

Inhaltsverzeichnis

1 Aufgabenstellung	2
1.1 Young'scher Doppelspalt, Beugungsgitter	2
1.2 Polarisation	2
1.3 Michelson Interferometer	2
2 Grundlagen	3
2.1 Kohärenz	3
2.2 Doppelspalt	4
2.3 Gesetz von Malus	5
2.4 Michelson-Interferometer	6
3 Versuchsanordnung	8
3.1 Young'scher Doppelspalt, Beugungsgitter	8
3.2 Polarisation	10
3.3 Michelson Interferometer	11
4 Geräteliste	13
5 Versuchsdurchführung und Messergebnisse	14
5.1 Young'scher Doppelspalt, Beugungsgitter	14
5.2 Polarisation	16
5.3 Michelson Interferometer	18
6 Auswertung	22
6.1 Young'scher Doppelspalt, Beugungsgitter	23
6.2 Polarisation	25
6.3 Michelson Interferometer	25
7 Diskussion	26
7.1 Young'scher Doppelspalt, Beugungsgitter	26
7.2 Polarisation	26
7.3 Michelson Interferometer	27
8 Zusammenfassung	28
8.1 Young'scher Doppelspalt, Beugungsgitter	28
8.2 Polarisation	28
8.3 Michelson Interferometer	28

1 Aufgabenstellung

1.1 Young'scher Doppelspalt, Beugungsgitter

- Bestimmen Sie das Beugungsmuster von vier Doppelspalten mit (bekannten) unterschiedlichen Spaltbreiten und Spaltabständen. Berechnen Sie aus den Messwerten die Wellenlänge des LASERs.
- Erklären Sie die Details der beobachteten Beugungsmuster durch Vergleich mit den berechneten Mustern.
- Bestimmen Sie das Beugungsmuster eines Liniengitters und vergleichen Sie mit berechneten Werten. Berechnen Sie aus den Messwerten die Gitterkonstante.

1.2 Polarisation

- Verifizieren Sie das Gesetz von Malus.
- Untersuchen Sie den Einfluss des Durchlasswinkels eines weiteren Polarisators zwischen zwei gekreuzten Polarisatoren.

1.3 Michelson Interferometer

- Justieren Sie das Interferometer und generieren Sie ein konzentrisches Interferenzmuster. Bestimmen Sie durch Weglängenänderung die Wellenlänge des LASERs. Wiederholen Sie dies für ein paralleles Interferenzmuster.
- Untersuchen Sie den absoluten Weglängenunterschied in den beiden Interferometerarmen, sowie Auflösung und Stabilität des Interferometers.
- Untersuchen Sie die Rolle der Polarisation auf die Interferenzfähigkeit des Laserlichts.

2 Grundlagen

2.1 Kohärenz

Die zeitliche Kohärenz bezieht sich auf den Grad der Ähnlichkeit zwischen zwei Lichtwellen, die von derselben Quelle, aber zu unterschiedlichen Zeiten ausgesendet werden. Lichtwellen bestehen aus oszillierenden elektrischen und magnetischen Feldern. Damit es zu einer Interferenz kommt, müssen die beiden Wellen eine konstante Phasenbeziehung haben. Das bedeutet, dass die Phasendifferenz zwischen den beiden Wellen über einen längeren Zeitraum konstant bleiben muss. Ändert sich die Phasenbeziehung schnell, wird von einer geringen zeitlichen Kohärenz der Wellen ausgegangen. Bleibt die Phasenbeziehung dagegen über einen langen Zeitraum konstant, so wird von einer hohen zeitlichen Kohärenz ausgegangen.

Die räumliche Kohärenz hingegen bezieht sich auf den Grad der Ähnlichkeit zwischen zwei Lichtwellen, die von derselben Quelle, aber an unterschiedlichen Orten im Raum ausgesendet werden. Damit es zu einer Interferenz kommt, müssen die beiden Wellen über ihre gesamte Wellenfront eine konstante Phasenbeziehung aufweisen. Das bedeutet, dass die Phasendifferenz zwischen zwei beliebigen Punkten der Wellenfronten konstant bleiben sollte. Wenn sich die Phasenbeziehung über die Wellenfronten hinweg schnell ändert, wird von einer geringen räumlichen Kohärenz der Wellen ausgegangen. Bleibt die Phasenbeziehung dagegen über die Wellenfronten hinweg konstant, so wird von einer hohen räumlichen Kohärenz ausgegangen.

Die Kohärenzlänge ist ein Maß dafür, wie weit sich das Licht unter Beibehaltung seiner Kohärenz ausbreiten kann. Sie ist die Strecke, über die die Phasenbeziehung zwischen zwei Punkten auf einer Wellenfront konstant bleibt. Die Kohärenzlänge verhält sich umgekehrt proportional zur spektralen Bandbreite der Lichtquelle. Eine schmalbandige Lichtquelle mit einer kleinen spektralen Bandbreite hat eine große Kohärenzlänge, während eine breitbandige Lichtquelle mit einer großen spektralen Bandbreite eine kleine Kohärenzlänge hat.

Zur Erzeugung von Interferenzmustern mit Licht ist eine Lichtquelle mit hoher zeitlicher Kohärenz, hoher räumlicher Kohärenz und einer ausreichend langen Kohärenzlänge erforderlich. Eine hohe zeitliche Kohärenz gewährleistet, dass die Phasenbeziehung zwischen zwei Wellen über einen längeren Zeitraum konstant bleibt, so dass sie konstruktiv oder destruktiv interferieren können. Eine hohe räumliche Kohärenz stellt sicher, dass die Phasenbeziehung zwischen verschiedenen Punkten auf den Wellenfronten konstant bleibt, so dass die Wellen gleichmäßig über das Muster interferieren können. Die Kohärenzlänge bestimmt die Größe des Bereichs, in dem Interferenz auftreten kann. Eine große Kohärenzlänge ist notwendig, um gut definierte Interferenzstreifen zu beobachten, während eine kurze Kohärenzlänge zu verschwommenen oder verwaschenen Mustern führt.

2.2 Doppelspalt

Das Youngsche Doppelspaltexperiment ist ein klassisches Experiment, das die Wellennatur des Lichts und das Phänomen der Interferenz demonstriert. Dabei wird Licht durch zwei eng beieinander liegende Spaltöffnungen geleitet und das sich ergebende Muster auf einem hinter den Spaltöffnungen angebrachten Bildschirm beobachtet.

Bei diesem Experiment wird eine kohärente Lichtquelle, z. B. ein LASER, verwendet, um eine hohe zeitliche und räumliche Kohärenz zu gewährleisten. Das Licht wird durch zwei schmale Schlitze geleitet, wodurch zwei Lichtwellenquellen entstehen, die sich als halbkreisförmige Wellenfronten ausbreiten. Diese Wellenfronten überlagern sich dann und interferieren miteinander.

Um die Kriterien für konstruktive Interferenz im Young'schen Doppelspaltexperiment zu verstehen, wird das Konzept der optischen Wegdifferenz (OPD) betrachtet. Die OPD ist der Unterschied in der Strecke, die die Lichtwellen von den beiden Spaltöffnungen bis zu einem bestimmten Punkt auf dem Bildschirm zurücklegen. Wenn diese Differenz ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge des Lichts ist, tritt an diesem Punkt konstruktive Interferenz auf.

Mathematisch lässt sich die Bedingung für konstruktive Interferenz wie folgt ausdrücken:

$$\Delta = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin(\theta) \quad (1)$$

Dabei bezeichnet Δ den Gangunterschied, d der Abstand zwischen den beiden Schlitzen, λ die Wellenlänge und θ der Winkel zwischen der Verbindungslinie zwischen dem Punkt auf dem Schirm und den Schlitzen und der Senkrechten zum Schirm ist.

Wenn die OPD gleich $m\lambda$ ist, wobei m eine ganze Zahl ist, die die Ordnung des Interferenzstreifens angibt, und λ die Wellenlänge des Lichts ist, tritt konstruktive Interferenz auf. Das bedeutet, dass die Wellen der beiden Schlitze an diesem Punkt des Schirms in Phase eintreffen, was zu einem hellen Streifen führt.

Die quadrierte Amplitude der Welle steht in direktem Zusammenhang mit der Lichtintensität, die an einem bestimmten Punkt des Bildschirms beobachtet wird. Durch Quadrieren der Amplitude erhält man also das Interferenzmuster des Doppelspalts. Das Muster besteht aus abwechselnd hellen und dunklen Streifen, die als Interferenzstreifen oder -bänder bezeichnet werden.

$$I(x)_{\text{Interferenz}} = I_0 \left(1 + \cos \frac{2\pi x d}{\lambda m} \right) \quad (2)$$

Zusätzlich zum Interferenzmuster des Doppelspalts wird jedoch noch ein weiteres Interferenzmuster überlagert. Dieses zusätzliche Muster entsteht durch die Interferenz von Lichtwellen, die durch jeden einzelnen Spalt laufen und sich dann beugen, wodurch Einzelspalt-Interferenzmuster entstehen. Die einzelnen Schlitze sind keine punktförmigen Quellen, und die gebeugten Wellen jedes Spalts interferieren mit sich selbst.

Das Interferenzmuster der Einzelspalte ist durch ein zentrales Maximum und eine Reihe kleinerer Maxima und Minima auf beiden Seiten gekennzeichnet. Dieses Muster wird mit dem Interferenzmuster der Doppelspalte überlagert, wodurch sich ein komplexeres Gesamtmuster ergibt, das auf dem Bildschirm zu sehen ist. Das kombinierte Muster weist sowohl die Interferenzstreifen des Doppelspalts als auch das Interferenzmuster des Einzelspalts auf.

$$I(x)_{\text{Beugung}} = \frac{\sin^2(\pi xD/\lambda m)}{(\pi xD/\lambda m)^2} \quad (3)$$

Das im Young'schen Doppelspaltexperiment beobachtete Muster ist also die Überlagerung von zwei Interferenzmustern: den Interferenzstreifen, die von den Doppelspalten erzeugt werden, und dem Interferenzmuster, das sich aus der Beugung der Einzelspalte ergibt. Dieses Experiment ist ein starker Beweis für die Wellennatur des Lichts und das Phänomen der Interferenz.

2.3 Gesetz von Malus

Das Gesetz von Malus-Gesetz beschreibt die Beziehung zwischen der Intensität des polarisierten Lichts, das durch einen Analysator übertragen wird, und dem Winkel zwischen der Polarisationsrichtung des einfallenden Lichts und der Übertragungsachse des Analysators.

Nach dem Malus-Gesetz ist die Intensität I des durchgelassenen Lichts gegeben durch:

$$I = I_0 \cos^2(\theta) \quad (4)$$

wobei I_0 die anfängliche Intensität des einfallenden polarisierten Lichts und θ der Winkel zwischen der Polarisationsrichtung des einfallenden Lichts und der Transmissionsachse des Analysators ist.

Das Malus-Gesetz beruht auf dem Prinzip der Polarisation. Wenn unpolarisiertes Licht einen Polarisator durchläuft, wird es polarisiert und seine elektrischen Feldschwingungen auf eine bestimmte Richtung beschränkt. Das polarisierte Licht ist

durch seine Polarisationsrichtung gekennzeichnet, die senkrecht zur Transmissionsachse des Polarisators verläuft.

Wenn das polarisierte Licht einen Analysator durchläuft, der ein weiterer Polarisator mit einer bestimmten Transmissionsachse ist, hängt die Intensität des übertragenen Lichts von der relativen Ausrichtung zwischen der Polarisationsrichtung des einfalldenden Lichts und der Transmissionsachse des Analysators ab.

2.4 Michelson-Interferometer

Der grundsätzliche Aufbau des Michelson Interferometers ist in Abbildung 2.1 sichtbar.

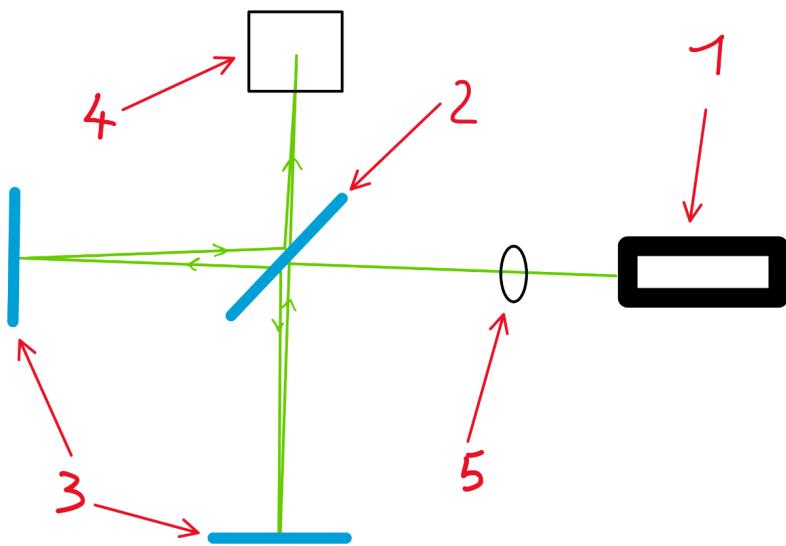


Abbildung 2.1: Skizze des Aufbaus des Michelson Interferometres

- 1 ...LASER
- 2 ...Beamsplitter
- 3 ...Spiegel
- 4 ...Schirm mit Beugungsmuster
- 5 ...Linse

Der Beamsplitter entspricht dabei einem dünnen Glasplättchen mit einer speziellen Beschichtung, durch die die Hälften des Strahls reflektiert und die andere Hälfte durchgelassen wird. Das entsprechende Beugungsmuster am Schirm entsteht dabei

durch Interferenz der beiden Lichtstrahlen von den unterschiedlichen Lichtarmen. Eine ebene Welle kann dabei in folgender Form dargestellt werden:

$$E(x, t) = E_0 \exp i(\omega t - kx) \quad (5)$$

Dadurch kann die Lichtintensität folgend ausgedrückt werden:

$$I = 1/4c\varepsilon_0 E_0^2 (1 + \cos \Delta\varphi) \quad (6)$$

Dabei entspricht $\Delta\varphi$ der Phasendifferenz, die sich aus dem Unterschied der Weglängen $\Delta s = |s_1 - s_2|$ nach folgender Formel berechnet:

$$\Delta\varphi = (2\pi/\lambda)\Delta s \quad (7)$$

Das Ringmuster im Interferenzbild kann dabei anhand folgenden Strahlengang in Abbildung 2.2 erklärt werden.

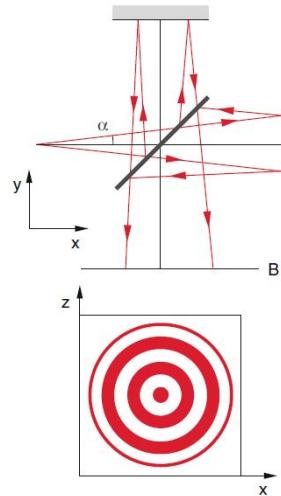


Abbildung 2.2: Skizze des Lichtwegs durch die Linse
[demtroderExperimentalphysik2014]

Mithilfe des Interferometers können bereits sehr kleine Weglängenänderungen in den Lichtarmen sichtbar gemacht werden. Aufgrund der Geometrie entspricht eine Armlängenänderung die im Interferenzbild den Wechsel von einem Interferenzmaximum zum nächsten entspricht, einer Änderung der halben Wellenlänge, weil der Weg zwischen Beamsplitter und Spiegel insgesamt 2 mal zurückgelegt wird. [krennInterferenzUndPolarisat

3 Versuchsanordnung

Für alle Versuche wird als Lichtquelle ein LASER mit einer Wellenlänge λ von 532 nm und einer Leistung von 5 mW verwendet. Der gesamte Versuch wird auf einem Breadboard aufgebaut, welches auf einer gedämpften Steinplatte steht, um Erschütterungen besser ausgleichen zu können. Dies wird noch genauer in Abschnitt 7 behandelt.

3.1 Young'scher Doppelspalt, Beugungsgitter

Der fertige Versuchsaufbau ist in Abbildung 3.1 sichtbar. Die entsprechenden Nummerierungen entsprechen dabei den Justierungsschritten in der Aufzählung.

1. Zunächst wird der LASER am Breadboard parallel ausgerichtet. Dazu kann der Blechschild mit der Skala (5) verwendet werden. Zusätzlich kann damit der Laserstrahl während dem Hantieren oder seine Reflexionen ausgeblendet werden.
2. Nun werden die beiden Spiegel, wie in Abbildung 3.1 sichtbar, aufgestellt, um den Laserstrahl auf den entsprechenden Lichtweg zu lenken. Erneut ist die parallele Ausrichtung zu überprüfen.
3. Nun wird mithilfe des entsprechenden Diahalters der Doppelspalt in den Lichtweg gegeben. Durch den Doppelspalt entsteht eine Reflexion die auf den Spiegel zurückgeworfen wird. Durch die Position dieser Reflexion auf den Spiegel kann die parallele Ausrichtung des Aufbaus überprüft werden. Nun werden die genauen Ausrichtungen der Spiegel und des LASERs durch die entsprechenden Feinjustierungsschrauben so lange nachjustiert, bis die Positionen übereinstimmen.
4. Um die Entfernung zwischen Schirm und Doppelspalt zu maximieren, wird als Schirm die Wand verwendet. Um die einzelnen Distanzen zwischen den Beugungsmaxima besser bestimmen zu können, wird auf die Position des Beugungsbilds ein Blatt Millimeterpapier geklebt.

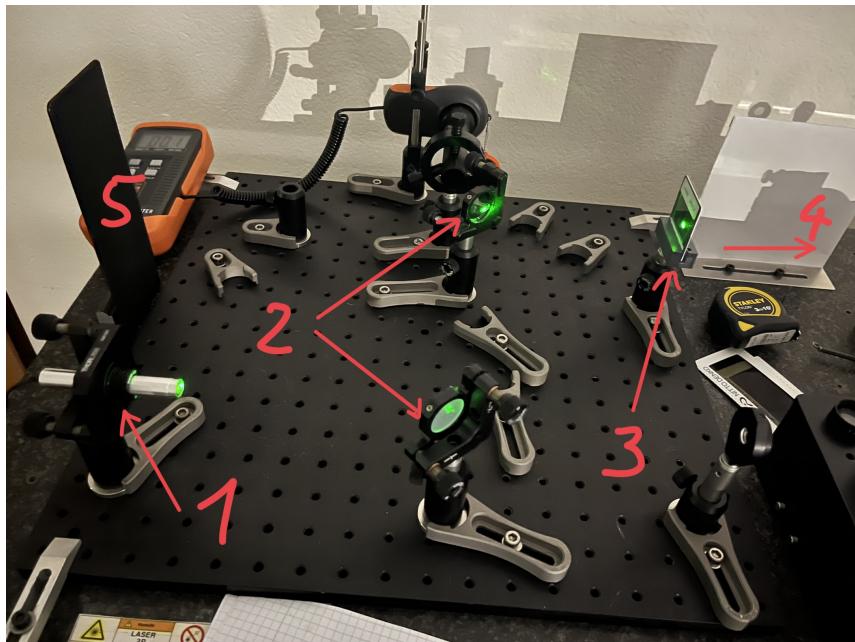


Abbildung 3.1: Versuchsaufbau für den Young'schen Doppelspalt und das Beugungsgitter

- 1 ...LASER
- 2 ...Spiegel
- 3 ...Halterung mit Young'schen Doppelspalt oder dem Beugungsgitter
- 4 ...Schirm auf der Wand (nicht sichtbar)
- 5 ...Blechschild mit Skala

3.2 Polarisation

Der fertige Versuchsaufbau ist in Abbildung 3.2 sichtbar. Die entsprechenden Nummerierungen entsprechen dabei den Justierungsschritten in der Aufzählung.

1. Zunächst wird wieder der LASER am Breadboard parallel ausgerichtet. Dabei kann der Blechschild mit der Skala, wie bereits erklärt, verwendet werden.
2. Nun wird ein Spiegel, wie in Abbildung 3.2 sichtbar, aufgestellt, um den Laserstrahl zum Photodetektor (3) zu lenken. Erneut ist die parallele Ausrichtung zu überprüfen.
3. Vor dem Photodetektor wird ein Rohr mithilfe einer entsprechenden Halterung befestigt, um die Hintergrundbeleuchtung möglichst abzuschirmen.
4. Um die entsprechende Lichtintensität ablesen zu können, wird das entsprechende Messgerät mit dem Photosensor verbunden.
5. Zwischen Photodetektor und Spiegel werden nun noch zwei Polarisationsfilter gegeben, deren Orientierung mit einer Skala verbunden ist.

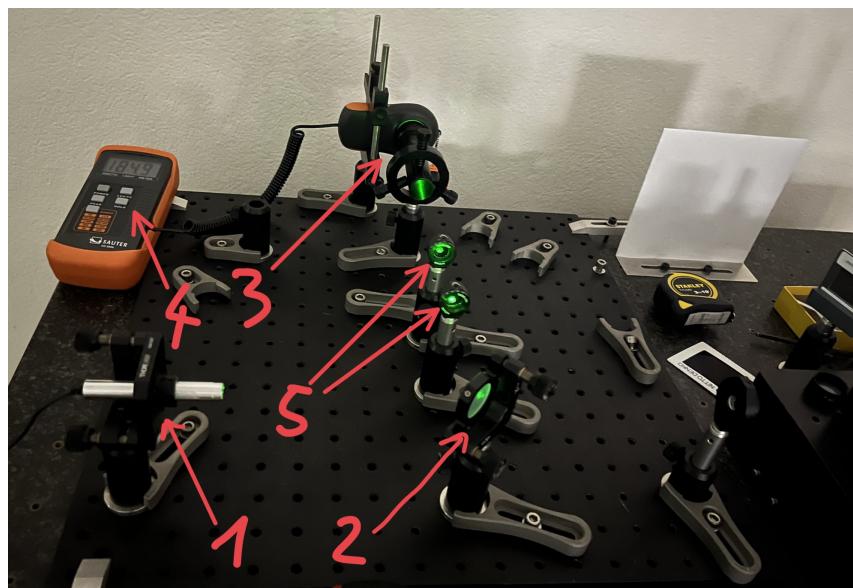


Abbildung 3.2: Versuchsaufbau für die Polarisation

- 1 ...LASER
- 2 ...Spiegel
- 3 ...Photodetektor mit Rohr
- 4 ...Messgerät für Photosensor
- 5 ...Polarisationsfilter

3.3 Michelson Interferometer

Der fertige Versuchsaufbau ist in Abbildung 3.3 sichtbar. Die entsprechenden Nummerierungen entsprechen dabei den Justierungsschritten in der Aufzählung. Der Hauptbestandteil des Interferometers befindet sich nicht auf dem Breadboard, sondern auf der Platte daneben.

1. Zunächst wird die Platte, auf der sich das Interferometer befindet so befestigt, dass sie nicht mehr wackelt.
2. Dann wird der LASER am Breadboard wieder parallel ausgerichtet, sodass dieser auf den Beamsplitter trifft.
3. Der Strahlteiler sorgt dafür, dass der halbe Lichtstrahl durchgelassen und die andere Hälfte in einem Winkel von 90° abgelenkt wird.
4. Nun werden die beiden Spiegel so eingerichtet, dass das Licht zurück zum Beamsplitter geworfen wird, wo es miteinander interferieren kann. Bei der genauen Ausrichtung der Spiegel ist dabei darauf zu achten, dass sich diese im 90° Winkel zueinander befinden und beide Lichtwege ca. gleich lang sind.
5. Am Schirm wird das Interferenzbild der beiden Laserstrahlen sichtbar. Die genaue Position des einen Spiegels bzw. des LASERs muss nun so lange feinjustiert werden, bis ein Interferenzmuster sichtbar wird.
6. Um dafür zu sorgen, dass das Interferenzmuster ringförmig wird, wird eine Linse in den Strahlengang vor den Beamsplitter gegeben.
7. Mit dieser Halterung kann im späteren Verlauf ein Polarisationsfilter im Strahlengang fixiert werden.
8. Durch die Schraube und die entsprechende Übersetzung kann einer der beiden Lichtwege um eine kleine Distanz verkürzt werden.

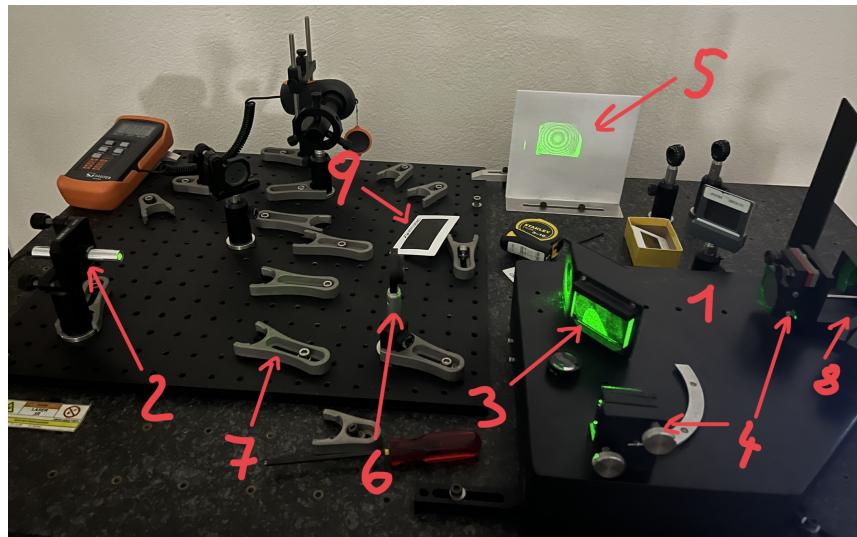


Abbildung 3.3: Versuchsaufbau für das Interferometer

- 1 ...Platte für Interferometer
- 2 ...LASER
- 3 ...Beamsplitter
- 4 ...Spiegel
- 5 ...Schirm
- 6 ...Linse
- 7 ...Halterung für Polarisationsfilter
- 8 ...Schraube für die Distanzänderung der Lichtarme (nicht sichtbar)
- 9 ...Polarisationsfolie

4 Geräteliste

Für den Versuch werden die in Tabelle 4.1 aufgelisteten Geräte verwendet.

Tabelle 4.1: Verwendete Geräte

Gerätetyp	Hersteller	Typ	Anmerkung
LASER	ThorLabs	CPS532-C2	$\lambda = 532 \text{ nm}$
Adapterring für LASER	ThorLabs	AD11NT	
Halterungsring für LASER	ThorLabs	KM100T	
Netzteil für LASER	ThorLabs	973-579-7227	
Spiegel	ThorLabs	PF10-03-P01	2x
Halterungsring für Spiegel	ThorLabs	KM100	2x
Polarisationsfilter	ThorLabs	RSP05/M	2x
Polarisationsfolie	NITTO DENKO		2x
Halterungsring für Linse	ThorLabs	FMP1/M	
Sammellinse	ThorLabs	$f = 40 \text{ mm}$	
Zerstreuulinse	ThorLabs	$f = -16 \text{ mm}$	
Photosensor mit Messgerät	Sauter	S1152203	
Halterungsring Photosensor	selbstbau		
Abdeckrohr mit Halterung	selbstbau		
Interferometeraufbau	selbstbau		
Optical Posts	ThorLabs	TR40/M-JP-P5	mehrmals
Post Holder	ThorLabs	UPH40/M-P5	mehrmals
Justierungsblech			
Breadboard			
Millimeterpapier			

5 Versuchsdurchführung und Messergebnisse

5.1 Young'scher Doppelspalt, Beugungsgitter

Zunächst muss der Versuchsaufbau, wie bereits in Abschnitt 3 beschrieben durchgeführt werden. Nun werden der Reihe nach die 4 verschiedenen Doppelspalt in den Versuchsaufbau gegeben. Die entsprechenden Abmessungen der Doppelspalte sind dabei in Tabelle 5.1 sichtbar. Die entstehenden Beugungsmuster der einzelnen Doppelspalte werden dabei fotografiert und sind im Folgenden Abbildung 5.1 - 5.4 sichtbar. Um die entsprechenden Distanzen im Beugungsbild besser messen zu können, werden die so generierten Fotos bezüglich der Pixelpositionen genau ausgewertet, wie genauer in Abschnitt 6 erklärt. Als Referenz dazu dient das im Hintergrund befindliche Millimeterpapier.

Tabelle 5.1: Maße der Doppelspalte mit implizit gegebener Unsicherheit [krennInterferenzUndPolarisation2023]

S_i ...i-ter Doppelspalt

B ...Spaltbreite in mm

D ...Spaltabstand in mm

	B / mm	D / mm
S_1	0.10	1.00
S_2	0.10	0.50
S_3	0.10	0.25
S_4	0.20	0.25

Für das Fotografieren muss mit der Hintergrundbeleuchtung experimentiert werden, damit die Millimetereinteilung sichtbar ist, jedoch auch die schwachen Beugungsordnungen noch erkannt werden können. Auch muss darauf geachtet werden, beim Aufnehmen der Fotos möglichst nahe am Beugungsbild zu sein, aber keinen Zoom der Kamera zu verwenden, um eine mögliche Verzerrung auf den Bildern zu vermeiden. Auch sollten alle Fotos aus der gleichen Perspektive aufgenommen werden. Dazu wird ein kleines Gerüst gebaut, um immer die gleiche Kameraposition zu treffen.

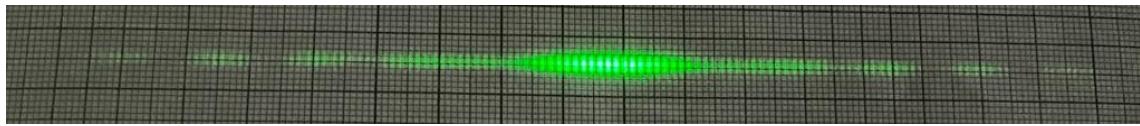


Abbildung 5.1: Erzeugtes Beugungsbild für Spalt 1 mit einer Spaltbreite von 0,1 mm und einem Spaltabstand von 1 mm

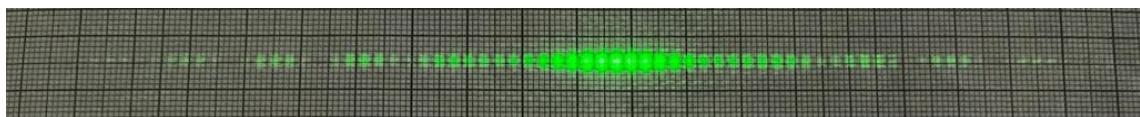


Abbildung 5.2: Erzeugtes Beugungsbild für Spalt 2 mit einer Spaltbreite von 0,1 mm und einem Spaltabstand von 0,5 mm

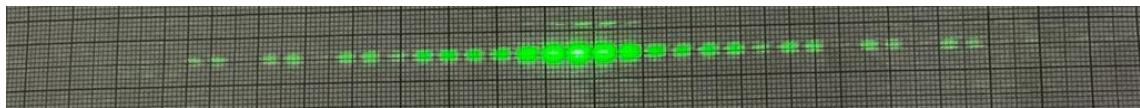


Abbildung 5.3: Erzeugtes Beugungsbild für Spalt 3 mit einer Spaltbreite von 0,1 mm und einem Spaltabstand von 0,25 mm

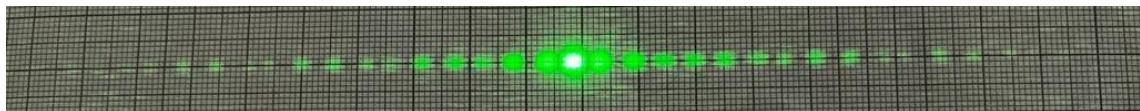


Abbildung 5.4: Erzeugtes Beugungsbild für Spalt 4 mit einer Spaltbreite von 0,2 mm und einem Spaltabstand von 0,25 mm

Nun wird die Abdeckung mit den Doppelspalten durch ein Beugungsgitter, also viele, eng beieinander liegende Spalte ersetzt. Das so erzeugte Beugungsbild ist in Abbildung 5.5 sichtbar.

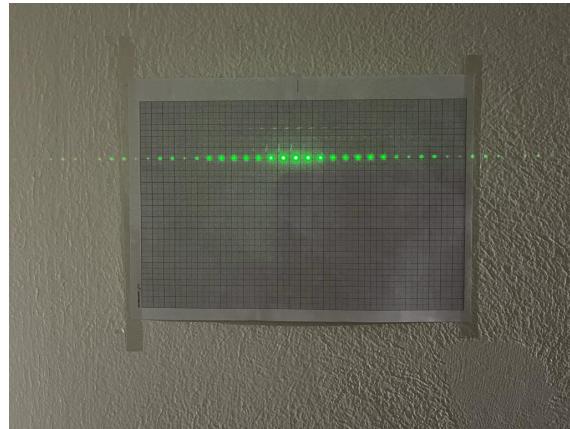


Abbildung 5.5: Erzeugtes Beugungsbild für das Beugungsgitter

5.2 Polarisation

Zunächst muss der Versuchsaufbau, wie bereits in Abschnitt 3 beschrieben durchgeführt werden.

An beiden Polarisationsfiltern wird zunächst die 0-Position eingestellt und diese in den Aufbau gegeben. Im Verlauf des Versuchs sollen nun die Polarisationssebenen zueinander verdreht werden. Dazu bleibt ein Polarisationsfilter konstant in der gleichen Ausrichtung. Der andere Polarisationsfilter wird nun kontinuierlich weitergedreht und der abgelesene Skalenwert, sowie die gemessene Helligkeit in Lux am entsprechenden Photodetektor notiert, was in Tabelle 5.2 sichtbar ist. Am Messgerät ist dabei zu beachten, dass der kleinste mögliche Messbereich gewählt wird. Die Unsicherheit des Winkel ist dabei so groß gewählt, weil der genaue Winkel recht schwer zu bestimmen war. Auch ist darauf zu achten, die Raumbeleuchtung möglichst abzudunkeln, um die Messung dadurch nicht zu Verfälschen.

Tabelle 5.2: Diese Tabelle beinhaltet die gemessenen Beleuchtungsstärke E_v bei verschiedenen Winkel ϕ zwischen den Polarisatoren. Als Lichtquelle dient dabei einem LASER.

$\phi / {}^\circ$	E_v / lx
0 ± 2	3 ± 10
10 ± 2	1 ± 10
20 ± 2	12 ± 10
30 ± 2	44 ± 10
40 ± 2	108 ± 10
50 ± 2	(2,3 ± 1,0) · 10 ²
60 ± 2	(3,3 ± 1,0) · 10 ²
70 ± 2	(4,7 ± 1,0) · 10 ²
80 ± 2	(5,8 ± 1,0) · 10 ²
90 ± 2	(6,4 ± 1,0) · 10 ²
100 ± 2	(6,3 ± 1,0) · 10 ²
110 ± 2	(5,6 ± 1,0) · 10 ²
120 ± 2	(4,6 ± 1,0) · 10 ²
130 ± 2	(2,3 ± 1,0) · 10 ²
140 ± 2	194 ± 10
150 ± 2	105 ± 10
160 ± 2	48 ± 10
170 ± 2	19 ± 10
180 ± 2	3 ± 10
190 ± 2	0 ± 10
200 ± 2	8 ± 10
210 ± 2	39 ± 10
220 ± 2	99 ± 10
230 ± 2	(2,1 ± 1,0) · 10 ²
240 ± 2	(3,5 ± 1,0) · 10 ²
250 ± 2	(4,5 ± 1,0) · 10 ²
260 ± 2	(5,7 ± 1,0) · 10 ²
270 ± 2	(6,2 ± 1,0) · 10 ²
280 ± 2	(6,0 ± 1,0) · 10 ²
290 ± 2	(5,3 ± 1,0) · 10 ²
300 ± 2	(4,2 ± 1,0) · 10 ²
310 ± 2	(2,9 ± 1,0) · 10 ²
320 ± 2	183 ± 10
330 ± 2	99 ± 10
340 ± 2	42 ± 10
350 ± 2	17 ± 10
360 ± 2	2 ± 10
7 ± 2	0 ± 10

Zusätzlich wird auch der Intensitätswert ohne Polarisationsfilter E_{v_0} , mit nur einem Filter $\frac{E_{v_0}}{2}$ und der Winkel $\phi|_{E_v=0}$ bestimmt, an dem, laut Messgerät, kein Licht durch den Aufbau gelangt, gemessen und notiert.

1. $E_{v_0} = (1170 \pm 100) \text{ lx}$
2. $\frac{E_{v_0}}{2} = (765 \pm 100) \text{ lx}$
3. $\phi|_{E_v=0} = (7 \pm 3)^\circ$

Nun wird noch ein dritter Polarisator in Form einer Polarisationsfolie in den Strahlengang gehalten durch den eigentlich keine Intensität gelangt. Dabei werden folgende Werte erzeugt:

1. $\tilde{E}_v|_{\phi \approx 90^\circ} = 0,0 \text{ lx}$
2. $\tilde{E}_v|_{\phi \approx 45^\circ} = 35,3 \text{ lx}$
3. $\tilde{E}_v|_{\phi \approx 22^\circ} = 17,8 \text{ lx}$

Dabei sei angemerkt, dass nur so wenig Werte angegeben wurden, weil hier keine Gradmessung möglich war und der entsprechende Winkel nur geschätzt werden konnte.

5.3 Michelson Interferometer

Zunächst muss der Versuchsaufbau, wie bereits in Abschnitt 3 beschrieben durchgeführt werden.

Nachdem das Interferometer fertig aufgebaut und justiert ist, wird die Linse vor dem Beamsplitter aufgestellt. Dadurch ergeben sich nach dem LASER verschiedene Lichtwege und damit verschiedene Weglängenänderungen, wie bereits in Abschnitt 2 erwähnt, wodurch das Ringförmige Interferenzmuster zustandekommt.

Aufgrund des Aufbaus des Interferometers hat der andere Strahl der den Beamsplitter verlässt eine andere Orientierung der Interferenzmuster. Das bedeutet, dass der Ring, welcher an einen Ausgang durch konstruktive Interferenz hell erscheint, am anderen Ausgang ein Minimum darstellt. Dies könnte optimal mithilfe eines zweiten Strahlteilers gezeigt werden. Da dieser nicht zur Verfügung war wurde das entsprechende Interferenzmuster mit einem gelochten Papier betrachtet, welches als Lochblende verwendet wird, wie in Abbildung 5.6 sichtbar.



Abbildung 5.6: Sichtbares Interferenzmuster durch die Lochblende

Nun wird Die Länge eines Lichtarms Verändert, was ein scheinbares Wandern der Interferenzringe mit sich bringt. Um die genaue Weglängenänderung bestimmen zu können, ist ein Übersetzungsarm mit der Mykrometerschraube verbunden, wodurch die genaue Distanz bestimmt werden kann. Dabei wird auf das Zentrum des Interferenzmusters geachtet und immer die Weglänge bestimmt, damit 10 Interferenzmuster das Zentrum durchlaufen. Die entsprechenden Werte sind in Tabelle 5.3 aufgelistet.

Tabelle 5.3: Diese Tabelle beinhaltet Werte vom Michelson-Interferometer bei unterschiedlichen optischen Armlängen. Beim Varieren der Armlänge sind die Abstände s auf dem Mikrometerschraube abgelesen worden und die dabei durchschrittenen Maxima N gezählt worden.

$N / 1$	s / mm
10,0	1,0
20,0	2,5
30,0	4,0
40,0	5,5
50,0	7,0
60,0	9,0
70,0	10,0
80,0	12,0
90,0	13,5
100,0	15,0
110,0	16,5
120,0	18,0
130,0	20,0
140,0	21,0
150,0	22,5
160,0	24,0
170,0	25,5

Bezüglich der Stabilität des Interferenzbildes wird klar ersichtlich, dass dieses sehr sensitiv auf eventuelle Schwingungen reagiert. Dies kann durch Erschütterungen beobachtet werden. Besser sichtbar wird dies durch vorsichtiges Rütteln des Sockels. Um die starke Sensitivität auf Erschütterungen sichtbar zu machen, wird mithilfe des Handys Musik abgespielt, während dieses auf den Sockel des Interferometers gelegt wird. So kann beobachtet werden, wie Störungen im Interferenzmuster im Takt der Musik auftreten.

Ein weiterer Aspekt, der beobachtet werden kann, ist die Änderung des Ausbreitungsmedium in einem der Lichtarme. Dazu wird die Luft in einem der Lichtarme mithilfe eines Feuerzeugs erhitzt. Dadurch wird durch die so entstehenden Luftwirbel kein deutliches Interferenzmuster mehr sichtbar.

Nun wird die Sammellinse entfernt und eine Zerstreuulinse zwischen Beamsplitter und Schirm gegeben. Dadurch wird das streifenförmige Interferenzmuster am Schirm sichtbar, siehe Abbildung 5.7.

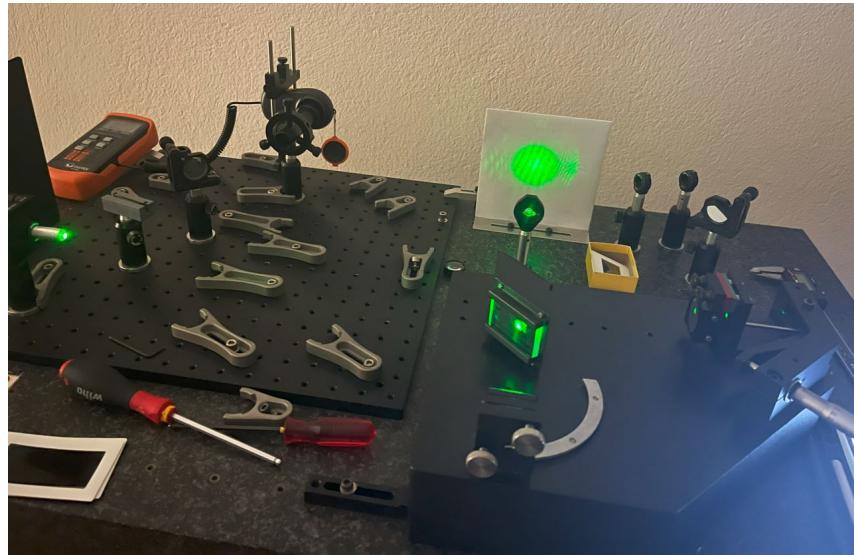
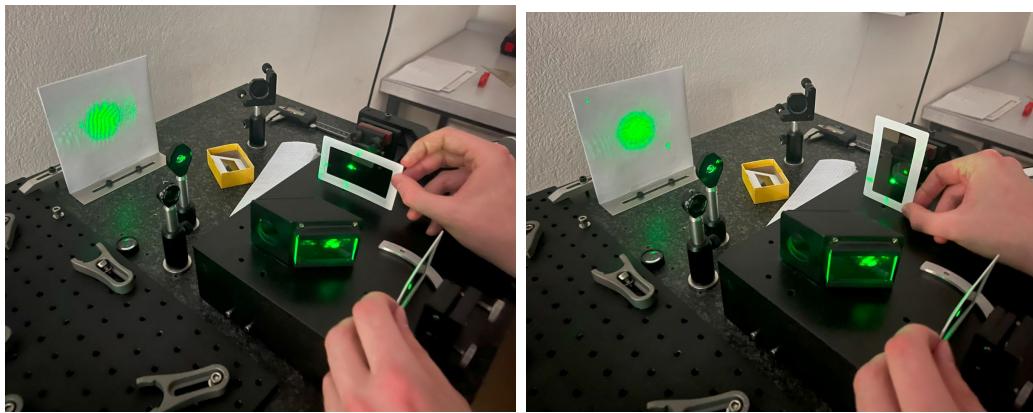


Abbildung 5.7: Sichtbares Interferenzmuster mit der Linse nach dem Beamsplitter

Es wird klar ersichtlich, dass sich ein streifenförmiges Interferenzmuster bildet. Dieses lässt sich durch konstruktive und destruktive Interferenz des Laserstrahls erklären.

Nun werden 2 Polarisationsfolien in die beiden Lichtarme gegeben, wie in Abbildung 5.8 ersichtlich.



(a) Parallele Ausrichtung der Polarisationsfilter (b) Normale Ausrichtung der Polarisationsfilter

Abbildung 5.8: Sichtbares Interferenzmuster mit der Linse nach dem Beamsplitter und Verwendung von Polarisationsfiltern

Die Krümmung der Interferenzstreifen in Abbildung 5.8a lässt sich dadurch erklären, dass die Polarisationsfolien nicht perfekt gerade in den Lichtarm eingebracht werden. Sind die Polarisationsfolien normal zueinander ausgerichtet, wie in Abbildung 5.8b ist kein Interferenzmuster sichtbar, weil die beiden Lichtstrahlen aufgrund ihrer Ausrichtung nicht miteinander Interferieren können.

6 Auswertung

Um zu sehen wie sich die Unsicherheit der Messungen bis in die Ergebnisse fort- pflanzt, ist erweiterte Gauss-Methode verwendet worden. Die Grundlagen dieser Methode stammen von den Powerpointfolien von GUM [[wolfgangkesselISOBIPMGUMSicht2004](#)]. Für die Auswertung ist die Programmiersprache Python im speziellen die Pakete `labtool-ex2`, `pandas`, `sympy`, `lmfit` zur Hilfe genommen worden. `lmfit` wurde für das Fitten verwendet, `sympy` wurde für symbolische Manipulation verwendet und die restlichen Pakete für leichteres Handhaben der Daten. Dies wurde aber alles durch `labtool-ex2` abstrahiert.

Um höchstmögliche Genauigkeit zu garantieren wird erst bei der Darstellung der Wert in Tabellen gerundet.

6.1 Young'scher Doppelspalt, Beugungsgitter

Um die Wellenlängen des LASERs bestimmen zu können wurden die Distanz Δx zwischen den zwei Maximal auseinanderliegende Intensitätmaxima und die Anzahl der Maxima N zwischen diesen minus dem Nullten bestimmt werden. Dabei wurden nur die durch den Einzelspalt verursachten Maxima gezählt und aus den Bildern herausgemessen. Da nun nach Gleichung 1 für große Distanzen die Intensitätsmaxima äquidistant von einander entfernt sind, muss die Distanz Δx noch durch die Anzahl der Maxima N dividiert werden um den effektiven Abstand zwischen zwei Maxima zu finden. Dann kann durch Umformen der Gleichung 1 auf die Wellenlänge λ geschlossen werden:

Tabelle 6.1: Diese Tabelle beinhaltet aus den Bildaufnahmen der Intensitätsverteilung aufgenommen Werte unter Verwendung verschiedener Doppelspalte. Dabei gilt:

Δx ... Distanz zwischen den Zwei am weitesten entfernten ablesbaren Maxima
 N ... Anzahl der Maxima vom Linkesten bis zum Rechtesten, wobei nur die Maxima der Einzelnensplaltinterferenz gezählt werden
 d ... Spaltabstand
 λ ... Errechnete Wellenlänge

Δx / mm	N / 1	d / mm	λ / m
162 ± 10	12,0	0,1	$(5,4 \pm 0,4) \cdot 10^{-7}$
149 ± 10	12,0	0,1	$(4,9 \pm 0,4) \cdot 10^{-7}$
161 ± 10	12,0	0,1	$(5,3 \pm 0,4) \cdot 10^{-7}$
152 ± 10	24,0	0,2	$(5,1 \pm 0,4) \cdot 10^{-7}$

Diese Wellenlängen ergeben gemittelt:

$$\lambda = (518 \pm 17) \text{ nm}$$

Nun werden die Interferenzmuster Bezuglich der Intensität mit den theoretischen Verläufen verglichen. Dazu wird mittels den ersten Paar periodischen Dunkelpeaks der Maßstab bestimmt, welcher für das ganze Interval extrapoliert werden kann. Damit können den Pixelwerten nun Distanzen zugeordnet werden. Für diese Distanzen werden nun auch die theoretischen Interferenzmusterverläufe aus Gleichung 2, Gleichung 3 und deren Superposition ausgewertet, was in Abbildung 6.1 sichtbar ist.

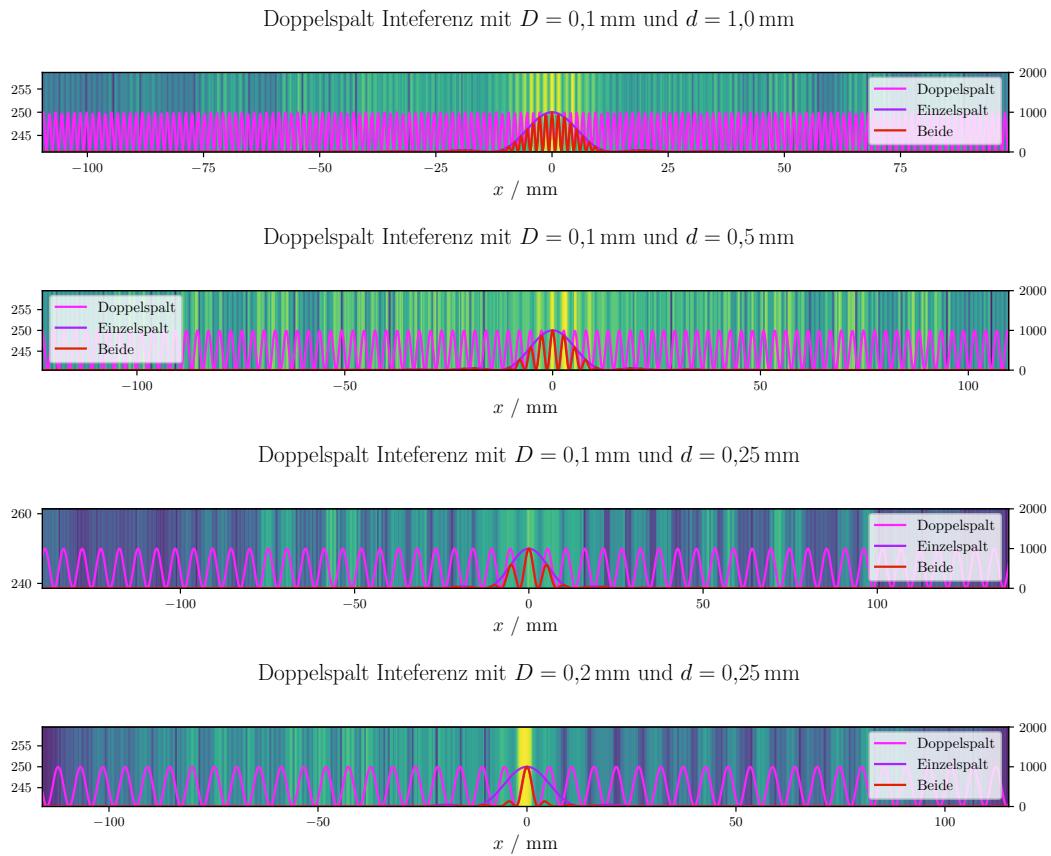


Abbildung 6.1: In dieser Graphik sind die theoretischen und gemessenen Verläufe der Intensitäten bei verschiedenen Doppelspalte qualitativ dargestellt. Im Hintergrund sind die gemessenen Helligkeitsdaten sichtbar, im Vordergrund die theoretischen Verläufe. Dabei bezeichnet D die Spaltdicke und d den Spaltabstand zwischen den beiden Einzelspalten.

Analog zu der Beugung am Doppelspalt wurde die maximale Distanz zwischen zwei Maxima auf dem Millimeterpapier genommen und die Anzahl der Maxima dazwischen gezählt. Mit dieser Information und dem Gitterbeugungsgesetz von Bragg lässt sich die Gitterkonstante des Gitters bestimmen. Hier wurde die oben errechnete Wellenlänge für den LASER verwendet, um die Gitterkonstante zu bestimmen. Die Gitterkonstante g ergibt sich folgendes:

1. $N = 24$
2. $\Delta x = (0,2720 \pm 0,0010) \text{ m}$
3. $g = (115 \pm 6) \mu\text{m}$

6.2 Polarisation

Die erhaltenen Werte aus Tabelle 5.2 werden nun in einem Scatterplot dargestellt, dabei wurde als Vergleich der theoretische Verlauf des Malus-Gesetzes als durchgängige Linie eingezeichnet. Für die eingehende Beleuchtungsstärke ist die Hälfte der Beleuchtungsstärke ohne Polarisatoren genommen worden, welche zu (1200 ± 200) lx gemessen wurde.

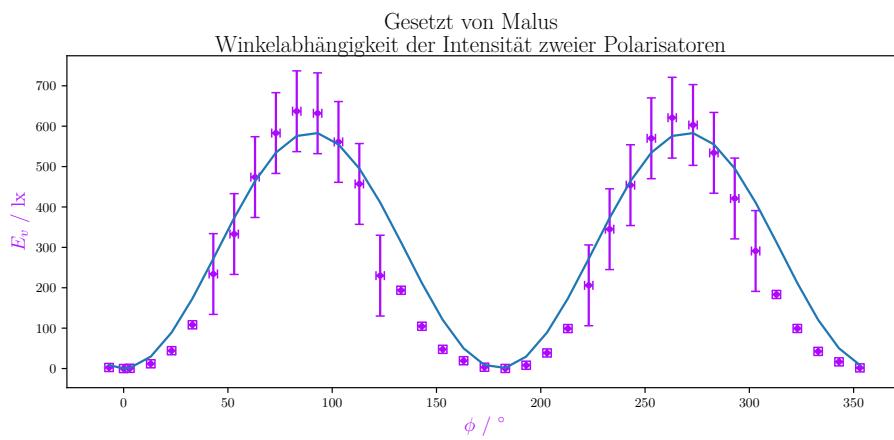


Abbildung 6.2: In dieser Graphik ist der theoretische Verlauf vom Malus-Gesetz dem vom Experiment erhaltenen gegenübergestellt worden. Dabei ist E_v die Beleuchtungsstärke am Sensor nach den Polarisatoren und ϕ der Winkel zwischen den Polarisatoren. Für den theoretischen Verlauf ist die eingehende Beleuchtung als $E_{v_0} = (600 \pm 100)$ lx (durch eine Messung bestimmt) angenommen worden.

6.3 Michelson Interferometer

Zunächst wurden für die Distanzen s und deren Ordnungszahl N die Differenzen zwischen den Einträgen und ihren nächsten Nachbarn gebildet. Durch Division von Δs durch ΔN und dem Mitteln der Resultate lässt sich die Wellenlänge λ gleich wie in Unterabschnitt 6.1 mittels Gleichung 1 bestimmen.

Somit ergibt sich für die Wellenlänge:

$$\lambda = (580 \pm 30) \text{ nm}$$

7 Diskussion

7.1 Young'scher Doppelspalt, Beugungsgitter

Um die Distanzmessung zwischen den Beugungsmaxima möglichst genau durchführen zu können, wurde Millimeterpapier am Schirm verwendet. Beziiglich der Auswertung der Fotos sei angemerkt, dass sich durch die Abbildung mithilfe der Kamera eine gewisse Verzerrung des Bildes nicht vermeiden lässt, was sich auf die erzielte Unsicherheit auswirkt und durch ein entsprechendes Sensorsystem verbessert werden könnte. Diese Verzerrung verursacht auch die Diskrepanz zwischen den theoretischen Verlauf und dem Gemessen, dies verursacht nun eine Verschiebung der Frequenz und der Offsets.

Ein Verbesserungsvorschlag für eine automatische Auswertung wäre die Verwendung eines Photodetektorarrays. Dadurch würde automatisch der Maßstab der Distanzen zu den Pixeln ohne Verzehrung dargestellt werden. Ist dies jedoch nicht möglich wird Empfohlen die Intensitätsverteilung nicht am Millimeterpapier sonder über dem Grid am weißen Bereich auszulesen. Dadurch beeinflusst die schwarze Farbe der Millimeterskalen die Absorptionscharakteristik nicht, welche hier jedoch in den Daten zu sehen waren und zum Erstellen des "Pixel-Distanz" Maßstabs verwendet wurden.

7.2 Polarisation

Die beiden Polarisationsfilter werden auch außerhalb des Versuchsaufbaus vor einer Lichtquelle gehalten und zueinander verdreht. Dadurch wird festgestellt, dass die 0-Position an beiden Polaristatoren beinahe dazu führt, dass kein Licht durchgelangt. Dies deckt sich auch mit dem erzeugten Intensitätsverlauf in Abbildung 6.2.

Generell decken sich die erhaltenen Ergebnisse mit dem Gesetz von Malus. Auch die Ergebnisse bei der Verwendung von 3 Polarisationsfolien entsprechen jenen, die durch die Theorie vorausgesagt wurden. Nämlich, dass durch das Hinzufügen eines Dritten Polarisators die Intensität, bei einer Verdrehung der zwei anderen Polarisatoren von 90° , ungleich null ist, wenn dieser nicht in eine der zwei Polarisationsebenen gedreht ist.

Um eine ideale Messung zu garantieren wäre es angebracht, den gesamten Raum abzudunkeln, um eventuelles Hintergrundlicht bestmöglich zu reduzieren. Da im gleichen Raum ein weiterer Versuch von einer Anderen Gruppe durchgeführt wurde, konnte dies nicht vollständig realisiert werden.

Die Abweichungen können durch die elliptischen Eigenschaft der Laserquelle beschrieben werden. Durch

Ein Verbesserungsvorschlag wäre, noch eine Übersetzung für den Winkel hinzuzufügen. Hier würde sich im Speziellen ein Schneckengetriebe anbieten, wo auch ein Durchlauf Servomotor montiert werden kann um den genauen Winkel ansteuern zu können. Weiters kann eine unpolarisierte Lichtquelle verwendet werden, damit keine Fehler beim Verdrehen entstehen können und die Voraussetzungen des Malus-Gesetzes gegeben sind.

7.3 Michelson Interferometer

Aufgrund der Geometrie des Aufbaus, entspricht ein Durchlauf eines Interferenzbildes der halben Wellenlänge des LASERs, wie bereits in Abschnitt 2 erklärt. Dies deckt sich auch mit dem beobachteten Resultaten, die erhaltene Wellenlänge stimmt mit dem LASER überein.

Die Beobachteten Effekte bezüglich Polarisation und Sensitivität auf Erschütterungen decken sich mit der erwarteten Theorie. Insgesamt sei daher nochmals erwähnt, dass das Interferometer sehr sensitiv auf eventuelle Erschütterungen reagiert, was einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Messergebnisse hat. Ein Verbesserungsvorschlag hierzu wäre, den Versuch im Keller des Gebäudes durchzuführen und nicht im Dachgeschoss.

8 Zusammenfassung

Hier werden nochmals alle Ergebnisse dieser Experimentenfolge aufgelistet. Wobei die meisten zu erstellenden Diagramme Aufgrund der Länge der Abschnitt 6 entnommen werden sollen.

8.1 Young'scher Doppelspalt, Beugungsgitter

Hier werden die durch den Doppelspalt ermittelte Wellenlänge des LASERs λ und die Gitterkonstante g des Gitters angeführt.

1. $\lambda = (518 \pm 17) \text{ nm}$
2. $g = (115 \pm 6) \mu\text{m}$

8.2 Polarisation

Für die Verifizierung des MalusGesetz sei auf den erzeugten Verlauf in Abbildung 6.2 hingewiesen.

8.3 Michelson Interferometer

Hier wird die durch das Michelson-Interferometer ermittelte Wellenlänge des LASERs λ angeführt.

1. $\lambda = (580 \pm 30) \text{ nm}$

Abbildungsverzeichnis

2.1	Skizze des Aufbaus des Michelson Interferometres	6
2.2	Skizze des Lichtwegs durch die Linse	7
3.1	Versuchsaufbau für den Young'schen Doppelspalt und das Beugungsgitter	9
3.2	Versuchsaufbau für die Polarisation	10
3.3	Versuchsaufbau für das Interferometer	12
5.1	Erzeugtes Beugungsbild für Spalt 1 mit einer Spaltbreite von 0,1 mm und einem Spaltabstand von 1 mm	15
5.2	Erzeugtes Beugungsbild für Spalt 2 mit einer Spaltbreite von 0,1 mm und einem Spaltabstand von 0,5 mm	15
5.3	Erzeugtes Beugungsbild für Spalt 3 mit einer Spaltbreite von 0,1 mm und einem Spaltabstand von 0,25 mm	15
5.4	Erzeugtes Beugungsbild für Spalt 4 mit einer Spaltbreite von 0,2 mm und einem Spaltabstand von 0,25 mm	15
5.5	Erzeugtes Beugungsbild für das Beugungsgitter	16
5.6	Sichtbares Interferenzmuster durch die Lochblende	19
5.7	Sichtbares Interferenzmuster mit der Linse nach dem Beamsplitter	21
5.8	Sichtbares Interferenzmuster mit der Linse nach dem Beamsplitter und mit Verwendung von Polarisationsfiltern	22
6.1	In dieser Graphik sind die theoretischen und gemessenen Verläufe der Intensitäten bei verschiedenen Doppelspalte qualitativ dargestellt. Im Hintergrund sind die gemessenen Helligkeitsdaten sichtbar, im Vordergrund die theoretischen Verläufe. Dabei bezeichnet D die Spaltdicke und d den Spaltabstand zwischen den beiden Einzelspalten.	24
6.2	In dieser Graphik ist der theoretische Verlauf vom Malus-Gesetz dem vom Experiment erhaltenen gegenübergestellt worden. Dabei ist E_v die Beleuchtungsstärke am Sensor nach den Polarisatoren und ϕ der Winkel zwischen den Polarisatoren. Für den theoretischen Verlauf ist die eingehende Beleuchtung als $E_{v_0} = (600 \pm 100)$ lx (durch eine Messung bestimmt) angenommen worden.	25

Tabellenverzeichnis

4.1	Verwendete Geräte	13
5.1	Maße der Doppelspalte	14
5.2	Diese Tabelle beinhaltet die gemessenen Beleuchtungsstärke E_v bei verschiedenen Winkel ϕ zwischen den Polarisatoren. Als Lichtquelle dient dabei einem LASER.	17

5.3	Diese Tabelle beinhaltet Werte vom Michelson-Interferometer bei unterschiedlichen optischen Armlängen. Beim Varieren der Armlänge sind die Abstände s auf dem Mikrometerschraube abgelesen worden und die dabei durchschrittenen Maxima N gezählt worden.	20
6.1	Diese Tabelle beinhaltet aus den Bildaufnahmen der Intensitätsverteilung aufgenommen Werte unter Verwendung verschiedener Doppelspalte. Dabei gilt: Δx . . . Distanz zwischen den Zwei am weitesten entfernten ablesbaren Maxima N . . . Anzahl der Maxima vom Linkesten bis zum Rechtesten, wobei nur die Maxima der Einzelnensplattinterferenz gezählt werden d . . . Spaltabstand λ . . . Errechnete Wellenlänge	23