

Institut für Experimentalphysik der Technischen Universität Graz

&

Institut für Physik der Universität Graz

LABORÜBUNGEN 2: ELEKTRIZITÄT, MAGNETISMUS, OPTIK

Übungsnummer: 3

Übungstitel: Interferometer

Betreuer/in: Olga Resel

Gruppennummer: 13

Name: Sebastian Brötz

Name: Stefanie Brandstötter

Mat. Nr.: 12406478

Mat. Nr.: 12415127

Datum der Übung: 20.01.2026

WS 2025/2026

Inhaltsverzeichnis

1 Allgemeine Informationen	3
2 Versuch 1: Räumliche Kohärenz	3
2.1 Auswertung	3
2.1.1 Bestimmung der Spaltbreiten	3
2.1.2 Bildanalyse und Intensitätsprofile	4
2.1.3 Bestimmung des Kontrasts	4
2.1.4 Vergleich mit der theoretischen Kurve	6
2.2 Diskussion	6
3 Versuch 2: Zeitliche Kohärenz	7
3.1 Auswertung	7
3.2 Diskussion	8
4 Versuch 3: Bestimmung der Schichtdicke	8
4.1 Auswertung	8
4.1.1 Bestimmung der Verschiebung in Pixel	9
4.1.2 Umrechnung in eine physikalische Länge	10
4.1.3 Bestimmung der Schichtdicke	10
4.2 Diskussion	10
5 Versuch 4: Streifenbreite in Abhängigkeit vom Spaltabstand	11
5.1 Auswertung	11
5.1.1 Vergleich mit der theoretischen Vorhersage	12
5.2 Diskussion	12

1 Allgemeine Informationen

Zu Beginn des Laborberichts werden allgemeine Konventionen und Definitionen, die während der gesamten Auswertung verwendet werden angeführt. Auf diese Punkte wird im Text fortlaufend hingewiesen.

- **Software / Fits.** Alle numerischen Auswertungen, Kurvenanpassungen und Regressionsrechnungen werden mit Python durchgeführt. Für nichtlineare und lineare Fits wird die Software `scipy.optimize.curve_fit` [1] verwendet. Aus der gelieferten Kovarianzmatrix der Regressionsrechnung werden zudem die Unsicherheiten der jeweiligen Fitparameter entnommen.
- **Größtunsicherheitsmethode.** Für die Fehlerabschätzung von berechneten Größen wird die Größtunsicherheitsmethode verwendet. Sei dabei eine beliebige Zielgröße y als Funktion der Messgrößen x_i gegeben, so folgt die Unsicherheit von y aus der Größtunsicherheitsmethode mit:

$$\Delta y_{\max} = \sum_i \left| \frac{\partial y}{\partial x_i} \right| \Delta x_i, \quad (1)$$

Hier ist Δx_i die Unsicherheit der jeweiligen Messgröße.

- **Fehlerfortpflanzung bei unabhängigen Größen.** Hängt eine berechnete Größe y von mehreren unabhängigen Messgrößen x_i ab, deren Unsicherheiten statistischer Natur sind (z.B. Standardabweichung), so werden die einzelnen Beiträge wie folgt kombiniert [5]:

$$\Delta y = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2}. \quad (2)$$

Dies gewährleistet eine korrekte statistische Fehlerabschätzung bei mehreren unabhängigen Unsicherheiten.

2 Versuch 1: Räumliche Kohärenz

2.1 Auswertung

In diesem Versuch soll der Einfluss der Größe einer ausgedehnten Lichtquelle auf das Interferenzmuster eines Doppelspalts untersucht werden. Zur Variation der Größe wird ein verstellbarer Spalt der Breite w vor der Lichtquelle positioniert. Gemäß der Versuchsanleitung [4] wurden für sechs verschiedene Spaltbreiten Interferenzmuster aufgezeichnet und mithilfe eines digitalen Bildanalyseverfahrens ausgewertet. Die räumliche Kohärenz der Lichtquelle wird dabei über den Kontrast K des Interferenzmusters veranschaulicht.

2.1.1 Bestimmung der Spaltbreiten

Zur präzisen Einstellung wurde eine Mikrometerschraube verwendet, wobei sich die Spaltbreite w aus der Anzahl vollständiger Umdrehungen sowie der Position auf der Feinskala ergibt. Eine vollständige Umdrehung entspricht einer Verschiebung von 0,5 mm, während die Feinskala in Schritten von 0,01 mm unterteilt ist. Aufgrund einer bestehenden Nullpunktverschiebung der Anzeige im vorgegebenen Messaufbau erfolgt zusätzlich eine Korrektur der gemessenen Abstände. Bei vollständig geschlossenem Spalt zeigte die Anzeige einen Wert von etwa $w_0 = 150 \mu\text{m}$ an. Die Unsicherheit zur Bestimmung von diesem Nullpunkt beträgt , in etwa $\pm 50 \mu\text{m}$. Aus diesem

Grund wird im folgenden auch die Unsicherheit der Spaltbreite auf $\Delta w = 0,05 \text{ mm}$ festgelegt, obwohl die Auflösung der Skalenteile bei $1 \mu\text{m}$ liegt. Die ermittelten Spaltbreiten sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Eingestellte Spaltbreiten w zur Untersuchung der räumlichen Kohärenz. Die Werte wurden unter Berücksichtigung der Nullpunktverschiebung w_0 berechnet. Die Unsicherheit Δw berücksichtigt sowohl die Ablesegenauigkeit als auch die systematische Nullpunktverschiebung.

Messung	w / mm
1	$1,85 \pm 0,05$
2	$1,45 \pm 0,05$
3	$1,40 \pm 0,05$
4	$1,05 \pm 0,05$
5	$0,65 \pm 0,05$
6	$0,25 \pm 0,05$

2.1.2 Bildanalyse und Intensitätsprofile

Für jede eingestellte Spaltbreite wurde das resultierende Interferenzmuster mit einer Kamera aufgenommen. Mithilfe eines Bildanalyse-Algorithmus wurde ein rechteckiger Bereich (Region of Interest) definiert, welcher das zentrale Interferenzmuster erfasst¹. Innerhalb dieser Region wurde entlang der horizontalen Richtung ein gemitteltes Intensitätsprofil berechnet und auf den Maximalwert normiert. In Abbildung 1 sind zwei exemplarische Aufnahmen dargestellt, wobei die linke Figur (Messung 3) ein Interferenzmuster nahe dem Kontrastminimum zeigt und die rechte Figur (Messung 5) eine Aufnahme bei deutlich geringerer Spaltbreite darstellt.

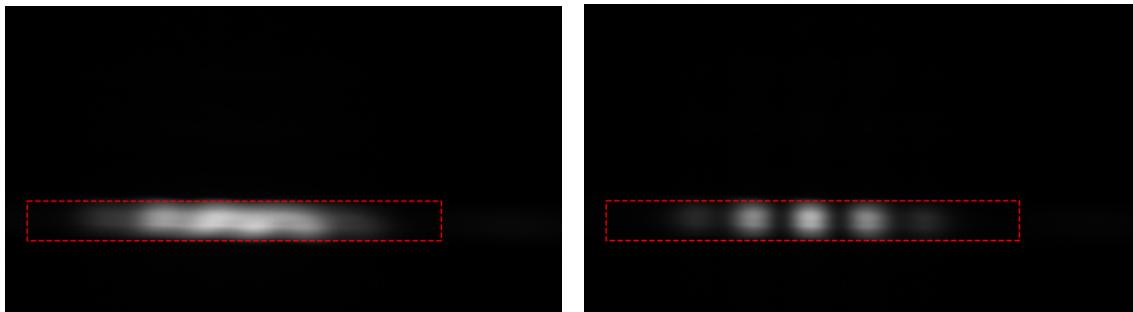


Abbildung 1: Exemplarische Interferenzmuster zur Bestimmung der räumlichen Kohärenz mit markiertem Bereich (rote gestrichelte Umrandung). Links: Messung 3 nahe dem Kontrastminimum bei großer Spaltbreite. Rechts: Messung 5 bei kleiner Spaltbreite und hohem Kontrast.

2.1.3 Bestimmung des Kontrasts

Zur Charakterisierung der Interferenzmuster wird der Kontrast K nach der Definition von Michelson^[3] herangezogen:

$$K = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (3)$$

wobei I_{\max} die Intensität des zentralen Maximums der nullten Beugungsordnung und I_{\min} die Intensität der benachbarten Minima erster Ordnung bezeichnet. Zur Bestimmung dieser charakteristischen Punkte wurde ein Algorithmus basierend auf `scipy.signal.find_peaks` [2] implementiert.

Für die Messungen unterhalb des Kontrastminimums (Messungen 4, 5 und 6 in Tabelle 1) funktioniert dieser Ansatz zuverlässig, da ein eindeutiges zentrales Maximum und zwei symmetrische

¹Da das Muster aufgrund einer Verschiebung der Kamera nicht genau Mittig im Bild ist, garantiert der ausgewählte Bereich konsistente Werte unterhalb der verschiedenen Messungen.

Minima vorhanden sind. In diesen Fällen werden die Intensitätswerte I_{\max} und I_{\min} jeweils über ein Fenster von insgesamt 12 Pixeln um die detektierten Positionen gemittelt, um Unsicherheiten aufgrund von Rauschen zu berücksichtigen. Die Standardabweichung dieser Datenpunkte wird als Unsicherheit für die berechneten Intensitäten angesetzt. Für die Unsicherheit des Kontrasts ΔK ergibt sich dann über Fehlerfortpflanzung (siehe Kapitel 1):

$$\Delta K = \sqrt{\left(\frac{2I_{\min}}{(I_{\max} + I_{\min})^2} \Delta I_{\max} \right)^2 + \left(\frac{2I_{\max}}{(I_{\max} + I_{\min})^2} \Delta I_{\min} \right)^2}. \quad (4)$$

Oberhalb des Kontrastminimums (Messungen 1 bis 3) ist die Situation komplizierter, da durch die Überlagerung der Beugungsmuster des Doppelpalts kein eindeutiges zentrales Maximum mehr existiert. Stattdessen zeigt sich eine nahezu konstante Intensitätsverteilung mit nur geringen Modulationen. Für diese Fälle wurde der Algorithmus so modifiziert, dass die mittlere Intensität im zentralen Bereich als I_{\min} und das ausgeprägteste Maximum als I_{\max} verwendet werden. Bei der Messung des Kontrastminimums ($w \approx 1,535$ mm), bei welcher praktisch keine ausgeprägten Spitzen im Intensitäts-Querschnitt erkennbar sind, wird der Kontrast auf $K = 0$ gesetzt. Da für diese Messungen die automatische Detektion keine physikalisch sinnvollen Werte für die Unsicherheit liefert, wird auf eine explizite Fehlerberechnung verzichtet. Die entsprechenden Datenpunkte dienen daher primär der qualitativen Darstellung des Übergangsbereichs und werden in der weiteren Analyse nicht für quantitative Vergleiche herangezogen.

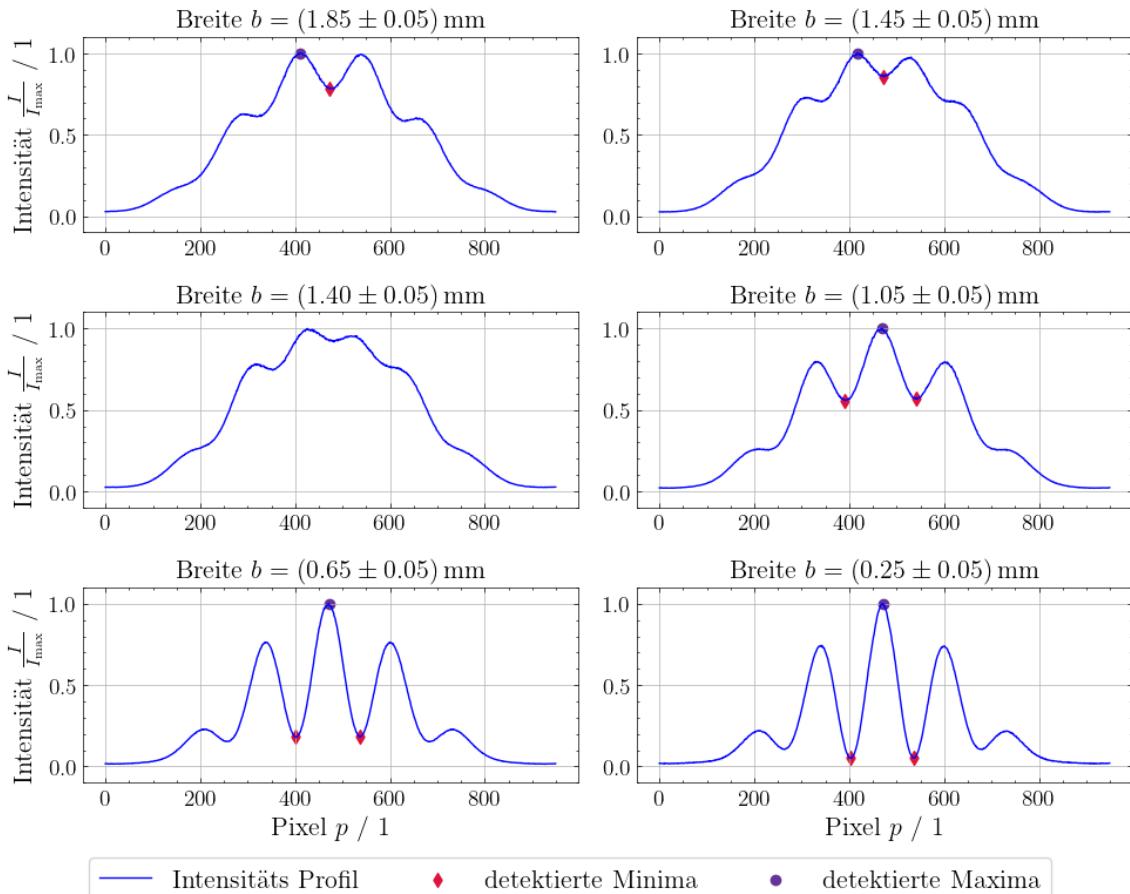


Abbildung 2: Intensitätsprofile des Interferenzmusters für verschiedene Spaltbreiten w mit automatisch detektierten Maxima (violette Punkte) und Minima (rote Rauten) zur Berechnung des Kontrastes K . Die Profile zeigen die normierte Intensität I/I_{\max} in Abhängigkeit von der Pixelposition.

In Abbildung 2 sind die detektierten Maxima und Minima für alle Messungen eingezeichnet. Die

Markierungen verdeutlichen die erfolgreiche Detektion der relevanten Punkte. Die aus den Intensitäts-Profilen ermittelten Werte für den Kontrast K inklusive den zugehörigen Unsicherheiten sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Berechnete Kontrastwerte K in Abhängigkeit von der Spaltbreite w . Für die Messungen 4 bis 6 konnte die Unsicherheit ΔK aus der statistischen Schwankung berechnet werden. Für die Messungen 1 bis 3 wird aufgrund der nicht eindeutigen Struktur keine Unsicherheit angegeben.

Messung	w / mm	$K / 1$
1	$1,85 \pm 0,05$	$0,118$
2	$1,45 \pm 0,05$	$0,072$
3	$1,40 \pm 0,05$	$0,000$
4	$1,05 \pm 0,05$	$0,273 \pm 0,003$
5	$0,65 \pm 0,05$	$0,682 \pm 0,007$
6	$0,25 \pm 0,05$	$0,892 \pm 0,008$

2.1.4 Vergleich mit der theoretischen Kurve

Zuletzt werden die ermittelten Kontrastwerte K mit dem theoretischen Verlauf verglichen. Dieser ist gegeben durch die Beziehung:

$$K(w) = \left| \frac{\lambda f_1}{\pi d w} \sin \left(\frac{\pi d w}{\lambda f_1} \right) \right|, \quad (5)$$

Dabei ist $d = 0,23 \text{ mm}$ der Abstand von dem Doppelspalt, $\lambda = 633 \text{ nm}$ die Wellenlänge des verwendeten Lichtes und $f_1 = 300 \text{ mm}$ die Brennweite der Sammellinse. Diese Größen sind in der Angabe [4] gegeben und werden im folgenden als Konstanten betrachtet.

In Abbildung 3 sind die experimentell bestimmten Werte von K zusammen mit der theoretischen Vorhersage gegenüber der Spaltbreite w dargestellt. Die Werte oberhalb des Kontrastminimums dienen nur zur qualitativen Analyse und sind entsprechend gekennzeichnet.

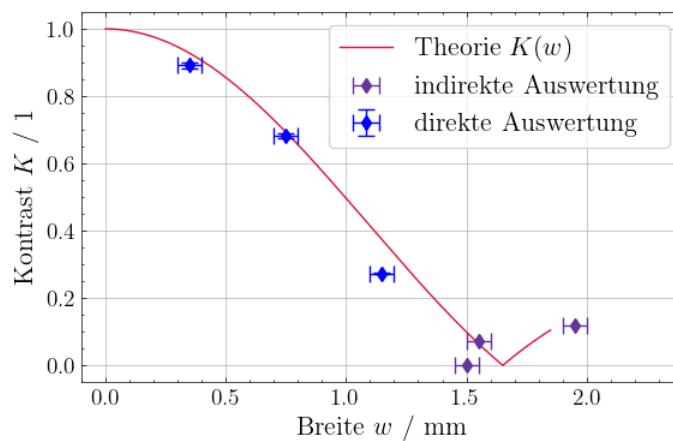


Abbildung 3: Vergleich der experimentell bestimmten Kontrastwerte (violette und blaue Rauten) mit dem theoretischen Verlauf der räumlichen Kohärenz (rote Kurve) in Abhängigkeit von der Spaltbreite w . Die blauen Datenpunkte mit Fehlerbalken zeigen quantitative Übereinstimmung mit der Theorie, während die violetten Punkte nur den qualitativen Verlauf verdeutlichen.

2.2 Diskussion

Ziel dieses Versuchs war es, den Einfluss der Ausdehnung einer Lichtquelle auf die räumliche Kohärenz experimentell zu untersuchen. Die räumliche Kohärenz wurde dabei über den Kontrast des Interferenzmusters eines Doppelspalts charakterisiert. Die Messergebnisse zeigen eine

klare Abhängigkeit des Kontrasts K von der Spaltbreite w der vorgeschalteten Lichtquelle und bestätigen die theoretischen Erwartungen.

Wie in Abbildung 3 dargestellt, nimmt der Kontrast mit zunehmender Spaltbreite deutlich ab. Physikalisch ist dieses Verhalten darauf zurückzuführen, dass eine größere Spaltbreite einer stärker ausgedehnten Lichtquelle entspricht. Licht von verschiedenen Punkten der Quelle trifft mit unterschiedlichen Phasen auf den Doppelspalt, dadurch entsteht dann ein verschobenes Interferenzmuster. Die Überlagerung der verschiedenen Muster führt zu einer Absenkung des Kontrastes K . Für kleine Spaltbreiten nähert sich die Lichtquelle einer punktförmigen Quelle, sodass eine hohe räumliche Kohärenz vorliegt und ein stark ausgeprägtes Interferenzmuster beobachtet wird.

Das experimentell beobachtete Kontrastminimum bei einer Spaltbreite von etwa $w \approx 1,4\text{ mm}$ stimmt gut mit der theoretischen Vorhersage gemäß Gleichung (5) überein. An dieser Stelle heben sich die Beiträge der verschiedenen Teilwellen über eine volle Periode fast vollständig auf. Oberhalb dieses Minimums ist kein eindeutig definiertes Interferenzmaximum mehr vorhanden, weshalb die entsprechenden Messpunkte nur qualitativ ausgewertet wurden.

Die Messwerte unterhalb des Kontrastminimums zeigen sich eine sehr gute Übereinstimmung mit der theoretischen Kurve, was die Zuverlässigkeit der angewandten Methode zur Bildanalyse und Bestimmung des Kontrastes bestätigt.

Die größten Unsicherheiten treten bei großen Spaltbreiten auf, da das Interferenzmuster dort nur schwach ausgeprägt ist und Bildrauschen sowie Inhomogenitäten der Lichtquelle einen starken Einfluss haben. Zusätzlich ist die Festlegung des tatsächlichen Nullpunktes anhand des Kamerabildes mit Unsicherheiten behaftet, da diese visuelle Einschätzung nicht eindeutig ist und somit individuelle Unterschiede in der Auswertung verursachen kann. Weitere systematische Fehlerquellen ergeben sich aus einer nicht idealen Justage des Doppelspalts, einer begrenzten Kameraoptik sowie der Annahme einer homogenen Intensitätsverteilung der Lichtquelle. Insgesamt zeigt der Versuch aber anschaulich, den Einfluss der Ausdehnung einer Lichtquelle auf die räumliche Kohärenz.

3 Versuch 2: Zeitliche Kohärenz

3.1 Auswertung

Im zweiten Versuch gilt es den Einfluss der spektralen Breite einer Lichtquelle auf das Interferenzmuster eines Doppelspalts zu untersuchen. Zur Demonstration dieses Effekts wurde eine räumlich kohärente Lichtquelle mit sehr geringer Spaltbreite w und ein Doppelspalt mit Abstand $d = 0,43\text{ mm}$ verwendet.

Für den Versuch wurde das Interferenzmuster mit einem Bandpassfilter, einem Langpassfilter und ohne Filter aufgezeichnet. Der Bandpassfilter lässt ausschließlich Licht der Wellenlänge $\lambda = 633\text{ nm}$ passieren und wirkt damit wie eine monochromatische Lichtquelle. Der Langpassfilter lässt nur Wellenlängen oberhalb von $\lambda \approx 650\text{ nm}$ durch, was zu einem erheblich breiterem Lichtspektrum führt. Bei der Messung ohne Filter besitzt die Lichtquelle die größtmögliche Spektrale Breite.

Zur besseren Visualisierung der zeitlichen Kohärenz wird, wie im vorigen Versuch ein Bereich des Interferenzmusters ausgewählt und ein Intensitätsprofil berechnet. Die aufgenommenen Interferenzmuster sowie die zugehörigen Profile sind in Abbildung 4 dargestellt.

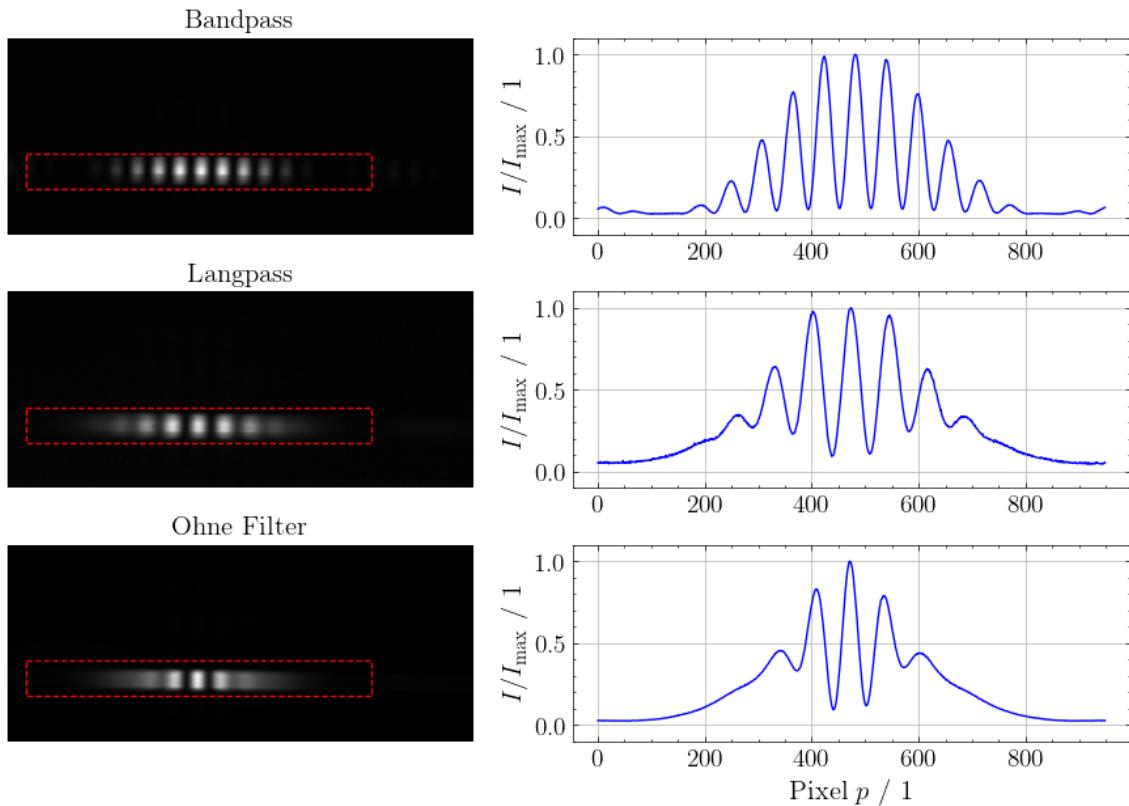


Abbildung 4: Interferenzmuster und zugehörige Intensitätsprofile für verschiedene Filter. Links sind die aufgenommenen Interferenzmuster mit dem markierten Bereich dargestellt, rechts die entsprechenden Intensitätsprofile I/I_{\max} in Abhängigkeit von der Pixelposition.

3.2 Diskussion

Die experimentellen Ergebnisse in Abbildung 4 zeigen deutlich, dass der Kontrast des Interferenzmusters mit zunehmender spektraler Breite, besonders in größeren Abständen vom Nullten Maximum, abnimmt. Beim Einsatz des Bandpassfilters ist ein Interferenzmuster mit hohem Kontrast sichtbar, was auf den monochromatischen Charakter des Licht zurückzuführen ist.

Der Langpassfilter führt zu einem deutlich breiteren Spektrum und damit zu einer reduzierten zeitlichen Kohärenz. Da die Beugung an einem Doppelspalt abhängig von der Wellenlänge ist [3] überlagern sich die einzelnen Interferenzmuster der verschiedenen Wellenlängen, besonders bei größeren Beugungsordnungen, stark destruktiv. Entsprechend ist der Kontrast gegenüber dem Bandpassfilter sichtbar verringert, was in der obigen Abbildung deutlich zu erkennen ist.

Ohne Filter besitzt die Lichtquelle die größte spektrale Breite, wodurch die zeitliche Kohärenz am geringsten ist. Noch deutlicher wie beim Langpassfilter erkennt man die Abnahme des Kontrastes mit steigendem Abstand vom Nullten Beugungsmaximum.

Abweichungen vom idealen Verhalten können durch nicht ideale Filtercharakteristiken, Streulicht sowie eine begrenzte spektrale Selektivität der Filter verursacht werden. Insgesamt verdeutlicht der Versuch anschaulich den Einfluss der spektralen Breite einer Lichtquelle auf die zeitliche Kohärenz.

4 Versuch 3: Bestimmung der Schichtdicke

4.1 Auswertung

Im dritten Versuch gilt es die Dicke einer transparenten Kunststoffschicht mithilfe eines Doppelspalts zu bestimmen. Entsprechend der Versuchsanleitung [4] wird zunächst das Referenz-

Interferenzmuster eines Doppelspalts mit Abstand $d = 0,43\text{ mm}$ ohne Probe aufgezeichnet, anschließend wird die zu untersuchende Kunststoffschicht so in den Strahlengang eingebracht, dass nur einer der beiden Spalte von der Schicht bedeckt ist. Dies führt zu einer Änderung der optischen Weglänge und resultiert in einer Verschiebung des gesamten Interferenzmusters. Beide Aufnahmen sind in Abbildung 5 dargestellt.

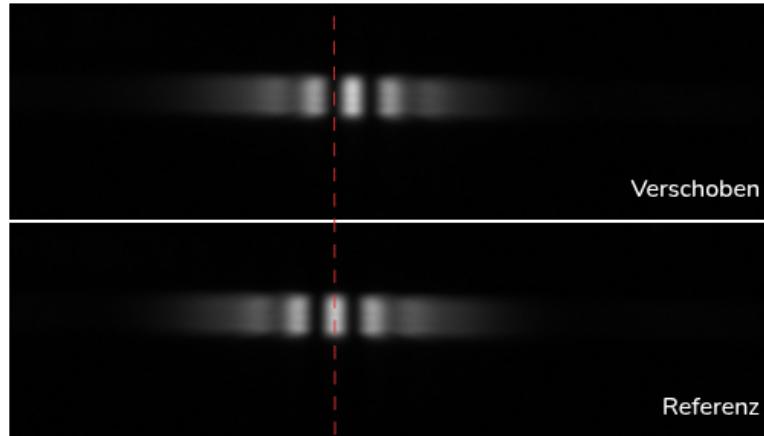


Abbildung 5: Interferenzmuster zur Bestimmung der Schichtdicke. Oben: Interferenzmuster mit zusätzlicher Kunststoffschicht im Doppelspalts. Unten: Referenzmuster ohne Schicht. Die vertikale rote Linie verdeutlicht die laterale Verschiebung der Interferenzmuster aufgrund der veränderten optischen Weglänge.

4.1.1 Bestimmung der Verschiebung in Pixel

Zur genaueren Auswertung werden aus beiden Aufnahmen die Intensitätsprofile, analog zu den vorigen Versuchen (siehe Kapitel 2 und 3), extrahiert. Weiterhin werden mit einem Algorithmus [2] die Maxima im Interferenz-Profil detektiert. Die extrahierten Profile mit den detektierten Peaks sind in Abbildung 6 dargestellt.

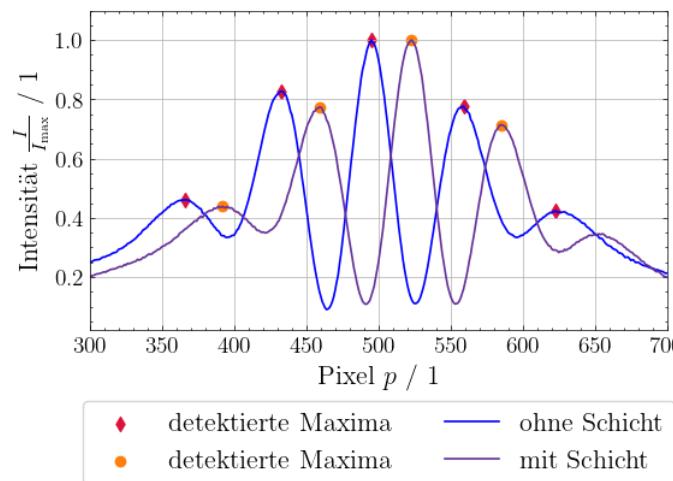


Abbildung 6: Normierte Intensitätsprofile I / I_{\max} in Abhängigkeit von der Pixelposition für die Messung ohne Schicht (blau) und mit Kunststoffschicht (violett). Die detektierten Interferenzmaxima sind als rote Rauten (ohne Schicht) und orange Kreise (mit Schicht) markiert.

Die Verschiebung des Interferenzmusters p wird durch Vergleich der Positionen des jeweils zentralen Maximums p_{mit} beziehungsweise p_{ohne} ermittelt.

$$p = |p_{\text{mit}} - p_{\text{ohne}}|, \quad (6)$$

Die Unsicherheit der Positionsbestimmung wird auf $\Delta p = 2$ Pixel festgelegt, womit sich für die gemessene Verschiebung folgender Wert ergibt:

$$p = (26 \pm 2) \text{ Pixel}$$

4.1.2 Umrechnung in eine physikalische Länge

Als nächstes wird ein Umrechnungsfaktor χ von Pixeln in eine physikalische Länge bestimmt. Der Abstand zwischen zwei benachbarten Interferenzmaxima p_{cal} entspricht einer Länge von genau einer Wellenlänge $\lambda = 633 \text{ nm}$. Zur Verbesserung der statistischen Genauigkeit wird der Abstand über mehrere Maxima N gemittelt.

$$\chi = \frac{N \cdot \lambda}{p_{\text{cal}}} \quad \Delta\chi = \chi \cdot \frac{\Delta p}{p_{\text{cal}}}, \quad (7)$$

Für die Unsicherheit des Abstandes zwischen den Interferenzmaxima wird wie zuvor $\Delta p = 2$ Pixel angesetzt. Mit den konkreten Zahlenwerten ergibt sich:

$$\chi = (9,85 \pm 0,08) \frac{\text{nm}}{\text{Pixel}}$$

Die Verschiebung der Maxima Δs ergibt sich aus der Umrechnung von Pixel in μm .

$$\Delta s = p \cdot \chi \quad \Delta(\Delta s) = \Delta s \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta p}{p}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\chi}{\chi}\right)^2}, \quad (8)$$

Konkret ergibt sich durch einsetzen der Zahlenwerte:

$$\Delta s = (0,26 \pm 0,03) \mu\text{m}$$

4.1.3 Bestimmung der Schichtdicke

Zuletzt berechnet sich die Schichtdicke t aus dem Zusammenhang über die gegebene Brechzahl der Kunststoffschicht $n = 1,492$.

$$t = \frac{\Delta s}{n - 1} \quad \Delta t = \frac{\Delta(\Delta s)}{n - 1}, \quad (9)$$

Als finaler Wert der Berechnung ergibt sich:

$$t = (0,52 \pm 0,05) \mu\text{m}$$

4.2 Diskussion

In diesem Versuch wurde die Dicke t einer transparenten Kunststoffschicht mithilfe der Verschiebung eines Doppelspalt-Interferenzmusters bestimmt. Die Methode basiert auf der Änderung der optischen Weglänge, die entsteht, wenn eine transparente Probe in einen der beiden Strahlengänge eines Doppelspalts eingebracht wird.

Die gemessene Verschiebung des Interferenzmusters konnte eindeutig aus den Intensitätsprofilen ermittelt werden. Die daraus berechnete Schichtdicke $t = (0,52 \pm 0,05) \mu\text{m}$ liegt in einer physikalisch plausiblen Größenordnung und zeigt, dass die verwendete Methode zur Bestimmung sehr kleiner Schichtdicken geeignet ist.

Die relative Unsicherheit der Schichtdicke wird hauptsächlich durch die Unsicherheit der Pixelpositionen, sowie durch den experimentell bestimmten Umrechnungsfaktor von Pixeln in eine physi-

kalische Länge bestimmt. Der Beitrag der Unsicherheit des Brechungsindex wurde vernachlässigt und stellt eine weitere systematische Fehlerquelle dar.

Weitere Abweichungen können durch eine nicht exakt senkrechte Ausrichtung der Kunststoffschicht, lokale Inhomogenitäten der Schichtdicke sowie durch begrenzte Auflösung der Kamera entstehen. Eine Verbesserung der Messgenauigkeit könnte durch eine statistische Auswertung über mehrere Interferenz-Ordnungen oder durch eine genauere Bestimmung der Pixel-Skalierung erreicht werden.

Insgesamt demonstriert der Versuch anschaulich, dass Interferenzmethoden eine empfindliche und präzise Möglichkeit zur Bestimmung von Schichtdicken im Submikrometerbereich darstellen.

5 Versuch 4: Streifenbreite in Abhängigkeit vom Spaltabstand

5.1 Auswertung

Im vierten Versuch soll die maximale Größe einer Lichtquelle w in Abhängigkeit vom Spaltabstand des Doppelspalts d untersucht werden. Dazu wird für drei verschiedene Doppelspalte mit den Abständen $d_1 = 0,13 \text{ mm}$, $d_2 = 0,23 \text{ mm}$ und $d_3 = 0,43 \text{ mm}$ die Breite w des verstellbaren Spalts vor der Lichtquelle so lange variiert, bis das Kontrastminimum erreicht ist. Analog zum ersten Versuch (siehe Kapitel 2) wird die Spaltbreite w mithilfe einer Mikrometerschraube eingestellt und unter Berücksichtigung der Nullpunktverschiebung w_0 korrigiert. Die Unsicherheit der Spaltbreite wird wie in Kapitel 2 auf $\Delta w = 0,05 \text{ mm}$ festgelegt. Da die Bestimmung des Kontrastminimums allerdings subjektiv ist, ist dies sicher eine optimistische Abschätzung, weshalb hier einfach der doppelte Wert $\Delta w = 0,1 \text{ mm}$ angesetzt wird.

Die drei aufgenommenen Interferenzmuster für die unterschiedlichen Doppelspalte sind in Abbildung 7 dargestellt. Der markierte Auswertebereich dient hier ausschließlich der Visualisierung.

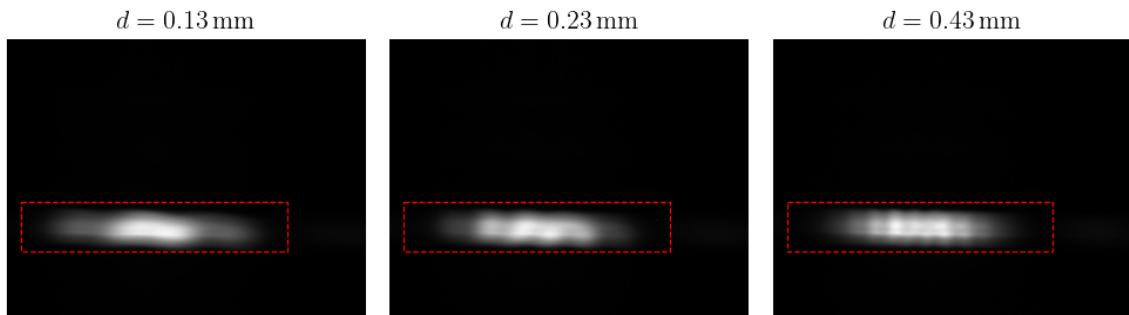


Abbildung 7: Interferenzmuster des ersten Kontrastminimums für drei verschiedene Doppelspaltabstände $d = 0,13 \text{ mm}$, $d = 0,23 \text{ mm}$ und $d = 0,43 \text{ mm}$. Der markierte Bereich hebt den relevanten Teil des Interferenzmusters hervor.

Die experimentell bestimmten Spaltbreiten w sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Ermittelte Spaltbreiten w des ersten Kontrastminimums für verschiedene Doppelspaltabstände d .

Messung	d / mm	w / mm
1	0,13	$2,20 \pm 0,10$
2	0,23	$1,40 \pm 0,10$
3	0,43	$0,39 \pm 0,10$

5.1.1 Vergleich mit der theoretischen Vorhersage

Zuletzt werden die ermittelten Spaltbreiten mit dem theoretischen Verlauf verglichen. Die Position des ersten Kontrastminimums ist durch die folgende Bedingung gegeben [3]:

$$w(d) = \frac{f_1 \lambda}{d}, \quad (10)$$

Hier ist $f_1 = 300$ mm die Brennweite der Sammellinse, $\lambda = 633$ nm die Wellenlänge des verwendeten Laserlichts und d der Abstand des Doppelspalts. Diese Größen sind in der Angabe [4] gegeben und werden als Konstanten betrachtet.

In Abbildung 8 sind die experimentell bestimmten Werte und die theoretische Kurve in Abhängigkeit vom Spaltabstand d dargestellt.

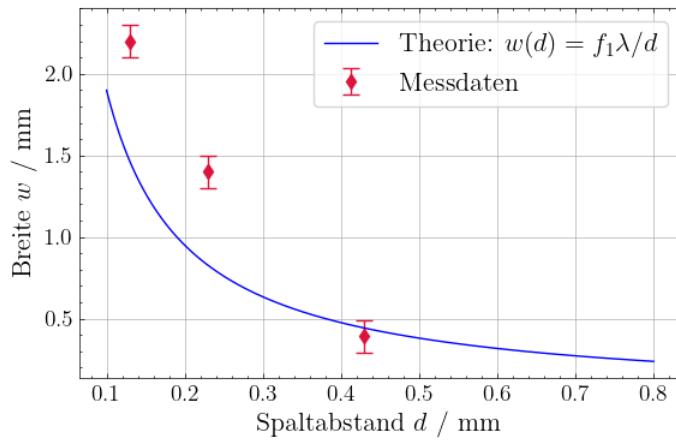


Abbildung 8: Vergleich der experimentell bestimmten Spaltbreiten (rote Rauten) mit dem theoretischen Verlauf (blaue Kurve) in Abhängigkeit vom Doppelspaltabstand d .

5.2 Diskussion

In letzten Versuch wurde der Zusammenhang zwischen dem Spaltabstand eines Doppelspalts und der maximalen Ausdehnung einer räumlich kohärenten Lichtquelle untersucht. Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass die Spaltbreite des ersten Kontrastminimums mit zunehmendem Spaltabstand deutlich abnimmt. Dieses Verhalten entspricht der theoretischen Vorhersage gemäß Gleichung (10), wonach die Spaltbreite umgekehrt proportional zum Spaltabstand ist. Physikalisch bedeutet dies, dass bei größerem Spaltabstand höhere Anforderungen an die räumliche Kohärenz der Lichtquelle gestellt werden, um noch ein Interferenzmuster beobachten zu können.

Die Übereinstimmung zwischen den experimentell bestimmten Werten und der theoretischen Kurve ist trotz der vergleichsweise großen Unsicherheiten durchaus gegeben. Während der dritte Messpunkt sehr gut mit der theoretischen Vorhersage zusammen passt, liegen insbesondere die Messdaten des ersten und zweiten Punktes deutlich oberhalb des erwarteten Wertes. Diese Abweichung ist vermutlich auf die subjektive Bestimmung des Kontrastminimums sowie auf die vergleichsweise große Unsicherheit der Spaltbreite zurückzuführen. Insbesondere bei mittleren Spaltabständen führt bereits eine geringe Fehleinschätzung des Kontrastminimums zu einer systematischen Überschätzung der Spaltbreite.

Weitere Fehlerquellen sind eine nicht ideale Justage des Doppelspalts, Inhomogenitäten der Lichtquelle sowie die Annahme einer idealen Punktabbildung durch die Sammellinse. Eine Verbesserung des Experiments könnte durch eine automatisierte Kontrastbestimmung oder eine statistische Auswertung über mehrere Messungen erreicht werden.

Insgesamt bestätigt der Versuch aber den theoretischen Zusammenhang zwischen der räumlichen

Kohärenz bzw der Spaltbreite w und dem Doppelspaltabstand d .

Literatur

- [1] S. community. `scipy.optimize.curve_fit`. https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.curve_fit.html, 2025. zuletzt besucht: 29.10.2025.
- [2] S. community. `scipy.signal.peak_finder`. https://docs.scipy.org/doc/scipy-1.16.2/reference/generated/scipy.signal.find_peaks.html, 2025. zuletzt besucht: 26.10.2025.
- [3] W. Demtröder. *Experimentalphysik 2 - Elektrizität und Optik*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 7 edition, 2018. ISBN 978-3-662-55790-7. zuletzt besucht: 08.11.2025.
- [4] Institut für Experimentalphysik, Technische Universität Graz and Institut für Physik, Universität Graz. Laborübung 2.04: Signalleitung, 2025. Laborpraktikum Elektrizität, Magnetismus, Optik, WS 2025/26.
- [5] iso.org. Determining combined standard uncertainty. https://www.iso.org/sites/JCGM/GUM/JCGM100/C045315e-html/C045315e_FILES/MAIN_C045315e/05_e.html, 2025. zuletzt besucht: 16.11.2025.

Abbildungsverzeichnis

1 Exemplarische Interferenzmuster zur Bestimmung der räumlichen Kohärenz mit markiertem Bereich (rote gestrichelte Umrandung). Links: Messung 3 nahe dem Kontrastminimum bei großer Spaltbreite. Rechts: Messung 5 bei kleiner Spaltbreite und hohem Kontrast.	4
2 Intensitätsprofile des Interferenzmusters für verschiedene Spaltbreiten w mit automatisch detektierten Maxima (violette Punkte) und Minima (rote Rauten) zur Berechnung des Kontrastes K . Die Profile zeigen die normierte Intensität I/I_{\max} in Abhängigkeit von der Pixelposition.	5
3 Vergleich der experimentell bestimmten Kontrastwerte (violette und blaue Rauten) mit dem theoretischen Verlauf der räumlichen Kohärenz (rote Kurve) in Abhängigkeit von der Spaltbreite w . Die blauen Datenpunkte mit Fehlerbalken zeigen quantitative Übereinstimmung mit der Theorie, während die violetten Punkte nur den qualitativen Verlauf verdeutlichen.	6
4 Interferenzmuster und zugehörige Intensitätsprofile für verschiedene Filter. Links sind die aufgenommenen Interferenzmuster mit dem markierten Bereich dargestellt, rechts die entsprechenden Intensitätsprofile I/I_{\max} in Abhängigkeit von der Pixelposition.	8
5 Interferenzmuster zur Bestimmung der Schichtdicke. Oben: Interferenzmuster mit zusätzlicher Kunststoffschicht im Doppelspalts. Unten: Referenzmuster ohne Schicht. Die vertikale rote Linie verdeutlicht die laterale Verschiebung der Interferenzmuster aufgrund der veränderten optischen Weglänge.	9
6 Normierte Intensitätsprofile I/I_{\max} in Abhängigkeit von der Pixelposition für die Messung ohne Schicht (blau) und mit Kunststoffschicht (violett). Die detektierten Interferenzmaxima sind als rote Rauten (ohne Schicht) und orange Kreise (mit Schicht) markiert.	9

7	Interferenzmuster des ersten Kontrastminimums für drei verschiedene Doppelspaltabstände $d = 0,13 \text{ mm}$, $d = 0,23 \text{ mm}$ und $d = 0,43 \text{ mm}$. Der markierte Bereich hebt den relevanten Teil des Interferenzmusters hervor.	11
8	Vergleich der experimentell bestimmten Spaltbreiten (rote Rauten) mit dem theoretischen Verlauf (blaue Kurve) in Abhängigkeit vom Doppelspaltabstand d	12

Tabellenverzeichnis

1	Eingestellte Spaltbreiten w zur Untersuchung der räumlichen Kohärenz. Die Werte wurden unter Berücksichtigung der Nullpunktverschiebung w_0 berechnet. Die Unsicherheit Δw berücksichtigt sowohl die Ablesegenauigkeit als auch die systematische Nullpunktverschiebung.	4
2	Berechnete Kontrastwerte K in Abhängigkeit von der Spaltbreite w . Für die Messungen 4 bis 6 konnte die Unsicherheit ΔK aus der statistischen Schwankung berechnet werden. Für die Messungen 1 bis 3 wird aufgrund der nicht eindeutigen Struktur keine Unsicherheit angegeben.	6
3	Ermittelte Spaltbreiten w des ersten Kontrastminimums für verschiedene Doppelspaltabstände d	11