



KARL-FRANZENS-UNIVERSITÄT GRAZ
INSTITUT FÜR PHYSIK

23S PHY.L02UB FORTGESCHRITTENPRAKTIKUM 2
678 Bachelorstudium Physik, UG2002/2021W

II. Interferometrie

Wachmann Elias Zach Andreas
12004232 12004790
Gruppe 12

Betreut von
Thomas Georg BONÉ, BSc MSc

10.03.2023

Inhaltsverzeichnis

1 Aufgabenstellung	3
2 Grundlagen	3
2.1 Young'scher Doppelspalt	3
2.2 Shearing-Interferometer / Wellenfront-Analyse	4
2.3 Polarisation	5
2.4 Michelson-Interferometer	6
3 Geräteliste	8
4 Versuchsaufbau	9
4.1 Young'scher Doppelspalt	9
4.2 Shearing-Interferometer	10
4.3 Polarisation	11
4.4 Michelson-Interferometer	11
5 Versuchsdurchführung	12
5.1 Young'scher Doppelspalt	12
5.2 Shearing Interferometer	13
5.3 Polarisation	15
5.4 Michelson Interferometer	15
6 Auswertung	15
7 Diskussion	15
8 Zusammenfassung	15

1 Aufgabenstellung [1]

Der folgende Laborversuch besteht aus vier separaten Teilversuchen, welche sich abermals wie folgt in Unterversuche gliedern:

- **Young'scher Doppelspalt**
 - Bestimmen des Beugungsmusters von vier Doppelspalten mit unterschiedlichen Spaltbreiten und Spaltabständen
 - Berechnung der Wellenlänge des Lasers
 - Erklärung der Beugungsmuster durch Vergleich mit errechneten Mustern
 - Bestimmung der Beugungsmuster eines Liniengitters und Vergleich mit errechneten Werten
 - Bestimmung der Gitterkonstante
- **Wellenfront-Analyse / Shearing Interferometer**
- **Polarisation**
 - Verifizieren des Gesetzes von Malus
 - Untersuchen des Einflusses des Durchlasswinkels eines weiteren Polarisators zwischen zwei gekreuzten Polarisatoren
- **Michelson Interferometer**
 - Justieren und generieren von konzentrischen Interferenzmustern
 - Bestimmung der Wellenlänge des Lasers durch Weglängenänderung
 - Untersuchung des absoluten Weglängenunterschieds in den beiden Interferometerarmen sowie Auflösung und Stabilität des Interferometers
 - Untersuchung der Rolle der Polarisation auf die Interfenzfähigkeit des Laserlichts

2 Grundlagen [1]

2.1 Young'scher Doppelspalt

Bescheint man mit einer Lichtquelle zwei eng beieinanderliegende Spalte mit dem Abstand d und projiziert das Bild auf einen ansonsten undurchsichtigen Schirm, so wirkt der Spalt als kohärente Lichtquelle (Anmerkung: Dies ist evident für eine kohärente Lichtquelle, gilt für eine thermische Lichtquelle aber nur unter bestimmten Bedingungen, jenen der räumlichen Kohärenz). Die Wellen aus den Spalten überlagern sich in Abhängigkeit vom Beobachtungswinkel konstruktiv oder destruktiv, was auf einen Schirm projiziert eine Abfolge an Intensitätsmaxima und -minima ergibt. Unter der Bedingung, dass der Abstand

zwischen Doppelspalt und Beobachtungsebene viel größer als der Spaltabstand d ist, ergibt sich der optische Gangunterschied in die durch den Winkel ϕ definierte Richtung als

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

mit λ der Wellenlänge. Mit der Näherung $\sin(\phi) \approx x/z$ (erfüllt für große Abstände z zwischen Doppelspalt und Schirm) ergibt sich ein Streifenmuster mit der Periode x der Form

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

Dafür wurde die endliche Breite des Spalts vernachlässigt bzw. ein unendlich schmaler Spalt angenommen. Tatsächlich überlagert sich dem Interferenzmuster das Beugungsmuster des Einzelspalts, das i.A. symmetrisch mit zu größeren Winkeln hin abnehmender Intensität ist. Ein einzelner rechteckiger Spalt der Breite D führt zu einem Beugungsmuster der Form

$$I_{\text{Beugung}}(x) = I_0 \cdot \frac{\sin^2\left(\frac{\pi D x}{\lambda z}\right)}{\left(\frac{\pi D x}{\lambda z}\right)^2} \quad (3)$$

Das Beugungsmuster des Doppelpalts ergibt sich multiplikativ als

$$I(x) = I_{\text{Interferenz}}(x) \cdot I_{\text{Beugung}}(x).$$

2.2 Shearing-Interferometer / Wellenfront-Analyse

Das Erscheinungsbild von optischen Interferenzmustern ist sowohl durch die Natur der Lichtwelle als auch der optischen Grenzflächen bestimmt, man denke an die farbigen Interferenzen auf Seifenblasen. Entsprechend ist es möglich, aus der Beobachtung von Interferenzen an Grenzflächen bekannter Geometrie auf die Eigenschaften der Lichtwelle zu schließen. Beim Shearing-Interferometer handelt es sich um ein simples Interferometer, mit dem bestimmt werden kann, ob ein Lichtstrahl kollimiert, konvergent oder divergent ist. Dazu trifft das Licht unter 45° auf eine Glasplatte (in Seitenansicht, siehe Abbildung 2.1a), welche keilförmig ausgeführt ist. Durch die Reflexion an der vorderen und hinteren Fläche der Glasplatte entstehen zwei reflektierte Strahlen (Abbildung 2.1a), in deren Überlappungsbereich Interferenz auftritt (Abbildung 2.1b). Durch die keilförmige Geometrie führt dies für einen kollimierten Strahl zu einem zur Einfallsebene des Lichts parallelen Streifenmuster (Abbildung 2.1b). Ein konvergierender bzw. divergierender Strahl führt dagegen nach Abbildung 2.1b zu einem gedrehten Streifenmuster. Aus dem lateralen Versatz der beiden reflektierten Strahlen l , dem Streifenabstand s und dem (auf die Senkrechte bezogenen) Winkel der Interferenzstreifen Θ (siehe Abbildung 2.1b) lässt sich der Radius r der Wellenfront mit

$$r = \frac{l s}{\lambda \cdot \sin(\Theta)}$$

berechnen.

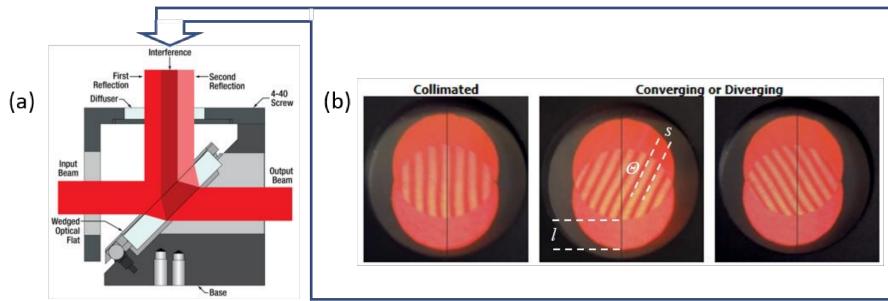


Abbildung 2.1: Shearing-Interferometer. (a) Schematischer Aufbau in Seitenansicht, (b) beobachtete Interferenzmuster (in Aufsicht) für kollimierte, konvergierende und divergierende Wellenfronten, im mittleren Bild sind die im Text besprochenen Bestimmungsgrößen eingezeichnet. © Thorlabs, Quelle: [1]

2.3 Polarisation

Für den Fall linearer Polarisation gilt für die transmittierte Intensität durch einen Polarisator mit der Durchlassrichtung entlang der durch den Winkel Null definierten Richtung das Gesetz von Malus.

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

Die nicht transmittierte Intensität wird je nach Art des Polarisators absorbiert oder reflektiert. Die Polarisation ist entscheidend für die Interferenzfähigkeit von Licht, es gelten die vier Gesetze nach Fresnel und Arago.

- In dieselbe Richtung linear polarisierte Lichtstrahlen interferieren (wie nicht polarisiertes Licht).
- Zueinander senkrecht linear polarisierte Lichtstrahlen interferieren nicht (mit den nachfolgend aufgelisteten zwei Einschränkungen).
- Zueinander senkrecht linear polarisierte Lichtstrahlen interferieren, wenn sie ursprünglich dieselbe Polarisationsebene besaßen und wieder in diese zurückgeführt werden.
- Zueinander senkrecht linear polarisierte Lichtstrahlen interferieren nicht, wenn sie in dieselbe Polarisationsebene zurückgeführt werden, diese aber nicht ursprünglich besaßen.

2.4 Michelson-Interferometer

Der prinzipielle Strahlengang eines Michelson-Interferometers ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Ein Lichtstrahl aus einer (Laser-)Quelle (1) wird an einem Strahlteiler (2) aufgeteilt. Der Strahlteiler ist ein dünnes Glasplättchen mit einer teilreflektierenden Schicht auf einer Fläche. Die beiden resultierenden Lichtstrahlen werden an zwei Spiegeln reflektiert und am Strahlteiler wieder vereint. Die Lichtstrahlen im Detektorarm treffen auf den Schirm (4), wo sie sich in Abhängigkeit vom Unterschied der Weglängen s_1 und s_2 überlagern. Für ebene Wellen der Form

$$E(x,t) = E_0 e^{\omega t - kx} \quad (5)$$

ist die Lichtintensität am Beobachtungsschirm gegeben durch

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

wobei $\Delta\varphi$ die Phasendifferenz bezeichnet, die mit dem Unterschied der Weglängen $\Delta s = |s_1 - s_2|$ nach $\Delta\varphi = (2\pi/\lambda)\Delta s$ zusammenhängt.

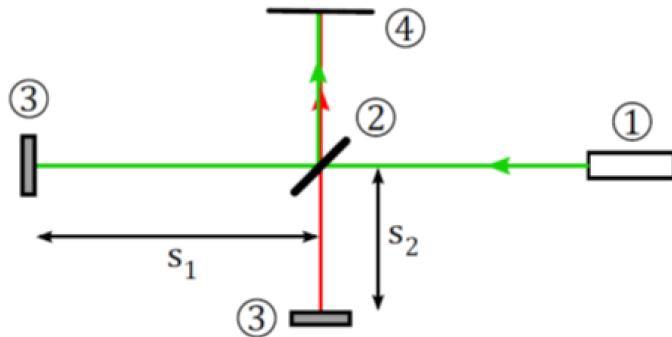


Abbildung 2.2: Michelson-Interferometer. Strahlengang im Michelson-Interferometer. Ein Laserstrahl aus der Quelle (1) wird am Strahlteiler (2) aufgeteilt, die beiden Teilstrahlen durchlaufen die beiden Interferometerarme der Länge s_1 und s_2 . Nach ihrer Reflexion an den Spiegeln (3,4) werden die Teilstrahlen am Strahlteiler wieder überlagert und interferieren am Beobachtungsschirm (4). © Thorlabs, Quelle: [1]

Es stellt sich die Frage, wo bei destruktiver Interferenz im Detektorarm die Energie der Lichtwellen bleibt. Tatsächlich hat das Interferometer ja zwei „Ausgänge“, wobei einer eben zum Beobachtungsschirm, der zweite zurück zum Laser führt. Tatsächlich beobachtet man in zweiterem konstruktive Interferenz, wenn am Schirm destruktive Interferenz (also keine Lichtintensität) zu beobachten ist.

Das am Schirm beobachtete Interferenzmuster reagiert empfindlich auf kleine Änderungen in der Richtung des einfallenden Laserstrahls und in der Ausrichtung der Spiegel. Gleichzeitig sind diese Änderungen durch den nur wenige mm durchmessenden Strahl schwer zu beobachten. Deshalb wird der Strahl durch eine Linse aufgeweitet, was zwischen Laser und Strahlteiler oder zwischen Strahlteiler und Schirm geschehen kann. Ersteres führt zu einem

konzentrischen Interferenzmuster, zweiteres zu parallelen Interferenzstreifen. Wie in Abbildung 2.3a skizziert, können divergierende Strahlen auf (bei Vorliegen eines Weglängenunterschieds Δs zwischen den beiden Interferometerarmen) auf zwei virtuelle Lichtquellen A und B zurückgeführt werden, wodurch sich das Auftreten eines konzentrischen Interferenzmusters erklärt. Gleichzeitig kann dieses genutzt werden, um die Interferometerarme auf die gleiche Länge einzustellen (im Prinzip auf einen Bruchteil der Wellenlänge), da sich dabei nach Abbildung 2.3b die Größe des zentralen Interferenzspots maximiert. Alternativ könnte dazu eine breitbandige Lichtquelle mit geringer Kohärenzlänge verwendet werden, wobei die Kohärenzlänge durch die Verwendung von Bandpassfiltern erhöht werden kann.

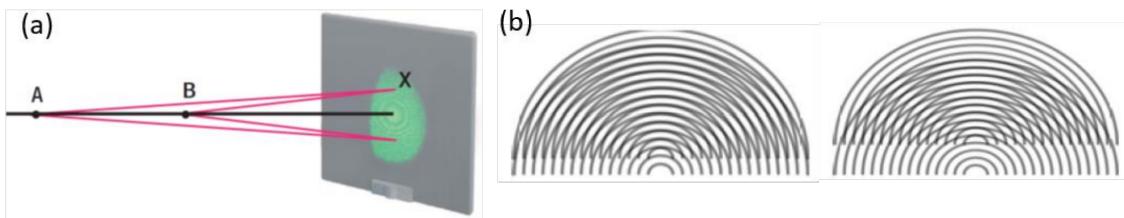


Abbildung 2.3: Zum kreisförmigen Interferenzmuster beim Michelson-Interferometer.
(a) Skizze zur Erklärung seiner Entstehung, (b) Skizze zur Erklärung der Größe des zentralen Maximums (oder Minimums). © Thorlabs, Quelle: [1]

3 Geräte liste

Für den praktischen Aufbau und die Messungen der geforderten Größen wurden die in Tabelle 3.1 aufgelisteten Geräte und Hilfsmittel verwendet.

Tabelle 3.1: Verwendete Geräte und wichtige Materialien

Gerät	Hersteller	Modell	Messbereich / Unsicherheit	Inventar-Nr.
Laser	Thorlabs	CPS532	$\lambda = 532$	22442-S01
diverse Spiegel	Thorlabs	KM100	-	-
Graufilter	Thorlabs	NX1N/M	-	-
Doppelspalte	Phywe	0852300	-	-
Gitter	Phywe	0852400	-	-
Optischer Tisch	-	-	-	-
diverse Halterungen	Thorlabs	-	-	-
Sammellinse	Thorlabs	FMP1/M	$f = 40 \text{ mm}$	-
Zerstreuungslinse	Thorlabs	FMP1/M	$f = -16 \text{ mm}$	-
Shearing-Interferometer	Thorlabs	nicht vorhanden	-	-
Lichtintensitätsmesser	Sauter	SO 200k	$\Delta I = (\pm 3\% \text{rdg} \pm 0,5\% \text{fs}) \cdot I$	51152203
Polarisationsfolie	Nitto denko	-	-	-
Maßband	Schuller Eh klar	Power Tape 3 m	Klasse II	-
Michelson Interferometer	-	-	-	-
Rohr	-	-	-	-
diverse Abbildungsschirme	Wand, Papier, Tür, etc.	-	-	-
Mobiltelefon	OnePlus	8-Pro	-	-

Die verwendeten Doppelspalte haben die Abmessungen wie in Tabelle 3.2 vermerkt.

Tabelle 3.2: Verwendete Doppelspalte mit der jeweiligen Nummer i , der Spaltbreite D in mm und dem Spaltabstand d in mm. Quelle: [1]

$i / 1$	D / mm	d / mm
1	0,2	0,25
2	0,1	0,25
3	0,1	0,50
4	0,1	1,00

Anmerkung zu den Unsicherheiten: Zur Unsicherheitsangabe werden die jeweiligen Unsicherheitsmaße der Geräte, welche aus den Datenblättern (sofern vorhanden) entnommen werden, verwendet. Für die analogen Messgeräte wird eine kombinierte Ablese- und Messunsicherheit von ± 1 Skalenstrich verwendet.

Alle Teilversuche wurden bei einer Umgebungstemperatur von $(24 \pm 1)^\circ\text{C}$ einem Luftdruck von $(1000 \pm 10) \text{ hPa}$ und einer relativen Luftfeuchtigkeit von $(33 \pm 1)\%$ durchgeführt.

4 Versuchsaufbau

4.1 Young'scher Doppelspalt

Für den Aufbau zum Versuch *Young'scher Doppelspalt* wird der Laser mittels zwei Spiegel auf das Plättchen mit den vier verschiedenen (siehe Tabelle 3.2) Doppelspalten gelenkt. Der Abstand vom Doppelspalt wird mit $(2520 \pm 5) \text{ mm}$ bestimmt – wobei hier noch zur vom Maßband gegebenen Unsicherheit von 1,1 mm eine weitere Unsicherheit durch das Messen in der Luft hinzukommt. Der Aufbau in Abbildung 4.1 zeigt den optischen Tisch, der Schirm ist rechts im oben angeführten Abstand an der Wand befestigt.



Abbildung 4.1: Aufbau Young'scher Doppelspalt

4.2 Shearing-Interferometer

Der Aufbau des Shearing-Interferometers ist in Abbildung 4.2 gegeben. Dabei wird der untere Spiegel aus dem vorhergehenden Versuch wiederverwendet und der Laserstrahl auf die Frontalebene gelenkt, welche um 45° zur Tischemebene geneigt ist.



Abbildung 4.2: Aufbau Shearing Interferometer. Quelle: [1]

Anmerkung zum Versuch: Da sich das Shearing Interferometer leider zum Zeitpunkt der Übung in Reparatur befand, wird der Versuch im folgenden hypothetisch abgehandelt.

4.3 Polarisation

Anstelle des Shearing Interferometers werden jetzt zwei Polarisationsfilter in den Pfad des Lasers eingebracht. Nach dem zweitem Filter trifft der Laser auf einen Lichtintensitätsmesser, welcher wie in Abbildung 4.3 ersichtlich, durch ein Rohr von sonstigen Lichteinflüssen abgeschirmt wird.



Abbildung 4.3: Aufbau Polarisation

4.4 Michelson-Interferometer

Nun wird auch der letzte verbleibende Spiegel aus dem Strahlengang des Lasers gegeben und der Laserstrahl trifft so direkt auf das in Abbildung 4.4 rechts gezeigte Michelson-Interferometer. Wie gut in der Abbildung ersichtlich ist, wird der Strahl im Michelson-Interferometer in die beiden Arme aufgeteilt. Nach letztlicher Zusammenführung der beiden Strahlen trifft der resultierende Strahl auf den Schirm. Zur Untersuchung verschiedener Effekte wird je eine Sammel- bzw. Zerstreuungslinse in den Strahlengang zwischen Laser und Michelson-Interferometer eingebracht.



Abbildung 4.4: Aufbau Michelson-Interferometer

5 Versuchsdurchführung

Vor jedem Teilversuch wird nochmals überprüft, ob sich der gewünschte optische Weg ergibt und der Laser nicht unkontrolliert oder ungewollt in nicht beabsichtigte Richtungen abgelenkt wird. Weiters wird stets darauf geachtet, dass man nicht mit reflektierenden Gegenständen (z.B. Ring, Schraubenzieher) im Strahlengang hantiert.

5.1 Young'scher Doppelspalt

Der Versuch wird gemäß der Beschreibung in Unterabschnitt 4.1 aufgebaut und die in Tabelle 3.2 angeführten Doppelspalte werden der Reihe nach vom Laser durchstrahlt. Der $l_{\text{Schirm}} = (2520 \pm 5) \text{ mm}$ entfernte Schirm – ein karriertes A4-Blatt an der Wand – wird nun vom sich ergebenden Interferenzmuster beleuchtet.

Es ergeben sich für die vier Doppelspalte folgende Interferenzbilder in den Abbildungen 5.1 bis 5.3.

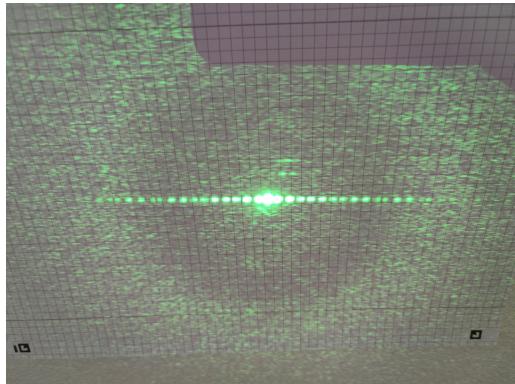


Abbildung 5.1: Interferenzmuster des Doppelspalts $i = 1$

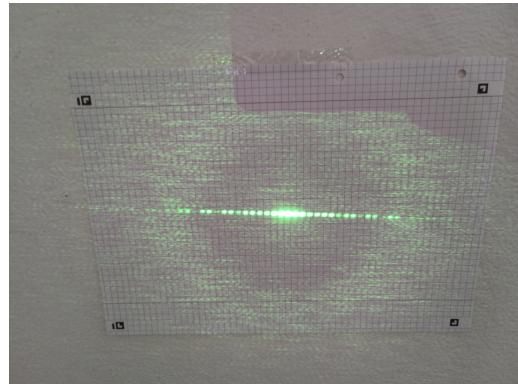


Abbildung 5.3: Interferenzmuster des Doppelspalts $i = 2$

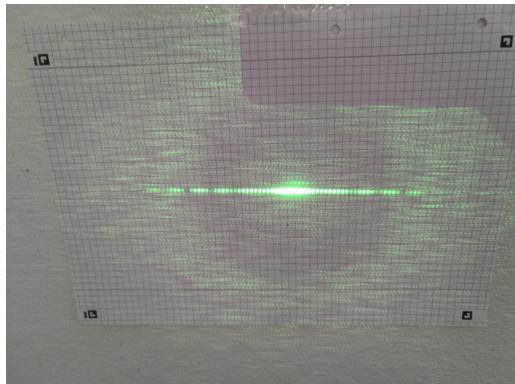


Abbildung 5.2: Interferenzmuster des Doppelspalts $i = 3$

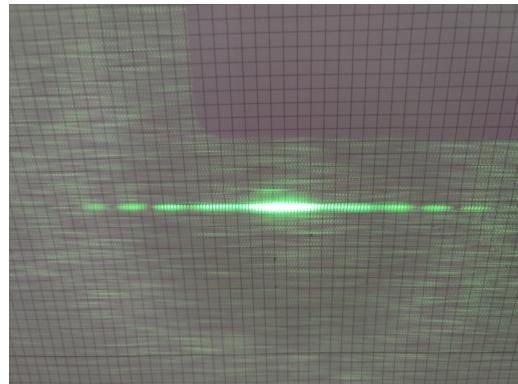


Abbildung 5.4: Interferenzmuster des Doppelspalts $i = 4$

Neben der fotografischen Dokumentation werden auch die Abstände der Maxima mittels Lineal vermessen. Die Messungen ergeben die in Tabelle 5.1 angeführten Werte.

Die eben beschriebene Messung wird nun in analoger Weise nochmals mit dem Gitter durchgeführt. Die Messungen ergeben die in Tabelle 5.2 angeführten Werte. Dabei bleibt der Abstand zum Schirm $l_{\text{Schirm}} = (2520 \pm 5) \text{ mm}$ konstant.

5.2 Shearing Interferometer

Der Aufbau erfolgt gemäß Unterabschnitt 4.2 und die der Laser wird mittels Spiegel wie beschrieben auf das Interferometer gelenkt.

Aus dem am Shearing Interferometer entstandenen Interferenzmuster wird werden nun die drei Größen: l Versatz in laterale Richtung, Θ Winkelversatz zur einfallenden Ebene und der Streifenabstand d bestimmt. Die Messungen ergeben sich zu:

- $l = (8,0 \pm 0,5) \text{ mm}$

Tabelle 5.1: Messwerte der Doppelspalten. Unsicherheit der Messung: $\Delta l_i = 0,5 \text{ mm}$

i	l_1 / mm	l_2 / mm	l_3 / mm	l_4 / mm
0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	5,0	5,0	2,5	1,5
2	11,0	11,0	8,0	2,5
3	16,0	16,0	10,5	4,0
4	21,0	22,0	13,0	5,5
5	27,0	27,0	16,0	6,5
6	33,0	32,0	18,5	8,0
7	38,0	38,0	21,0	9,5
8	43,0	43,0	24,0	10,5
9	49,0	48,0	26,5	12,0
10	55,0	54,0	29,0	13,5
11	58,0	-	-	15,0

Tabelle 5.2: Messwerte des Gitters. Unsicherheit der Messung: $\Delta l_i = 0,5 \text{ mm}$

$i / 1$	l_1 / mm
0	0,0
1	11,0
2	21,5
3	32,5
4	43,0
5	53,5
6	64,5
7	75,0
8	86,0
9	97,0
10	108,0
11	118,0
12	128,0
13	139,0
14	151,0

- $\Theta = (-19 \pm 3)^\circ$
- $d = (4,0 \pm 0,5) \text{ mm}$

Nachdem der Versuchsaufbau ordnungsgemäß hergestellt ist, wird der Laser eingeschaltet. Am optischen Ausgang am oberen Ende des Shearing-Interferometers erscheint dadurch ein streifenförmiges Interferenzmuster. Aus diesem Interferenzmuster werden der laterale Versatz l , der Abstand der Interferenzstreifen s und Winkel der Interferenzstreifen θ vermessen. Vermessen wurde direkt am optischen Ausgang mit einem handelsüblichen durchsichtigen Geodreieck. Für die Längenmessung wird eine Ableseunsicherheit von 1 mm angenommen, die Winkelmessung wird mit einer Ungenauigkeit von 3° abgeschätzt. Aufgrund der hohen Messungenauigkeit dieser Methodik wird die Messung zwei weitere Male wiederholt, um so zumindest eine geringfügige statistische Aussage treffen zu können. Die Messergebnisse werden notiert und tabelliert.

5.3 Polarisation

Der Strahl wird für den ersten Unterpunkt dieses Versuchs durch zwei Polarisationsfilter geführt. Für den ersten der beiden Filter wurde 70° als Ausgangswinkel gewählt, der zweite wird im folgenden Versuch einmal um 360° gedreht, wobei die Ausgangsstellung hier so gewählt wird, dass zuerst die höchste Lichtintensität am Messgerät abgelesen werden kann. So stehen die Polarisationsfilter gleich; Dies ist bei 330° des zweiten Filters der Fall. Die Messung wurde zweimal durchgeführt und die gemessenen Werte des Lichtintensitätsmessers sind in ?? angeführt.

5.4 Michelson Interferometer

6 Auswertung

7 Diskussion

8 Zusammenfassung

Literaturverzeichnis

- [1] J. Krenn. „Interferenz und Polarisation“. In: 2022.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Shearing-Interferometer	5
2.2	Michelson-Interferometer	6
2.3	Interferenzmuster Michelson-Interferometer	7
4.1	Aufbau Young'scher Doppelspalt	10
4.2	Aufbau Shearing Interferometer	10
4.3	Aufbau Polarisation	11
4.4	Aufbau Michelson-Interferometer	12
5.1	Interferenzmuster des Doppelspalts $i = 1$	13
5.2	Interferenzmuster des Doppelspalts $i = 3$	13
5.3	Interferenzmuster des Doppelspalts $i = 2$	13
5.4	Interferenzmuster des Doppelspalts $i = 4$	13

Tabellenverzeichnis

3.1	Geräteliste	8
3.2	Doppelspaltmaße	9
5.1	Messwerte Doppelspalten	14
5.2	Messwerte Gitter	14