

Robert Strothmann, 5040218  
Jonas Scholz, 5153815  
David Ueberle, 4903184

Jonas.Scholz@fu-berlin.de  
Robert.Strothmann@fu-berlin.de  
Ueberleda@zedat.fu-berlin.de

## **Laborbericht / Versuchsprotokoll**

### **S9-Beugung am Spalt**

Datum der Versuchsdurchführung: 18. Juni 2018  
Datum der Protokolleinreichung: 28. August 2018  
Assistent/in: Budau  
Dateiname:S9-5040218-5153815-4903184-2

Mit der Einreichung wird versichert, dass das Protokoll von den oben eingetragenen Personen in gemeinschaftlicher Arbeit angefertigt worden ist und dass sämtliche Quellen, die zur Erstellung des Protokolls genutzt wurden, im 6. Teil des Protokolls (Literatur) kenntlich gemacht worden sind.

# 1 Einleitung

Bereits im 17. Jahrhundert beschrieb Huygens, der Begründer der Wellenoptik, dass Licht in seiner Ausbreitung Wellencharakter zeigt. Dem entgegen stellte sich die von Isaac Newton begründete Theorie Licht als Strahl von Teilchen zu betrachten. Es folgten viele Jahren von Diskussionen und Experimente der konkurrierenden theoretischen Lager, bis schließlich am Anfang des 20. Jahrhundert der Welle-Teilchen-Dualismus begründet wurde. Dieser besagt, dass Quantenobjekte, also auch Lichtteilchen, sowohl als Welle wie auch Teilchen beschreiben werden können. Der in diesem Versuch verwendete Effekt der Beugung an einem Einfachspalt zur Bestimmung einer unbekannten Wellenlänge ist ein sehr frühes Beispiel eines aus der Wellenoptik kommenden Experimentes.

## 2 Theoretische Grundlagen<sup>[1]</sup>

Trifft kollimiertes Licht auf einem kleinen Spalt der Breite  $b$  zeigt es ein Verhalten, welches der in der Strahlenoptik geltenden Gesetze widerspricht. Anzunehmen sei eigentlich, dass paralleles Licht, welches durch einen Spalt auf eine dahinter liegende Sammellinse fällt, nur in einem Punkt gebündelt erscheinen sollte. Jedoch beobachtet man stattdessen ein Beugungsmuster.

Dass das Licht ein solches Verhalten zeigt, kann auf das Huygens-Prinzip zurückgeführt werden. Dieses besagt, dass jeder Punkt einer ebenen Lichtwelle (eine sogenannte Wellenfront) Ausgangspunkt einer neuen Elementarwelle ist. Trifft nun eine solche Front auf einen Spalt der Breite  $b$  wird jeder Punkt der innerhalb des Spalts liegt zum Ausgangspunkt einer Elementarwelle. Das nun sich ausbreitende Licht interferiert und zeigt sogenannte Grenzeffekte. Es breiten sich also Kreisförmig in den Schatten des Raums hinter dem Spalt aus.

Dabei ist nun das auf dem Schirm zu beobachtende Interferenzmuster davon abhängig, ob es sich bei dem Beugungsmuster um eine sogenannte Fresnelsche Beugung handelt, also einer solchen, bei der das Beugungsobjekt und die Abbildungsebene in voneinander kleinen Abständen angeordnet sind oder um eine Fraunhoferbeugung, bei der der Grenzfall unendlich großer Abstände des eben genannten Objekts und dem Schirm vorliegt. Im diesem Versuch wird zweiteres Beugungsmuster beobachtet, wobei der unendlich große Abstand mittels einer Sammellinse erreicht wird, welche das Licht in einem Punkt bündelt. Damit erscheint der Schirm optisch unendlich weit, da sich laut Definition parallele Strahlen im unendlichen treffen.

Die Intensität des Fraunhofer Interferenzmuster kann durch einen Verlauf einer quadratischen *sinus Cardinalis* ( $\text{sinc}(x) = \frac{\sin(x)}{x}$ ) Funktion beschrieben werden.

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{für } x \neq 0 & I(x) = I_0 \cdot \left( \frac{\sin(x)}{x} \right)^2 \quad \text{mit } x = \frac{\pi \cdot b \cdot \sin(\varphi)}{\lambda} \\ \text{für } x = 0 & I(x) = I_0 \end{array} \right. \quad (1)$$

Es gilt also, dass bei  $\varphi = 0$  das Intensitätsmaximum  $I_0$  das sogenannte Hauptmaximums gefunden wird. Dabei ist  $b$  die Spaltbreite  $\varphi$  der Beugungswinkel und  $\lambda$  die Wellenlänge

des Lichts.

$$I(\varphi) = I_0 \cdot \left( \frac{\sin(k \cdot \sin(\varphi))}{k \cdot \sin(\varphi)} \right)^2 \quad \text{mit} \quad k = \frac{\pi \cdot b}{\lambda} \quad (2)$$

Im Versuch wird jedoch nicht der Beugungswinkel  $\varphi$  direkt gemessen sondern der Abstand  $a$  zwischen dem Hauptmaximum und den danebenliegenden Nebenmaximum. Durch einfache Trigonometrie ist hiermit mit bekannten Abstand  $f$  der Linse zum Spalt der Winkel  $\varphi$  zugänglich.

$$\arctan\left(\frac{a}{f}\right) = \varphi \quad (3)$$

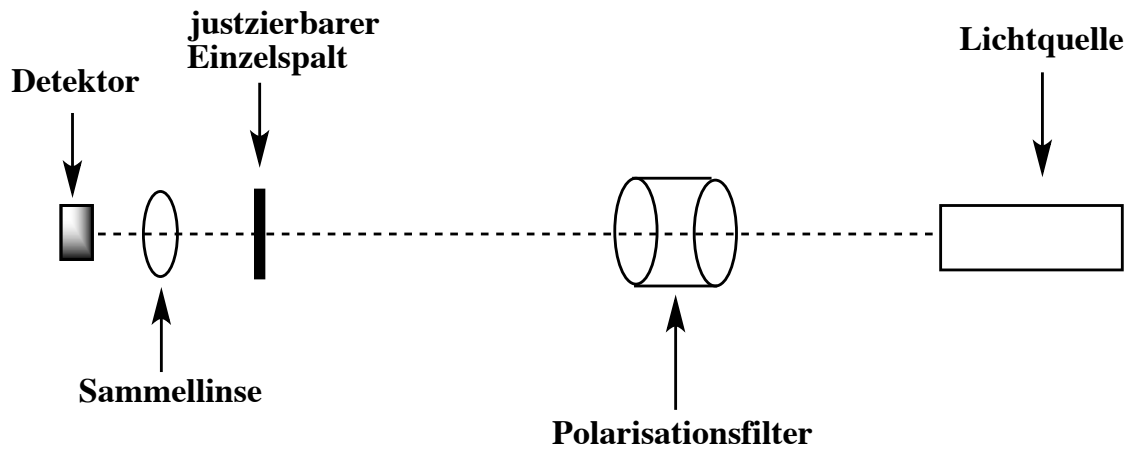
Daraus folgt also

$$I(\varphi) = I_0 \cdot \left( \frac{\sin\left(k \cdot \sin\left(\arctan\left(\frac{a}{f}\right)\right)\right)}{k \cdot \sin\left(\arctan\left(\frac{a}{f}\right)\right)} \right)^2 \quad \text{mit} \quad k = \frac{\pi \cdot b}{\lambda} \quad (4)$$

### 3 Durchführung

Zur Charakterisierung verschiedenen Laser unbekannter Wellenlänge wurde dessen Beugungsverhalten an einem Spalt untersucht. Hierfür wurde zuerst ein Strahlengang mit einem Laser bekannter Wellenlänge als Lichtquelle aufgebaut um eine Referenzierung zu erhalten. Der lineare Strahlengang wird im folgenden ausgehend vom Detektor bis hin zur Lichtquelle beschrieben. Der Detektor, in der Form einer Monochrom-Kamera mit einem CMOS-Chip, wurde in direkter Verbindung mit dem Messrechner aufgebaut. Die empfindlichen Fläche wurde als  $4.512 \times 2.880$  mm groß gegeben und durch eine Einbuchtung in dem Kameragehäuse kenntlich gemacht. Der Detektor wurde in 11.9 [cm] Entfernung zur Sammellinse im Strahlengang aufgestellt, entsprechend der zuvor empirisch bestimmten Brennweite der verwendeten Sammellinse. Demzufolge konnte der Brennpunkt der Linse leicht in den Detektor ausgerichtet werden. In 10 [cm] Entfernung zur Linse wurde der verwendete justierbarer Einzelspalt aufgestellt, welcher orthogonal zur Tischebene ausgerichtet und justiert wurde. Des weiteren ist ein Polarisationsfilter benutzt worden um die Lichtintensität abzuschwächen, damit das Sättigungsniveau des Detektors nicht erreicht wird, und eine klare Intensitätsmessung durchgeführt werden konnte. Dieser sowie die Lichtquelle in Form des jeweiligen Lasers wurden frei im Strahlengang, ungefähr in zwanzig und dreißig Zentimeter Entfernung zum Spalt, aufgestellt. Nach erfolgreicher Ausrichtung des Lasers durch die Bauelemente des Strahlengangs in den Detektor wurden für den Referenzlaser, als Helium-Neon der Laserklasse II, drei Messungen des Beugungsbildes durchgeführt. Von besonderer Relevanz bei der Ausrichtung war die orthogonale Lage des Lasers zum Beugungsspalt, welche durch drehen des runden Lasergehäuses in seiner Fassung erreicht wurde. Für die folgenden drei zu charakterisierenden Laser wurde jeweils eine Messung durchgeführt. Der schematische Versuchsaufbau ist der folgenden Abbildung

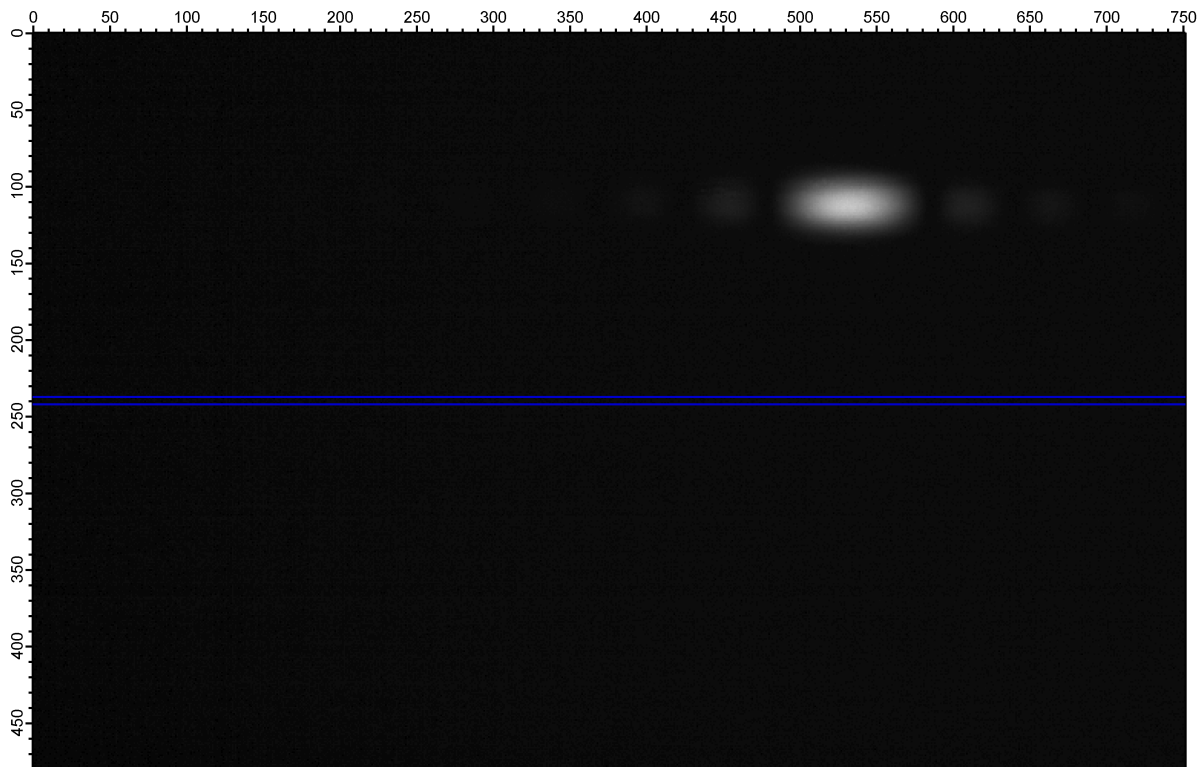
zu entnehmen.



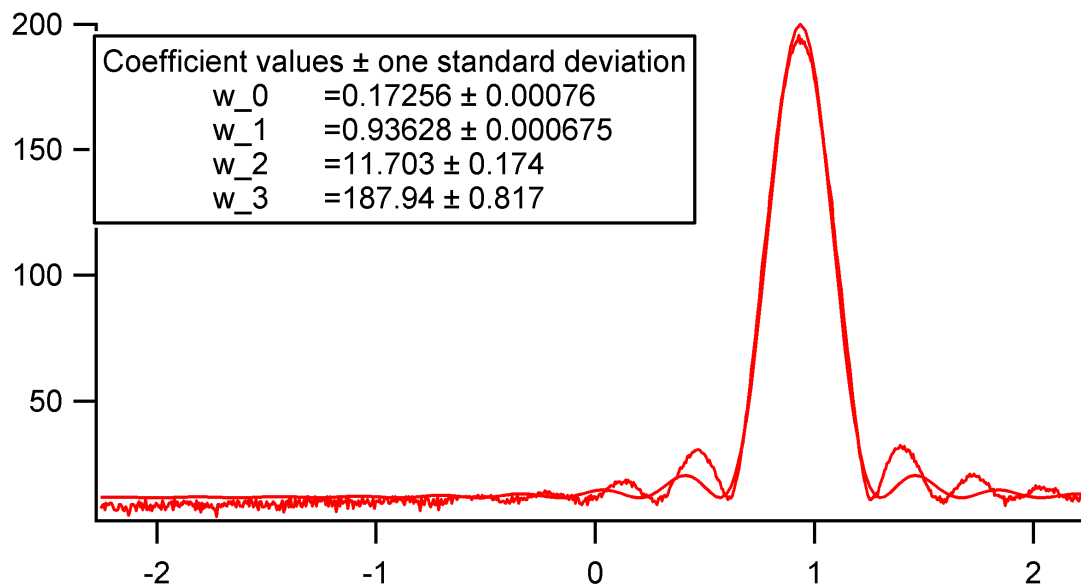
**Abbildung 3.1:** Schematischer Aufbau des durchgeführten Versuchs.

## 4 Auswertung

Die exakte Spaltbreite wurde ermittelt indem die Beugung eines Lasers bekannter Wellenlänge bei unterschiedlichen Spaltbreiten gemessen wurde. Es wurde mit Igor Pro ein Querschnitt der Beugungsmusterbestimmt. Die so erhaltenen Intensitätsprofile wurden mit einer, vom Assistenten zur Verfügung gestellten Fitfunktion angepasst. Exemplarisch sind hier das Beugungsmuster4.1 und das Profil 4.3 für die Spalteinstellung 0 gezeigt.

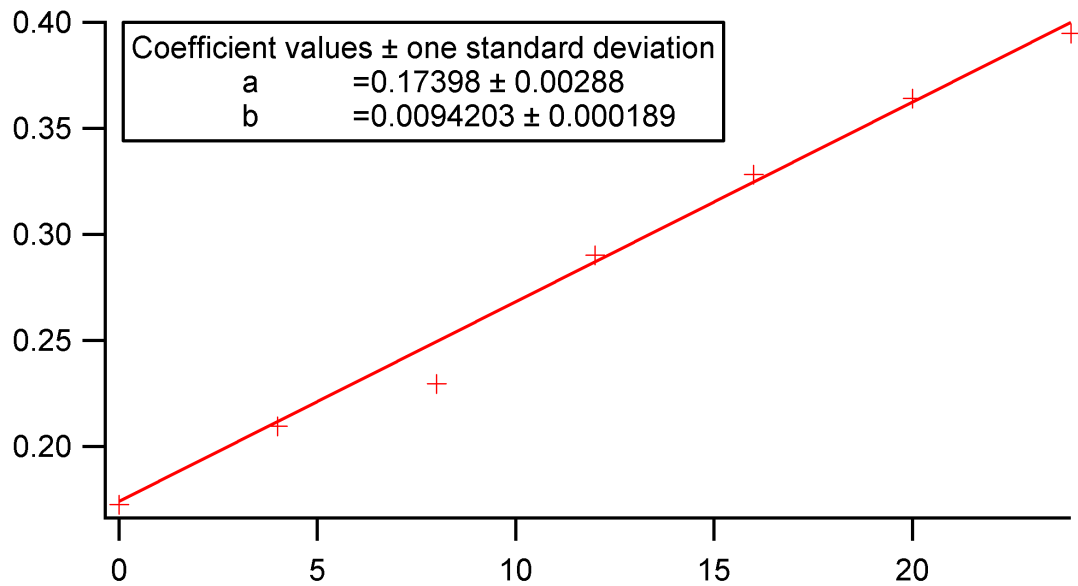


**Abbildung 4.1:** Beugungsmuster eines Helium-Neon-Lasers bei der Einstellung von 0. Der Querschnitt wurde mit Igor Pro ausgewählt und weiter analysiert



**Abbildung 4.2:** Intensitätsprofil eines Helium-Neon-Lasers bei der Einstellung von 0. Das Profil wurde mit Igor Pro gefittet um die tatsächliche Spaltbreite exakt zu bestimmen

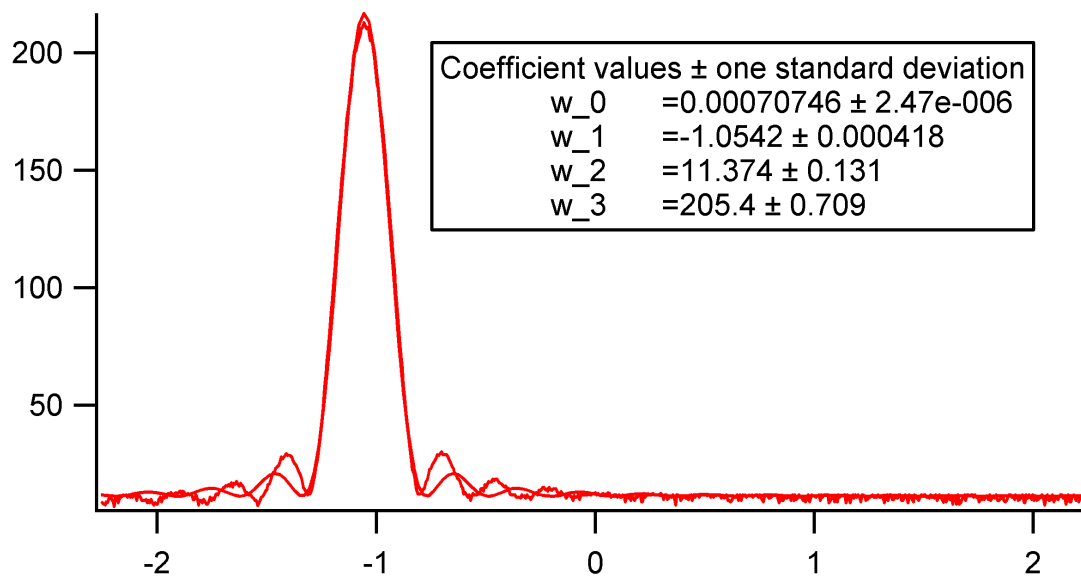
Durch die oben gezeigte Messung bei einer Einstellung von 0, 4, 8, 12, 16, 20 und 24 konnte eine Kalibriergerade erstellt werden, bei der die Spaltbreite gegen die Einstellung des Spaltes aufgetragen wurde.



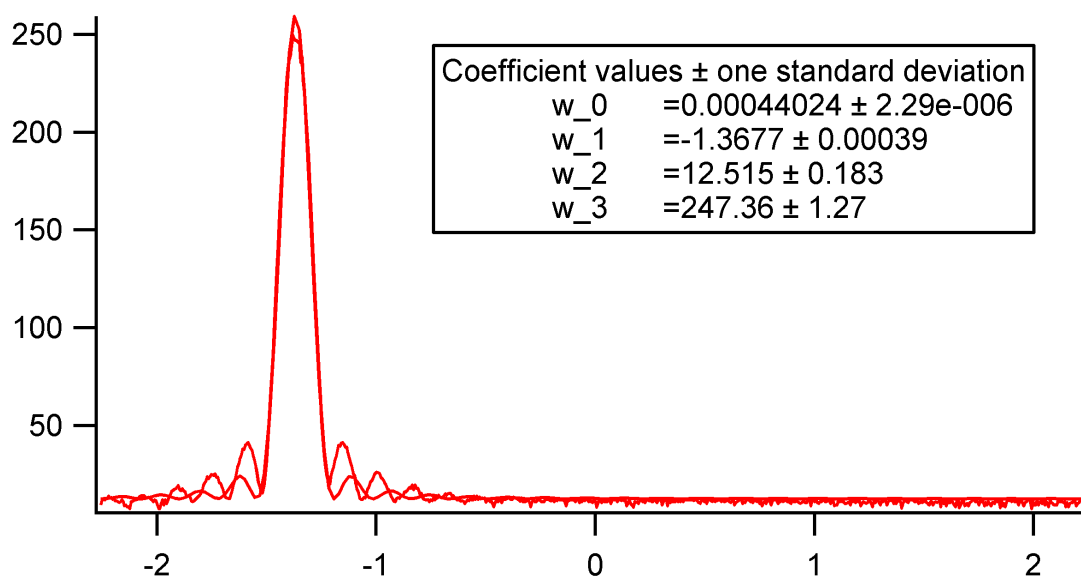
**Abbildung 4.3:** Auftragung der gemessenen Spaltbreite gegen die Einstellung am Spalt mit einer linearen Regression, dargestellt mit Igor Pro. Das Wertepaar für die Spalteinstellung von 8 wurde bei der Regression nicht berücksichtigt, da er sichtlich von dem Trend abweicht.

Durch die exakte Bestimmung der Spaltbreite bei einer Einstellung war es nun möglich die Wellenlänge unbekannter Laser zu ermitteln. Hierzu wurden erneut die Beugungsmuster und dadurch die Intensitätsprofile bei einer Spalteinstellung von  $8 \mu\text{m}$  gemessen und aus einem Fit die Wellenlänge zu bestimmen. Die Spalteinstellung von 8 wurde aus dem Grund gewählt, da hier die gemessene Spaltöffnung rund  $250 \mu\text{m}$  betrug. Bei größeren Spaltbreiten würde der Detektor durch die hohe Lichtintensität übersättigen, bei kleineren hingegen zu wenig anzeigen.

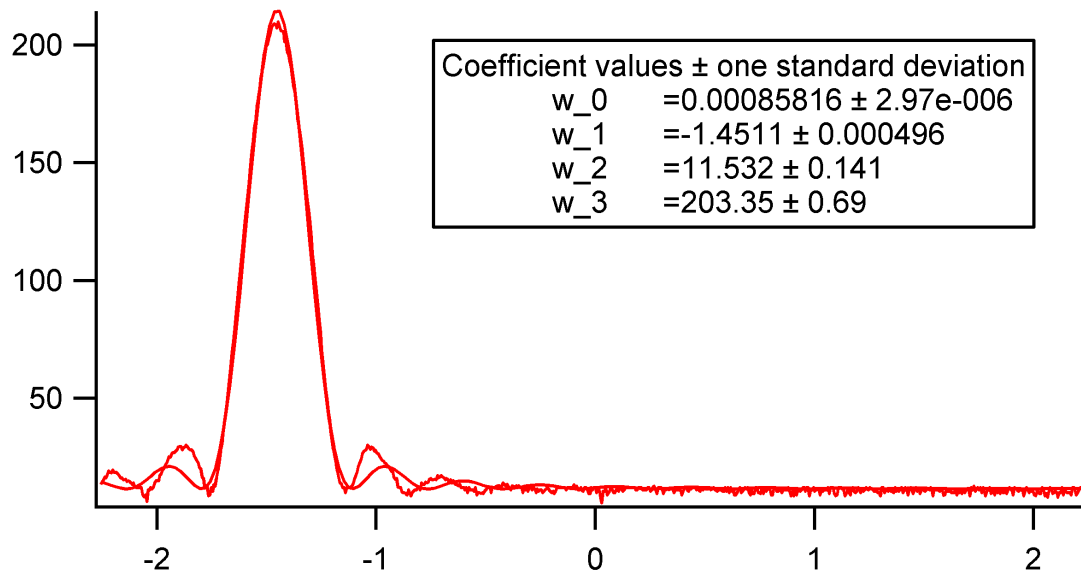
Die Intensitätsprofile eines roten 4.4, blauen 4.5 und eines infraroten Lasers 4.6 sind unten dargestellt.  $w_0$  entspricht hierbei der Wellenlänge.



**Abbildung 4.4:** Intensitätsprofil eines unbekannten roten Lasers bei der Einstellung von 8. Das Profil wurde mit Igor Pro gefittet um die Wellenlänge zu ermitteln.



**Abbildung 4.5:** Intensitätsprofil eines unbekannten blauen Lasers bei der Einstellung von 8. Das Profil wurde mit Igor Pro gefittet um die Wellenlänge zu ermitteln.



**Abbildung 4.6:** Intensitätsprofil eines unbekannten infraroten Lasers bei der Einstellung von 8. Das Profil wurde mit Igor Pro gefittet um die Wellenlänge zu ermitteln.

Die Wellenlängen der unbekannten Laser wurden in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

**Tabelle 4.1:** Zusammenfassung der ermittelten Wellenlängen der unbekannten Laser

Laser	Wellenlänge in nm	Literaturwert in nm
<i>rot</i>	$707.5 \pm 21.2$	630 – 750
<i>blau</i>	$440.2 \pm 13.0$	430 – 480
<i>infrarot</i>	$858.2 \pm 25.7$	750 – 3000

Die Fehler der Wellenlängen wurden berechnet indem mit Igor Pro pro Laser zwei weitere *fits* gemacht wurden. Einmal mit einem Abstand zwischen Spalt und Linse von 97 mm für den oberen und 103 mm für den unteren Wert. Der Fehler entspricht dann dem arithmetischen Mittel der Beträge der Subtraktionen der jeweiligen Werte zum Wert bei 100 mm. Die Fehlerberechnung beschränkt sich auf den Fehler des Abstandes von Spalt und Linse, da dies die größte Fehlerquelle ist.

Die gemessenen Wellenlängen liegen in den Bereichen der jeweiligen Farben, wobei der blaue Laser an der unteren Grenze des Bereichs liegt. Dies passt jedoch gut zu der Farberscheinung des Lasers, die vom bläulichen eher ins violette ging und nur schwach zu sehen war, dies deutet auf eine kürzere Wellenlänge, als es bei einem blauen Laser vermutet wird, hin.



## 5 Zusammenfassung

Mittels der im ersten Teil exakt bestimmten Spaltbreite durch die Messung des Intensitätsprofil eines Lasers mit bekannter Wellenlänge, konnte die Wellenlänge durch ebenjene Messung eines roten, blauen und infraroten Lasers gemessen werden. Für die Kalibrierung konnte folgende Formel gefunden werden:

$$\text{Spaltbreite} = 0.0094203x + 0.17398 \quad (5)$$

Entsprechend wurde die Spalteinstellung 8 genommen, da hier die Spaltöffnung etwa  $250 \mu\text{m}$  entspricht.

Die Ergebnisse, der Wellenlängenbestimmungen, der unbekannten Laser sind in der untenstehenden Tabelle 5.1 zusammengefasst.

**Tabelle 5.1:** Zusammenfassung der ermittelten Wellenlängen der unbekannten Laser

Laser	Wellenlänge in nm	Literaturwert in nm
<i>rot</i>	$707.5 \pm 21.2$	630 – 750
<i>blau</i>	$440.2 \pm 13.0$	430 – 480
<i>infrarot</i>	$858.2 \pm 25.7$	750 – 3000

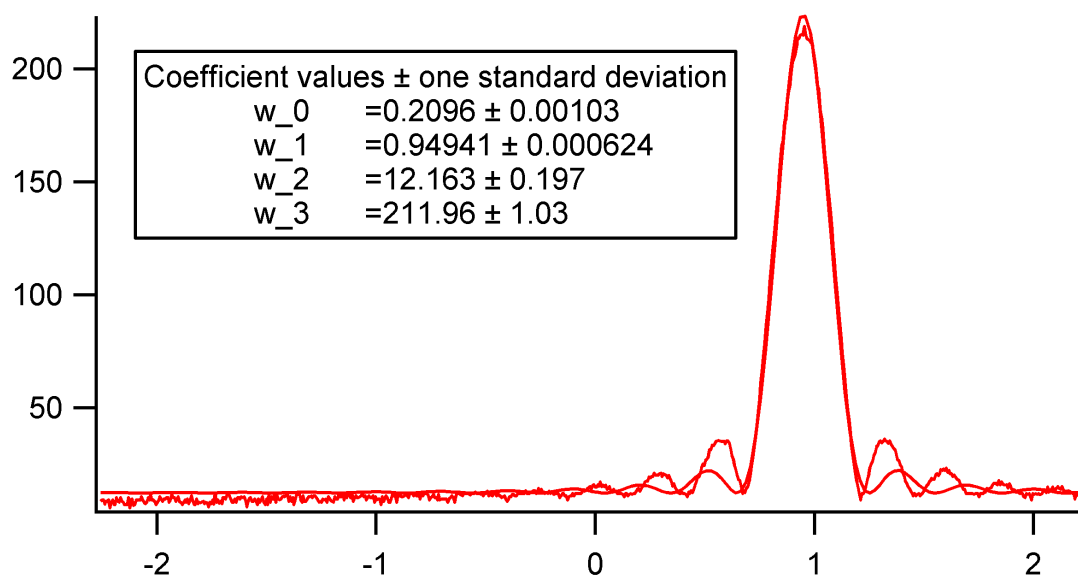
Die gemessenen Wellenlängen liegen gut im Wellenlängenbereich der jeweiligen Farben. Einzig die Wellenlänge des blauen Lasers liegt nahe am unteren Rand des Bereiches. Dies passt jedoch zu der Beobachtung, dass die Farbe des blauen Lasers fast ins Violette ging und schwach zu erkennen war.

Neben dem Fehler in dem Abstand von Spalt und Linse können ebenso alle anderen manuell eingestellten Abstände fehlerhaft sein. Zudem muss für eine perfekte Messung der ganze Aufbau linear sein, da schon geringe Abweichungen im Winkel z.B. der Linse zu Fehlern führen können. Eine weitere Fehlerursache können unregelmäßigkeiten in den optischen Geräten sein wie z.B. Kratzer in der Linse oder Defekte auf dem Detektor sein.

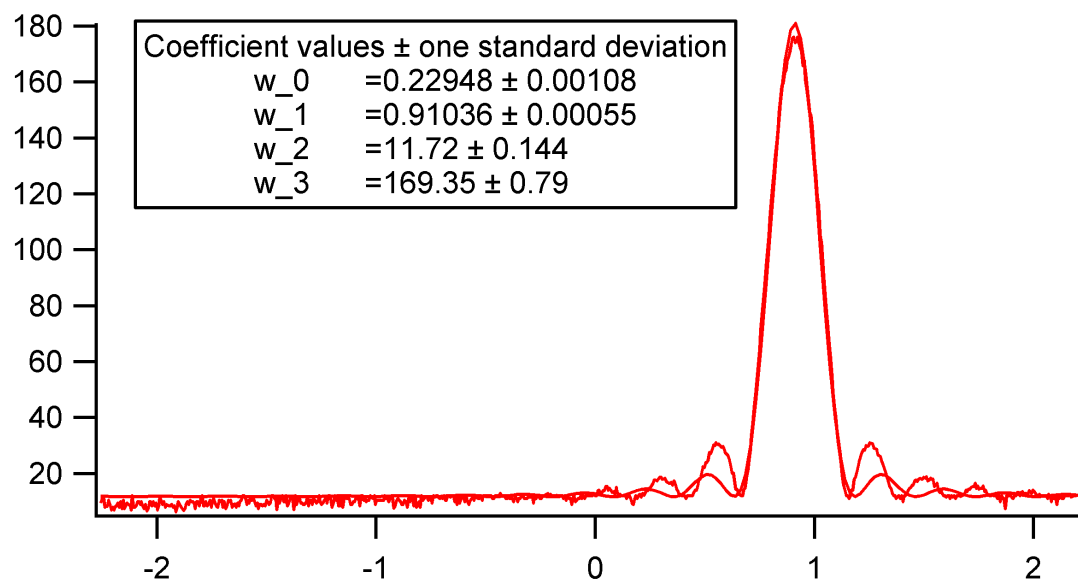
## 6 Literatur

[1] N. Heinz, *Optik, Wellen- und Teilchenoptik*, De Gruyter, 2008.

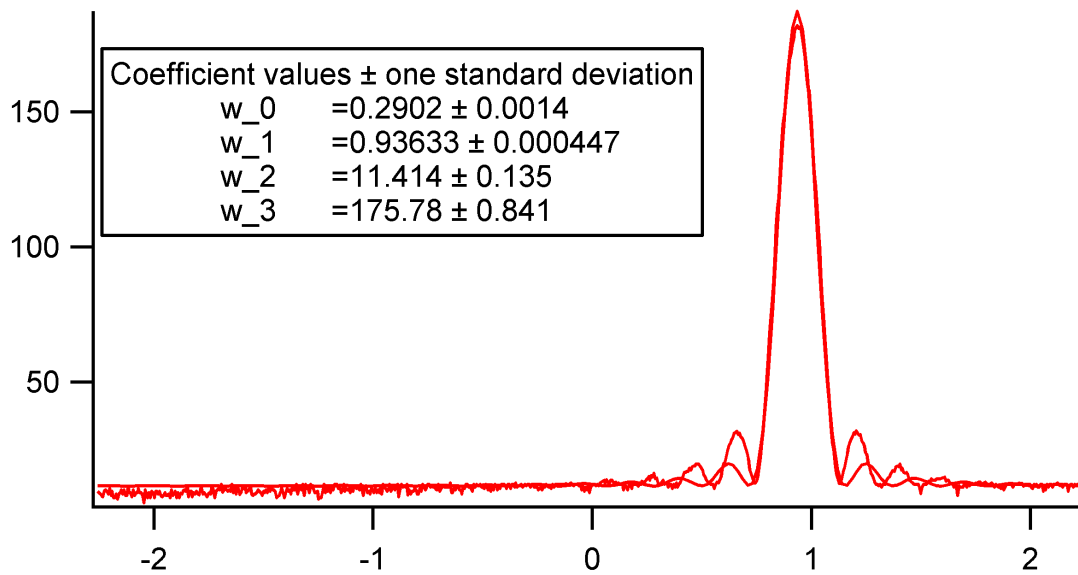
## 7 Anhang



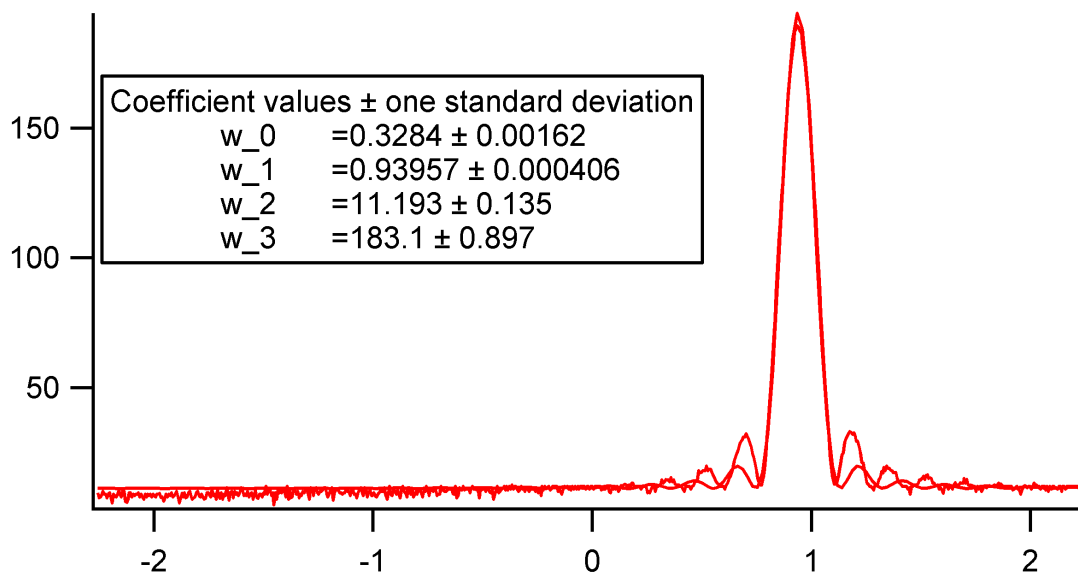
**Abbildung 7.1:** Beugungsmuster eines Helium-Neon-Lasers bei der Einstellung von  $4 \mu\text{m}$ . Der Querschnitt wurde mit Igor Pro ausgewählt und weiter analysiert



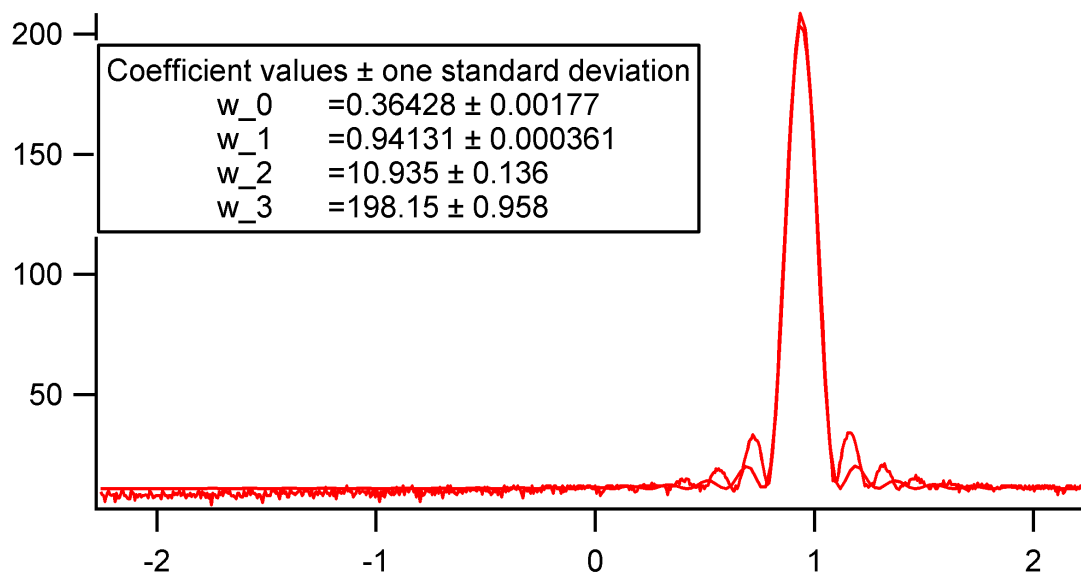
**Abbildung 7.2:** Beugungsmuster eines Helium-Neon-Lasers bei der Einstellung von  $8 \mu\text{m}$ . Der Querschnitt wurde mit Igor Pro ausgewählt und weiter analysiert



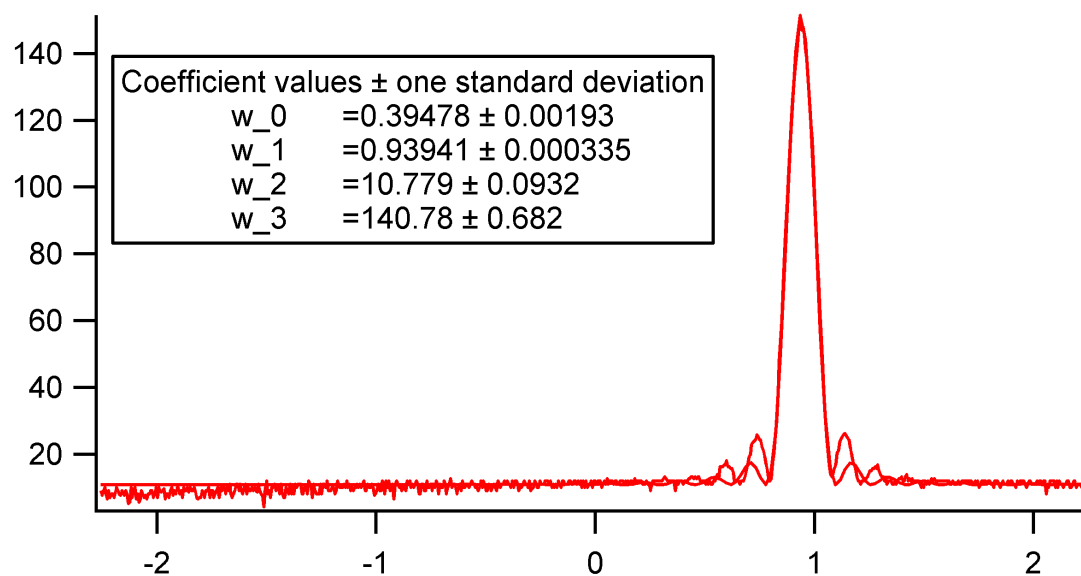
**Abbildung 7.3:** Beugungsmuster eines Helium-Neon-Lasers bei der Einstellung von  $12 \mu m$ . Der Querschnitt wurde mit Igor Pro ausgewählt und weiter analysiert



**Abbildung 7.4:** Beugungsmuster eines Helium-Neon-Lasers bei der Einstellung von  $16 \mu m$ . Der Querschnitt wurde mit Igor Pro ausgewählt und weiter analysiert



**Abbildung 7.5:** Beugungsmuster eines Helium-Neon-Lasers bei der Einstellung von  $20 \mu m$ . Der Querschnitt wurde mit Igor Pro ausgewählt und weiter analysiert



**Abbildung 7.6:** Beugungsmuster eines Helium-Neon-Lasers bei der Einstellung von  $24 \mu m$ . Der Querschnitt wurde mit Igor Pro ausgewählt und weiter analysiert