

Institut für Experimentalphysik der Technischen Universität Graz

&

Institut für Physik der Universität Graz

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

Übungsnummer: 4

Übungstitel: Interferometer (KFU)

Betreuer: Andreas Hohenau

Gruppennummer: 42

Name: Nico Eisner

Name: Philip Waldl

Mat. Nr.: 12214121

Mat. Nr.: 12214120

Datum der Übung: 01.12.2023

WS 2023/2024

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Aufgabenstellung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Voraussetzungen &amp; Grundlagen</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Versuchsanordnung</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Geräteliste</b>	<b>6</b>
<b>5</b>	<b>Versuchsdurchführung &amp; Messergebnisse</b>	<b>6</b>
5.1	Teil 1 . . . . .	7
5.2	Teil 2 . . . . .	8
5.3	Teil 3 . . . . .	9
5.4	Teil 4 . . . . .	9
<b>6</b>	<b>Auswertung und Unsicherheitsanalyse</b>	<b>10</b>
6.1	Teil 1 . . . . .	10
6.2	Teil 2 . . . . .	12
6.3	Teil 3 . . . . .	13
6.4	Teil 4 . . . . .	14
<b>7</b>	<b>Diskussion</b>	<b>14</b>
7.1	Teil 1 . . . . .	14
7.2	Teil 2 . . . . .	14
7.3	Teil 3 . . . . .	14
7.4	Teil 4 . . . . .	15
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>15</b>
	<b>Literatur</b>	<b>17</b>

# 1 Aufgabenstellung

Das Experiment Interferometer gilt es folgende vier Aufgaben durchzuführen.

Der erste Teil besteht darin, den Einfluss der Größe einer Lichtquelle auf das Interferenzmuster eines Doppelspalt zu Demonstrieren und auch zu Erklären.

Im zweiten Teil gilt es den Einfluss der spektralen Breite des Lichtes, wie im ersten Teil, auf das Interferenzmuster eines Doppelspalt zu Demonstrieren und zu Erklären.

Im dritten Teil wird mithilfe des Doppelspalt-Interferenzmusters die Dicke einer Kunststoffschicht bestimmt.

Der vierte und letzte Teil besteht aus der Bestimmung der Größe der Lichtquelle bei welcher für Doppelspalten mit unterschiedlichem Spaltabstand das Licht noch räumlich kohärent ist.

Alle Informationen und Methodiken wurden uns von der Technischen Universität bereitgestellt [1].

# 2 Voraussetzungen & Grundlagen

Ein Interferenzmuster entsteht durch Überlagerung der Wellenfronten. Sendet man monochromatisches Licht aus einer Lichtquelle durch eine Sammellinse, so entstehen kugelförmige Wellenfronten. Treten diese kugelförmige Wellenfronten durch einen Doppelspalt, so treten aus dem Spalt phasengleiche kugelförmige Wellenfronten aus. Treffen dabei die Wellenfronten (Maxima und Minima) aufeinander, addieren sich diese konstruktiv. So entstehen größere Maxima und kleinere Minima. Durch phasengleichen Austritt der Wellenfronten aus dem Doppelspalt entstehen Interferenzen bei den Winkeln  $\theta$  wo der Phasenverschub ein Vielfaches von  $2\pi$  ist. Dies geschieht, wo die Differenz der Strecke  $\Delta s$  ein Vielfaches der Wellenlänge  $\lambda$  beträgt.  $m$  ist die Zahl der Ordnung.

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

Um die Dicke  $t$  der Polyacrylat Schicht zu bestimmen, benötigt man zuvor einen Proportionalitätsfaktor  $M$ . Dieser lässt sich aus der Pixelzahl  $px$  zwischen den Beugungsmaxima, sowie den Doppelspalt  $d$  und der Wellenlänge  $\lambda$  bestimmen.

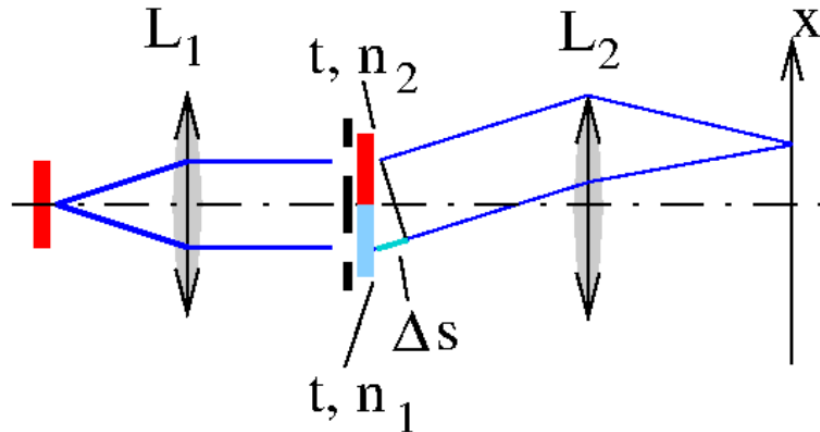
$$px = M \sin(\theta) = M \frac{m\lambda}{d} \quad (2)$$

Umgeformt kommt man für den Proportionalitätsfaktor  $M$  auf folgende Gleichung.

$$M = \frac{dpx}{\lambda m} \quad \Delta M = \left| \frac{\partial M}{\partial d} * \Delta d \right| + \left| \frac{\partial M}{\partial \lambda} * \lambda \right| + \left| \frac{\partial M}{\partial px} * px \right| \quad (3)$$

Um nun die Dicke  $t$  zu bestimmen benötigt man noch die Brechungsindizes  $n$  der Medien.

$$t = \frac{px}{M(n_2 - n_1)} \quad \Delta t = \left| \frac{\partial t}{\partial M} * \Delta M \right| + \left| \frac{\partial t}{\partial px} * px \right| + \left| \frac{\partial t}{\partial n_i} * n_i \right| \quad (4)$$



**Abb. 1:** Beugung am Doppelspalt mit Schichten unterschiedlicher Brechungsindizes  $n$  und Stärken  $t$ . Entnommen aus Skriptum Interferometer Seite 10, Abbildung 7 [1].

Durch Verschiebung der Lichtquelle verschiebt sich auch das Interferenzmuster. Die Lichtquelle ist im idealen Fall punktförmig, in diesem Fall besitzt sie eine gewisse Ausdehnung  $2w$ . Für jeden Punkt der Lichtquelle entstehen Interferenzmuster, welche sich überlagern. Man spricht hier von räumlicher Kohärenz, wenn unterschiedlichen Lichtquellen unterschiedliche Nullmaxima haben. Durch die Spaltblende wird dies auf eines begrenzt. In den später beobachtbaren Interferenzmustern wird dadurch der Kontrast  $K$  verringert. Dieser lässt sich mit folgender Formel bestimmen. Dabei ist  $I$  die Intensität.

$$K = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad \Delta K = \left| \frac{\partial K}{\partial I_{max}} * \Delta I_{max} \right| + \left| \frac{\partial K}{\partial I_{min}} * \Delta I_{min} \right| \quad (5)$$

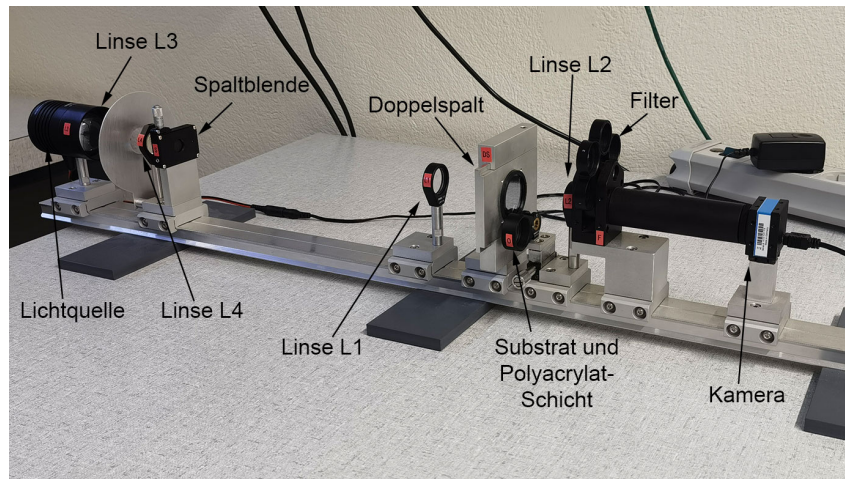
Für den theoretischen Verlauf bzw. Erwartungswert des Kontrastes wird die folgende Formel verwendet. Dabei ist  $d$  der Doppelspalt,  $\lambda$  die Wellenlänge, welche durch den Bandpassfilter begrenzt wird.  $2w$  ist dabei die Breite der Lichtquelle und  $f$  die Brennweite.

$$K = \left| \frac{\sin(2\pi \frac{d}{\lambda} \frac{w}{f_1})}{2\pi \frac{d}{\lambda} \frac{w}{f_1}} \right| \quad (6)$$

Der Doppelspalt wird mit mehreren monochromatischen Wellenlängen beleuchtet. Damit Beugungsmaxima im Fraunhoferlimit auftreten können, gilt  $\sin(\theta) = m\lambda/d$ . Der Beugungswinkel hängt von der Wellenlänge ab. Der Kontrast wird daher mit zunehmenden Beugungsmaximum immer geringer, bis er komplett verschwimmt. Diesen Effekt nennt man zeitlich Kohärent. Reduziert man die spektrale Breite, beispielsweise durch einen Bandpassfilter, so bleibt auch der Kontrast in den höheren Beugungsmaxima erhalten.

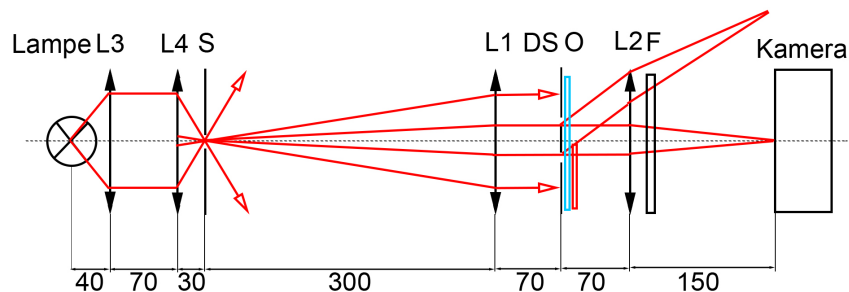
### 3 Versuchsanordnung

Der Versuch ist wie folgt aufgebaut.



**Abb. 2:** Aufbau des Versuches.

Die Lichtquelle wird über eine einstellbare Spaltblende geleitet. Durch diese lässt sich die Größe der Lichtquelle einstellen. Durch die Linse L1 werden die Lichtstrahlen parallelisiert bevor sie auf den Doppelspalt treffen. Nach dem Doppelspalt trifft das Licht auf ein Substrat. In diesem befindet sich die Polyacrylat Schicht. Nach diesem trifft das Licht auf die Linse L2, welche das Licht auf den Kamerasensor lenkt. Zwischen Linse L2 und Kamera befindet sich noch ein Filterradd, durch welches verschiedene Filter hinzugefügt werden können.



**Abb. 3:** Aufbau des Versuches. Skizze des optischen Aufbaus (maßstabsgetreu) mit Strahlengang.

Die Einzelteile mit Beschreibung sind in folgender Tabelle ersichtlich:

**Tab. 1:** Aufbau: Module

Nr.	Modul	Bezeichnung	Eigenschaft
1	Lichtquelle	Lampe	
2	Linse 3	L3	$f_3 = 40 \text{ mm}$
3	Linse 4	L4	$f_4 = 30 \text{ mm}$
4	Spaltblende	S	
5	Linse 1	L1	$f_1 = 300 \text{ mm}$
6	Doppelspalt	DS	$430 \mu\text{m}, 230 \mu\text{m}, 130 \mu\text{m}$
7	Substrat und Polyacrylat Schicht	O	
8	Linse 2	L2	$f_2 = 150 \text{ mm}$
9	Filerrad	F	Bandpass- und Langpassfilter
10	Kamera	Kamera	

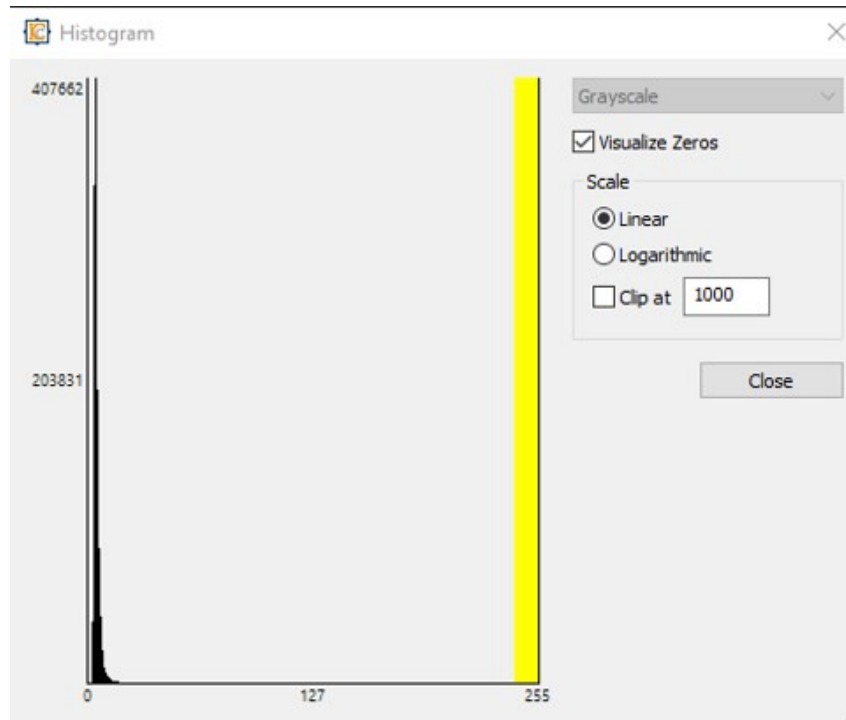
## 4 Geräteliste

**Tab. 2:** Im Versuch verwendete Geräte und Utensilien. Bei Geräten, dessen Unsicherheit nicht auffindbar ist, wird die Unsicherheit implizit angenommen oder die Ablesungsunsicherheit genommen.

Gerät	Gerätenummer	Unsicherheit
Lampe	Thorlabs QTH10/M	n.a
Sammellinsen	Thorlabs LMR1/M	$\pm 0.5 \text{ mm}$
Spaltblende	Thorlabs	$\pm 0.05 \text{ mm}$
Doppelspalte $(130.0, 230.0, 430.0) \mu\text{m}$	Mitutoyo	$\pm 0.5 \mu\text{m}$
Substrat & Polyacrylat	Thorlabs TRF90/M	n.a
Kamera	n.a	n.a
Langpassfilter	n.a	n.a
Bandpassfilter $\lambda = 633 \text{ nm}$	n.a	$\pm 0.5 \text{ nm}$
IC Capture	n.a	n.a
Fiji ImageJ	n.a	n.a

## 5 Versuchsdurchführung & Messergebnisse

Der Versuch ist wie in Abbildung 2 bereits aufgebaut. Die Datenauslese erfolgt über den UniPC mit IC Capture. Bei den Aufnahmen ist es wichtig, vorher die Belichtungszeit einzustellen, so dass kein Pixel die Intensität von 255 überschreitet, da es ansonsten zu fehlerhaften Messdaten kommt. Mithilfe des Histogrammes wird geprüft, dass die Belichtungszeit dementsprechend gewählt wird. Die rechte Seite des Histogrammes sollte dabei nie die Intensität von 255 erreichen.

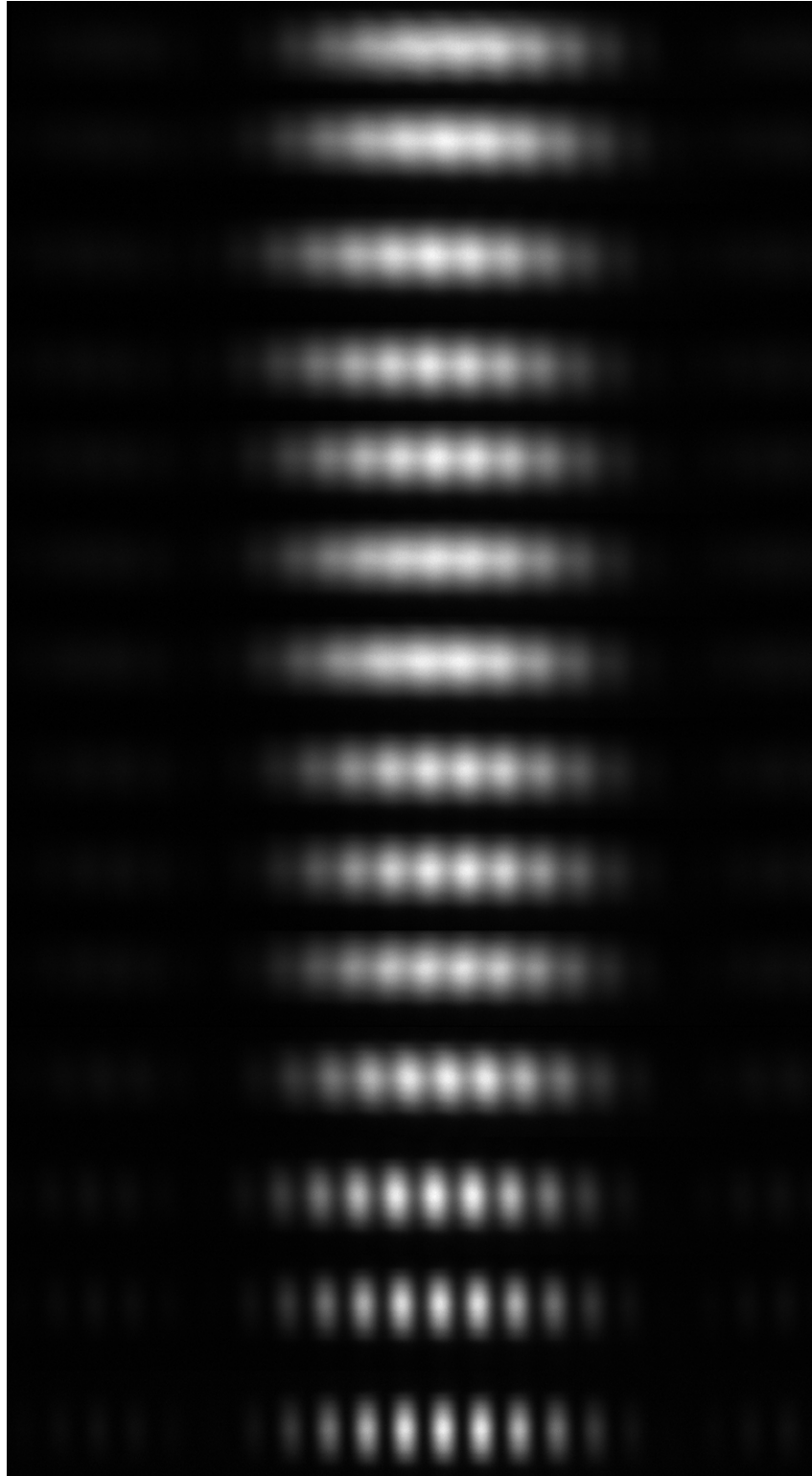


**Abb. 4:** Screenshot des Histogrammes.

Anfangs gilt es den Öffnungsabstand der Spaltblende zu bestimmen. Dazu wird der  $230.0\ \mu\text{m}$  Doppelspalt verwendet und auf den Filterrad wird kein Filter zugeschalten. Der Spalt wird vollständig geschlossen. Durch langsames öffnen, bis ein Bild auf der Kamera zu erkennen ist wird der Offset bestimmt. Die Anzeige der Schraube wird abgelesen und bei den folgenden Werten miteinberechnet. Die Abweichung beträgt  $(0.35 \pm 0.05)\text{mm}$ , das bedeutet, bei den folgenden Werten muss ein Offsetwert von  $0.15\text{mm}$  dazugerechnet werden.

## 5.1 Teil 1

Im ersten Teil wird mit dem  $430.0\ \mu\text{m}$  Doppelspalt und dem Bandpassfilter gearbeitet. Der Lichtspalt der Spaltblende  $2w$  wird von einer Öffnung von  $0.10\ \text{mm}$  bis  $1.4\ \text{mm}$  geöffnet in  $0.10\ \text{mm}$  Schritten. Die Interferenzmuster werden dabei gespeichert. In der folgenden Abbildung werden die Interferenzmuster dargestellt, dabei ist das Oberste bei  $1.4\ \text{mm}$ . Die Öffnungen  $2w$  sind absteigend.



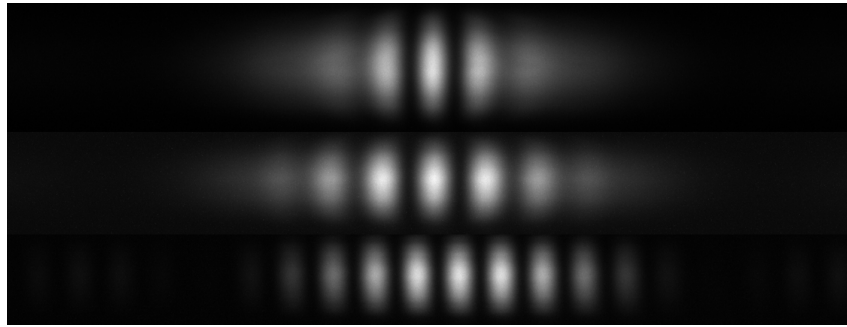
**Abb. 5:** Interferenzmuster bei einer Öffnung  $2w$  von 0.1 mm (unten) bis 1.4 mm (oben).

## 5.2 Teil 2

Im zweiten Teil bleibt der Doppelspalt mit  $430.0 \mu\text{m}$ . Es wird ein Interferenzmuster mit dem Langpassfilter, den Bandpassfilter und eines ohne Filter aufgenommen. Dazu schließt man die Spaltblende und mit den Bandpassfilter wird die Spaltblende geöffnet, bis ein



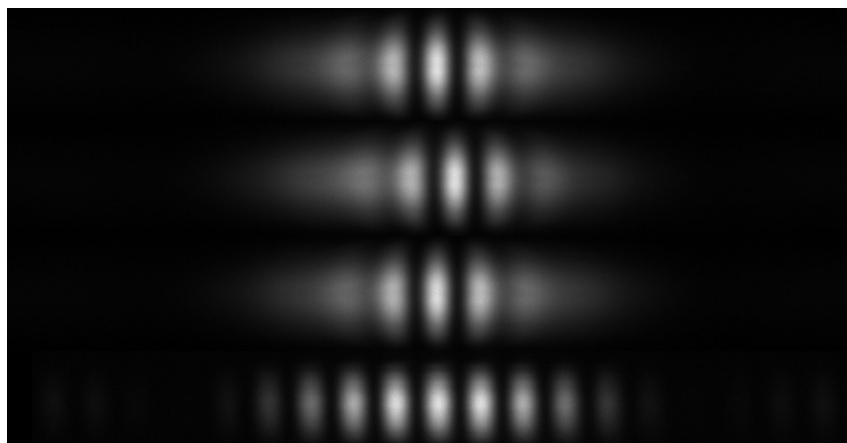
kontrastreiches Interferenzmuster erkennbar ist.



**Abb. 6:** Interferenzmuster mit verschiedenen Filter. Ohne Filter (oben), Langpassfilter (mitte), Bandpassfilter (unten)

### 5.3 Teil 3

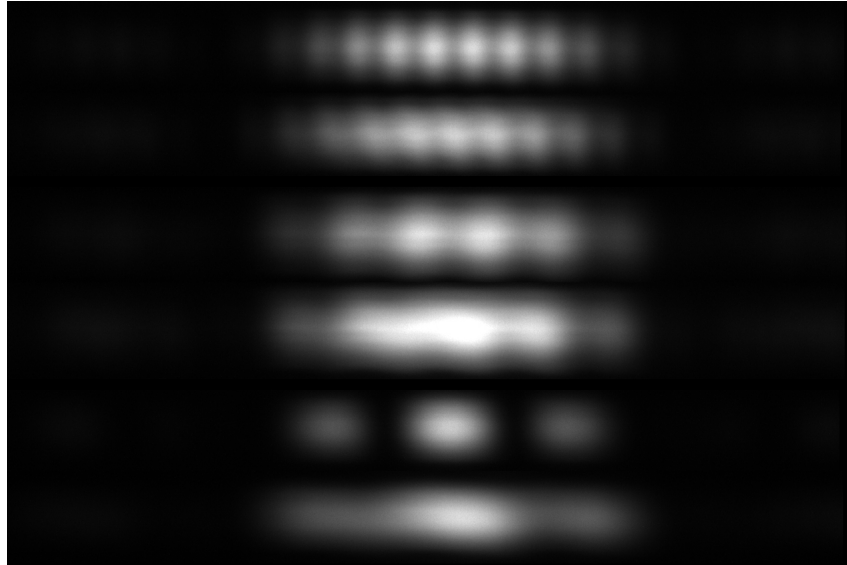
Im dritten Teil gilt es die Dicke einer Polyacrylat Schicht zu bestimmen. Dazu wird derselbe Doppelspalt mit  $430.0\ \mu\text{m}$  verwendet. Das Filterrad wird so eingestellt, dass kein Filter im Strahlengang ist. Die Probe wird in den Strahlengang gegeben. Durch drehen der Justageschraube lässt sich die Probe verschieben, so dass einmal das unbeschichtete Substrat im Strahlengang ist und einmal die Polyacrylat Schicht. Es wird jeweils ein Bild des Beugungsmusters aufgenommen. Einmal mit Verschiebung und einmal vor Verschiebung und einmal dannach. Bei Überschreiten der Schichtgrenze zwischen Substrat und Polyacrylat ist ein sprunghafter Verschieb des Beugungsmusters zu beobachten. Aus Teil 2 wird noch ein Referenzbild mit dem Bandpassfilter hinzugefügt.



**Abb. 7:** Beugungsmuster mit Substrat vor Schicht (oben), Polyacrylat Schicht (mitte) und Substrat nach Polyacrylat Schicht (unten). Referenzbild mit Bandpassfilter (unten).

### 5.4 Teil 4

Der Bandpassfilter wird in den Strahlengang gedreht und der  $130.0\ \mu\text{m}$  Doppelspalt wird in den Strahlengang gesetzt. Die Spaltblende wird geschlossen und dann langsam geöffnet, bis ein Interferenzmuster sichtbar wird. Durch weiteres öffnen verschwimmt das Interferenzmuster vollständig. Der Kontrast ist jetzt minimal. Diese Öffnung der Spaltblende wird notiert. Dies wird für die weiteren Doppelspalte wiederholt.



**Abb. 8:** Interferenzmuster aller Doppelspalte. Die beiden oberen sind die des  $430.0 \mu\text{m}$  Spaltes, die mittleren die des  $230.0 \mu\text{m}$  Spaltes und die unteren beiden die des  $130.0 \mu\text{m}$  Spaltes. Dabei sind jeweils die ersten die mit minimalem Kontrast und die zweiten mit gutem Kontrast zum Vergleich.

**Tab. 3:** Öffnungen der Spaltblende  $2w$  bei verschwommenen Interferenzmuster (minimaler Kontrast) für die verschiedenen Doppelspalte  $d$ .

$d \pm 0.5 / \mu\text{m}$	$2w \pm 0.05 / \text{mm}$
430.0	0.55
230.0	1.02
130.0	1.65

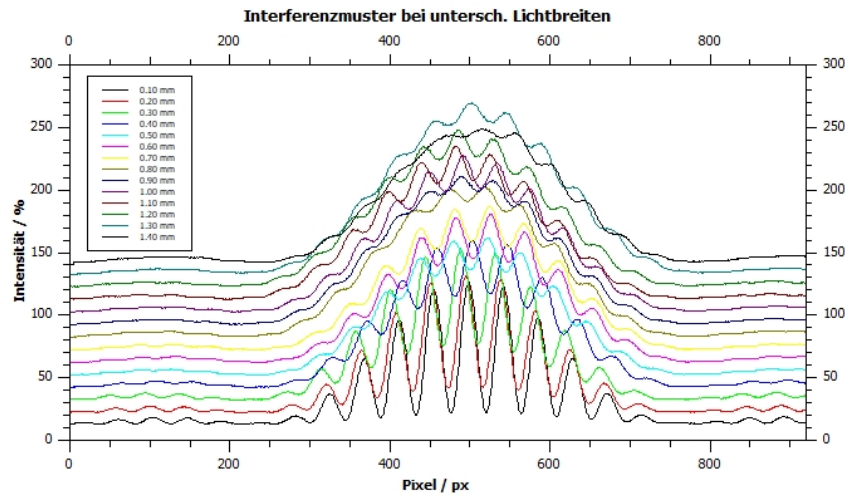
## 6 Auswertung und Unsicherheitsanalyse

In der Auswertung werden zur erhöhten Genauigkeit durchgehend ungerundete Werte bis zu den Endergebnissen verwendet und nur zur Darstellung gerundet.

Zur Berechnung der Unsicherheiten wird, wenn nicht anders angegeben, die Größtunsicherheitsmethode verwendet.

### 6.1 Teil 1

Die mit der Kamera aufgenommenen Interferenzmuster werden mithilfe der Software "ImageJ" analysiert. Dabei werden Intensitätsprofile erstellt, welche als CSV-Datei exportiert werden.

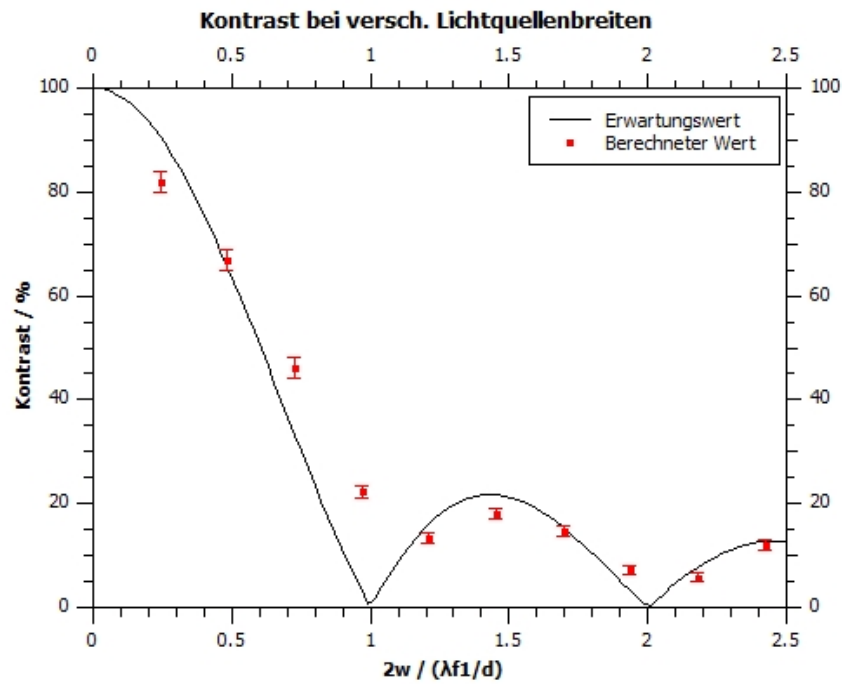


**Abb. 9:** Interferenzmuster bei verschiedenen Spaltbreiten (Lichtquellengröße). Zur Darstellung wurden die Daten vertikal getrennt.

Aus den CSV-Dateien wird das Intensitätsmaximum und Minimum ausgelesen. Für das Minimum wird der linke und rechte Wert (vom 0-ten Maximum ausgehend) gemittelt. Eingesetzt in die Formel 5 erhält man den Kontrast pro Spaltbreite  $2w$ . Der Wert des Kontrastes wurde anschließend nochmal mit 100 multipliziert, sodass man den Wert in Prozent erhält. Die Unsicherheiten der Intensitäten sind dabei die Ablesungsunsicherheiten in Qti Plot.

**Tab. 4:** Kontrast  $K$  pro Spaltbreite  $2w$  (Lichtquellengröße) mit dazugehörigen Intensitätsmaximum  $I_{max}$  und Minimum  $I_{min}$ .

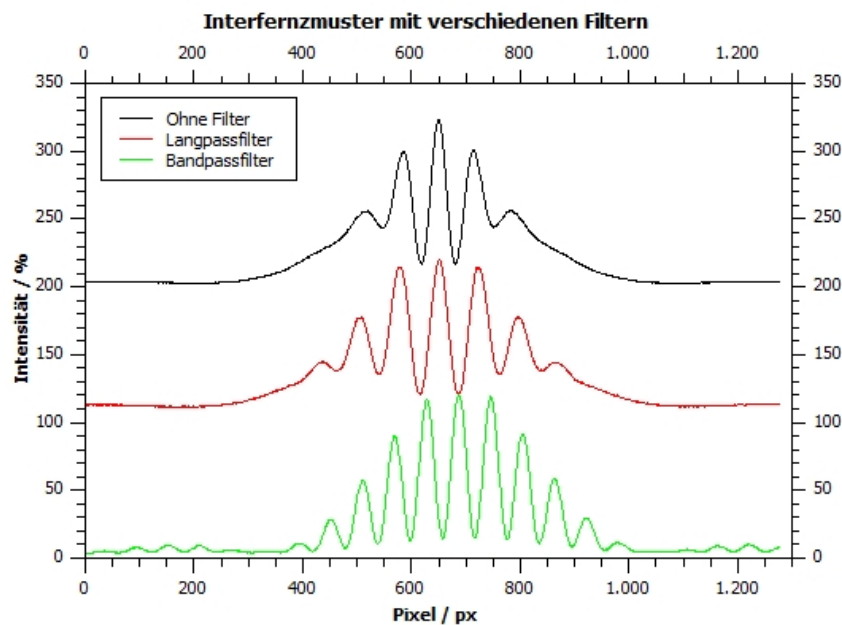
Spaltbreite $2w \pm 0.05$ / mm	$I_{max} \pm 0.0005$ / %	$I_{min} \pm 0.0005$ / %	K / %
1.40	108.9691	101.9662	$3.4 \pm 1.0$
1.30	139.5772	122.5767	$6.5 \pm 0.8$
1.20	127.7342	105.2003	$9.7 \pm 0.9$
1.10	124.6181	96.2478	$12.9 \pm 1.0$
1.00	127.3105	100.1558	$12.0 \pm 0.9$
0.90	120.5227	107.3559	$5.8 \pm 0.9$
0.80	122.6704	106.3307	$7.2 \pm 0.9$
0.70	116.7189	86.6813	$14.8 \pm 1.0$
0.60	120.3311	83.7664	$18.0 \pm 1.0$
0.50	111.3533	85.0506	$13.4 \pm 1.1$
0.40	119.9133	76.2207	$22.3 \pm 1.1$
0.30	122.7907	46.0073	$46 \pm 2$
0.20	111.6321	22.1324	$67 \pm 2$
0.10	116.5771	11.7119	$82 \pm 2$



**Abb. 10:** Kontrast bei versch. Lichtquellenbreiten. Theoretisch berechneter Wert laut Formel 6 im Vergleich zu den berechneten Werten aus Tabelle 4.

## 6.2 Teil 2

Die aufgenommenen Interferenzmuster der verschiedenen Filter werden mit ImageJ analysiert und als CSV-Datei exportiert.



**Abb. 11:** Interferenzmuster mit verschiedenen Filtern. Zur Darstellung wurden die Daten vertikal getrennt.

Wie man erkennen kann, sind mit den unterschiedlichen Filtern verschiedenen Intensi-

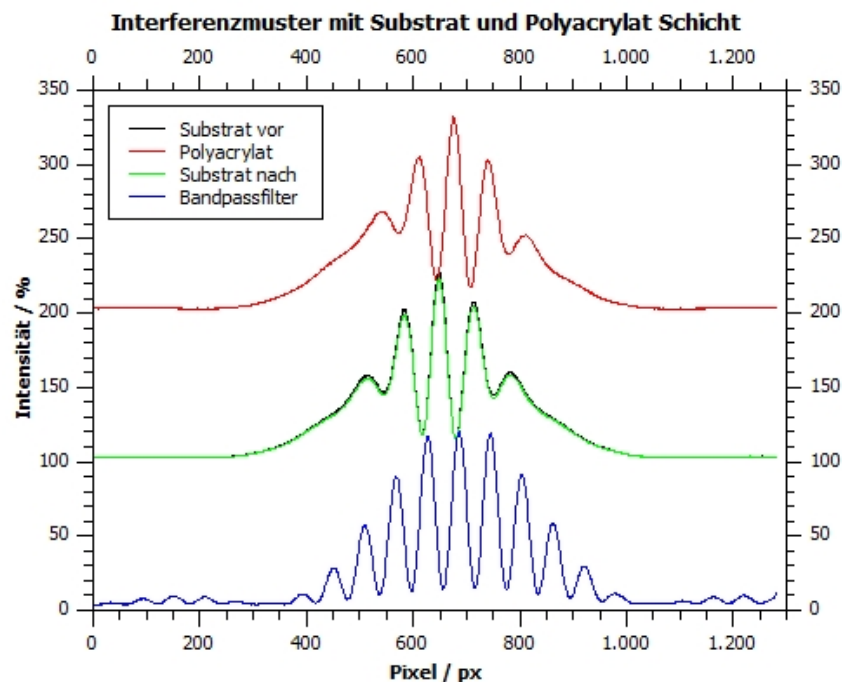
tätsmaxima erkennbar.

Ohne Filter erkennt man 5 Intensitätsmaxima, mit Langpassfilter erkennt man 7 Intensitätsmaxima und mit dem Bandpassfilter erkennt man 11 Intensitätsmaxima.

Man erkennt, dass bei einer kleineren spektralen Breite (durch die Filter) ein klareres Interferenzmuster sichtbar ist.

### 6.3 Teil 3

Die aufgenommenen Interferenzmuster mit Substrat und Polyacrylat Schicht werden mit ImageJ analysiert und als CSV-Datei exportiert.



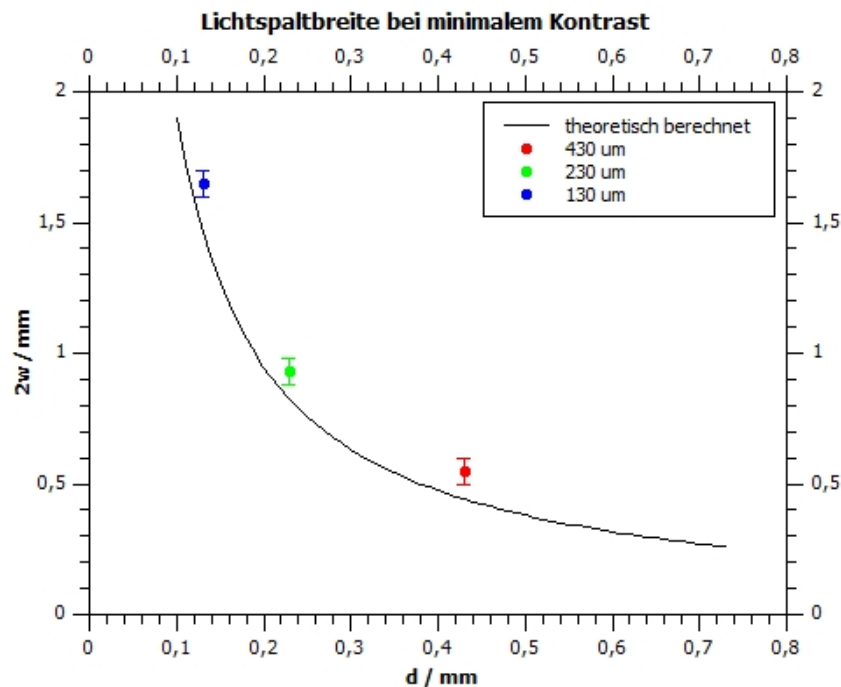
**Abb. 12:** Interferenzmuster mit Substrat und Polyacrylat Schicht. Zur Darstellung wurden die Daten vertikal getrennt.

Durch händisches Auswerten lässt sich die Verschiebung in Pixel bestimmen. Diese beträgt  $(26.7080 \pm 0.0005)px$ . Unsicherheit ist die Ableseunsicherheit in Qti Plot. Mithilfe der Daten des Bandpassfilters lässt sich der Proportionalitätsfaktor zwischen Pixel und optischer Weglängendifferenz bestimmen. Dazu misst man die Pixel zwischen den Beugungsmaxima, in diesen Fall zwischen 9 Maxima. Dies beträgt  $(471.8074 \pm 0.0005)px$ . Eingesetzt in die Formel 3 erhält man den Proportionalitätsfaktor von  $M = (35612 \pm 70)$ .

Die Brechzahl  $n_{poly}$  der Polyacrylat Schicht beträgt bei 633.0 nm  $n_{poly} = (1.492 \pm 0.001)$  [1]. Die der Luft beträgt  $n_{luft} = (1.0003 \pm 0.0001)$  [2]. Unsicherheiten implizit angenommen. Mit diesen Werten und der Formel 4 lässt sich die Dicke  $t$  der Schicht bestimmen. Dazu nimmt man die Anzahl der Pixel der Verschiebung. Man kommt dabei auf einen Wert von  $t = (1.525 \pm 0.007)\mu m$ .

## 6.4 Teil 4

Die Werte aus Tabelle 3 werden in einem Diagramm mit der theoretisch berechneten Kurve dargestellt.



**Abb. 13:** Lichtspaltbreite  $2w$  bei minimalem Kontrast. Der theoretische Verlauf wird mit Formel 6 berechnet.

Wie man sehen kann, hat die Kurve einen hyperbolischen Verlauf. Die Fehler fallen dabei bei den größeren Doppelspalten höher aus.

## 7 Diskussion

### 7.1 Teil 1

Wie man in der Abbildung 10 erkennen kann, entsprechen die berechneten Werten den Erwartungswerten nicht. Dennoch besitzt der Kontrast einen ähnlichen Verlauf.

### 7.2 Teil 2

Die mit den unterschiedlichen Filtern aufgenommenen Interferenzmuster entsprechen dem Erwartungswerten. Dabei handelt es sich um die zeitliche Kohärenz. Durch diese verschwimmen die äußeren Maxima. Durch geeignete Filter lässt sich diese jedoch reduzieren, was man auch in der Auswertung beobachten kann. Es lässt sich dabei auf eine fehlerfreie Durchführung dieses Teils schließen.

### 7.3 Teil 3

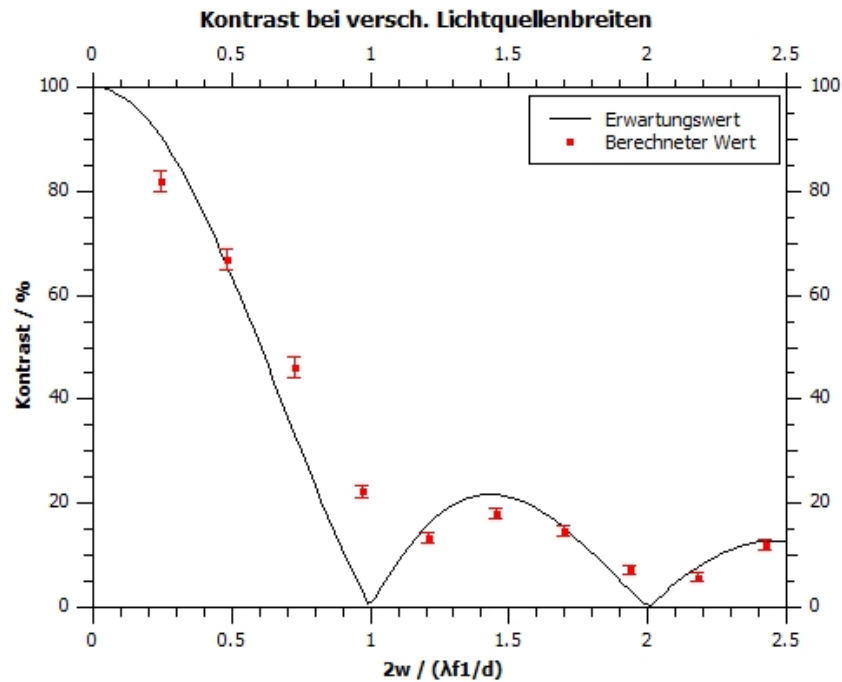
Da die genaue Schichtdicke der Polyacrylat Schicht nicht bekannt ist, kann auch keine aussage über die Genauigkeit des Versuches getroffen werden.

## 7.4 Teil 4

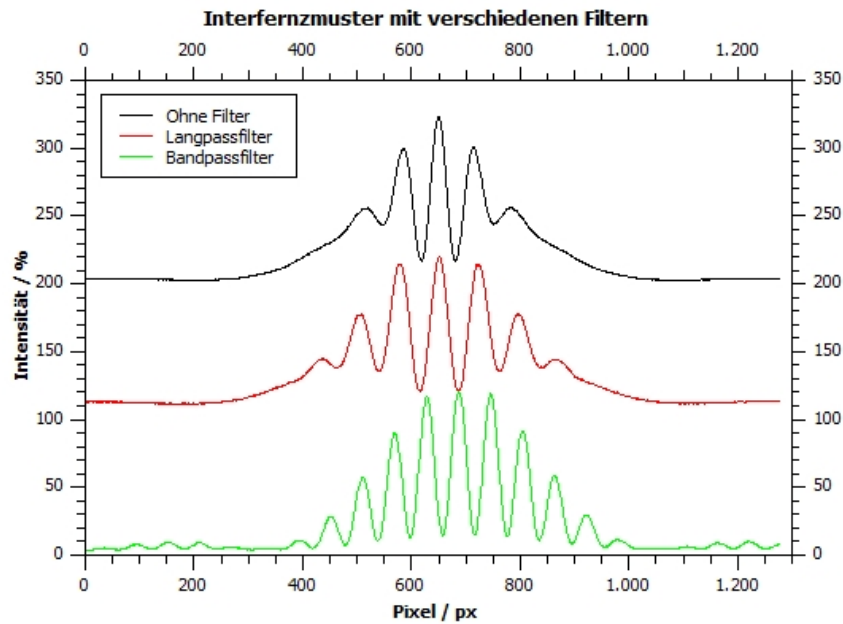
Da sich der exakte minimale Kontrast mit dem Auge nicht sehr genau bestimmen lässt, liegen die Werte auch nicht auf der theoretisch berechneten Kurve. Bei erneuter Versuchsdurchführung sollt eine genauere Bestimmung des minimalen Kontrastes gewählt werden.

## 8 Zusammenfassung

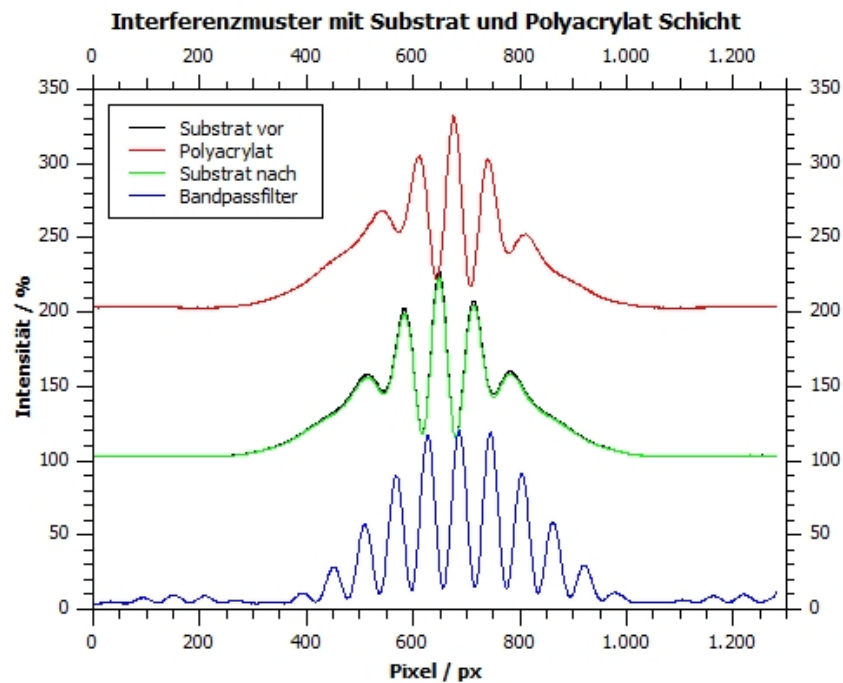
Hier nocheinmal die Ergebnisse zusammengefasst.



**Abb. 14:** Kontrast bei versch. Lichtquellenbreiten. Theoretisch berechneter Wert laut Formel 6 im Vergleich zu den berechneten Werten aus Tabelle 4.



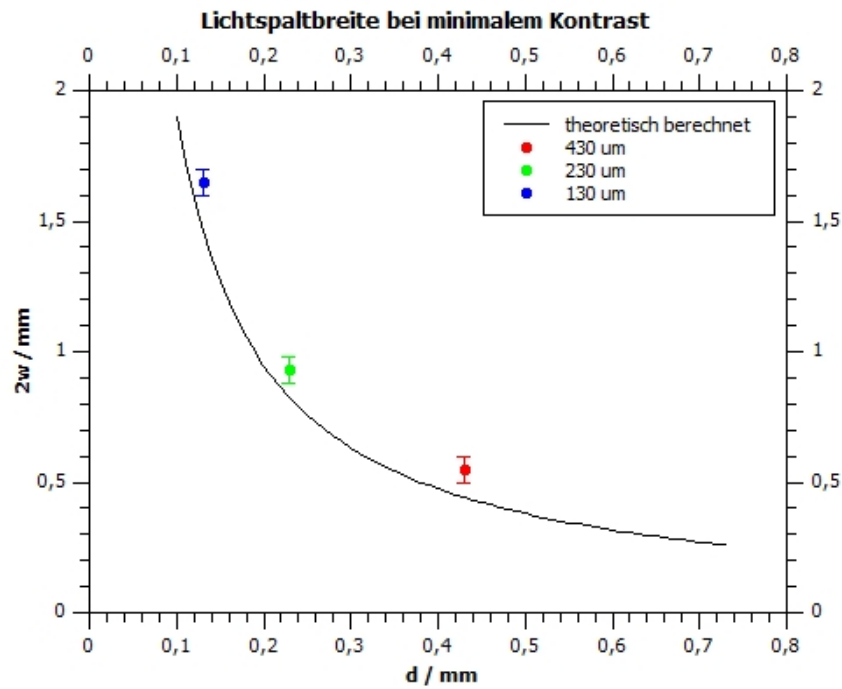
**Abb. 15:** Interferenzmuster mit verschiedenen Filtern. Zur Darstellung wurden die Daten vertikal getrennt.



**Abb. 16:** Interferenzmuster mit Substrat und Polyacrylat Schicht. Zur Darstellung wurden die Daten vertikal getrennt.

Schichtdicke:  $t = (1.525 \pm 0.007) \mu m$





**Abb. 17:** Lichtspaltbreite  $2w$  bei minimalem Kontrast. Der theoretische Verlauf wird mit Formel 6 berechnet.

## Literatur

- [1] TU Graz TeachCenter. *"Laborübungen 2: Elektrizität, Magnetismus, Optik"*. Kurs: *PHYD30UF*. (besucht am 01.12.2023). URL: <https://tc.tugraz.at/main/course/view.php?id=796>.
- [2] Wikipedia. *Brechungsindex Luft*. (besucht am 01.12.2023). URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Brechungsindex#:~:text=Dichte%20des%20Materials\).-,Luft,der%20Luft%20%E2%80%93%20insbesondere%20der%20Luftfeuchtigkeit..](https://de.wikipedia.org/wiki/Brechungsindex#:~:text=Dichte%20des%20Materials).-,Luft,der%20Luft%20%E2%80%93%20insbesondere%20der%20Luftfeuchtigkeit..)