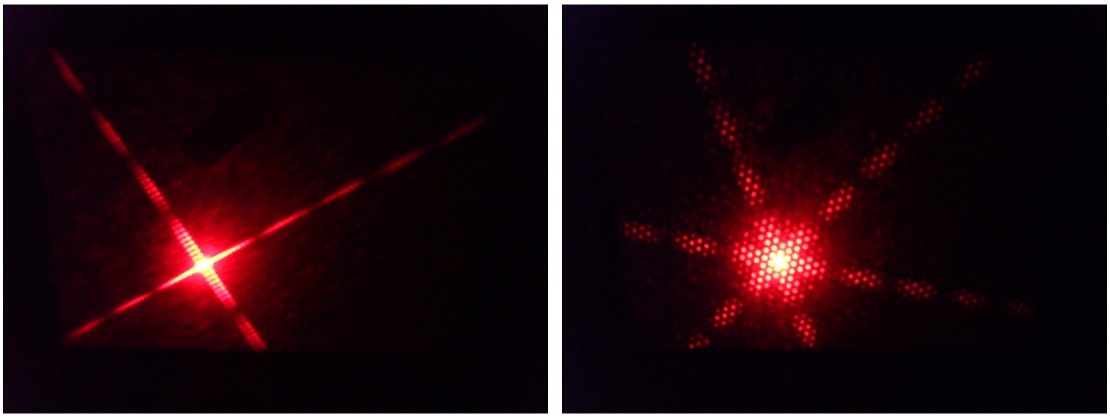
$$\bar{g} \pm \Delta\bar{g}_{sys} \pm \Delta\bar{g}_{stat} = (0.1283 \pm 0.0023 \pm 0.0055)\,\text{mm} \tag{13}$$

Die Berechnung des Mittelwertes und der Fehler sind identisch zur Berechnung der Doppelspalte. Im Rahmen der Unsicherheiten stimmt dieses Ergebnis jedoch nicht mit der Angabe auf dem Aufgabenblatt von 100 Strichen pro Centimeter überein $g_{angabe} = 0.1\text{mm}$.

3.3 Beugungsbild von Kreuz und Wabengitter

Wie schon in der Vorbereitung beschrieben, konnte in diesem Demonstrationsversuch das Beugungsbild des Kreuzgitters als Überlagerung der Beugungsbilder zweier senkrechter Gitter beobachtet werden.

Das Beugungsbild des Wabengitters besaß einen sternförmigen Charakter.



(a) Beugungsbild des Kreuzgitters

(b) Beugungsbild des Wabengitters

Abbildung 7: Beugungsbilder bzw. Fouriertransformierte im Demonstrationsversuch

4 Aufgabe 4: Abbildung nichtselbstleuchtender Gegenstände

4.1 Versuchsjustierung

Ein Gitter wurde über eine Linse entsprechend der Abbildungsgleichung für dünne Linsen auf einem entfernten Schirm abgebildet.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b} \tag{14}$$

4.2 Versuchsprinzip

In der bildseitigen Brennebene der Linse konnte die Fouriertransformierte des Gitters beobachtet werden. Mit verschiedenen Filtern in dieser Ebene wurden bestimmte Fourierkomponenten ausgeblendet und die Veränderung der Abbildung beobachtet.

4.3 Entfernung hoher, bzw. tiefer Raumfrequenzen

Bei einem Kreuzgitter wurden durch eine Kreisblende die niedrigen Raumfrequenzen ausgeblendet. Im Abbild konnte man jetzt ein Kreuzgitter beobachten, welches nur die Konturen des ursprünglichen Kreugitters hell erleuchtet darstellte. Der Versuch wurde mit einem Wabengitter wiederholt, wiederum wurden die Konturen hell, die vorher gleichmäßig beleuchteten Flächen dunkel angezeigt.

Mithilfe einer Lochblende, welche die hohen Raumfrequenzen blockiert, wurden nun nur die niedrigen Raumfrequenzen abgebildet, man konnte bei dem Kreuzgitter einen verwaschenen Fleck ohne scharfe Konturen beobachten.

4.4 Gezielte Entfernung bestimmter Fourierkomponenten

In einem weiteren Demonstrationsversuch wurden mithilfe eines Einzelspaltes mit veränderlicher Breite die Beugungsmaxima des Kreuzgitters in einer Dimension ausgeblendet. Die Konturen der Abbildung verschwanden in dieser Dimension, sodass anstatt eines Gitters eine Art „Lattenzaun” beobachtet werden konnte. Dieser Versuch zeigte eindrucksvoll, wie z.B. die in der Aufgabenstellung erwähnte Rasterung auf einem digitalisiert empfangenen Zeitungsbild entfernt werden kann. Es müssen lediglich die entsprechenden Beugungsmaxima des Gitters entfernt werden.

4.5 Fazit

Die Ergebnisse entsprechen den Erwartungen, die bereits in der Vorbereitung formuliert wurden.

5 Aufgabe 5: Holographie

In dieser Aufgabe wurde ein aufgeweiteter Laserstrahl benutzt, um ein Hologramm zu reproduzieren.
Durch Veränderung des Blickwinkels bei der direkten Betrachtung des Hologramms konnte nachgewiesen werden, dass sich die Perspektive jeweils ändert und je nach Kopfhaltung auch unterschiedliche Details wahrgenommen werden können.
Die Abbildungen 8 und 9 versuchen diesen Eindruck wiederzugeben.
Weiterhin wurde das Hologramm auf einem Schirm dargestellt. Auch hier waren je nach Stellung des Schirms unterschiedliche Details auf Grund der wechselnden Perspektive erkennbar, wobei das Bild selbst zweidimensional war.
Ein teilweises Verdecken des Hologramms führte nicht zu einem Verlust an Bildinformationen, was – wie bereits in der Vorbereitung erläutert – damit zusammenhängt, dass alle vom Hologramm ausgehenden Elementarwellen mit ihrer Phase und Amplitude zur Entstehung der Abbildung beitragen.
Zuletzt betrachteten wir noch ein weiteres Hologramm, welches mit einer inkohärenten, polychromatischen Lichtquelle ("Glühbirne") beleuchtet wurde. Auch hier ergab sich ein dreidimensionales Bild. Allerdings veränderten sich bei einer Veränderung des Blickwinkels neben der Perspektive auch die Farben des Hologramms.

Abbildung 8: Darstellung des Hologramms aus der 1. Perspektive: Das Hologramm ist in Graustufen zur besseren Betrachtung eingefärbt.

Abbildung 9: Darstellung des Hologramms aus der 2. Perspektive: Das Hologramm ist in Graustufen zur besseren Betrachtung eingefärbt.

Literatur

[Aufgabenstellung] Aufgabenstellung zu den Versuchen P2-16,17,18

[Vorbereitungshilfe] Vorbereitungshilfe zu den Versuchen P2-16,17,18 (falls vorhanden)

[Literatur zu den Versuchen] Literatur zu den Versuchen P2-16,17,18 (falls vorhanden)

[Wikipedia - Kopfhaar] `http://de.wikipedia.org/wiki/Kopfhaar`

[Hecht - Optik]

[ISO 8255-1:1986 (E)] Optics and optical instruments – Microscopes – Cover glasses – Part 1: Dimensional tolerances, thickness and optical properties