

Institut für Experimentalphysik der Technischen Universität Graz

&

Institut für Physik der Universität Graz

# **LABORÜBUNGEN 2: ELEKTRIZITÄT, MAGNETISMUS, OPTIK**

Übungsnummer: PHYC03UF

Übungstitel: Interferometer

Betreuer: HOHENAU Andreas

Gruppennummer: 1

Name: PHILIPP Maximilian

Name: STARK Matthias

Mat. Nr.: 11839611

Mat. Nr.: 12004907

Datum der Übung: 15 Oktober

WS 2021/2022

## Inhaltsverzeichnis

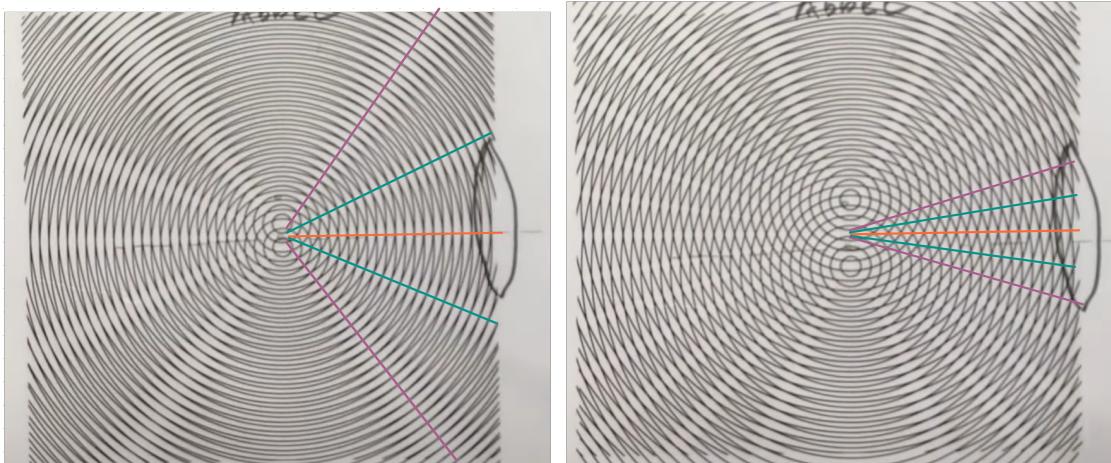
|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1   | Aufgabenstellung . . . . .  | 3  |
| 2   | Grundlagen . . . . .  | 3  |
| 3   | Versuchsanordnung . . . . .   | 5  |
| 4   | Geräteliste . . . . .   | 6  |
| 5   | Versuchsdurchführung & Messergebnisse . . . . .   | 6  |
| 5.1 | Einfluss der Größe einer Lichtquelle auf das Interferenzmuster eines Doppelspalts . . . . .             | 7  |
| 5.2 | Einfluss der spektralen Breite einer Lichtquelle auf das Interferenzmuster eines Doppelspalts . . . . . | 14 |
| 5.3 | Bestimmung der Dicke einer Kunststoffschicht anhand des Interferenzmusters . . . . .                    | 16 |
| 5.4 | Bestimmung der Größe einer Lichtquelle, bei der das Licht noch räumlich kohärent ist . . . . .          | 19 |
| 6   | Auswertung . . . . .  | 21 |
| 6.1 | Einfluss der Größe einer Lichtquelle auf das Interferenzmuster eines Doppelspalts . . . . .             | 21 |
| 6.2 | Einfluss der spektralen Breite einer Lichtquelle auf das Interferenzmuster eines Doppelspalts . . . . . | 22 |
| 6.3 | Bestimmung der Dicke einer Kunststoffschicht anhand des Interferenzmusters . . . . .                    | 23 |
| 6.4 | Bestimmung der Größe einer Lichtquelle, bei der das Licht noch räumlich kohärent ist . . . . .          | 24 |
| 7   | Diskussion . . . . .  | 25 |
| 7.1 | Einfluss der Größe einer Lichtquelle auf das Interferenzmuster eines Doppelspalts . . . . .             | 25 |
| 7.2 | Einfluss der spektralen Breite einer Lichtquelle auf das Interferenzmuster eines Doppelspalts . . . . . | 26 |
| 7.3 | Bestimmung der Dicke einer Kunststoffschicht anhand des Interferenzmusters . . . . .                    | 26 |
| 7.4 | Bestimmung der Größe einer Lichtquelle, bei der das Licht noch räumlich kohärent ist . . . . .          | 27 |
| 7.5 | möglicher systematischer Fehler . . . . .   | 27 |
| 8   | Zusammenfassung . . . . .   | 27 |

## 1 Aufgabenstellung

- Im Rahmen dieses Experiments soll der Einfluss der Größe einer Lichtquelle auf das Interferenzmuster eines Doppelspalts demonstriert und erklärt werden.
- Zusätzlich soll der Einfluss der spektralen Breite des Lichts einer räumlich kohärenten Lichtquelle auf das Interferenzmuster eines Doppelspalts demonstriert werden.
- Weiters soll die Dicke einer Kunststoffschicht anhand des Interferenzmusters bestimmt werden.
- Zum Abschluss soll die Größe der Lichtquelle bestimmt werden, bei der für Doppelspalten mit unterschiedlichen Spaltabstand das Licht noch räumlich kohärent ist.

## 2 Grundlagen

Trifft eine monochromatische Lichtwelle auf einen Doppelspalt, so bildet diese dahinter zwei neue Elementarwellen, die sich überlagern und so Interferenzmaxima und Minima bilden. Eine beispielhafte Skizze dafür ist in Abbildung 1 und Abbildung 2 gegeben. Die Anzahl der Beugungsordnungen die abgebildet werden, hängt dabei vom Abstand der Spalten ab.



**Abbildung 1:** Abbildung der Linse bei der die erste Beugungsordnung gerade nicht mehr vom Objektiv erfasst wird [3]

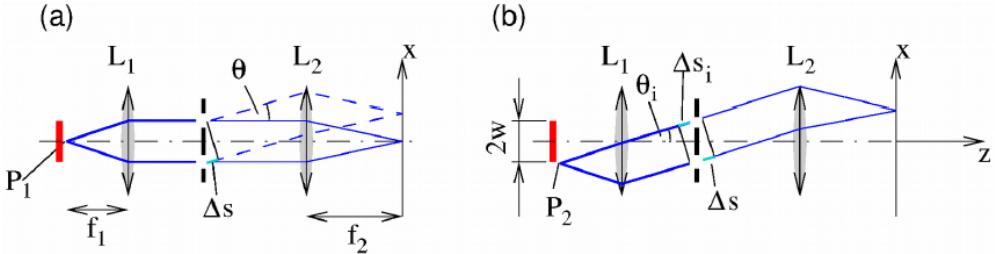
**Abbildung 2:** Abbildung der Linse bei der die zweite Beugungsordnung vom Objektiv erfasst wird [3]

Beugungsmaxima treten bei einem bestimmten Spaltabstand  $d$  immer bei Winkeln  $\theta$  auf, bei denen der Gangunterschied  $\Delta s$  ein Vielfaches  $m$  der Wellenlänge  $\lambda$  ist.

$$\Delta s = d \sin(\theta) = m\lambda \quad (1)$$

Reale Lichtquellen sind jedoch nie punktförmig und haben eine Ausdehnung  $2w$ .  $w$  steht dabei für den Abstand zur optischen Achse. Befindet sich der beleuchtete Punkt nun

abseits der optischen Achse, so wird eine Verschiebung des Beugungsmusters sichtbar, wie in folgender Abbildung 3 sichtbar.



**Abbildung 3:** Strahlengang für einen Punkt der sich auf der optischen Achse befindet (a) und einen Punkt, der um  $w$  entfernt ist. [2]

Diese Verschiebung der Interferenzmuster überlagert sich inkohärent. Ist die Lichtquelle also größer, gelangt Licht aus mehreren Richtungen in das System, wodurch der Kontrast, aufgrund von räumlicher Kohärenz, abnimmt. Anhand der Intensitätswerte kann der Kontrast  $K$  nach folgender Formel berechnet werden.  $I_{max}$  bezeichnet dabei die Intensität der 0. Maximums, während  $I_{min}$  die Intensität der  $\pm$  ersten Beugungsminimum bezeichnet.

$$K = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} = \left| \frac{\sin(2\pi \frac{d}{\lambda} \frac{w}{f_1})}{(2\pi \frac{d}{\lambda} \frac{w}{f_1})} \right| \quad (2)$$

Das erste Minimum ergibt sich dabei wenn folgende Bedingung erfüllt ist.

$$2\pi \frac{d}{\lambda} \frac{w}{f_1} = \pi \quad (3)$$

Lichtquellen mit einer Breite von  $2w$  werden dabei als räumlich kohärent bezeichnet.

Neben der räumlichen Kohärenz, die aufgrund der unterschiedlichen Richtungen der Lichtwellen entsteht, gibt es auch noch zeitliche Kohärenz, die aufgrund von unterschiedlichen Frequenzen zustande kommt.

Um die Schichtdicke  $t$  eines Objekts zu bestimmen wird die Tatsache verwendet, dass sich Licht in unterschiedlichen Medien verschieden schnell ausbreitet. Zunächst wird die Position der Interferenzmaxima bestimmt. Nun wird die zu bestimmende Schicht in den Strahlengang gegeben und der Versatz  $\Delta s$  notiert. Die Dicke der Schicht kann dann nach folgender Formel bestimmt werden. Dabei bezeichnet  $\lambda$  die Wellenlänge des Lichts,  $m$  die entsprechenden Beugungsordnungen und  $n_1$  bzw.  $n_2$  die Brechzahlen der jeweiligen Medien. [2]

$$t = \frac{m\lambda - \Delta s}{n_2 - n_1} \quad (4)$$

### 3 Versuchsanordnung

Der Versuchsaufbau ist in folgender maßstabsgtreuen Skizze ersichtlich, siehe Abbildung 4

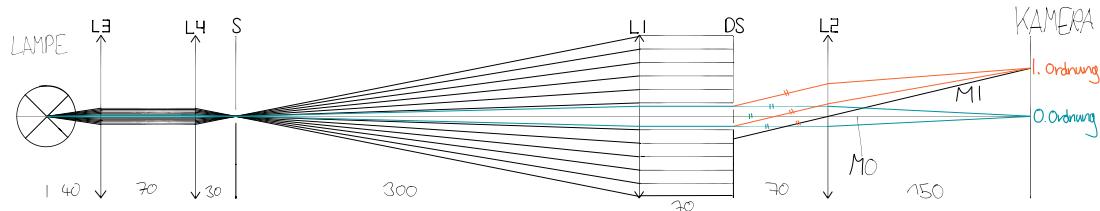


Abbildung 4: maßstabsgtreue Skizze des Versuchsaufbaus

L1 und L2 sind dabei die Linsen, welche das Licht der Lampe zum Spalt S bündeln. Dessen Breite kann mithilfe einer Mikrometerschraube verstellt werden. Von dort aus gelangt das Licht zur Linse L3, welche dieses parallel ausrichtet. Am Doppelspalt DS breitet sich das Licht in Form von zwei Wellen aus, die sich überlagern und so Interferenzmuster entstehen. Die Linse L3 richtet die Strahlen wieder so aus, dass diese in der Ebene der Kamera fokussiert werden. Am Filterrad F kann noch ein Filter in den Strahlengang gedreht werden. An der Stelle des blau gekennzeichneten Objekts O kann noch eine Substratschicht, sowie eine Polyacrylschicht in den Lichtweg eingeschwenkt und über einen Schraubmechanismus bewegt werden.

Der tatsächliche Versuchsaufbau ist in folgender Abbildung 5 ersichtlich. Die einzelnen Bestandteile des Aufbaus können anhand der Skizze in Abbildung 4 bestimmt werden.

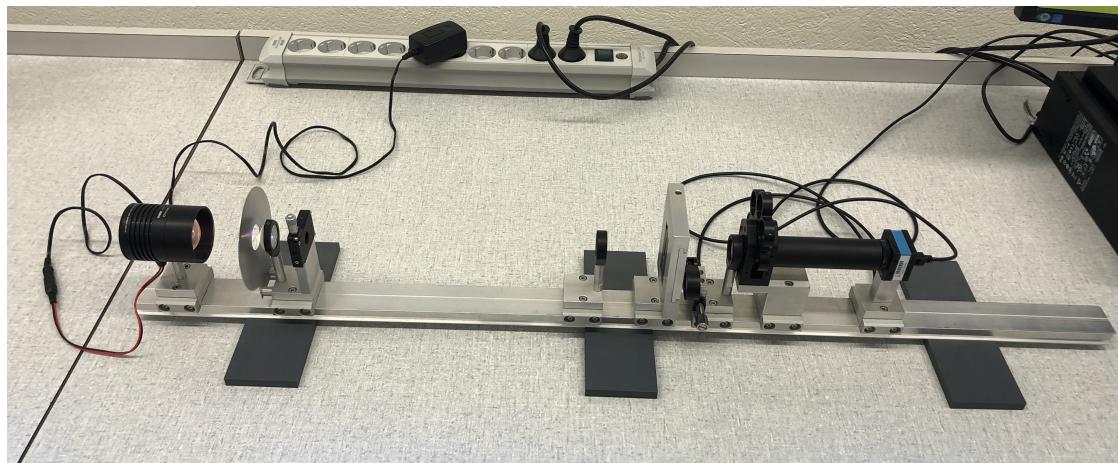


Abbildung 5: Versuchsaufbau

## 4 Geräteliste

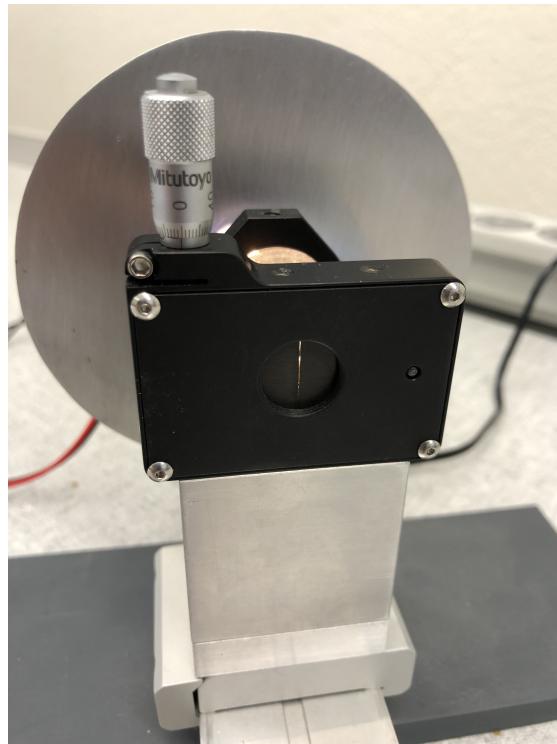
Für die Messungen wurden folgende Geräte verwendet:

**Tabelle 1:** Verwendete Geräte

| Gerät              | Typ                          | Brennweite bei Linsen | Hersteller    |
|--------------------|------------------------------|-----------------------|---------------|
| Lampe              | QTH 10 / M                   |                       | Thorlabs      |
| Linse L3           | LMR 1 / M                    | 40mm                  | Thorlabs      |
| Linse L4           | LMR 1 / M                    | 30mm                  | Thorlabs      |
| Spaltblende        | FMP 1 / M                    |                       | Thorlabs      |
| Mikrometerschraube | 148201                       |                       | Mitutoyo      |
| Linse L1           | LMR 1 / M                    | 300mm                 | Thorlabs      |
| Doppelspalt        | 0,13 mm, 0,23 mm, 0,43 mm    |                       | Thorlabs      |
| Objekte            | TRF 90 / M                   |                       | Thorlabs      |
| Linse L2           | LMR 1 / M                    | 150mm                 | Thorlabs      |
| Filterrad          | Bandpass- und Langpassfilter |                       |               |
| Kamera             | DMK 42 AUC 03                |                       | Imagingsource |
| Optische Bank      |                              |                       |               |
| Computersoftware   | IC Capture                   |                       |               |
| Computersoftware   | imageJ                       |                       |               |

## 5 Versuchsdurchführung & Messergebnisse

Um die genaue Spaltbreite feststellen zu können, lässt sich diese mithilfe einer Mikrometerschraube variieren. Dabei ist zu beachten, dass der Spalt bei der Nulllage der Mikrometerschraube nicht vollständig geschlossen ist, wie in Abbildung 6 ersichtlich ist.



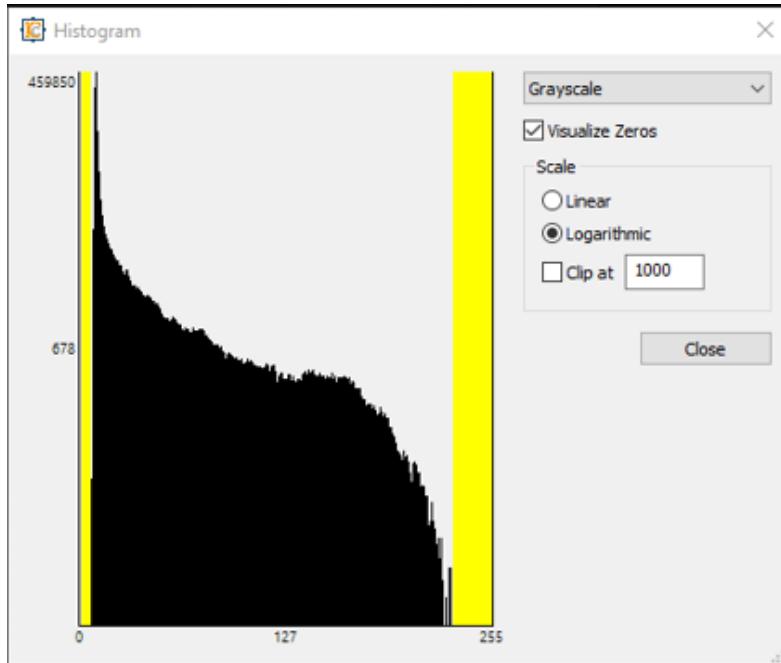
**Abbildung 6:** Spaltabstand bei Nullpunktslage

Um nun also den tatsächlichen Spaltabstand bestimmen zu können, wird der Spalt vollständig geschlossen und der entsprechende Wert der Mikrometerschraube abgelesen, was einen Versatz von  $(-0,210 \pm 0,005)$  mm ergibt, der bei der Auswertung berücksichtigt werden muss.

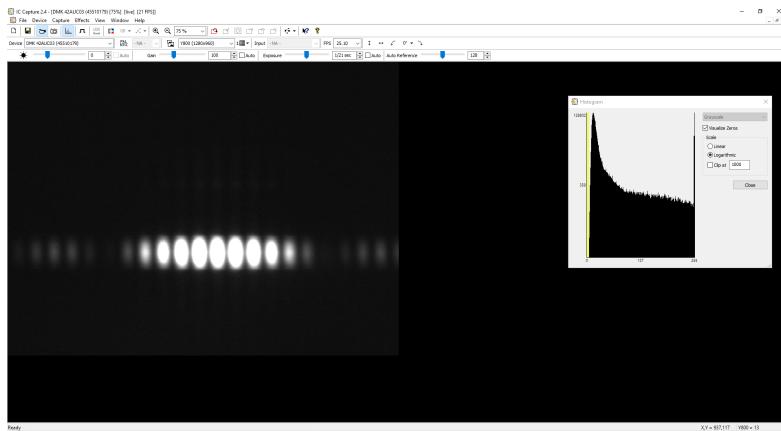
### **5.1 Einfluss der Größe einer Lichtquelle auf das Interferenzmuster eines Doppelspalts**

Zunächst wird am Filterrad der Bandpassfilter für eine Wellenlänge von 633 nm in den Strahlengang gedreht, um für monochromatisches Licht zu sorgen. Bei den Doppelpalten wird der Breiteste Spalt mit einem Abstand von 0,43 mm verwendet.

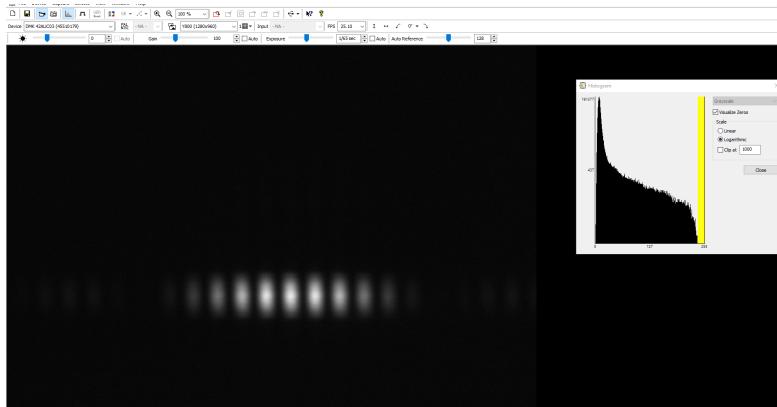
Nun wird mithilfe der Computersoftware "IC Capture" die "Exposure" geändert, was der Belichtungszeit entspricht. Dabei ist zu beachten, dass am rechten Rand der angezeigten Grafik, die in Abbildung 7 sichtbar ist, ein gelber Balken angezeigt wird. Dies bestätigt, dass die Belichtungsparameter richtig eingestellt sind.

**Abbildung 7:** Grafik mit gelben Balken am Rand

Wenn die Helligkeit richtig eingestellt ist, ist nun in der Software folgendes Bild aus Abbildung 8 sichtbar.

**Abbildung 8:** Sichtbares Bild mit Beugungsordnungen

Nun wird der Spalt vollkommen geschlossen und vorsichtig wieder geöffnet. Dabei wird alle 0,1 mm ein Bild des Interferenzmusters gemacht und die entsprechende Spaltbreite notiert. Dabei ist, wie bereits erwähnt, der Offset der Mikrometerschraube zu beachten. Die Belichtungszeit muss bei jedem Spaltabstand neu nachjustiert werden, da sich mit zunehmender Größe des Spalts natürlich aus die Helligkeit der aufgezeichneten Bilder erhöht. Ein exemplarisches Bild des Interferenzmusters ist in Abbildung 9 zu sehen. Der abgelesene Wert der Spaltbreite ist dabei  $(-0,010 \pm 0,005)$  mm, was unter der Berücksichtigung des Offsets einer Breite von  $(0,200 \pm 0,005)$  mm entspricht.

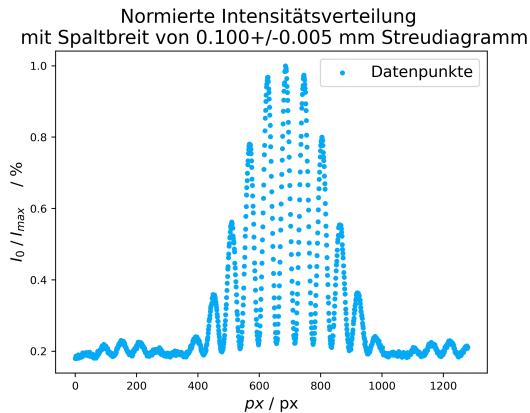


**Abbildung 9:** Interferenzmuster bei einer Spaltbreite von  $(0,200 \pm 0,005)$  mm unter Verwendung des Bandpassfilters und einem Doppelspalt mit  $(0,430 \pm 0,005)$  mm

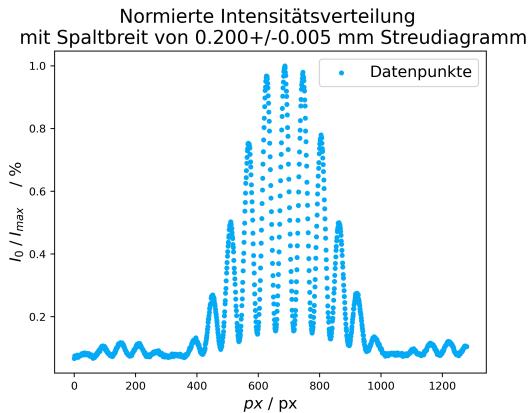
Die so aufgenommenen Bilder wurden nun mithilfe der Bildbearbeitungssoftware “imageJ“ ausgewertet. Dazu wird eine rechteckige Auswahl über das Bild des Beugungsmusters gelegt. Mit der “Analyze“Funktion kann nun der Grauwert, welcher der Intensität entspricht, der jeweiligen Pixelnummer zugeordnet werden und die so erhaltenen Daten in Form einer CSV-Datei gespeichert und so geplottet werden. Dabei ist zu beachten, dass sich der Auswahlkasten über das gesamte Bild erstreckt, was später für die Bestimmung der Unsicherheit noch wichtig wird.

Im folgenden sind die so geplotteten Graphen für die unterschiedlichen Spaltbreiten sichtbar.

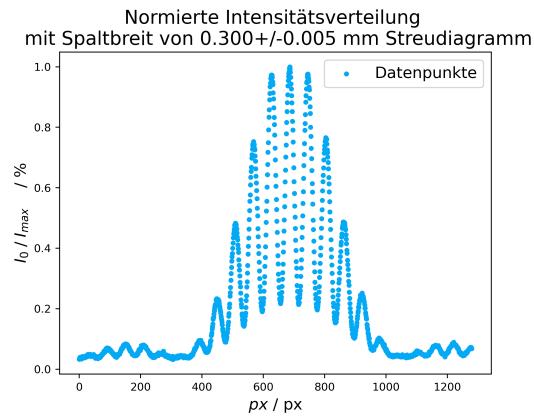
Der besseren Übersicht halber, wird beim Spaltabstand nur der Wert mit dem Berücksichtigten Offset der Mikrometerschraube notiert.



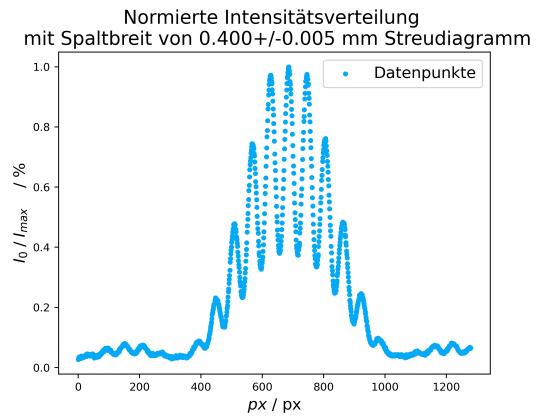
**Abbildung 10:** geplotter Grauwert aufgetragen zu jeweiligen Pixelnummer bei einer Spaltbreite von  $(0,100 \pm 0,005)$  mm



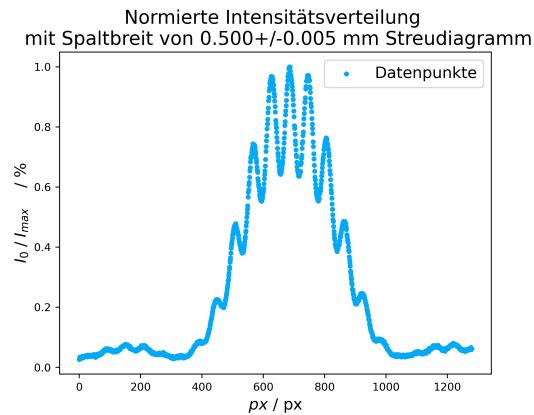
**Abbildung 11:** geplotter Grauwert aufgetragen zu jeweiligen Pixelnummer bei einer Spaltbreite von  $(0,200 \pm 0,005)$  mm



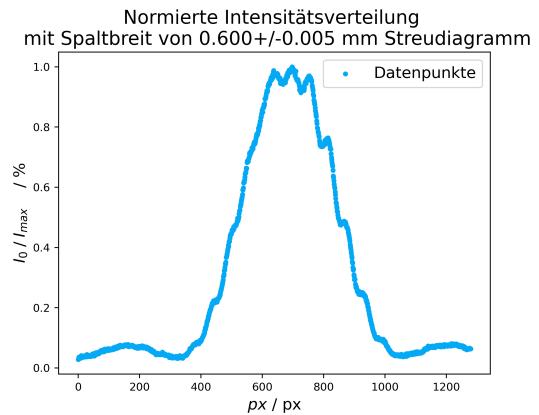
**Abbildung 12:** geplotter Grauwert aufgetragen zu jeweiligen Pixelnummer bei einer Spaltbreite von  $(0,300 \pm 0,005)$  mm



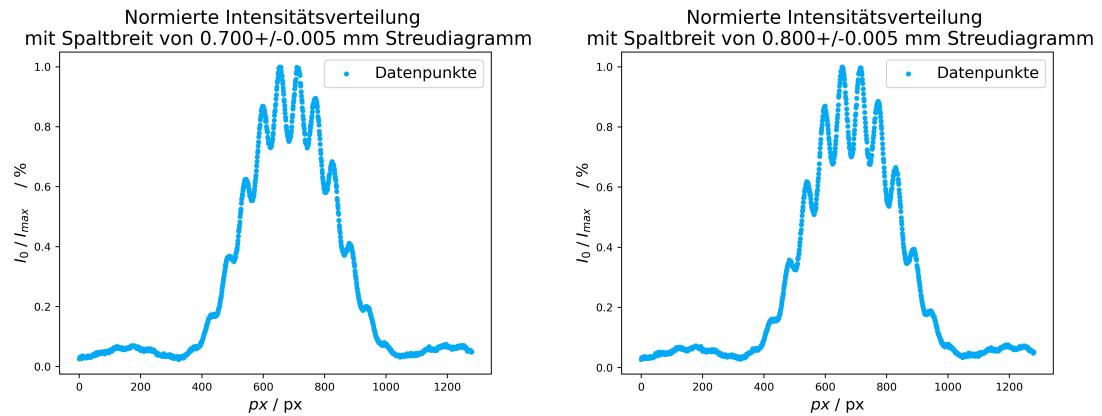
**Abbildung 13:** geplotter Grauwert aufgetragen zu jeweiligen Pixelnummer bei einer Spaltbreite von  $(0,400 \pm 0,005)$  mm



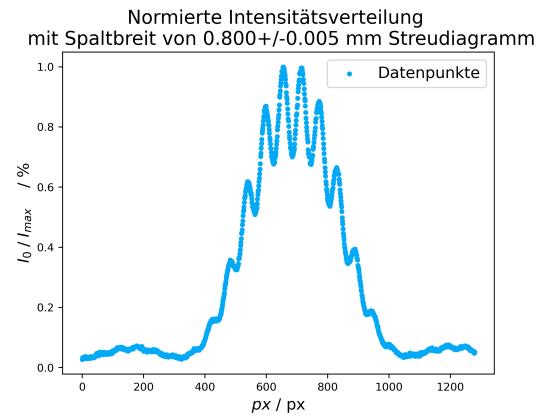
**Abbildung 14:** geplotter Grauwert aufgetragen zu jeweiligen Pixelnummer bei einer Spaltbreite von  $(0,500 \pm 0,005)$  mm



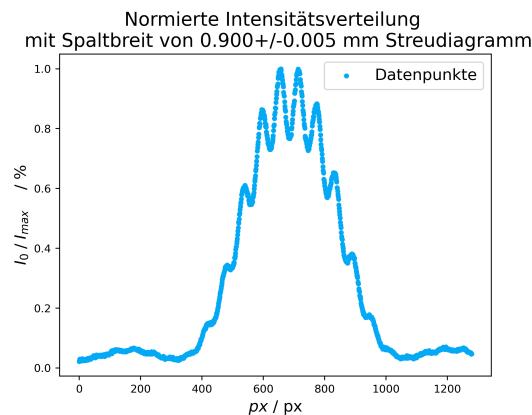
**Abbildung 15:** geplotter Grauwert aufgetragen zu jeweiligen Pixelnummer bei einer Spaltbreite von  $(0,600 \pm 0,005)$  mm



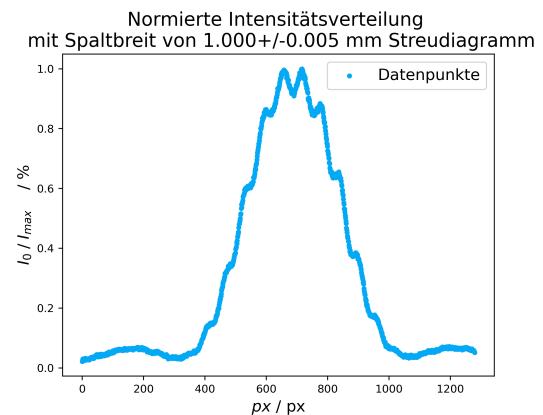
**Abbildung 16:** geplotter Grauwert aufgetragen zu jeweiligen Pixelnummer bei einer Spaltbreite von  $(0,700 \pm 0,005)$  mm



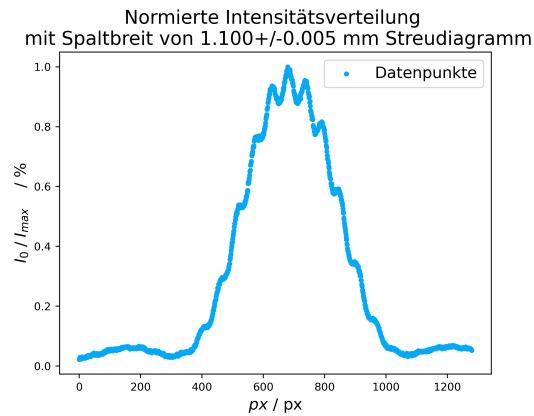
**Abbildung 17:** geplotter Grauwert aufgetragen zu jeweiligen Pixelnummer bei einer Spaltbreite von  $(0,800 \pm 0,005)$  mm



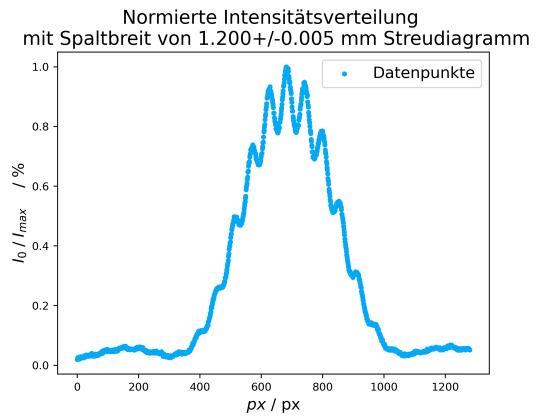
**Abbildung 18:** geplotter Grauwert aufgetragen zu jeweiligen Pixelnummer bei einer Spaltbreite von  $(0,900 \pm 0,005)$  mm



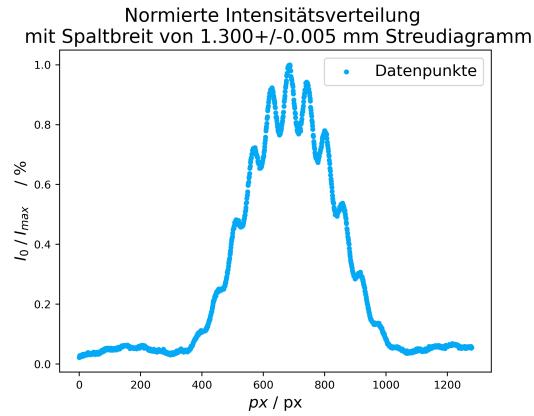
**Abbildung 19:** geplotter Grauwert aufgetragen zu jeweiligen Pixelnummer bei einer Spaltbreite von  $(1,000 \pm 0,005)$  mm



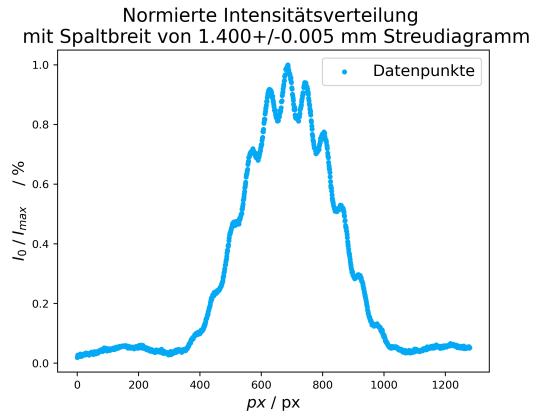
**Abbildung 20:** geplotter Grauwert aufgetragen zu jeweiligen Pixelnummer bei einer Spaltbreite von  $(1,100 \pm 0,005)$  mm



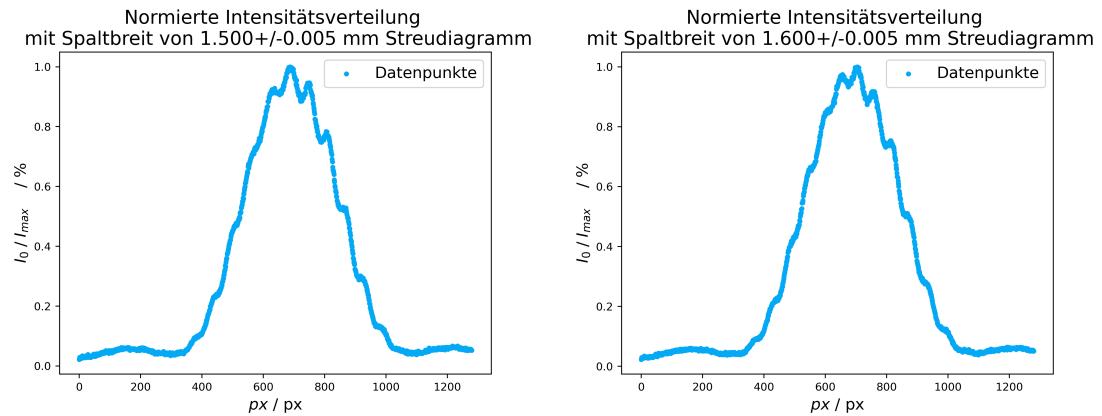
**Abbildung 21:** geplotter Grauwert aufgetragen zu jeweiligen Pixelnummer bei einer Spaltbreite von  $(1,200 \pm 0,005)$  mm



**Abbildung 22:** geplotter Grauwert aufgetragen zu jeweiligen Pixelnummer bei einer Spaltbreite von  $(1,300 \pm 0,005)$  mm

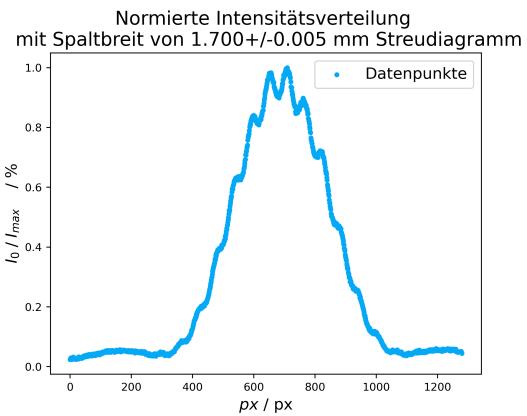


**Abbildung 23:** geplotter Grauwert aufgetragen zu jeweiligen Pixelnummer bei einer Spaltbreite von  $(1,400 \pm 0,005)$  mm



**Abbildung 24:** geplotter Grauwert aufgetragen zu jeweiligen Pixelnummer bei einer Spaltbreite von  $(1,500 \pm 0,005)$  mm

**Abbildung 25:** geplotter Grauwert aufgetragen zu jeweiligen Pixelnummer bei einer Spaltbreite von  $(1,600 \pm 0,005)$  mm



**Abbildung 26:** geplotter Grauwert aufgetragen zu jeweiligen Pixelnummer bei einer Spaltbreite von  $(1,700 \pm 0,005)$  mm

## 5.2 Einfluss der spektralen Breite einer Lichtquelle auf das Interferenzmuster eines Doppelspalts

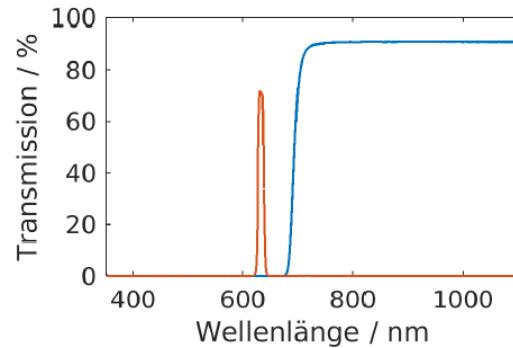
Für Versuch 2 werden die verschiedenen Filter des Filterrads F in den Strahlengang gedreht. Diese sind in folgender Abbildung 27 sichtbar.



**Abbildung 27:** verschiedene Filter an Filterrad

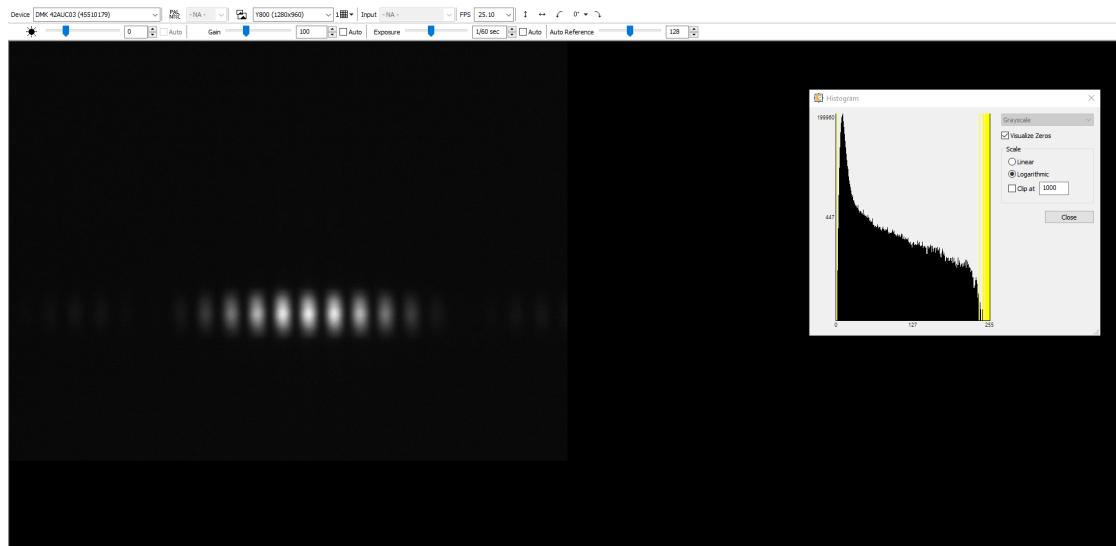
Der dunkle Filter, bei dem in der Abbildung 27 die 5 sichtbar ist, ist ein Langpassfilter, der ab einer Wellenlänge von ca. 710 nm aktiv wird. Der Filter links daneben ist der Bandpassfilter von 633 nm. Die anderen 4 Positionen im Filterrad sind leer.

Die genaue Transmission der Filter ist in folgender Abbildung 28 veranschaulicht.

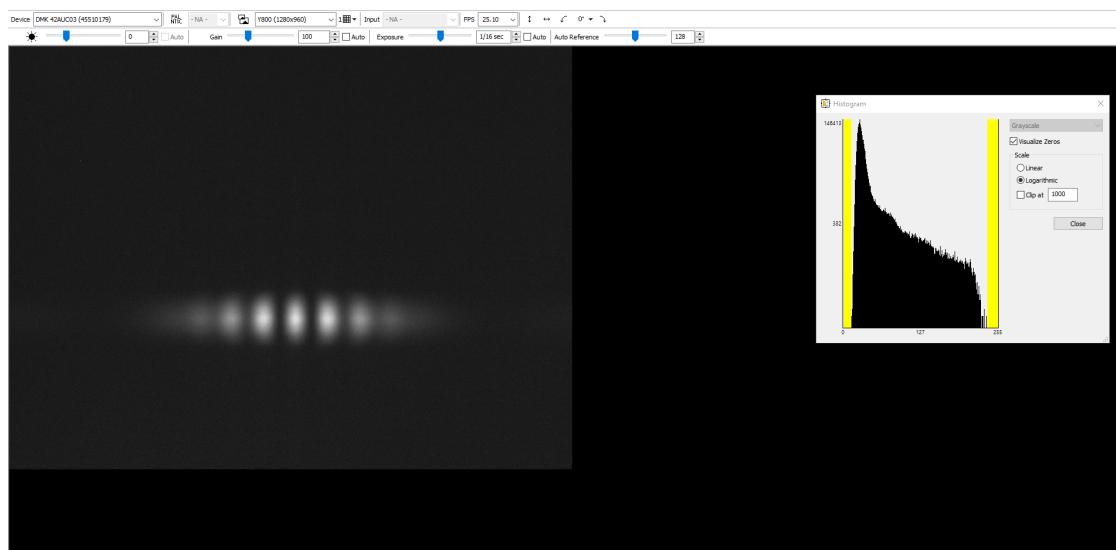


**Abbildung 28:** Abbildung der Transmissionen der Filter  
Orange beschreibt dabei den Bandpassfilter,  
während die blaue Kurve den Langpassfilter beschreibt [2]

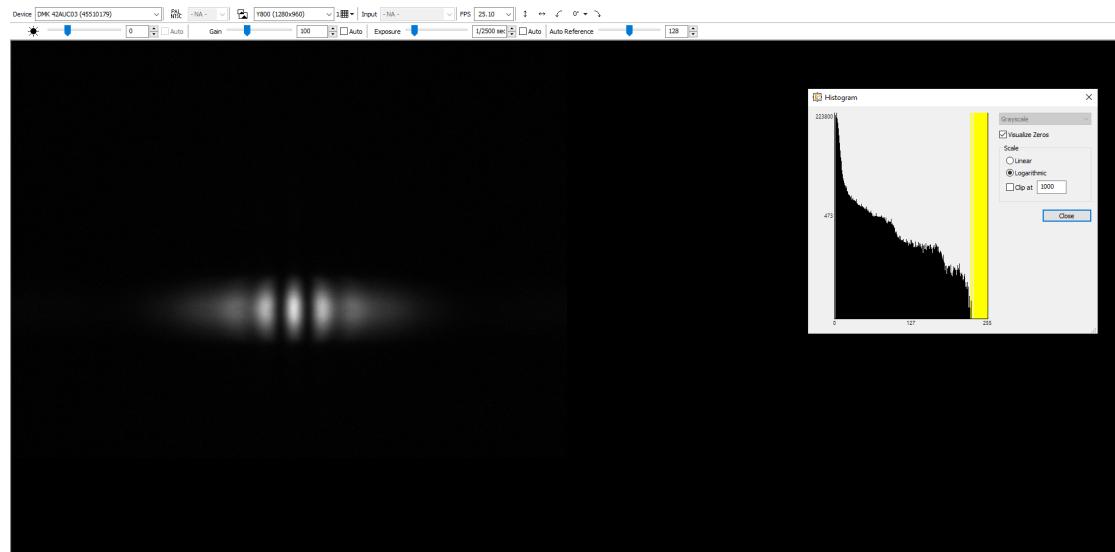
Nun werden wieder, wie bereits unter Versuch 1 beschrieben die Interferenzmuster mit den unterschiedlichen Filtern mithilfe der Computersoftware “IC Capture“ aufgenommen, was in folgenden 3 Abbildungen sichtbar ist. der Abstand des Doppelspalts war wieder, wie zuvor,  $(0,430 \pm 0,005)$  mm, während für die Spaltbreite ein Abstand von  $(0,200 \pm 0,005)$  mm, mit Berücksichtigung der Offsets, gewählt wurde. Es wurde wieder ein Bild des gesamten Bildschirms abgebildet, um die Werte die beispielsweise für die “Exposure“ angegeben wurden, festzuhalten.



**Abbildung 29:** Interferenzmuster bei einer Spaltbreite von  $(0,200 \pm 0,005)$  mm unter Verwendung des Bandpassfilters und einem Doppelspalt mit  $(0,430 \pm 0,005)$  mm



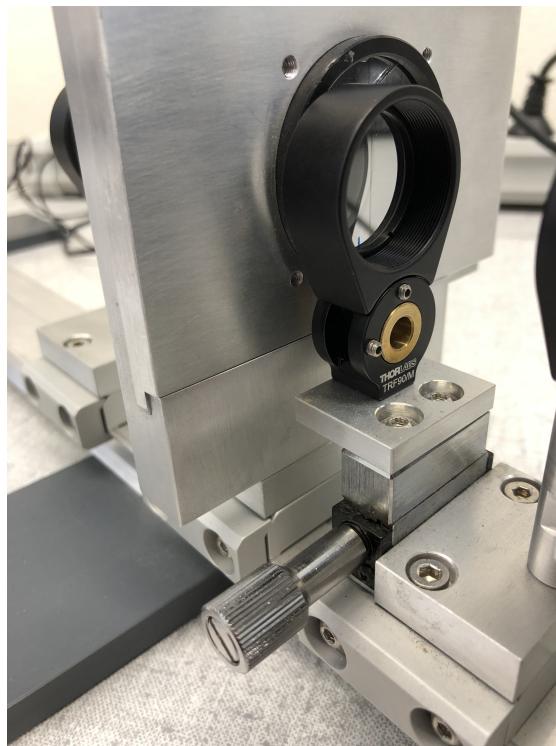
**Abbildung 30:** Interferenzmuster bei einer Spaltbreite von  $(0,200 \pm 0,005)$  mm unter Verwendung des Langpassfilters und einem Doppelspalt mit  $(0,430 \pm 0,005)$  mm



**Abbildung 31:** Interferenzmuster bei einer Spaltbreite von  $(0,200 \pm 0,005)$  mm ohne Filter und einem Doppelspalt mit  $(0,430 \pm 0,005)$  mm

### 5.3 Bestimmung der Dicke einer Kunststoffschicht anhand des Interferenzmusters

Für diesen Teil des Versuchs werden die Substratschicht, sowie die Polyacrylatschicht, in den Strahlengang geschoben. Dies ist in Abbildung 32 sichtbar.

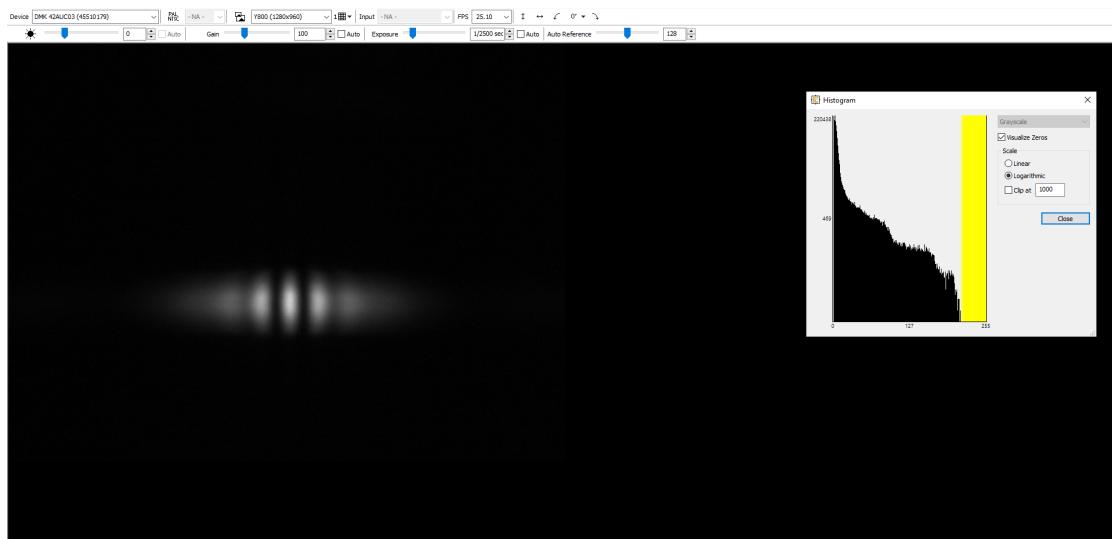


**Abbildung 32:** in den Strahlengang geschobene Substratschicht, sowie die Polyacrylatschicht (bei blau markierten Strich)

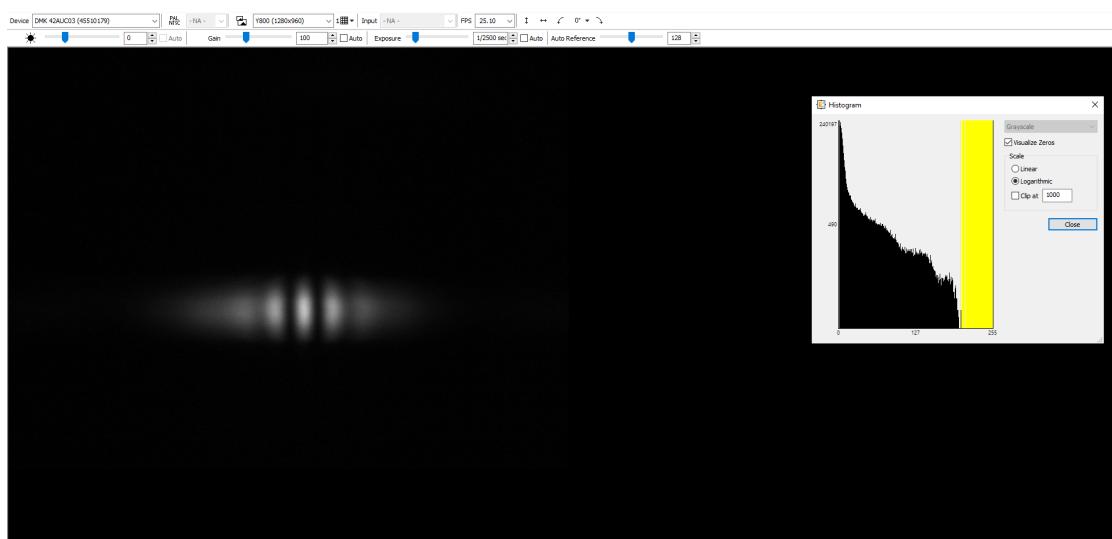
Die Einstellungen für den Doppelspalt und den Spaltabstand wurden gleich gelassen, wie für Versuch 2, also ein Abstand des Doppelspalts von  $(0,430 \pm 0,005)$  mm und eine Spaltbreite von  $(0,200 \pm 0,005)$  mm, mit Berücksichtigung der Offsets. Weiters wird der Filter aus dem Strahlengang entfernt, also das Filtrerrad in eine Position gedreht, sodass die Filter außerhalb sind.

Nun wird das Objekt mithilfe des Schraubmechanismus bewegt, bis ein leichter Sprung am aufgezeichneten Bild der Kamera sichtbar wird. Daran ist erkennbar, dass sich die Polyacrylatschicht nun vor einem der Doppelpalten befindet.

Nun werden die beiden entsprechenden Bilder aufgenommen, um so anhand der Verschiebung der Maxima auf die Dicke der Kunststoffschicht schließen zu können.

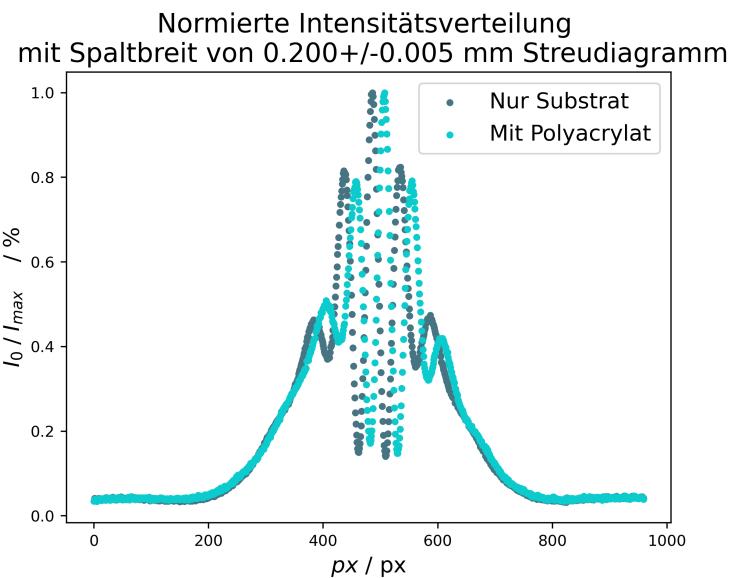


**Abbildung 33:** Interferenzmuster mit der Substratschicht, bei einer Spaltbreite von  $(0,200 \pm 0,005)$  mm und einem Doppelspalt mit  $(0,430 \pm 0,005)$  mm



**Abbildung 34:** Interferenzmuster mit der Substrat- und Polyacrylschicht, bei einer Spaltbreite von  $(0,200 \pm 0,005)$  mm und einem Doppelspalt mit  $(0,430 \pm 0,005)$  mm

Die genaue Position der Maxima wird wieder, wie bereits unter Versuch 1 beschrieben, mithilfe der Bildbearbeitungssoftware ‘imageJ’ ausgewertet und die so erhaltenen Daten in folgender Grafik veranschaulicht.



**Abbildung 35:** Verteilung der Intensitätsmaxima auf die entsprechende Pixelzahl mit (türkis) und ohne (grau) Polyacrylschicht

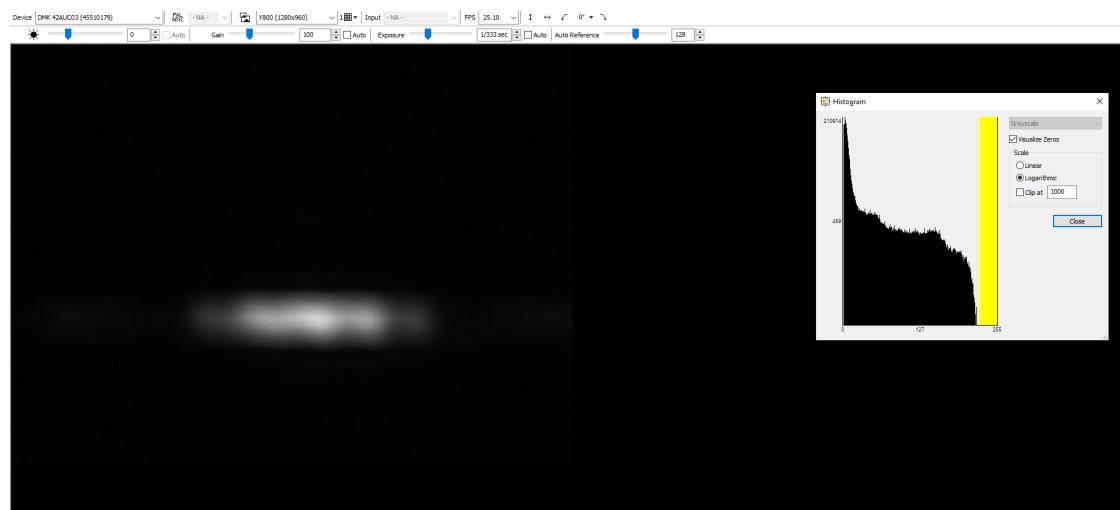
#### 5.4 Bestimmung der Größe einer Lichtquelle, bei der das Licht noch räumlich kohärent ist

Für diesen Teil des Versuchs wird wieder der Bandpassfilter in den Strahlengang gedreht, um monochromatisches Licht zu erzeugen. Auch der Spaltabstand wird konstant bei  $(0,200 \pm 0,005)$  mm, unter der Berücksichtigung des Offsets, belassen.

Nun werden der Reihe nach unterschiedlich große Doppelspalte in den Aufbau geschoben und notiert, bei welchem Spaltabstand das erste Beugungsminimum sichtbar wird. Dies ist daran erkennbar, dass das Beugungsmuster verschwommen wird und die einzelnen Maxima nicht mehr unterscheidbar sind, wie beispielsweise für den Doppelspalt mit einem Abstand von  $(0,230 \pm 0,005)$  mm in Abbildung 36 sichtbar.

**Tabelle 2:** Abgelesene Werte für die Spaltbreite bei der das erste Minimum sichtbar ist  
 $d \dots$  Größe des Doppelspalts

| $d = (0,430 \pm 0,005) \text{ mm}$ | $d = (0,230 \pm 0,005) \text{ mm}$ | $d = (0,130 \pm 0,005) \text{ mm}$ |
|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 0.410                              | 0.800                              | 1.680                              |
| 0.380                              | 0.780                              | 1.460                              |
| 0.390                              | 0.760                              | 1.510                              |
| 0.360                              | 0.800                              | 1.730                              |
| 0.380                              | 0.750                              | 1.530                              |
| 0.370                              | 0.810                              | 1.420                              |
| 0.410                              | 0.790                              | 1.480                              |
| 0.390                              | 0.750                              | 1.340                              |
| 0.410                              | 0.770                              | 1.260                              |
| 0.400                              | 0.760                              | 1.270                              |

**Abbildung 36:** Interferenzmuster des ersten Minimums bei einer Spaltbreite von  $(0,200 \pm 0,005) \text{ mm}$  und einem Doppelspalt mit  $(0,230 \pm 0,005) \text{ mm}$ 

Da der genaue Punkt des Minimums sehr schwer zu finden ist, wurde der Spalt immer geschlossen und langsam wieder geöffnet, bis das von der Computersoftware aufgezeichnete Bild das erste Mal einen Verschwommenen Eindruck macht. Um den statistischen Fehler dieser subjektiven Wahrnehmung möglichst gering zu halten wurde dieser Vorgang von den Experimentatoren abwechselnd 10 mal wiederholt. Die erhaltenen Werte sind in folgender Tabelle 2 aufgelistet. Bei den Werten ist dabei zu beachten, dass diese direkt von der Mikrometerschraube abgelesen wurden und daher noch der Offset von  $(0,210 \pm 0,005) \text{ mm}$  addiert werden muss.

## 6 Auswertung

Um zu sehen wie sich die Unsicherheit der Messungen bis in die Ergebnisse fortpflanzt, ist Gleichung 5 verwendet worden. Die Grundlagen dieser Gleichung stammen von den Powerpointfolien von GUM.[4] Die Verallgemeinerung ist von Wikipedia entnommen worden [1]. Für die Auswertung ist die Programmiersprache Python im speziellen das Packet `scipy`, zur Hilfe genommen worden.

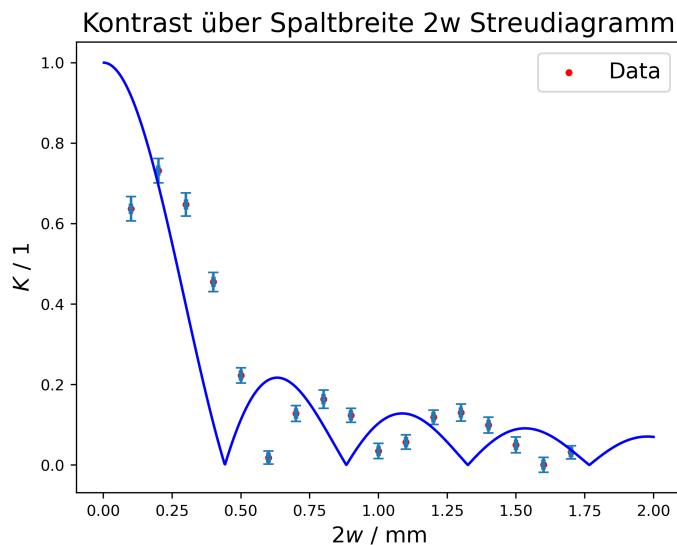
$$V_y = J(x) \cdot V_x \cdot J^T(x) \quad (5)$$

Wobei  $V_y$  und  $V_x$  die Kovarianzmatrizen von den Vektoren  $\mathbf{y}$  und  $\mathbf{x}$  sind.  $\mathbf{x}$  ist der Vektor der Eingangsvariablen und  $\mathbf{y}$  ist der Vektor der Ausgangsvariablen.  $J$  ist die Jakobimatrix der vektorwertigen Funktion  $\mathbf{y} = \vec{F}(\mathbf{x})$ . So lassen sich die Komponenten der Matrix relativ einfach anschreiben  $J_{ij}(x) = \frac{\partial y_i}{\partial x_j}(x)$ . Damit man die Unsicherheit der einzelnen Variablen  $y_i$  bekommt, muss nur die Quadratwurzel des i-ten Diagonalelementes der  $\mathbf{y}$ -Kovarianzmatrix genommen werden  $u_i = \sqrt{\text{diag}(V_y)_i}$ . Da in diesem Experiment meistens nur skalare Funktionen untersucht werden, vereinfacht sich die Gleichung 5 dramatisch und die Unsicherheit der Variable  $y$  lässt sich einfach so berechnen:

$$u_y = \sqrt{\text{grad}y^T \cdot V_x \cdot \text{grad}y} \quad (6)$$

### 6.1 Einfluss der Größe einer Lichtquelle auf das Interferenzmuster eines Doppelspalts

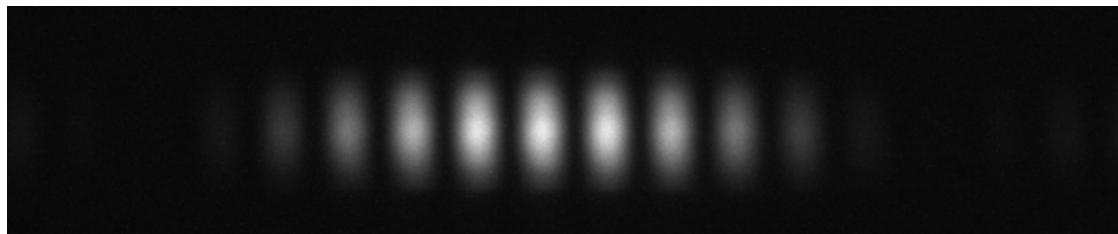
Die gemessenen Daten der bestimmten Maximal und Minimalintensitäten werden nun, unter Verwendung von Gleichung 2 geplottet, was in folgender Abbildung 37 sichtbar ist. Zusätzlich wird noch der theoretische Verlauf unter Verwendung von Gleichung 2 (rechter Teil) eingezeichnet.



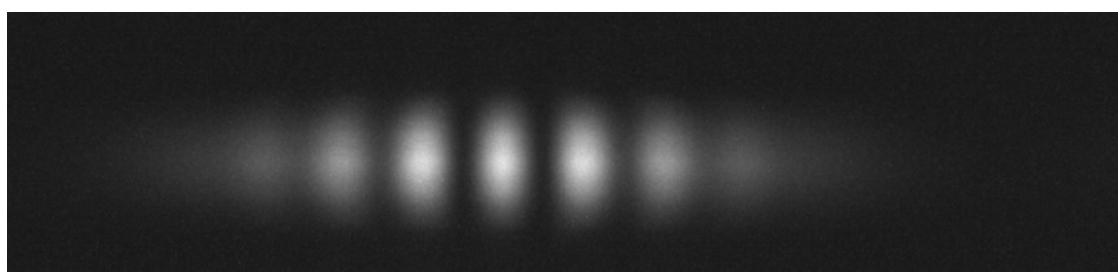
**Abbildung 37:** Kontrast des Beugungsmusters mit theoretischen Fit und gemessenen Werten

## 6.2 Einfluss der spektralen Breite einer Lichtquelle auf das Interferenzmuster eines Doppelspalts

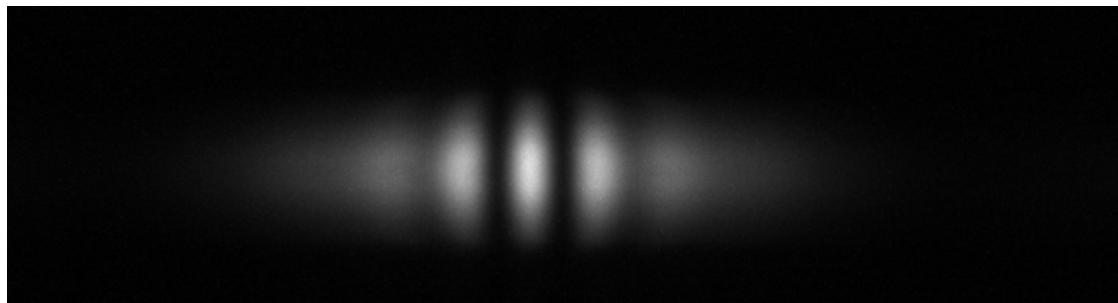
Um einen direkten Vergleich der Interferenzmuster aus Abbildung 29, Abbildung 30 und Abbildung 31 zu ermöglichen, wurden die entsprechenden Interferenzmuster mochmals extra als Großaufnahme abgebildet.



**Abbildung 38:** Interferenzmuster bei einer Spaltbreite von  $(0,200 \pm 0,005)$  mm unter Verwendung des Bandpassfilters und einem Doppelspalt mit  $(0,430 \pm 0,005)$  mm



**Abbildung 39:** Interferenzmuster bei einer Spaltbreite von  $(0,200 \pm 0,005)$  mm unter Verwendung des Langpassfilters und einem Doppelspalt mit  $(0,430 \pm 0,005)$  mm

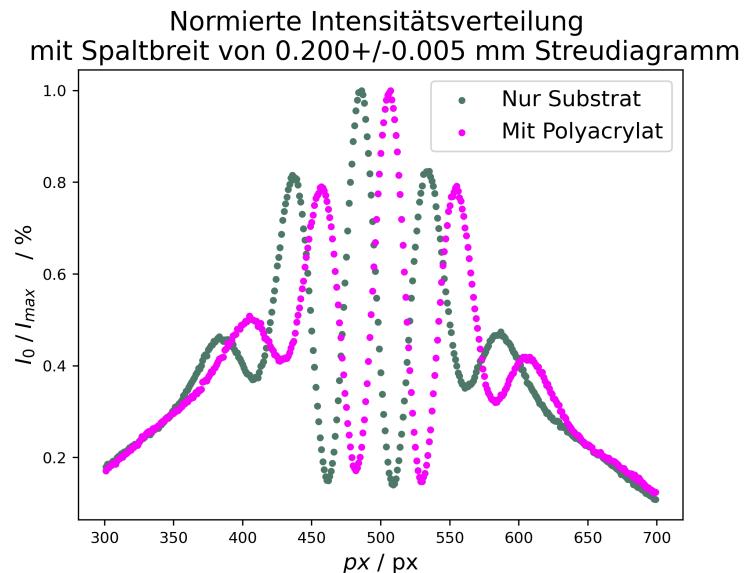


**Abbildung 40:** Interferenzmuster bei einer Spaltbreite von  $(0,200 \pm 0,005)$  mm ohne Filter und einem Doppelspalt mit  $(0,430 \pm 0,005)$  mm

Dieser Vergleich zeigt klar, dass bei einer geringeren durchgelassenen Wellenlänge die Auflösung des Bildes deutlich besser ist.

### 6.3 Bestimmung der Dicke einer Kunststoffschicht anhand des Interferenzmusters

Um die Verschiebung der Maxima durch die Polyacrylatschicht genauer festzustellen, wurde der Pixelbereich des Graphen aus Abbildung 35 vergrößert in folgender Abbildung 41 dargestellt, um den relevanten Bereich besser darzustellen.



**Abbildung 41:** Verteilung der Intensitätsmaxima auf die entsprechende Pixelzahl mit (pink) und ohne (dunkelgrün) Polyacrylatschicht

Datenpunkte der zwei äußersten Peaks wurden verwendet um die Nanometer pro Pixelzahl zu bestimmen. Die zwei Peaks sind 4 Wellenlängen von einander entfernt, da jeder Peak eine Wellenlängen zum Nächsten hat, dies ist anhand Gleichung 1 erkennbar.

$$M = \frac{4\lambda}{P_L - P_R} = \frac{4 \cdot 633 \pm 5}{587 \pm 1 - 383 \pm 1} = (1,24 \pm 0,16) \frac{\text{nm}}{\text{px}} \quad (7)$$

Da wir nun ein Maß besitzen um Pixel in Nanometer umzurechnen ist es möglich den den Versatz der 0. Ordnung  $\Delta P_0$  in nm umzurechnen.

$$\Delta s = \Delta P_0 \cdot M = 507 \pm 1 - 486 \pm 1 \cdot 1,24 \pm 0,16 \text{ nm} = (260 \pm 30) \text{ nm} \quad (8)$$

Mit diesem Versatz und dem Brechungsindex von Polyacrylat  $n_P = 1.492@633 \text{ nm}$  [2] und Luft  $n_L \approx 1$  kann mit Gleichung 4 die Dicke  $t$  der Polyacrylschicht bestimmt werden. Da es sich um die 0. Ordnung handelt ist  $m = 0$  und somit erhält man:

$$t = \left| \frac{\Delta s}{n_P - n_L} \right| = (530 \pm 70) \text{ nm} \quad (9)$$

#### 6.4 Bestimmung der Größe einer Lichtquelle, bei der das Licht noch räumlich kohärent ist

Zunächst wurden der Mittelwert und die Standardabweichung der gemessenen Werte aus Tabelle 2 bestimmt, was in folgender Tabelle sichtbar ist.

**Tabelle 3:** Mittelwert und Standardabweichung der Werte für die Spaltbreite bei der das erste Minimum sichtbar ist

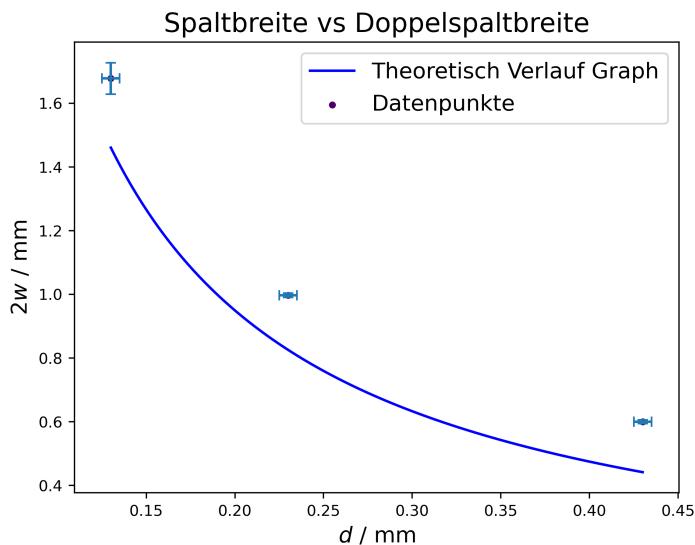
$d$  ... Größe des Doppelspalts

$\overline{2w}$  ... errechneter Mittelwert

$\Delta$  ... entsprechende Unsicherheit

|                 | $d = (0,430 \pm 0,005) \text{ mm}$ | $d = (0,230 \pm 0,005) \text{ mm}$ | $d = (0,130 \pm 0,005) \text{ mm}$ |
|-----------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| $\overline{2w}$ | 0.390                              | 0.777                              | 1.49                               |
| $\Delta$        | 0.006                              | 0.007                              | 0.05                               |

Anhand dieser Daten wurde folgende Grafik geplottet.



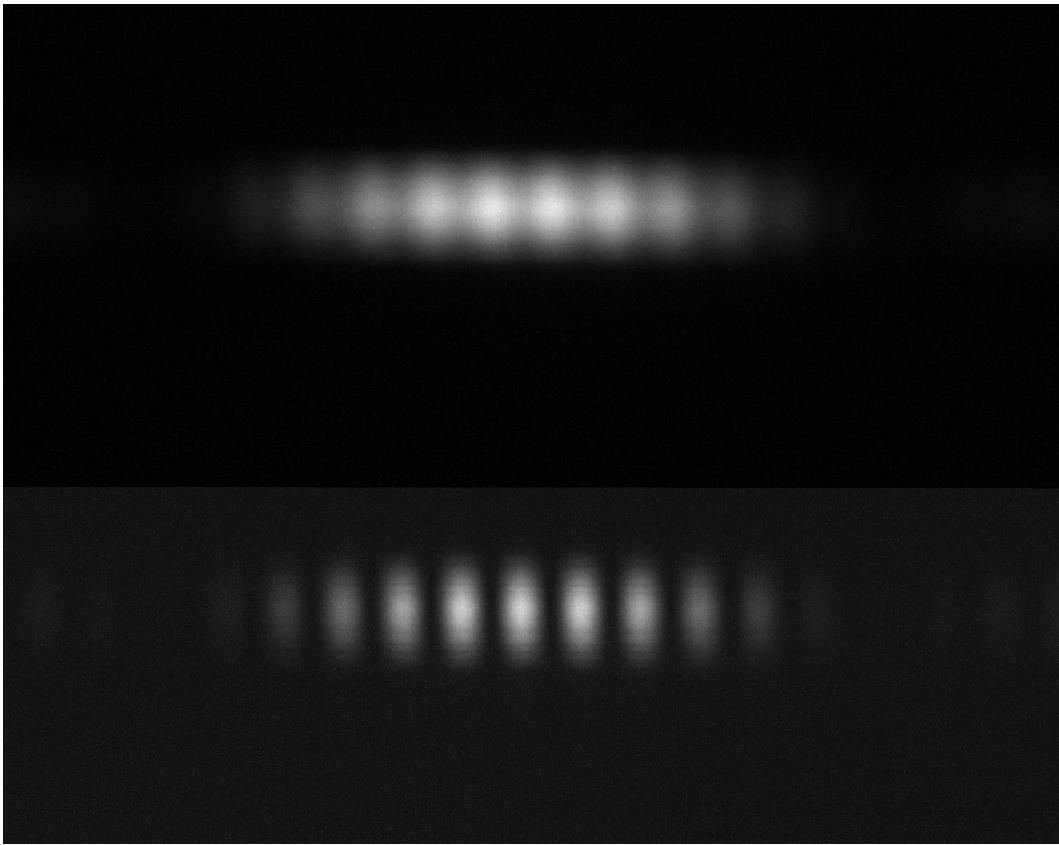
**Abbildung 42:** Spaltbreite beim ersten Kontrastminimum aufgetragen zur Doppelspaltbreite

## 7 Diskussion

### 7.1 Einfluss der Größe einer Lichtquelle auf das Interferenzmuster eines Doppelspalts

Vergleicht man die gemessenen Werte mit dem theoretischen Verlauf der Kurve, fällt sofort auf, dass diese um einen bestimmten Faktor verschoben scheinen. Es könnte sich dabei um einen systematischen Fehler handeln.

Der erste aufgezeichnete Punkt weicht besonders stark von der theoretischen Kurve ab. Betrachtet man das zugehörige Foto, siehe Abbildung 43, stellt man fest, dass der Hintergrund des Bildes etwas gräulicher als die anderen ist, wodurch sich der Kontrast der weißen Maxima klarerweise ändert, wie auch in den Daten ersichtlich, siehe Abbildung 10.



**Abbildung 43:** Unten sieht man, dass das Hintergrundschwarz, bei einer Spaltöffnung von 0,1 mm gräulicher ist als bei den anderen Spaltöffnungen z.B. bei 0,8 mm Oben, ersichtlich

## 7.2 Einfluss der spektralen Breite einer Lichtquelle auf das Interferenzmuster eines Doppelspalts

Wie es die Theorie voraussagt, sind die Bilder (38 39 40) deutlich verschwommener, wenn mehrere unterschiedliche Wellenlängen durchgelassen werden, die zeitliche Kohärenz also erhöht wird.

## 7.3 Bestimmung der Dicke einer Kunststoffschicht anhand des Interferenzmusters

Der erhaltene Wert für die Dicke der Kunststoffschicht liegt in einer zu erwartenden Größenordnung. Allerdings liegen hierzu keine genauen Angaben vor, wodurch keine qualitative Aussage über das erhaltene Ergebnis getätigt werden kann.

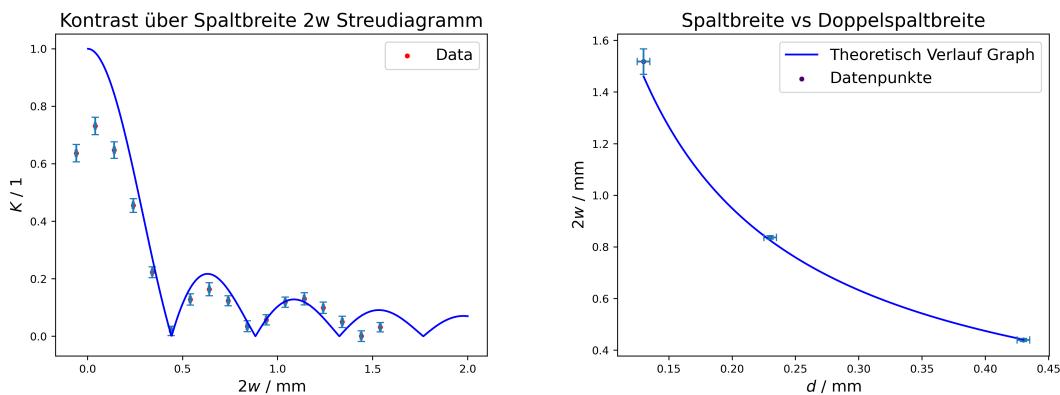
$$t = (530 \pm 70) \text{ nm}$$

## 7.4 Bestimmung der Größe einer Lichtquelle, bei der das Licht noch räumlich kohärent ist

Betrachtet man Abbildung 42 stellt man fest, dass auch in diesen Graph die erhaltenen Werte einen Versatz gegenüber der theoretisch vorausgesagten Kurve haben.

## 7.5 möglicher systematischer Fehler

Beim Betrachten der Graphen in Abbildung 37 und Abbildung 42 fällt auf, dass die erhaltenen Werte über den, durch die theoretischen Kurve vorhergesagten, Werten liegen. Der Versatz beträgt dabei annähernd Konstant 0,16 mm, weshalb von einem systematischen Fehler bei der Messung des Spaltoffsets ausgegangen wird. Würde man diesen Versatz bei den Grafiken berücksichtigen würden sich folgende Abbildungen ergeben.



**Abbildung 44:** Kontrast des Beugungsmusters **Abbildung 45:** Spaltbreite beim ersten Kontrastminimum mit theoretischen Fit und gemessenen Werten trastminimum aufgetragen zur Doppelpaltbreite mit dem Versatz von 0,16 mm

Besonders beim Betrachten von Abbildung 45 fällt auf, dass dieser Versatz annähernd perfekte Wert liefern würde.

Ein Verbesserungsvorschlag wäre den Versuch mit einem anderen Aufbau zu wiederholen, um sicherzustellen, dass der systematische Fehler nicht auf einen Gerätedefekt oder Aufbaufehler zurückzuführen ist, der, im Gegensatz zum Versatz der Mikrometerschraube, bislang unbemerkt geblieben ist.

Eine Mögliche Erklärung dieses Fehlers wäre, dass der Fehler durch die Überlappung der beiden Blendenteile der Irisblende zustande gekommen ist.

Ein weiterer Verbesserungsvorschlag wäre die Kamera zu kalibrieren oder eine Kamera zu verwenden die High-Dynamic-Range hat.

## 8 Zusammenfassung

Sieht man von dem systematischen Fehler ab, liefern die durchgeführten Versuche, Ergebnisse, die sich mit der Theorie decken. Auch die bestimmte Dicke der Kunststoffschicht

liegt in einer realistischen Größenordnung und ist hier nochmals angeführt:

$$t = (530 \pm 70) \text{ nm}$$

## Literatur

- [1] *Fehlerfortpflanzung*. de. Page Version ID: 205827844. Nov. 2020. URL: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Fehlerfortpflanzung&oldid=205827844> (besucht am 08.05.2021).
- [2] Andreas Hohenau. *Interferometer - Kohärenz*. de. Version 18.09.2020. Universitätsplatz 5/I, 8010 Graz, Karl-Franzens Universität Graz, 18. Sep. 2020.
- [3] Stephan Mueller. (6) \*\* Abbe Optik Abbildungstheorie besser - YouTube. en. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=oFJCEGcwUiQ> (besucht am 13.10.2021).
- [4] Braunschweig Wolfgang Kessel. *Die ISO/BIPM-GUM Sicht:Schätzwert & Messunsicherheit*. 2004.

## Abbildungsverzeichnis

|    |   |    |
|----|---|----|
| 1  | Abbildung der Linse bei der die erste Beugungsordnung gerade nicht mehr vom Objektiv erfasst wird [3]   | 3  |
| 2  | Abbildung der Linse bei der die zweite Beugungsordnung vom Objektiv erfasst wird [3]  | 3  |
| 3  | Strahlengang für einen Punkt der sich auf der optischen Achse befindet (a) und einen Punkt, der um $w$ entfernt ist. [2]                                | 4  |
| 4  | maßstabsgerechte Skizze des Versuchsaufbaus   | 5  |
| 5  | Versuchsaufbau  | 5  |
| 6  | Spaltabstand bei Nullpunktslage   | 7  |
| 7  | Grafik mit gelben Balken am Rand  | 8  |
| 8  | Sichtbares Bild mit Beugungsordnungen   | 8  |
| 9  | Interferenzmuster bei einer Spaltbreite von $(0,200 \pm 0,005)$ mm unter Verwendung des Bandpassfilters und einem Doppelpalt mit $(0,430 \pm 0,005)$ mm | 9  |
| 10 | geplotteter Grauwert aufgetragen zu jeweiligen Pixelnummer bei einer Spaltbreite von $(0,100 \pm 0,005)$ mm   | 9  |
| 11 | geplotteter Grauwert aufgetragen zu jeweiligen Pixelnummer bei einer Spaltbreite von $(0,200 \pm 0,005)$ mm   | 9  |
| 12 | geplotteter Grauwert aufgetragen zu jeweiligen Pixelnummer bei einer Spaltbreite von $(0,300 \pm 0,005)$ mm   | 10 |
| 13 | geplotteter Grauwert aufgetragen zu jeweiligen Pixelnummer bei einer Spaltbreite von $(0,400 \pm 0,005)$ mm   | 10 |
| 14 | geplotteter Grauwert aufgetragen zu jeweiligen Pixelnummer bei einer Spaltbreite von $(0,500 \pm 0,005)$ mm   | 10 |
| 15 | geplotteter Grauwert aufgetragen zu jeweiligen Pixelnummer bei einer Spaltbreite von $(0,600 \pm 0,005)$ mm   | 10 |
| 16 | geplotteter Grauwert aufgetragen zu jeweiligen Pixelnummer bei einer Spaltbreite von $(0,700 \pm 0,005)$ mm   | 11 |
| 17 | geplotteter Grauwert aufgetragen zu jeweiligen Pixelnummer bei einer Spaltbreite von $(0,800 \pm 0,005)$ mm   | 11 |

|    |   |    |
|----|---|----|
| 18 | geplotteter Grauwert aufgetragen zu jeweiligen Pixelnummer bei einer Spaltbreite von $(0,900 \pm 0,005)$ mm . . . . .                                       | 11 |
| 19 | geplotteter Grauwert aufgetragen zu jeweiligen Pixelnummer bei einer Spaltbreite von $(1,000 \pm 0,005)$ mm . . . . .                                       | 11 |
| 20 | geplotteter Grauwert aufgetragen zu jeweiligen Pixelnummer bei einer Spaltbreite von $(1,100 \pm 0,005)$ mm . . . . .                                       | 12 |
| 21 | geplotteter Grauwert aufgetragen zu jeweiligen Pixelnummer bei einer Spaltbreite von $(1,200 \pm 0,005)$ mm . . . . .                                       | 12 |
| 22 | geplotteter Grauwert aufgetragen zu jeweiligen Pixelnummer bei einer Spaltbreite von $(1,300 \pm 0,005)$ mm . . . . .                                       | 12 |
| 23 | geplotteter Grauwert aufgetragen zu jeweiligen Pixelnummer bei einer Spaltbreite von $(1,400 \pm 0,005)$ mm . . . . .                                       | 12 |
| 24 | geplotteter Grauwert aufgetragen zu jeweiligen Pixelnummer bei einer Spaltbreite von $(1,500 \pm 0,005)$ mm . . . . .                                       | 13 |
| 25 | geplotteter Grauwert aufgetragen zu jeweiligen Pixelnummer bei einer Spaltbreite von $(1,600 \pm 0,005)$ mm . . . . .                                       | 13 |
| 26 | geplotteter Grauwert aufgetragen zu jeweiligen Pixelnummer bei einer Spaltbreite von $(1,700 \pm 0,005)$ mm . . . . .                                       | 13 |
| 27 | verschiedene Filter an Filterrad . . . . .  | 14 |
| 28 | Abbildung der Transmissionen der Filter Orange beschreibt dabei den Bandpassfilter, während die blaue Kurve den Langpassfilter beschreibt [2]               | 14 |
| 29 | Interferenzmuster bei einer Spaltbreite von $(0,200 \pm 0,005)$ mm unter Verwendung des Bandpassfilters und einem Doppelspalt mit $(0,430 \pm 0,005)$ mm    | 15 |
| 30 | Interferenzmuster bei einer Spaltbreite von $(0,200 \pm 0,005)$ mm unter Verwendung des Langpassfilters und einem Doppelspalt mit $(0,430 \pm 0,005)$ mm    | 15 |
| 31 | Interferenzmuster bei einer Spaltbreite von $(0,200 \pm 0,005)$ mm ohne Filter und einem Doppelspalt mit $(0,430 \pm 0,005)$ mm . . . . .                   | 16 |
| 32 | in den Strahlengang geschobene Substratschicht, sowie die Polyacrylschicht (bei blau markierten Strich) . . . . .   | 17 |
| 33 | Interferenzmuster mit der Substratschicht, bei einer Spaltbreite von $(0,200 \pm 0,005)$ mm und einem Doppelspalt mit $(0,430 \pm 0,005)$ mm . . . . .      | 18 |
| 34 | Interferenzmuster mit der Substrat- und Polyacrylschicht, bei einer Spaltbreite von $(0,200 \pm 0,005)$ mm und einem Doppelspalt mit $(0,430 \pm 0,005)$ mm | 18 |
| 35 | Verteilung der Intensitätsmaxima auf die entsprechende Pixelzahl mit (türkis) und ohne (grau) Polyacrylschicht . . . . .                                    | 19 |
| 36 | Interferenzmuster des ersten Minimums bei einer Spaltbreite von $(0,200 \pm 0,005)$ mm und einem Doppelspalt mit $(0,230 \pm 0,005)$ mm . . . . .           | 20 |
| 37 | Kontrast des Beugungsmusters mit theoretischen Fit und gemessenen Werten . . . . .  | 22 |
| 38 | Interferenzmuster bei einer Spaltbreite von $(0,200 \pm 0,005)$ mm unter Verwendung des Bandpassfilters und einem Doppelspalt mit $(0,430 \pm 0,005)$ mm    | 22 |
| 39 | Interferenzmuster bei einer Spaltbreite von $(0,200 \pm 0,005)$ mm unter Verwendung des Langpassfilters und einem Doppelspalt mit $(0,430 \pm 0,005)$ mm    | 22 |
| 40 | Interferenzmuster bei einer Spaltbreite von $(0,200 \pm 0,005)$ mm ohne Filter und einem Doppelspalt mit $(0,430 \pm 0,005)$ mm . . . . .                   | 23 |

|    |   |    |
|----|---|----|
| 41 | Verteilung der Intensitätsmaxima auf die entsprechende Pixelzahl mit (pink) und ohne (dunkelgrün) Polyacrylatschicht . . . . .  | 23 |
| 42 | Spaltbreite beim ersten Kontrastminimum aufgetragen zur Doppelspaltbreite . . . . .   | 25 |
| 43 | Unten sieht man, dass das Hintergrundschwarz, bei einer Spaltöffnung von 0,1 mm gräulicher ist als bei den anderen Spaltöffnungen z.B. bei 0,8 mm Oben, ersichtlich . . . . . | 26 |
| 44 | Kontrast des Beugungsmusters mit theoretischen Fit und gemessenen Werten mit dem Versatz von 0,16 mm . . . . .  | 27 |
| 45 | Spaltbreite beim ersten Kontrastminimum aufgetragen zur Doppelspaltbreite mit dem Versatz von 0,16 mm . . . . .   | 27 |

## Tabellenverzeichnis

|   |  |    |
|---|--|----|
| 1 | Verwendete Geräte . . . . .  | 6  |
| 2 | Abgelesene Werte für die Spaltbreite bei der das erste Minimum sichtbar ist $d$ . . . Größe des Doppelspalts . . . . .   | 20 |
| 3 | Mittelwert und Standardabweichung der Werte für die Spaltbreite bei der das erste Minimum sichtbar ist $d$ . . . Größe des Doppelspalts $\bar{w}$ . . . errechneter Mittelwert $\Delta$ . . . entsprechende Unsicherheit . . . . . | 24 |