



KARL-FRANZENS-UNIVERSITÄT GRAZ  
INSTITUT FÜR PHYSIK

22S PHY.L02UB FORTGESCHRITTENPRAKTIKUM 2 LU  
678 Bachelorstudium Physik, UG2002/2021W

## II. Interferometrie

Michael Bitzan      Fabian Michael Dixer  
12014662            12005188  
Gruppe 19

Betreut von  
Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Peter BANZER

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Aufgabenstellung</b>	<b>2</b>
<b>2 Voraussetzungen und Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1 Beugung, Interferenz und Kohärenz . . . . .	3
2.2 Interferometrie . . . . .	3
2.2.1 Shearing Interferometer . . . . .	3
2.2.2 Michelson-Interferometer . . . . .	4
2.3 Polarisation . . . . .	5
<b>3 Beschreibung der Versuchsanordnung</b>	<b>6</b>
3.1 Versuchsaufbau - Young'scher Doppelspalt . . . . .	6
3.2 Versuchsaufbau - Shearing Interferometer . . . . .	7
3.3 Versuchsaufbau - Polarisation . . . . .	7
3.4 Versuchsaufbau - Michelson Interferometer . . . . .	8
<b>4 Geräteliste</b>	<b>9</b>
<b>5 Versuchsdurchführung und Messergebnisse</b>	<b>9</b>
5.1 Versuchsdurchführung - Doppelspalt . . . . .	9
5.2 Versuchsdurchführung - Gitter . . . . .	10
5.3 Versuchsdurchführung - Shearing Interferometer . . . . .	11
5.4 Versuchsdurchführung - Polarisation . . . . .	11
5.5 Versuchsdurchführung - Michelson Interferometer . . . . .	12
<b>6 Auswertung</b>	<b>16</b>
6.1 Auswertung - Young'scher Doppelspalt & Gitter . . . . .	16
6.2 Auswertung - Shearing Interferometer . . . . .	22
6.3 Auswertung - Polarisation . . . . .	22
6.4 Auswertung - Michelson Interferometer . . . . .	22
<b>7 Diskussion</b>	<b>23</b>
7.1 Diskussion - Young'scher Doppelspalt & Gitter . . . . .	23
7.2 Diskussion - Shearing Interferometer . . . . .	23
7.3 Diskussion - Polarisation . . . . .	24
7.4 Diskussion - Michelson Interferometer . . . . .	24
<b>8 Zusammenfassung</b>	<b>25</b>
<b>9 Literaturverzeichnis</b>	<b>26</b>
<b>10 Anhang</b>	<b>26</b>
10.1 Python-Code . . . . .	26

## 1 Aufgabenstellung

### 1. Young'scher Doppelspalt

- Bestimmung der Beugungsmuster von vier verschiedenen Doppelspalten unterschiedlicher Spaltabstände  $d$ .
- Bestimmen des Beugungsmusters eines Gitters und berechnen der Gitterkonstante  $g$ .
- Vergleich zwischen experimentell und theoretischer Berechnung des Beugungsmusters.

### 2. Shearing Interferometer

- Untersuchen der Wellenfront  $r$  des verwendeten Lasers.

### 3. Polarisation

- Verifizierung des Gesetzes von Malus.
- Bestimmen der Lichtintensität  $I$  nach zwei unterschiedlich zueinander verschobenen Polarisatoren.

### 4. Michelson Interferometer

- Bestimmung der Wellenlänge des Lasers mit konzentrischen  $\lambda_{\odot}$  und parallelen  $\lambda_{||}$  Interferenzmuster.
- Untersuchen der Empfindlichkeit, Auflösung und Auswirkung von Polarisation.

## 2 Vorraussetzungen und Grundlagen

### 2.1 Beugung, Interferenz und Kohärenz

Trifft eine elektromagnetische Welle wie zum Beispiel Licht auf einen Spalt, dessen Größenordnung in dem Bereich der Wellenlänge  $\lambda$  liegt, breitet sich das Licht nach dem Spalt in Form einer Kugelwelle aus. Hierbei ist jeder Punkt im Spalt eine Quelle einer Kugelwelle, welche sich anschließend ausbreitet und eine Wellenfront hervorruft. Dieses Phänomen lässt sich mit dem Huygen'schen Prinzip erklären und ist als Beugung bekannt. Die Kugelwellen überlagern sich, was zu konstruktiver (Verstärkung) und destruktiver (Auslöschung) Interferenz führt, dies bewirkt eine Abfolge von Intensitätsmaxima und -minima am beobachteten Schirm. Konstruktive Interferenz tritt hierbei bei vielfachen  $m$  der Wellenlänge des Lichtes  $\lambda$  auf. Dies wird auch als optischer Gangunterschied  $\Delta$  bezeichnet.

$$\Delta = m\lambda \quad (1)$$

Ein zusätzlicher Interferenzeffekt tritt auf, wenn eine höhere Anzahl  $N$  an Spalten mit der Intensität  $I_0$  beleuchtet werden. Das gesamte Interferenzmuster, was bei der Beugung und Interferenz entsteht, kann mit der Breite des Spaltes  $D$ , der Abstand zwischen den benachbarten Spalten  $d$ , der Wellenlänge des Lichtes  $\lambda$  und dem Winkel  $\theta$  zur Flächennormale beschrieben werden:

$$I(\theta) = I_0 \frac{\sin^2(\pi(D/\lambda)\sin\theta)}{(\pi(D\lambda)\sin\theta)^2} \cdot \frac{\sin^2(N\pi(d/\lambda)\sin\theta)}{\sin^2(\pi(d/\lambda)\sin\theta)} \quad (2)$$

Der 1. Term aus Glg. (2) beschreibt hierbei die Beugung am Spalt, wobei der 2. Term die Interferenz aufgrund mehrerer Spalten erklärt. Verwendet man einen Doppelspalt (somit  $N = 2$ ) und vereinfacht die Winkelfunktion  $\sin\theta \approx x/z$  ergeben sich für Beugungs- und Interferenzanteil:

$$I(x)_{\text{Beugung}} = \frac{\sin^2(\pi x D / \lambda z)}{(\pi x D / \lambda z)^2} \quad I(x)_{\text{Interferenz}} = I_0(1 + \cos \frac{2\pi x d}{\lambda z}) \quad (3)$$

Die Variable  $x$  ist hierbei die Position am Schirm und  $z$  der Abstand zwischen dem Doppelspalt und dem Schirm. Ist zusätzlich  $z \gg d$  kann der optische Gangunterschied  $\Delta = d \cdot \sin\theta$  in Glg. (1) eingesetzt werden. Hierfür ergibt sich eine Gleichung für das  $m$ -te Maximum beim Doppelspalt oder auch Gitterexperiment.

$$m\lambda = d \sin\theta \approx d \frac{x}{z} \quad (4)$$

Für die Interferenzfähigkeit einer elektromagnetischen Welle wird der Begriff der Kohärenz eingeführt. Zwei Frequenzen mit dem Abstand  $\Delta\nu$  sind interferenzfähig, wenn sich ihre Phasenbeziehung  $\Delta\varphi$  weniger als  $2\pi$  ändert. Dies wird als zeitliche Kohärenz bezeichnet, wobei die Kohärenzzeit  $\tau_c$  aus dem Kehrwert des Frequenzunterschiedes  $\Delta\nu$  berechnet werden kann. Die Länge, die während dieser Zeit von Licht zurückgelegt wird ist als Kohärenzlänge bekannt und über  $L_c = c\Delta\tau_c$  bestimmbar.

Weiters gibt es im Gegensatz auch die räumliche Kohärenz welche auftritt, wenn sich die Phasendifferenz einer Teilwelle an zwei unterschiedlichen Punkten im Raum während einer bestimmten Zeit um weniger als  $2\pi$  ändert.

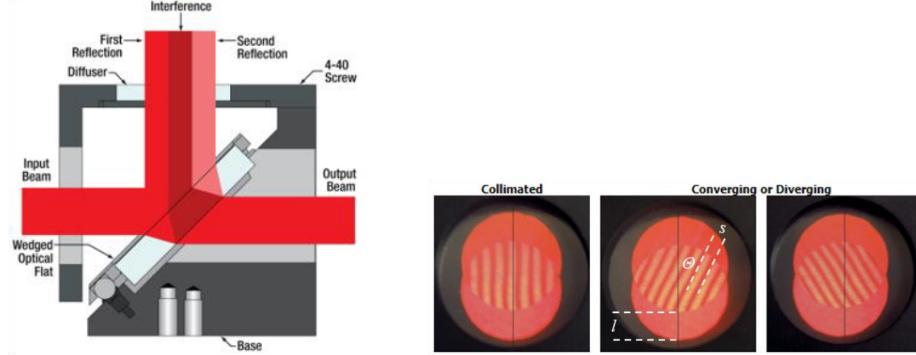
### 2.2 Interferometrie

Interferometrie bezeichnet Messmethoden, welche das Phänomen der Interferenz von Wellen, meist hervorgerufen durch die Aufspaltung und folgende Zusammenführung eines Lichtstrahls in zwei oder mehr Teile. Diese Messgeräte werden Interferometer genannt, wobei es hier eine Vielzahl an verschiedenen Ausführungen gibt.

#### 2.2.1 Shearing Interferometer

Das Shearing-Interferometer ist eines der einfachsten Messgeräte und dient zur Feststellung, ob ein Lichtstrahl kollimiert, konvergent oder divergent ist (Abbildung 1 (b)). Es besteht aus einer keilförmigen Glasplatte, welche  $45^\circ$  zum einfallenden Strahl gelagert ist. Das Licht wird hierbei an der vorderen und hinteren Seite

der Glasplatte reflektiert. So entsteht aufgrund der Keilform und dem Strahlenversatz durch die Dicke der Glasplatte ein Überlappungsbereich, bei dem Interferenz auftritt.



(a) Aufbau des Shearing-Interferometers. Der Strahl (Input Beam) wird an der Glasplatte vorne und hinten reflektiert. Am oberen Ende entsteht das Interferenzmuster.

(b) Feststellen, ob ein Strahl kollimiert, konvergent oder divergent ist.

Abbildung 1: Shearing Interferometer. [2]

Sind die Interferenzstreifen parallel, ist der Strahl kollimiert. Findet man jedoch ein gedrehtes Muster auf, handelt es sich um einen konvergierten oder divergierten Strahl. Über den gedrehten Winkel  $\theta$ , den Streifenabstand  $s$  und dem lateralen Versatz  $l$  kann der Radius  $r$  der Wellenfront berechnet werden.

$$r = \frac{ls}{\lambda \sin \theta} \quad (5)$$

## 2.2.2 Michelson-Interferometer

Eine weitere Ausführung ist das Michelson-Interferometer (siehe Abbildung 2). Hierbei fällt der Strahl E einer Lichtquelle (meist Laser) auf einen Strahlteiler ST, welcher als planparallele Platte mit Halbspiegelfolie realisiert ist. Dies bewirkt, dass der Strahl einerseits um  $90^\circ$  abgelenkt wird, aber ein weiterer Teil des Strahles gerade durch den Strahlteiler hindurch tritt. Die beiden Teilstrahlen treffen auf zwei Interferometerarme auf einen Spiegel M1/2, welcher den Strahl jeweils zurück zum Strahlteiler reflektiert. Dort werden die Strahlen wieder zusammengeführt und gemeinsam auf einen Schirm B bezüglichweise Detektor und zurück zur Quelle gelenkt.

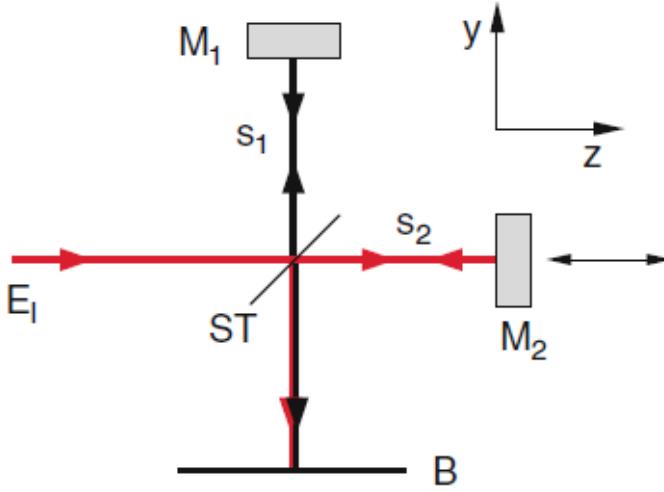


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Strahlengangs beim Michelson-Interferometer. E ... Strahl am Eingang, ST ... Strahlenteiler, M1/2 ... Spiegel der beiden Interferometerarme, B ... Schirm/Detektor. [1]

An den beiden Ausgängen kann ein Interferenzmuster beobachtet werden, wobei am Schirm ein konstruktives und an der Quelle ein destruktives Interferenzmuster auftritt. Die unterschiedlichen Muster sind aufgrund von Phasensprüngen beim Übergang der Teilstrahlen von optisch dichten in ein dünneres Medium zu erklären. Mithilfe einer Sammellinse zwischen Lichtquelle und Strahlenteiler kann dieses Muster als konzentrische Kreise projiziert werden. Wird hingegen eine Zerstreuungslinse zwischen Strahlenteiler und Schirm platziert, kann ein paralleles Interferenzmuster beobachtet werden.

Die Anzahl an Änderungen zwischen Maxima und Minima (Ringe beziehungsweise Linien)  $N$  ist abhängig vom Weglängenunterschied der beiden Interferometerarme  $\Delta s$ . Durch die Anzahl an entstandenen Interferenzmaxima beziehungsweise -minima kann auf die Wellenlänge  $\lambda$  der Lichtquelle geschlossen werden.

$$\Delta s = \frac{N\lambda}{2} \quad (6)$$

### 2.3 Polarisation

Licht ist im Wellenmodell eine senkrecht zur Ausbreitungsrichtung schwingende Welle, die Richtung dieser Transversalwelle ist durch die Polarisation gegeben. Sie beschreibt die Schwingungsrichtung des E-Feld Anteiles, das B-Feld hingegen steht immer senkrecht zur Polarisationsrichtung. Hierbei wird zwischen linear (Richtung ist zeitlich konstant), zirkular (E-Feld Vektor überstreicht einen Kreis) und elliptisch (E-Vektor überstreicht eine Ellipse) polarisierter Welle unterschieden. Licht, was in der realen Welt durch Leuchtkörper (Sonne, Lampe, etc.) auftritt, ist in der Regel nicht polarisiert, da es sich um eine Überlagerung von mehreren Wellen handelt. Um dieses Licht zu polarisieren wird ein Polarisator verwendet: Diese bevorzugen eine gewisse Polarisationsrichtung und löschen (absorbieren oder reflektieren) andere aus. Handelt es sich um lineare Polarisation, kann die Ausgangsintensität  $I$  eines Lichtstrahls mit der Intensität  $I_0$  abhängig von der Drehung eines Polarisators  $\alpha$  berechnet werden.

$$I(\alpha) = I_0 \cos^2 \alpha \quad (7)$$

Die Polarisation wird durch die vier Gesetze nach Fresnel und Arago beschrieben: [2]

1. In dieselbe Richtung linear polarisiertes Licht interferiert.
2. Zueinander senkrecht linear polarisierte Strahlen interferieren nicht.

3. Zueinander senkrecht linear polarisierte Lichtstrahlen interferieren, wenn sie ursprünglich in der selben Polarisationsebene waren und in diese zurückgeführt werden.
4. Zueinander senkrecht linear polarisierte Strahlen interferieren nicht, wenn sie in die selbe Polarisations-ebene zurückgeführt werden, in welcher sie nicht ursprünglich waren.

### 3 Beschreibung der Versuchsanordnung

In diesem Experiment werden vier Versuche durchgeführt, wofür der Aufbau für jeden Teil angepasst werden muss. Alle Versuche werden auf einem optischen Tisch mit Granitplatte durchgeführt, wobei die optischen Elemente mit einer Halterung auf einer Metallplatte befestigt werden. Als Lichtquelle wird ein grüner Laser verwendet (grüner Strahl in den Abbildungen wie zum Beispiel bei Abbildung 3), welcher eine typische Wellenlänge von  $\lambda = 532 \text{ nm}$  aufweist. Dieser hat eine Ausgangsleistung von circa 4,5 mW, was eine Sicherheitsklasse von 3R bedeutet. Da dies relativ stark ist, befindet sich nach dem Laser ein Graufilter GF, welcher die Intensität des Lasers auf etwa 0,5 mW verringert. Jedoch sollte besonders darauf geachtet werden, dass der Laserstrahl nicht in die Augen der Versuchsdurchführer trifft. Um diese Chance zu verringern sollten alle spiegelnden Elemente (Geodreieck, Uhren, etc.) vom Versuchsaufbau entfernt werden.

#### 3.1 Versuchsaufbau - Young'scher Doppelspalt

Im ersten Teil des Experimentes wird das Interferenzmuster beim Auftreffen des Lichtes auf verschiedene Doppelspalte und auf ein Gitter untersucht. Hierfür wird zunächst der Laser L mithilfe eines Justierschirms parallel zur Tischoberfläche und entlang der Bohrungen justiert. Nach dem Laser folgen zwei Spiegel SP1/2, welche den Strahl schlussendlich auf die Halterung mit dem Doppelspalt DS beziehungsweise dem Gitter G ablenken. Der Aufbau inklusive theoretischem Strahlengang ist in Abbildung 3 dargestellt.

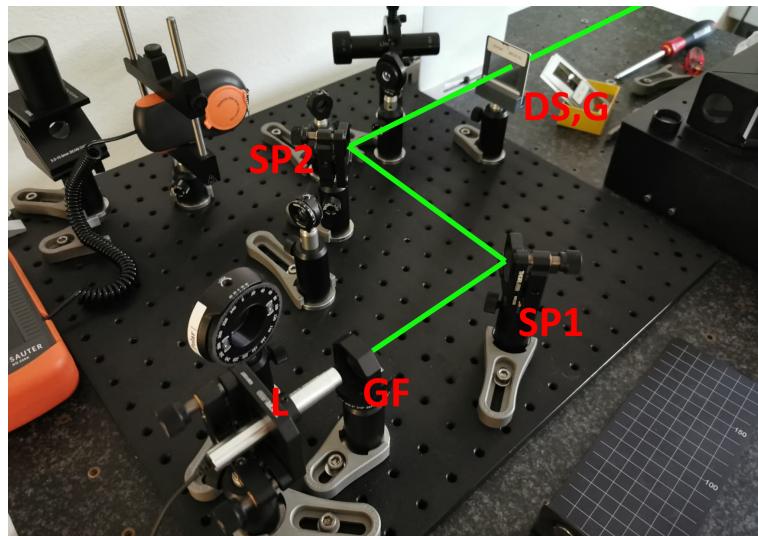


Abbildung 3: Aufbau des Doppelspalt Versuches, L ... Laser, GF ... Graufilter, SP1/2 ... Spiegel, DS, G ... Doppelspalt, Gitter.

Der Doppelspalt wird nach jeder Messung mit dem nächst größeren beziehungsweise dem Gitter ausgetauscht. Das Interferenzbild entsteht hierbei auf der Wand am Ende des Raumes im Abstand  $z$  von der Doppelspalt-Halterung. Dieser Abstand sollte viel größer als der Doppelspaltabstand  $d$  sein, damit der Versuch richtig funktioniert.

### 3.2 Versuchsaufbau - Shearing Interferometer

Für den Aufbau des Shearing Interferometers wird nur mehr ein Spiegel SP benötigt. Dieser lenkt den Lichtstrahl nun direkt auf das Shearing Interferometer SI, welches das Interferenzmuster IM auf das obere Ende des Gerätes projiziert. Beim Aufbau sollte immer kontrolliert werden, ob der Laserstrahl noch parallel ist. Der Aufbau ist in Abbildung 4 ersichtlich.

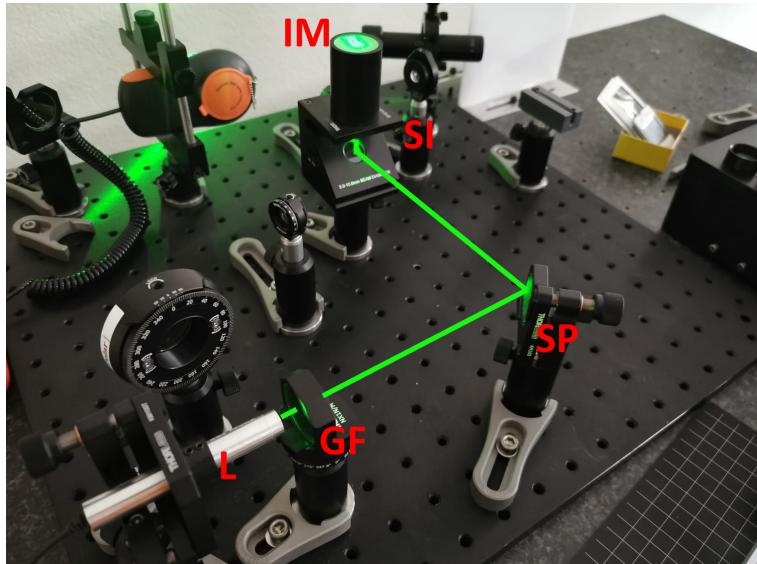


Abbildung 4: Aufbau des Shearing Interferometer Versuches, L ... Laser, GF ... Graufilter, SP ... Spiegel, SI ... Shearing-Interferometer, IM ... Sichtbares Interferenzmuster.

### 3.3 Versuchsaufbau - Polarisation

Der Versuch wird nach Abbildung 5 aufgebaut. Im Strahlengang befinden sich nun zuerst zwei und anschließend drei Polarisatoren P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>, welche mithilfe eines Drehrades ihren Polarisationswinkel  $\alpha$  ändern können. Am Ende des Strahlenganges befindet sich nun ein Photodetektor PD, welcher die Intensität des Strahles in Lux auf einer digitalen Anzeige A ausgibt. Um einen genaueren Wert für die Intensität zu erhalten, wird vor den Detektor ein Rohr R platziert, welches das Umgebungslicht abschirmt.

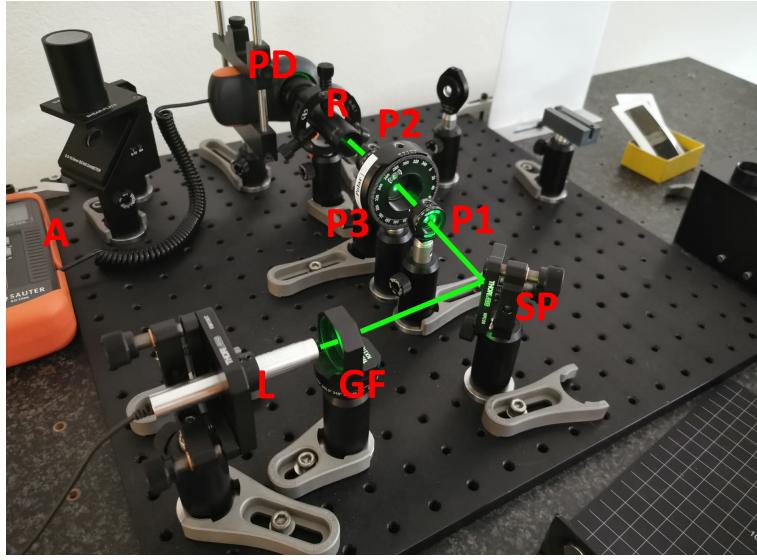
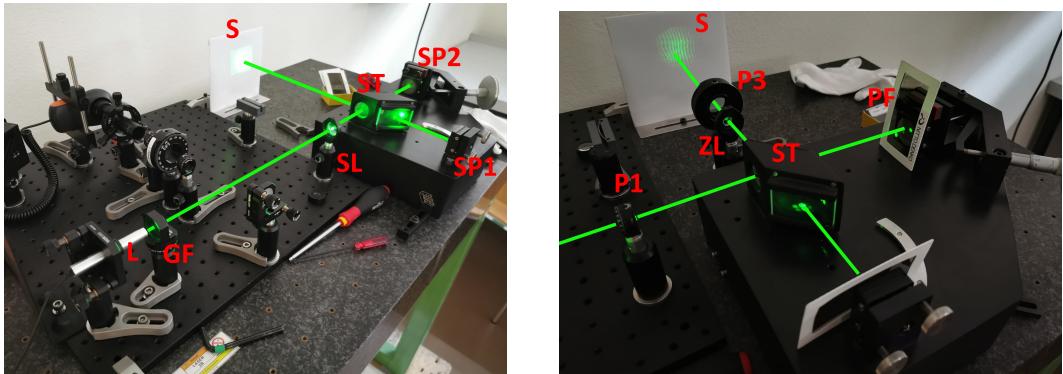


Abbildung 5: Aufbau des Polarisation Versuches, L ... Laser, GF ... Graufilter, SP ... Spiegel, P1,P2,P3 ... Polarisatoren, R ... Rohr, PD ... Photodetektor, A ... Digitalanzeige.

### 3.4 Versuchsaufbau - Michelson Interferometer

Abschließend wird ein weiteres Interferometer in den Strahlengang gebaut. Auf den Interferometerarmen befinden sich zwei Spiegel SP1,SP2, welche den Strahl vom Strahlenteiler ST zurückwerfen. Am Schirm S entsteht ein Interferenzbild, wird eine Sammellinse SL zwischen Quelle und Strahlenteiler platziert, erscheinen konzentrische Kreise. Durch eine Zerstreuungslinse ZL zwischen Schirm und Strahlenteiler hingegen erscheint ein paralleles Muster von Interferenzen. Der Aufbau ist in Abbildung 6 (a) dargestellt.



(a) Aufbau des Michelson-Interferometers. L ... Laser, GF ... Graufilter, SL ... Sammellinse ( $f = 40$  mm), ST ... Strahlenteiler, SP1/2 ... Spiegel, S ... Schirm.

(b) Erweitert Aufbau beim Michelson-Interferometer. P1/3 ... Polarisatoren, ST ... Strahlenteiler, PF ... Polarisationsfolie, ZL ... Zerstreuungslinse ( $f = -16$  mm), S ... Schirm.

Abbildung 6: Aufbau des Michelson Interferometers.

Für den weiteren Verlauf des Versuches (Untersuchung der Gesetze von Fresnel und Arago) wird ein Polarisator nach der Zerstreuungslinse P3 und nach der Quelle P1 in den Strahlengang platziert (Abbildung 6 (b)). Zusätzlich werden auch Polarisationsfolien PF verwendet, um die Teilstrahlen nach den Spiegeln zu polarisieren.

## 4 Geräteliste

Die Geräte, welche im gesamten Experiment verwendet werden, sind in Tabelle 1 eingetragen. Die Messgerätsicherheit wird aus [4] entnommen, die Gitterabstände aus [3].

Tabelle 1: Verwendete Geräte.

Gerät	Hersteller	Typ	Seriennummer	Messbereich & Fehler
Laser	Thorlabs	CPS532	22442-S01	$\lambda = 532 \text{ nm}$
Spiegel	Thorlabs	KM100	-	-
Graufilter	Thorlabs	NX1N/M	-	-
Doppelspalthalterung	Thorlabs	BE1/M	-	-
Polarisatoren	Thorlabs	RSP05/M	-	-
Sammellinse	Thorlabs	FMP1/M	-	$f = 40 \text{ mm}$
Zerstreuungslinse	Thorlabs	FMP1/M	-	$f = -16 \text{ mm}$
Shearing-Interferometer	Thorlabs	-	-	-
Lichtintensitätsmessgerät	Sauter	SO 200k	51152203	$\Delta I = (\pm 3\% \text{ rdg} \pm 0,5\% \text{ f.s})$
Doppelpalte	Phywe	0852300	-	-
Gitter	Phywe	0853400	-	8 Striche / mm
Polarisationsfolien	Nitto denko	-	-	-
Maßband	Schuller Eh klar	Power Tape 3 m	-	$\Delta z = \pm 0,5 \text{ cm}$
Michelson Interferometer	-	-	-	-
Schirm	-	-	-	-
Rohr	-	-	-	-
Smartphone	Huawei	P30 Pro	-	-

Die Doppelpalte haben unterschiedliche Spaltbreiten  $D$  und Spaltabstände  $d$ , welche in Tabelle 2 ersichtlich sind. Diese werden aus [2] entnommen.

Tabelle 2: Verschiedene Doppelpalte im Experiment.

# ... Nummer des Spaltes  
 $D$  ... Spaltbreite  
 $d$  ... Spaltabstand

#	$D / \text{mm}$	$d / \text{mm}$
1	0,20	0,25
2	0,10	0,25
3	0,10	0,50
4	0,10	1,00

## 5 Versuchsdurchführung und Messergebnisse

Zu Beginn jeder Messung sollte erneut überprüft werden, ob die Ausrichtungen der Komponenten und des Lasers noch in Ordnung ist. Der Laser sollte immer parallel zum optischen Tisch ausgerichtet sein.

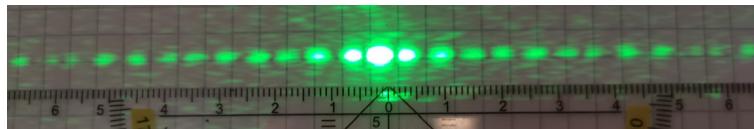
### 5.1 Versuchsdurchführung - Doppelspalt

Der erste Versuch ist die Untersuchung des Interferenzmusters beim Doppelspalt im Strahlengang und folgende Berechnung der Wellenlänge  $\lambda$  des Lasers, hierfür wird der Aufbau aus Abbildung 3 hergenommen. Für die Messung werden nacheinander die unterschiedlichen Doppelpalte in den Halter gesteckt, beginnend mit dem 1. aus Tabelle 2.

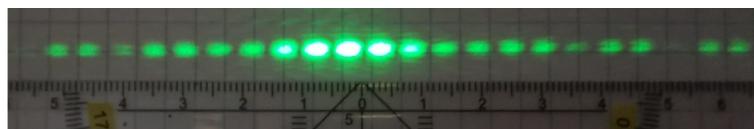
Als Schirm wird ein kariertes Blatt Papier mit einem Geodreieck an die Wand im Abstand  $z$  des Raumes fixiert. Der Schirm-Doppelspalt Abstand  $z$  wird anschließend mit dem Maßband bestimmt.

$$z = (260,5 \pm 0,5) \text{ cm}$$

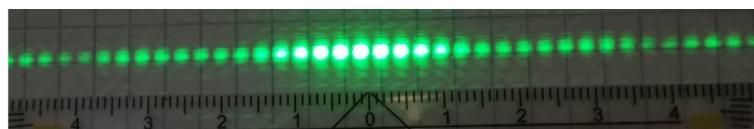
Die Unsicherheit ergibt sich aus der Kombination von Messgerät- und Ableseunsicherheit. Anschließend wird der Laser eingeschaltet, mit einer Smartphone Kamera wird ein Bild vom entstandenen Interferenzmuster am Schirm aufgenommen, welches später mit einer Software ausgewertet wird. In Abbildung 7 sind die vier verschiedenen Muster abgebildet.



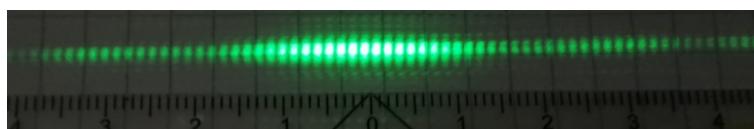
(a) Interferenzmuster am 1. Spalt ( $D = 0,2 \text{ mm}$  und  $d = 0,25 \text{ mm}$ ).



(b) Interferenzmuster am 2. Spalt ( $D = 0,1 \text{ mm}$  und  $d = 0,25 \text{ mm}$ ).



(c) Interferenzmuster am 3. Spalt ( $D = 0,1 \text{ mm}$  und  $d = 0,50 \text{ mm}$ ).



(d) Interferenzmuster am 4. Spalt ( $D = 0,1 \text{ mm}$  und  $d = 1,00 \text{ mm}$ ).

Abbildung 7: Interferenzmuster beim Doppelspalt.

Es wird besonders darauf geachtet, dass in allen Bildern ein Messbereich von -4 cm bis 4 cm ersichtlich ist, um die Auswertung konsistent zu halten.

## 5.2 Versuchsdurchführung - Gitter

Beim Versuch zur Bestimmung der Gitterkonstante wird derselbe Aufbau wie beim Doppelspalt verwendet, in die Halterung wird nun jedoch das Spaltgitter gesteckt. Das entstandene Bild ist in Abbildung 8 ersichtlich.

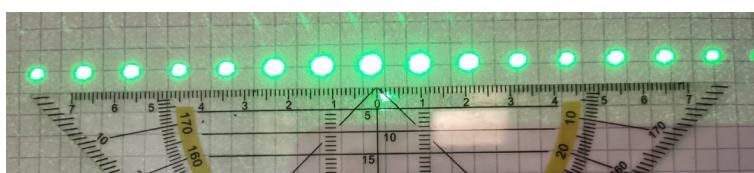


Abbildung 8: Interferenzmuster mit Gitter im Strahlengang.

Der Abstand  $z$  vom Gitter zum Schirm ändert sich nicht und wird somit aus dem vorherigen Versuch übernommen. Wie in Abbildung 8 zu erkennen ist, ist der Bereich vom Interferenzmuster viel weiter als bei Doppelspalt, daher wird der Messbereich auf  $\pm 7 \text{ cm}$  erhöht.

### 5.3 Versuchsdurchführung - Shearing Interferometer

Für diesen Versuch wird der Aufbau aus Abbildung 4 hergenommen. Ist das Interferometer im Strahlengang platziert und wird der Laser eingeschaltet, ist am oberen Ende des Shearing-Interferometers ein Interferenzmuster in Form von Streifen zu erkennen. Aus diesem können die Größen lateraler Versatz  $l$ , Abstand der Interferenzstreifen  $s$  und Winkel der Interferenzstreifen  $\theta$  abgemessen werden (siehe Abbildung 9). Diese werden später verwendet, um den Radius der Wellenfront  $r$  zu berechnen.

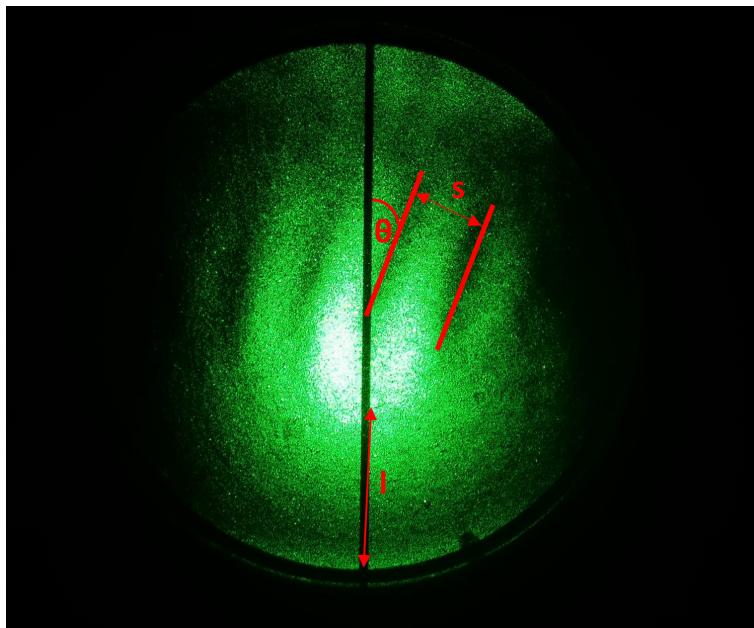


Abbildung 9: Interferenzmuster am Shearing-Interferometer und Parameterbestimmung.  $\theta$  ... Winkel der Streifen,  $s$  ... Streifenabstand,  $l$  ... lateraler Versatz.

Die Größen wurden direkt mit dem Geodreieck bestimmt, da die Smartphone-Kamera das Bild nur schwer auflösen kann und somit die Streifen am Bild nur schwer erkennbar sind. Um eine bessere Aussage treffen zu können, wird die Messung drei mal durchgeführt, der Laser und die Komponenten werden für jede Messung justiert. Die Messergebnisse sind in Tabelle 3 aufgelistet.

Tabelle 3: Messwerte beim Shearin-Interferometer.

#	...	Nummer der Messung
$s$	...	Streifenabstand ( $\Delta s = 0,5 \text{ mm}$ )
$\theta$	...	Winkel der Streifen ( $\Delta\theta = 2^\circ$ )
$l$	...	lateraler Versatz ( $\Delta l = 0,5 \text{ mm}$ )

#	$s / \text{mm}$	$\theta / {}^\circ$	$l / \text{mm}$
1	3,5	24	9,0
2	3,0	23	11,0
3	3,0	23	10,0

Für die Längenbestimmungen wird ein Ablesefehler von 0,5 mm angenommen, da die Striche nicht optimal erkennbar sind. Beim Winkel ist die Messung um einiges ungenauer, daher eine Ableseunsicherheit von  $2^\circ$ .

### 5.4 Versuchsdurchführung - Polarisation

In diesem Versuch werden zuerst zwei Polarisatoren in den Strahlengang gesetzt, wie es in Abbildung 5 zu sehen ist. Der Polarisator P1 wird dabei senkrecht in die 0 Position gedreht, während der Winkel  $\alpha$

des Polarisators P2 variiert wird. Am Ende des Strahlengangs befindet sich ein Gerät zur Messung der Lichtintensität  $I$ , diese wird in diesem Experiment abhängig vom Winkel  $\alpha$  des zweiten Polarisators P2 gemessen. Zu beachten ist hierbei, dass die 0 Position am Drehrad nicht  $0^\circ$  entspricht, da beim Montieren der Polarisationsscheibe im Drehrad die Scheibe leicht verrutscht. Laut der Theorie der Polarisation sollte bei  $n \cdot 90^\circ$  (gekreuzte Polarisatoren) keine Intensität mehr durchdringen, somit wird der erste Wert, bei dem keine Intensität  $I$  gemessen wird, als  $\alpha_{\text{neu}} = 90^\circ$  angenommen. Folgend wird der Winkel  $\alpha$  am Drehrad in  $10^\circ$  Schritten erhöht, was wiederum eine Erhöhung des angepassten Winkels  $\alpha_{\text{neu}}$  bewirkt. In Tabelle sind die Intensitäten  $I$  abhängig vom Winkel  $\alpha_{\text{neu}}$  des Polarisators P2 aufgelistet, zusätzlich sind auch noch die nicht angepassten und gemessenen Winkel  $\alpha$  angegeben. Die Unsicherheit der Lichtintensität  $\Delta I_0$  wird aus der Messgerätsicherheit aus [4] für einen Messbereich von 2000 lx bestimmt.

Tabelle 4: Verschiedene Doppelspalte im Experiment.

$\alpha_{\text{neu}}$	...	Anangepasster Winkel des Drehades
$\alpha$	...	Tatsächlicher gemessener Winkel am Drehades
$I$	...	Intensität des Lichtes

$\alpha_{\text{neu}} / {}^\circ$	$\alpha / {}^\circ$	$I / \text{lx}$	$\Delta I / \text{lx}$	$\alpha_{\text{neu}} / {}^\circ$	$\alpha / {}^\circ$	$I / \text{lx}$	$\Delta I / \text{lx}$
0	80	560	30	180	260	580	30
10	90	550	30	190	270	550	30
20	100	500	30	200	280	500	30
30	110	430	30	210	290	410	30
40	120	340	20	220	300	320	30
50	130	242	18	230	310	220	20
60	140	156	15	240	320	135	17
70	150	69	12	250	330	70	14
80	160	22	11	260	340	14	11
90	170	0	10	270	350	0	10
100	180	12	11	280	0	12	12
110	190	59	12	290	10	70	14
120	200	129	14	300	20	133	17
130	210	226	17	310	30	230	20
140	220	326	20	320	40	320	30
150	230	423	30	330	50	420	30
160	240	502	30	340	60	490	30
170	250	552	30	350	70	550	30

Für die spätere Auswertung muss ebenfalls die Intensität des Lasers ohne Polarisator  $I_0$  gemessen werden. Diese beträgt in diesem Aufbau:

$$I_0 = (1090 \pm 50) \text{ lx}$$

Um die Gesetze von Fresnel und Arago zu überprüfen, wird ein dritter Polarisator P3 zwischen die zwei gekreuzten Polarisatoren P1 und P2 eingeschoben. Folgende Veränderungen konnten beobachtet werden:

- Die Maximalintensität verringert sich auf  $I = 106 \text{ lx}$ .
- Bei  $P3 = 0^\circ, 90^\circ, \text{ etc.}$  ist keine Änderung wahrnehmbar und es wird keine Intensität gemessen.
- Bei  $P3 = 45^\circ, 135^\circ$ , ist die volle Intensität messbar.

## 5.5 Versuchsdurchführung - Michelson Interferometer

Das Michelson Interferometer wird wie in Abbildung 6 in den Strahlengang platziert. Mithilfe der Sammellinse zwischen Laser und Strahlenteiler wird am Schirm ein konzentrisches Interferenzmuster sichtbar. Am Spiegel SP1 befinden sich zwei Stellschrauben, mit welchen man den konzentrischen Kreis genau positionieren kann, wobei jeweils eine Schraube für die x- und die andere für die y-Achse zuständig ist. Für eine genaue

Auswertung wird die Mitte des Kreise genau in der Mitte des Schirmes positioniert. Ein Beispielbild des Interferenzmusters ist in Abbildung 10 (a) dargestellt. Das Michelson-Interferometer besitzt jedoch sogar zwei Ausgänge, wobei das zweite Muster zum Laser zurückgeworfen wird. Platziert man hier auch einen Schirm, kann das invertierte Interferenzmuster wie am ersten Schirm erkannt werden. Leider wird aufgrund des Lasers der größte Teil des Interfusters überdeckt, somit ist nur ein Teil sichtbar, welcher in Abbildung 10 (b) ersichtlich ist.

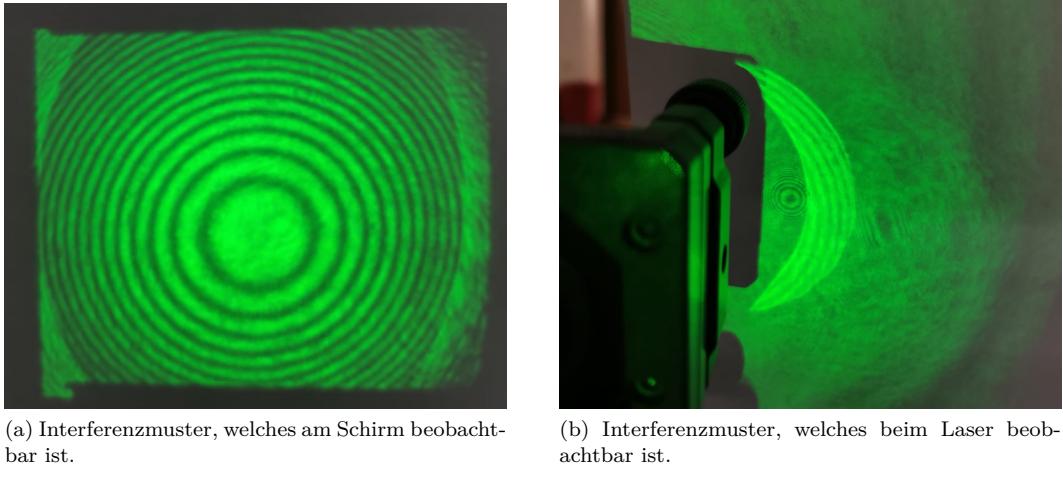


Abbildung 10: Beispiel Bild der konzentrischen Kreise als Interferenzmuster beim Michelson-Interferometer.

Mit der Mikrometerschraube am Spiegel SP2 kann der Spiegelabstand und somit die Anzahl an Interferenzmaxima verändert werden. Wird die Schraube gedreht, ziehen Interferenzmaxima vorbei und verschwinden zeitgleich wieder. Diese Anzahl an Wechsel Maxima und Minima  $N$  wird gezählt, die Verschiebung des Interferometerarmes  $\Delta x_{\odot}$  dabei wird zusätzlich notiert. Die Messung wird für  $N = 100 \pm 2$  Interferenzwechsel durchgeführt, der Interferometerarm ist jedoch mit einem Hebel um den Faktor 5,3 versetzt. Somit ergibt sich der genaue Unterschied  $\Delta x'_{\odot}$ :

$$\Delta x_{\odot} = (140 \pm 5) \mu\text{m} \quad \Delta x'_{\odot} = (26,4 \pm 1,0) \mu\text{m}$$

Die Unsicherheit des Abstandes  $\Delta x_{\odot}$  ergibt sich aus dem Fehler der Mikrometerschraube. Die Unsicherheit von der Anzahl  $N$  kommt zustande, da am Anfang und Ende des Zählens kein genauer Wechsel festgestellt werden konnte.

Anschließend wird nach dem Strahlenteiler und vor dem Schirm eine Zerstreuungslinse platziert, diese verändert die Interferenzerscheinung zu einem parallelen Muster. Hierfür wird jedoch die Sammellinse vor dem Interferometer entfernt. Bei diesem Versuch wird der selbe Messvorgang wie bei den konzentrischen Kreisen wiederholt. Es ergibt sich:

$$\Delta x_{||} = (145 \pm 5) \mu\text{m} \quad \Delta x'_{||} = (27,4 \pm 1,0) \mu\text{m}$$

Das Interferenzmuster ist in Abbildung 11 dargestellt.

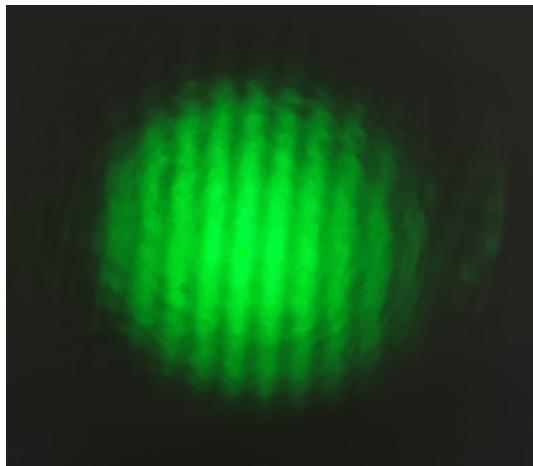
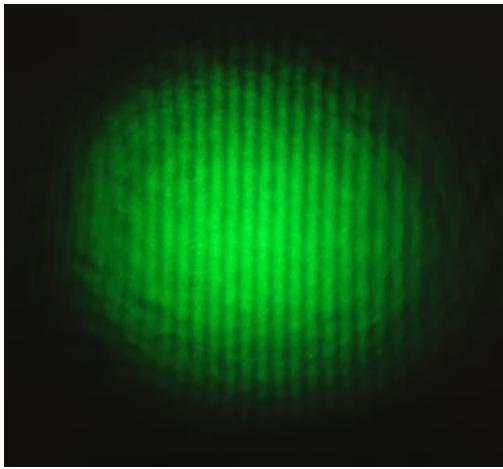
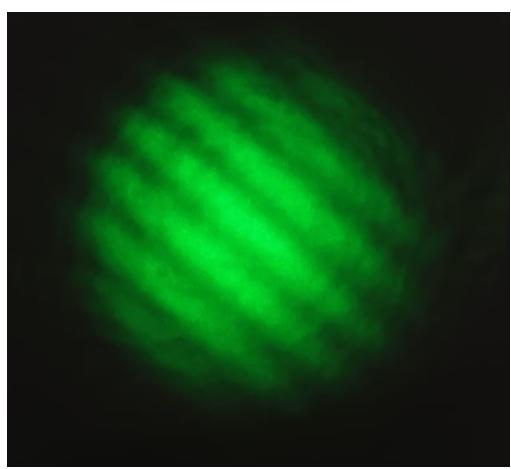


Abbildung 11: Beispiel Bild der parallelen Linien als Interferenzmuster beim Michelson-Interferometer.

Anschließend werden verschiedene Effekte am Michelson-Interferometer untersucht. Die Stellschrauben am Spiegel SP1, welche zuvor die konzentrischen Kreise verschoben haben, weisen nun einen anderen Effekt auf (siehe Abbildung 12). Das Drehen der linken Schraube führt zu mehr beziehungsweise weniger Interferenzstreifen (a), wobei die rechte Schraube für das Drehen des Interferenzbildes zuständig ist (b).



(a) Durch Drehen der linken Schraube verändert sich die Anzahl an Maxima beziehungsweise Minima.

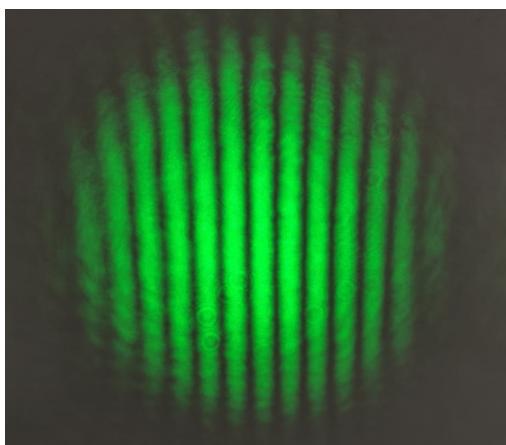


(b) Durch Drehen der rechten Schraube dreht sich das Interferenzbild am Schirm.

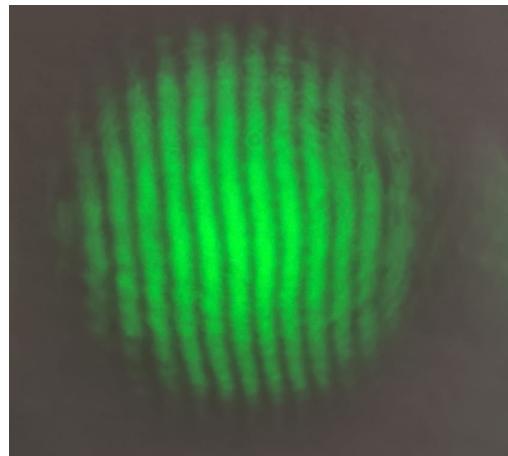
Abbildung 12: Beispiel Bild der zusätzlichen Effekte bei den den parallelen Linien des Interferenzmusters beim Michelson-Interferometer.

Weiters wird das Verhalten des Michelson Interferometers mit Polarisatoren im Strahlengang untersucht. Die erhaltenen Ergebnisse sind in Abbildung 13 dargestellt.

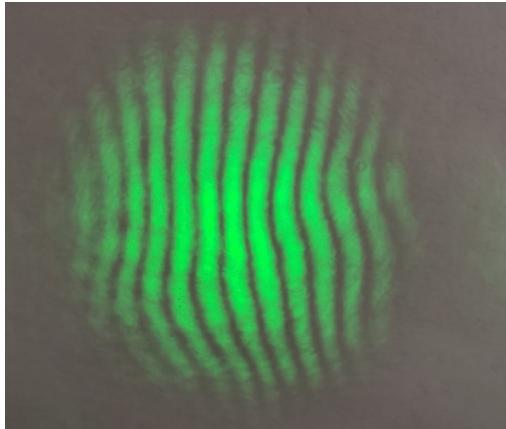
- (a) Hierfür wird der Polarisator P1 vor das Michelson Interferometer in den Strahlengang gesetzt und auf  $45^\circ$  gedreht.
- (b) Anschließend wird eine Polarisatorfolie horizontal vor den Spiegel SP1 gestellt.
- (c) Folgend wird eine zweite Polarisatorfolie horizontal zu Spiegel SP2 gesetzt.
- (d) Abschließend wird eine der beiden Folien (hier SP1) vertikal gedreht.



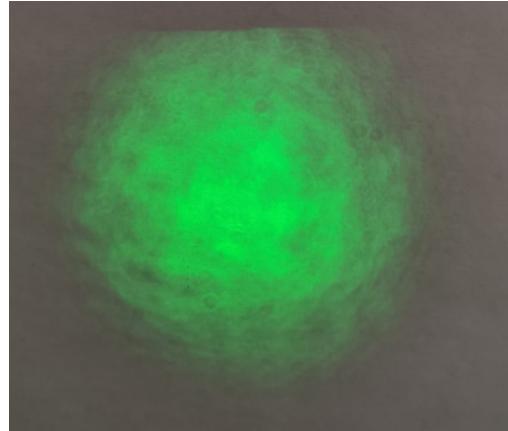
(a) Interferenzmuster mit Polarisator P1.



(b) Interferenzmuster mit P1 und einer horizontalen Polarisationsschicht.



(c) Interferenzmuster mit P1 und zwei horizontalen Polarisationsschichten.



(d) Interferenzmuster mit P1 und einer horizontalen und einer vertikalen Polarisationsschicht.

Abbildung 13: Interferenzerscheinungen beim Michelson Interferometer mit verschiedenen Polarisationseinstellungen.

Abschließend wird ein dritter Polarisator P3 nach Aufbau 6 nach der Zerstreuungslinie ZL und vor dem Schirm in den Strahlengang platziert. Wird der Winkel des Polarisators ebenfalls um  $45^\circ$  gedreht, ist trotz gekreuzten Polarisationsfolien bei den Spiegeln wieder ein Interferenzmuster erkennbar (siehe Abbildung 14).

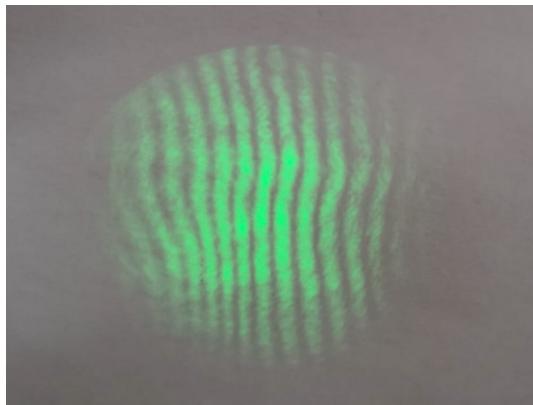


Abbildung 14: Interferenzmuster mit Polarisator P3 des Michelson-Interferometers.

## 6 Auswertung

In diesem Abschnitt werden nacheinander alle Messergebnisse aus Kapitel 5 ausgewertet. Die Werte werden immer ungerundet bis zu dem Endergebnis verwendet, um möglichst viel Genauigkeit beizubehalten. Sie werden nur zur besseren Darstellung gerundet und inklusive Unsicherheit, welche mit der Größtfehlermethode berechnet wird, angegeben. Die Auswertung, inklusive Berechnung der Wert und grafischer Darstellung der Plots, wird mit einem Python-Programm (siehe Anhang) realisiert.

### 6.1 Auswertung - Young'scher Doppelspalt & Gitter

Im ersten Teil der Auswertung wird anhand der aufgenommenen Interferenzmuster aus Abbildung 7 der Doppelspalte und Abbildung 8 des Gitters die Wellenlänge  $\lambda$  des Lasers bestimmt. Hierfür werden die Bilder der Smartphone Kamera hergenommen und mit *Adobe Photoshop* so bearbeitet, dass das Interferenzmuster auf ein 1270x16 px Bild zugeschnitten wird. Zusätzlich wird über dieses Bild noch ein Schwarz-Weiß Filter gelegt, um die Intensitätsstufen besser herauslesen zu können. Die bearbeiteten Bilder sind in Abbildung 15 dargestellt.

(a) Bearbeitetes Interferenzmuster am 1. Spalt ( $D = 0,2 \text{ mm}$  und  $d = 0,25 \text{ mm}$ ).

(b) Bearbeitetes Interferenzmuster am 2. Spalt ( $D = 0,1 \text{ mm}$  und  $d = 0,25 \text{ mm}$ ).

(c) Bearbeitetes Interferenzmuster am 3. Spalt ( $D = 0,1 \text{ mm}$  und  $d = 0,50 \text{ mm}$ ).

(d) Bearbeitetes Interferenzmuster am 4. Spalt ( $D = 0,1 \text{ mm}$  und  $d = 1,00 \text{ mm}$ ).

(e) Bearbeitetes Interferenzmuster am Gitter.

Abbildung 15: Bearbeitetes Interferenzmuster beim Doppelspalt und Gitter.

Hierbei erstreckt sich der Bereich des Interferenzmusters der Doppelspalten von -4 bis 4 cm, also insgesamt 8 cm, beim Gitter ist der Messbereich von -7 bis 7 cm, also 14 cm gesamt. Diese Bilder wurden anschließend in das Programm *ImageJ* geladen, welches die Graustufen Werte aus Grafiken analysieren kann. Hierfür wird das Bild geöffnet, der gewünschte Bereich mit dem Rechteck-Tool ausgewählt und unter dem Reiter *Analyze* die Funktion *Plot Profile* ausgewählt. Mit dem Knopf *Data* links unten können daraufhin die Graustufenwerte als .csv Datei exportiert werden. Ein Screenshot des Programmes bei der Auswertung des Gitter Bildes ist in Abbildung 16 dargestellt.

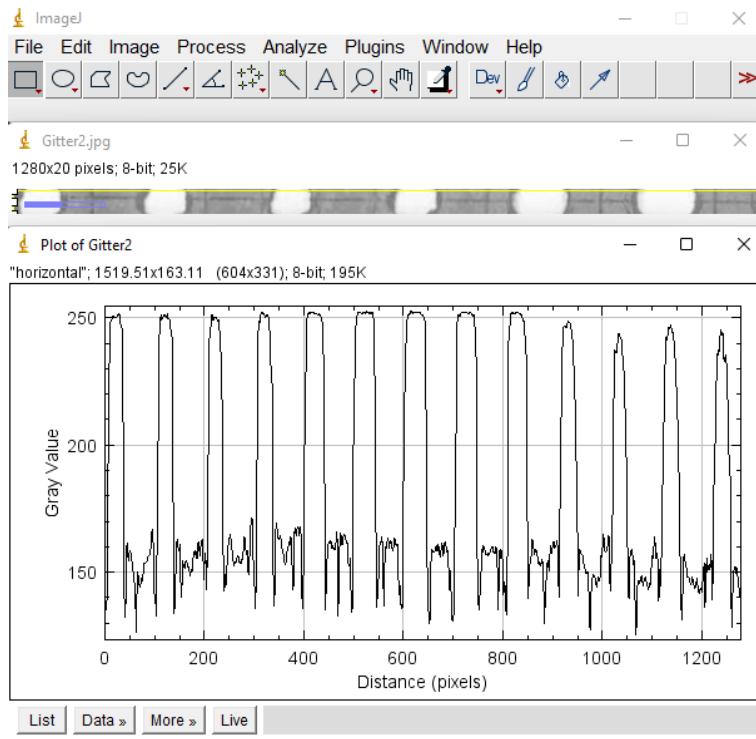
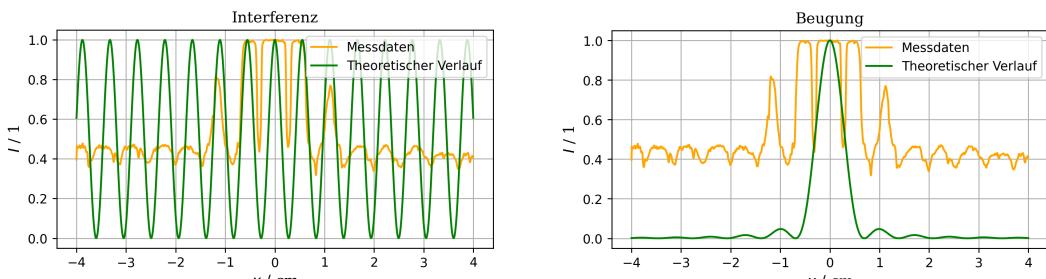


Abbildung 16: Screenshot des ImageJ Programms zur Analyse der Graustufenwerte eines Interferenzbildes.

Anschließend wurde für das Plotten der Intensitäten die jeweiligen aus ImageJ erhaltenen Datenfiles in das Pythonprogramm eingelesen. Um für die Darstellung auf der x-Achse die jeweiligen Abstände am Schirm in cm zu haben werden die in den Datenfiles enthaltenen Pixel mit Umrechnungsfaktor  $f = 0,0063 \text{ cm}/\text{px}$ , welcher aus den oben angegebenen Daten (Pixelanzahl und Bildbreite) folgt, in cm umgerechnet. Zusätzlich wird die maximal gemessene Intensität gesucht und alle Werte mit Hilfe dieser normiert, daher erfolgt die Darstellung auf der y-Achse auf 1 normiert. Zusätzlich zu den gemessenen Verläufen werden noch die theoretischen Verläufe für die Interferenz, die Beugung und das Gesamtbild berechnet und ebenso geplottet, dies erfolgt für die Einzel-Diagramme (Interferenz und Beugung) als auch das Gesamtdiagramm (Abbildung 17 bis Abbildung 24). Diese Vorgehensweise wird für alle vier Doppelspalte durchgeführt.



(a) Theoretischer Verlauf des Interferenzmusters im Vergleich zum gemessenen Gesamtverlauf zu Doppelspalt 1.

(b) Theoretischer Verlauf des Beugungsmusters im Vergleich zum gemessenen Gesamtverlauf zu Doppelspalt 1.

Abbildung 17: Interferenz- und Beugungsmuster am 1. Doppelspalt ( $D = 0,2 \text{ mm}$  und  $d = 0,25 \text{ mm}$ ).

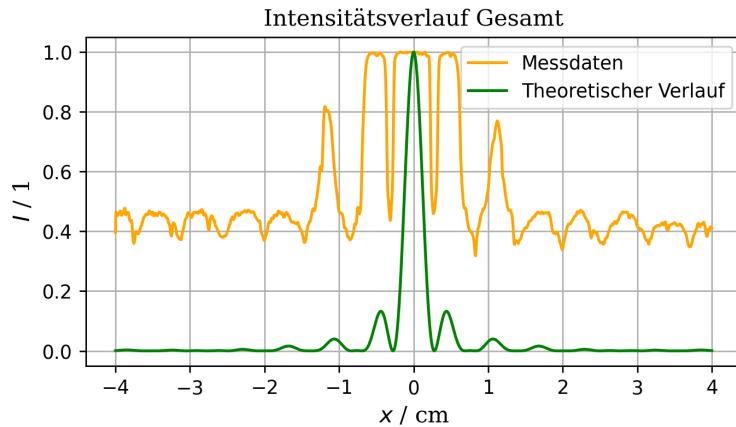
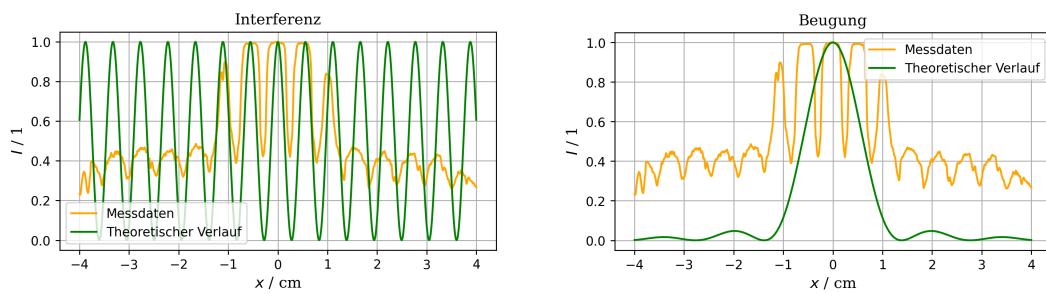


Abbildung 18: Theoretischer Gesamtverlauf im Vergleich zum gemessenen Gesamtverlauf zu Doppelspalt 1.



(a) Theoretischer Verlauf des Interferenzmusters im Vergleich zum gemessenen Gesamtverlauf zu Doppelspalt 2.

(b) Theoretischer Verlauf des Beugungsmusters im Vergleich zum gemessenen Gesamtverlauf zu Doppelspalt 2.

Abbildung 19: Interferenz- und Beugungsmuster am 2. Doppelspalt ( $D = 0,1 \text{ mm}$  und  $d = 0,25 \text{ mm}$ ).

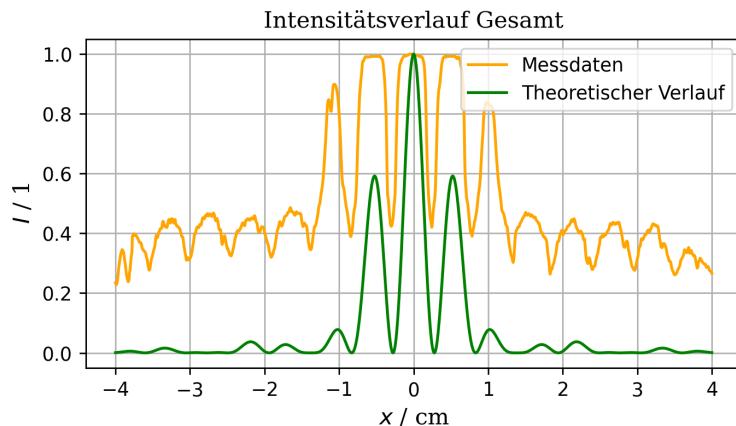
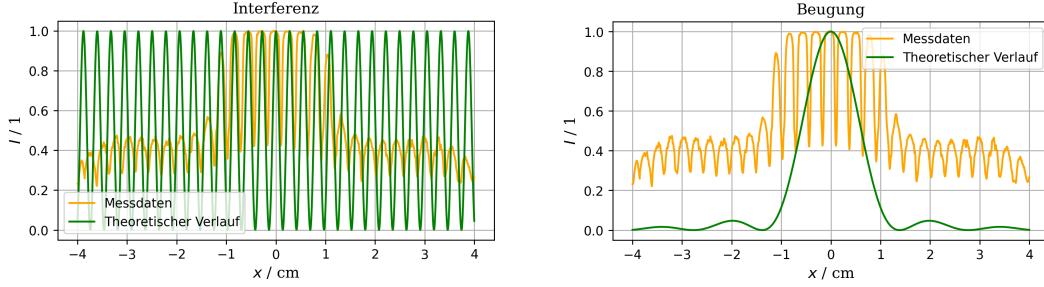


Abbildung 20: Theoretischer Gesamtverlauf im Vergleich zum gemessenen Gesamtverlauf zu Doppelspalt 2.



(a) Theoretischer Verlauf des Interferenzmusters im Vergleich zum gemessenen Gesamtverlauf zu Doppelspalt 3.

(b) Theoretischer Verlauf des Beugungsmusters im Vergleich zum gemessenen Gesamtverlauf zu Doppelspalt 3.

Abbildung 21: Interferenz- und Beugungsmuster am 3. Doppelspalt ( $D = 0,1$  mm und  $d = 0,50$  mm).

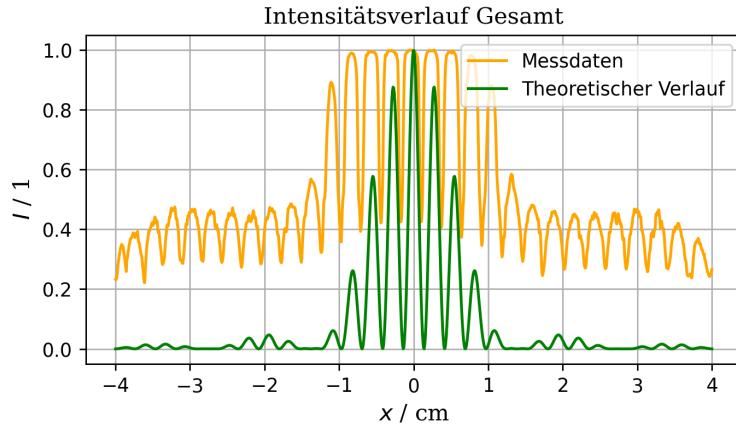
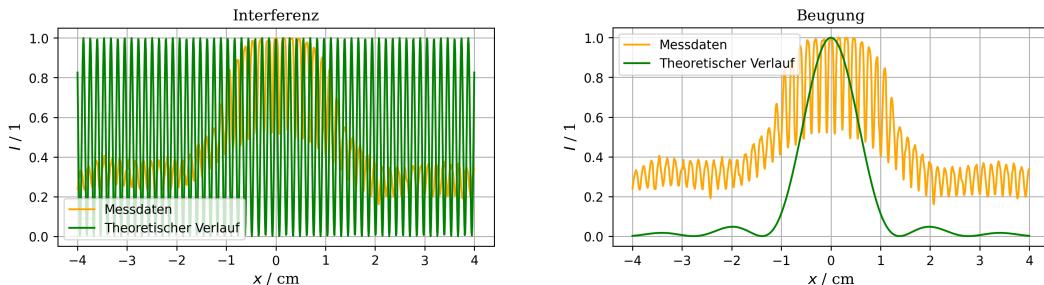


Abbildung 22: Theoretischer Gesamtverlauf im Vergleich zum gemessenen Gesamtverlauf zu Doppelspalt 3.



(a) Theoretischer Verlauf des Interferenzmusters im Vergleich zum gemessenen Gesamtverlauf zu Doppelspalt 4.

(b) Theoretischer Verlauf des Beugungsmusters im Vergleich zum gemessenen Gesamtverlauf zu Doppelspalt 4.

Abbildung 23: Interferenz- und Beugungsmuster am 4. Doppelspalt ( $D = 0,1$  mm und  $d = 1,00$  mm).

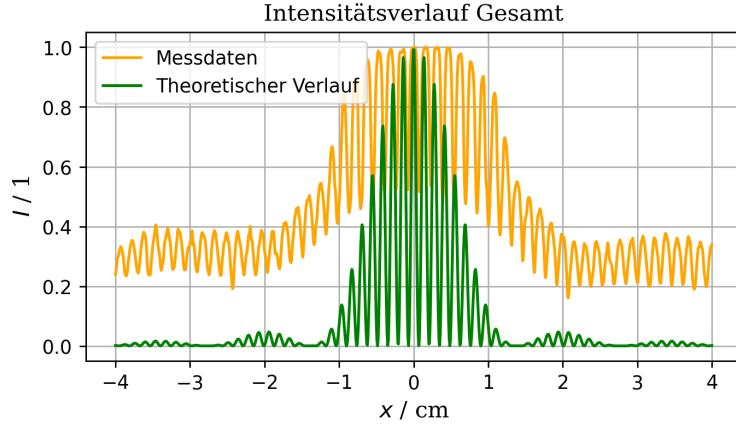


Abbildung 24: Theoretischer Gesamtverlauf im Vergleich zum gemessenen Gesamtverlauf zu Doppelspalt 4.

Anschließend wird aus den gemessenen Daten jeweils der Abstand zwischen zwei Maxima der selben Ordnung herausgelesen und halbiert, dies entspricht einem  $\Delta x$  für die jeweilige Ordnung. Die Werte für die Ordnung des jeweiligen Maximums und die zugehörigen  $\Delta x$  werden anschließend in Glg. (4) verwendet um die jeweilige Wellenlänge  $\lambda$  zu berechnen. Die zugehörige Unsicherheit folgt aus der Größtfehlermethode, wobei für  $\Delta x$  eine Ableseunsicherheit von  $\Delta \Delta x = 0,01$  cm angenommen wird. Die gesammelten Werte werden je Doppelspalt in einer eigenen Teiltabelle (5) dargestellt.

Größtfehlermethode für die Unsicherheit der Wellenlänge  $\Delta \lambda$ :

$$\Delta \lambda = \frac{d}{zm} \cdot \Delta \Delta x + \frac{d \Delta x}{z^2 m} \cdot \Delta z$$

Tabelle 5: Ermittelte Wellenlänge bei den unterschiedlichen Doppelspalten (DS1 bis DS4).

$m$	...	Ordnung des jeweiligen Maximums
$\Delta x$	...	Abstand zur 0ten Ordnung inklusive Unsicherheit ( $\Delta \Delta x = 0,01$ cm)
$\lambda$	...	berechnete Wellenlänge
$\Delta \lambda$	...	Unsicherheit der berechneten Wellenlänge

$m$	$\Delta x_{DS1}$ / cm	$\lambda_{DS1}$ / nm	$\Delta \lambda_{DS1}$ / nm	$m$	$\Delta x_{DS2}$ / cm	$\lambda_{DS2}$ / nm	$\Delta \lambda_{DS2}$ / nm
1	0,51	485	11	1	0,49	475	11
2	1,14	545	6	2	1,02	490	6
3	1,69	540	5	3	1,62	517	5
4	2,23	534	4	4	2,14	514	4
5	2,85	547	3	5	2,72	522	3

$m$	$\Delta x_{DS3}$ / cm	$\lambda_{DS3}$ / nm	$\Delta \lambda_{DS3}$ / nm	$m$	$\Delta x_{DS4}$ / cm	$\lambda_{DS4}$ / nm	$\Delta \lambda_{DS4}$ / nm
1	0,29	560	20	1	0,15	570	40
2	0,54	520	11	2	0,31	600	20
3	0,80	511	8	3	0,46	594	14
4	1,07	515	6	4	0,62	597	11
5	1,34	516	5	5	0,77	589	9

Um in weiterer Folge die einzelnen Ergebnisse der Doppelspalten besser vergleichen zu können wird jeweils der Mittelwert der berechneten Wellenlängen  $\lambda$  gebildet. Die neue Unsicherheit folgt hierbei aus dem Standardfehler des Mittelwerts.

$$\lambda_{DS1} = (530 \pm 30) \text{ nm} \quad \lambda_{DS2} = (504 \pm 19) \text{ nm}$$

$$\lambda_{DS3} = (525 \pm 19) \text{ nm} \quad \lambda_{DS4} = (590 \pm 11) \text{ nm}$$

Die Versuchsdurchführung für die Bestimmung der Wellenlänge des Gitters ist sehr ähnlich zu jener des Doppelspaltes, da daher ist auch die Vorgehensweise für die Auswertung nahezu dieselbe. Die oben beschriebenen Datenfiles aus ImageJ werden wieder in das Python-Programm eingelesen. Anschließend wird aus der Anzahl der Pixel und der Schirmbreite (Werte siehe oben) wieder der Umrechnungsfaktor  $f = 0,0109 \text{ cm}/\text{px}$  bestimmt und somit die Daten für die richtige Skalierung der x-Achse angepasst. Die Normierung der Intensität der y-Achse erfolgt ebenso wieder über die im Spektrum vorkommende maximale Intensität. Anschließend werden diese Daten in einem Plot (siehe Abbildung 25) dargestellt, jedoch wird hierbei nicht noch zusätzlich der theoretische Verlauf dargestellt.

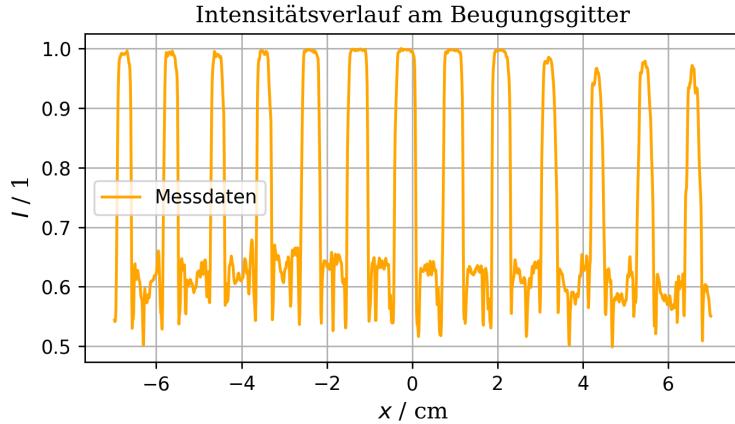


Abbildung 25: Gemessener Intensitätsverlauf des Gitters.

Um in weiterer Folge die Gitterkonstante  $g$  mittels Glg. (4) bestimmen zu können, werden wieder die Abstände zweier Maxima gleicher Ordnung herausgelesen und halbiert. Anschließend kann mit diesen Abständen  $\Delta x$ , den zugehörigen Ordnungen  $m$  und der zuvor berechneten Wellenlänge  $\lambda = (537 \pm 18) \text{ nm}$  (dies ist der Mittelwert der vorherigen vier Wellenlängen) die Gitterkonstante  $g$  berechnet werden. Die gesammelten Werte werden wieder zur besseren Übersicht in Tabelle 6 dargestellt. Die zugehörige Unsicherheit folgt wieder aus der Größtfehlermethode.

$$\Delta g = \frac{mz}{\Delta x} \cdot \Delta \lambda + \frac{m\lambda}{\Delta x} \cdot \Delta z + \frac{m\lambda z}{\Delta x^2} \cdot \Delta \Delta x$$

Tabelle 6: Ermittelte Gitterkonstante je Abstand der Maxima bzw. Ordnung.

$m$	...	Ordnung des jeweiligen Maximums
$\Delta x$	...	Abstand zur 0ten Ordnung inklusive Unsicherheit ( $\Delta \Delta x = 0,01 \text{ cm}$ )
$g$	...	berechnete Gitterkonstante
$\Delta g$	...	Unsicherheit der berechneten Gitterkonstante

$m$	$\Delta x_{Git} / \text{cm}$	$g / \mu\text{m}$	$\Delta g / \mu\text{m}$
1	1,09	128	6
2	2,24	125	5
3	3,37	125	5
4	4,47	125	5
5	5,56	126	5
6	6,62	127	5

Anschließend werden die berechneten Gitterkonstanten gemittelt und die zugehörige Unsicherheit wird durch den Standardfehler des Mittelwerts ersetzt.

$$g = (125,9 \pm 1,1) \mu\text{m}$$

## 6.2 Auswertung - Shearing Interferometer

Beim Shearing-Interferometer werden zunächst Mittelwerte und Standardfehler des Abstandes der Streifen  $s$ , des Winkels der Streifen  $\theta$  und des lateralen Versatzes  $l$  berechnet. Die Ableseunsicherheit wird hierbei durch den Standardfehler ersetzt, es ergibt sich:

$$s = (3,2 \pm 0,3) \text{ mm} \quad \theta = (23,4 \pm 0,5)^\circ \quad l = (10,0 \pm 0,9) \text{ mm}$$

Anschließend kann mit Glg. (5) der Radius der Wellenfront  $r$  berechnet werden. Für die Wellenlänge wird die berechnete Wellenlänge des Lasers aus Kapitel 6.1  $\lambda = (537 \pm 18)$  nm hergenommen. Die Unsicherheit wird mit der Größtfehlermethode berechnet.

$$r = (150 \pm 40) \text{ m} \quad \Delta r = \frac{s}{\lambda \sin \theta} \Delta l + \frac{l}{\lambda \sin \theta} \Delta s + \frac{sl}{\lambda^2 \sin \theta} \Delta \lambda + \frac{sl \cdot \cos \theta}{\lambda \sin^2 \theta} \Delta \theta \cdot \frac{\pi}{180}$$

## 6.3 Auswertung - Polarisation

Die Messergebnisse der Intensitäten bei unterschiedlichen Winkeleinstellungen des Polarisators sollen mit dem theoretischen Verlauf verglichen werden. Hierzu werden die Messpunkte und der theoretische Verlauf (nach Glg. (7)) in einem Plot dargestellt (siehe Abbildung 26). Die in Glg. (7) geforderte Intensität ist hierbei die maximal transmittierte Intensität  $I_0 = 575$  lx durch die beiden Polarisatoren. Theoretisch würde eine Wahl auf die maximal gemessene Intensität ohne jegliche Polarisatoren ebenfalls Sinn machen, jedoch wurde zur besseren Vergleichbarkeit eben jene abgeschwächte gewählt, da die Polarisator selbst ohne Polarisationswinkel die Intensität doch deutlich verringern.

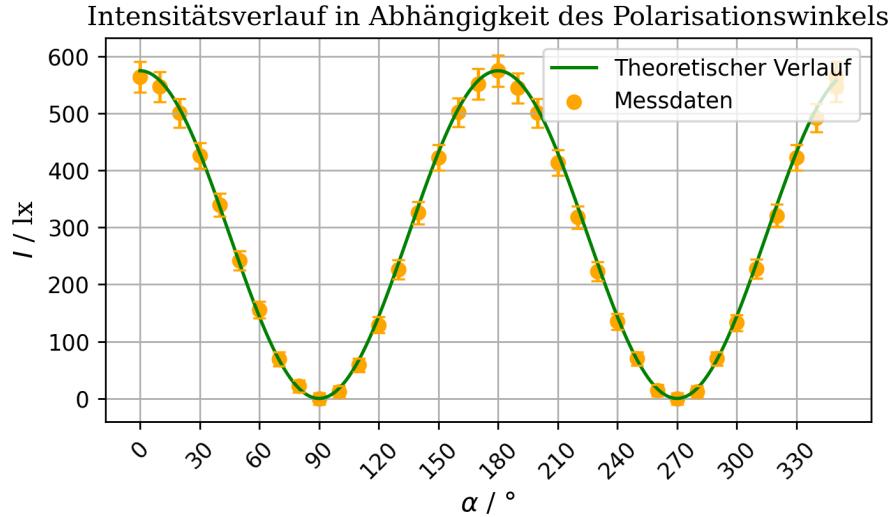


Abbildung 26: Vergleich Intensitätsverlauf bei unterschiedlichen Polarisationswinkeln zwischen gemessenen und theoretischen Werten.

Auf die restlichen Beobachtungen wird im Zuge der Diskussion noch eingegangen.

## 6.4 Auswertung - Michelson Interferometer

Abschließend wird aus der Messung des Abstandes  $\Delta x'$  beider Methoden des Interferometerarmes die Wellenlänge des Lasers  $\lambda$  erneut berechnet. Hierfür wird Glg. (6) auf die Wellenlänge  $\lambda$  umgestellt. Für  $N$  wird die gezählte Anzahl von Interferenzwechsel  $N = 100 \pm 2$  hergenommen. Die Unsicherheit wird mit der Größtfehlermethode berechnet.

$$\Delta \lambda = \lambda \left( \frac{\Delta x'}{x'} + \frac{\Delta N}{N} \right)$$

Für die beiden Längen  $\Delta x'_\odot$  und  $\Delta x'_{||}$  ergeben sich die Wellenlängen:

$$\lambda_\odot = (530 \pm 30) \text{ nm} \quad \lambda_{||} = (550 \pm 30) \text{ nm}$$

Die genaue Analyse der verschiedenen Interferenzmuster wird in Kapitel 7 Diskussion behandelt.

## 7 Diskussion

### 7.1 Diskussion - Young'scher Doppelspalt & Gitter

Im ersten Experiment wurden die Interferenzmuster einzelner Doppelspalten (DS1 bis DS4) fotografiert, daraus die Daten der Intensitätsverteilungen gewonnen und anschließend sowohl die gemessenen als auch theoretischen Verläufe dargestellt. Vergleicht man die in den einzelnen Abbildungen (Abb. 17 bis Abb. 24) dargestellten gemessenen und theoretischen Verläufe kann erkannt werden, dass die Lage der einzelnen Maxima ohne signifikante Abweichung mit der Theorie übereinstimmt. Auch die Abnahme der Intensität entspricht grob der Theorie jedoch kann hier die etwas ungenauere Bestimmung der Intensität mittels Smartphone-Kamerabild-Auswertung deutlich in der erhöhten Grundintensität erkannt werden. Insbesondere ist der Vergleich zwischen dem ersten und zweiten Doppelspalte interessant, da diese Beiden denselben Spaltabstand besitzen. Vergleicht man die Lage der 1ten Nebenmaxima kann erkannt werden, dass diese nahezu an der identischen Position sind, dies macht auch in den theoretischen Überlegungen Sinn, da in die Glg. (3) für die Interferenz nur der Spaltabstand und nicht die Spaltbreite einfließt. Vergleicht man hingegen die Intensitäten bzw. auch die theoretischen Beugungsmuster, kann erkannt werden, dass hierbei ein sichtbarer Unterschied auftritt, dies tritt durch die unterschiedlichen Spaltbreiten auf. Neben diesen Beobachtungen wurde auch die Wellenlänge des Lasers bei den unterschiedlichen Doppelspalten berechnet.

$$\lambda_{DS1} = (530 \pm 30) \text{ nm} \quad \lambda_{DS2} = (504 \pm 19) \text{ nm}$$

$$\lambda_{DS3} = (525 \pm 19) \text{ nm} \quad \lambda_{DS4} = (590 \pm 11) \text{ nm}$$

Vergleicht man diese Werte mit dem in [2] angegebenen Literaturwert für die Wellenlänge  $\lambda_{\text{Lit}} = 532 \text{ nm}$  so kann erkannt werden, dass vor allem die ersten drei Ergebnisse nicht signifikant abweichen, dies lässt auf eine korrekte Durchführung des Experiments schließen. Die etwas größere Abweichung beim 4ten Doppelspalt kann in der etwas schwierigeren Bestimmung der einzelnen Intensitätspeaks liegen.

Neben den Doppelspalten wurde dieselbe Versuchsanordnung für ein Gitter durchgeführt. Im Gegensatz zu den Doppelspalten wurde hier jedoch die Gitterkonstante über die gemessene Wellenlänge des Laser bestimmt. Für die Gitterkonstante  $g$  hat sich folgender Wert ergeben:

$$g = (125,9 \pm 1,1) \mu\text{m}$$

Um diesen Wert vergleichen zu können wird aus dem Datenblatt des Gitters ([3]) die Anzahl an Gitterstrichen pro mm herausgelesen  $gs = 8 \text{ mm}^{-1}$ . Bildet man den Kehrwert dieses Wertes erhält man den Literaturwert der Gitterkonstante  $g_{\text{Lit}} = 125 \mu\text{m}$  des verwendeten Gitters. Auch hier kann erkannt werden, dass der gemessene/berechnete Wert nicht signifikant vom Literaturwert abweicht. Dies lässt wiederum auf eine korrekte Durchführung des Experiments schließen.

### 7.2 Diskussion - Shearing Interferometer

Beim Shearing-Interferometer wurde der Radius der Wellenfront  $r = (150 \pm 40) \text{ m}$  berechnet. Für diesen Wert konnte leider kein Vergleichswert gefunden werden. Betrachtet man jedoch Abbildung 9, kann eine Aussage über das Strahlenbündel getroffen werden. In unserem Experiment handelt es sich hierbei um einen konvergenten Strahl, da die Strahlen nach rechts geneigt sind.

Jedoch war es bei diesem Experiment sehr schwer, die Werte für  $l$ ,  $\theta$  und  $s$  abzulesen, da das Interferenzmuster am Glas am oberen Ende des Interferometers nur schwer sichtbar und mit äußerst schlechten Kontrast dargestellt ist. Dies verfälscht natürlich die Parameter, was zu einer Abweichung des Ergebnisses führt.

### 7.3 Diskussion - Polarisation

Um das Polarisationsverhalten qualitativ gut auswerten bzw. beobachten zu können wird ein Polarisator in den Strahlengang gebracht, sodass die Ausgangspolarisation eindeutig bestimmt werden kann. Dies ist notwendig da der Laser keine perfekte/bekannte Polarisation besitzt. Anschließend wird ein zweiter Polarisator in den Strahlengang gebracht um das Polarisationsverhalten beobachten zu können. Hierfür wurde die Intensität bei unterschiedlichen Polarisationswinkeln (zwischen 1ten und 2ten Polarisator) gemessen. Diese Messpunkte wurde gemeinsam mit dem theoretischen Intensitätsverlaufs je Polarisationswinkel in einem Diagramm aufgetragen (siehe Abbildung 26). Vergleicht man diese Verläufe sieht man, dass keine signifikante Abweichung zwischen Messung und Theorie existiert, dies lässt wiederum auf eine korrekte Durchführung schließen. Zusätzlich kann an den markanten Punkten  $90^\circ$  (dies entspricht dem Fall zweier gekreuzter Polarisatoren) bzw.  $180^\circ$  die Theorie von keiner bzw. maximal durchgelassener Intensität bestätigt werden. Anschließend wurde um die Gesetze von Fresnel und Arago überprüfen zu können ein weiterer (3ter) Polarisator in den Strahlengang gebracht. Hierbei wurde beobachtet, dass ein Einbringen um  $0^\circ$  (somit gleiche Polarisationsrichtung wie der erste Polarisator) bzw.  $90^\circ$  (gleiche Polarisationsrichtung wie der 2te (nun 3te) Polarisator) keine Effekt auf die gemessene Intensität hat und diese somit immer noch 0 ist. Dies entspricht auch der Theorie, da nach wie vor eine Kreuzung der Polarisationsrichtungen vorliegt und somit keine gemeinsame Komponente vorhanden ist. Wird der Winkel jedoch gegen  $45^\circ$  verändert bzw. auch  $135^\circ$  (ect.) wird wieder ein Intensitätsmaximum gemessen, dieses ist zwar aufgrund der prinzipiellen Abschwächung je Polarisator wieder geringer, jedoch ist dies trotzdem eindeutig ein Peak. Auch dies ist geht mit der Theorie konform, da nun eine weitere Polarisierung um  $45^\circ$  stattfindet und somit zwischen 2ten und 3ten Polarisator keine Orthogonalität mehr vorliegt und daher auch gemeinsame Komponenten gemessen werden können.

### 7.4 Diskussion - Michelson Interferometer

Zuletzt werden die Ergebnisse des Michelson Interferometers diskutiert. Als erstes wurde die Wellenlänge des Laser  $\lambda$  über das konzentrische und das parallele Interferenzmuster berechnet.

$$\lambda_{\odot} = (530 \pm 30) \text{ nm} \quad \lambda_{||} = (550 \pm 30) \text{ nm}$$

Vergleicht man dies mit dem Literaturwert  $\lambda_{\text{Lit}} = 532 \text{ nm}$  aus [2], kann man erkennen, dass die experimentell bestimmten Werte nicht signifikant vom Literaturwert abweichen. Auch der experimentell bestimmte Wert  $\lambda = (537 \pm 18) \text{ nm}$  bei den Doppelpalten aus Kapitel 6.1 weicht nicht signifikant davon ab, was auf eine korrekte Durchführung des Experiments schließen lässt. Beim parallelen Verfahren ist die Abweichung im Vergleich zu den konzentrischen Kreisen etwas größer. Dies ist auf die erschwerte Messung der Maxima und Minima Änderung zurückzuführen.

Weiters wird das Michelson Interferometer auf verschiedene Eigenschaften überprüft. Beim Beginn des Experiments konnte sofort erkannt werden, dass das Interferometer besonders Empfindlich bezüglich Erschütterungen und Temperaturänderungen ist. Bereits eine kleine Berührung des Tisches oder der Luftzug der geöffneten Tür im Laborraum veränderte das Interferenzbild bereits stark. Für die Messung musste daher besonders genau und ruhig gearbeitet werden. Auch die Klimaanlage im Raum musste ausgeschaltet werden, um das Ergebnis nicht zu verfälschen.

Bei den Interferenzbildern am Schirm und Laser aus Abbildung 10 kann gut erkannt werden, dass es sich bei den beiden Bilder um konstruktive und destruktive Interferenz handelt. Dies stimmt genau mit der Theorie überein, dass an beiden 'Ausgängen' die komplementären Interferenzmuster auftreten.

Anschließend werden Polarisatoren in den Strahlengang platziert (siehe Abbildung 13). Nach dem ersten Polarisator P1 (a) wird das Licht im  $45^\circ$  Winkel polarisiert. Hierbei kann noch keine große Änderung erkannt werden, da sich der Lichtstrahl am Strahlenteiler weiters wie gewohnt aufteilen kann. Nach einer horizontalen Polarisationsfolie kann bereits eine leichte Verzerrung des Interferenzmusters erkannt werden, da der vertikale Teil eines Strahles nun nicht durchgelassen wird. Durch Hinzufügen einer weiteren Folie (c) wird die Verzerrung verstärkt, da nun beide Teilstrahlen nur mehr eine horizontale Komponente besitzen. Dreht man eine der beiden Folien in die vertikale Position, ist kein Interferenzmuster mehr erkennbar, da die beiden

Teilstrahlen keine gemeinsame Komponente mehr besitzen. Setzt man jedoch nun einen weiteren Polarisator P3 am Ende des Strahlengangs (Abbildung 14) und dreht diesen auf  $45^\circ$ , ist wieder ein Interferenzmuster erkennbar, da beide Strahlen wieder in  $45^\circ$  polarisiert werden. Dies ist möglich, da die Information immer noch im Strahl enthalten ist, dies stimmt mit den Gesetzen von Fresnel und Arago überein.

Abschließend kann noch eine Aussage über den Wechsel zwischen Maximum und Minimum bei der Änderung des Interferometerarmes getroffen werden. Der Wechsel findet genau bei der halben Wellenlänge  $\lambda/2$  statt, was mit der Theorie übereinstimmt.

## 8 Zusammenfassung

Im ersten Experiment wurde die Wellenlänge  $\lambda$  des verwendeten Lasers bei unterschiedlichen Doppelspalten bestimmt.

$$\begin{aligned}\lambda_{DS1} &= (530 \pm 30) \text{ nm} & \lambda_{DS2} &= (504 \pm 19) \text{ nm} \\ \lambda_{DS3} &= (525 \pm 19) \text{ nm} & \lambda_{DS4} &= (590 \pm 11) \text{ nm}\end{aligned}$$

Zusätzlich wurden die Interferenzmuster fotografiert und aus diesen die Daten für einen Intensitätsverlauf gewonnen. Diese wurde gemeinsam mit den theoretischen Intensitätsverläufen in mehreren Diagrammen dargestellt (siehe Abb. 17 bis Abb. 24).

Außerdem wurde derselbe Versuchsaufbau für die Bestimmung einer Gitterkonstante  $g$  eines Beugungsgitters verwendet und diese somit berechnet.

$$g = (125,9 \pm 1,1) \mu\text{m}$$

Beim zweiten Versuch wurde der Radius der Wellenfront  $r$  mittels einem Shearing-Interferometer experimentell bestimmt.

$$r = (150 \pm 40) \text{ m}$$

Im dritten Teil des Experiments wurden die Intensitäten bei unterschiedlichen Polarisationswinkeln gemessen und mit dem theoretischen Intensitätsverlauf über unterschiedliche Polarisationswinkel verglichen. Zusätzlich wurden die Gesetze von Fresnel und Arago überprüft bzw. veranschaulicht.

Mit dem Michelson-Interferometer wurde die Wellenlänge  $\lambda$  mit dem konzentrischen und dem parallelen Interferenzmuster bestimmt.

$$\lambda_{\odot} = (530 \pm 30) \text{ nm} \quad \lambda_{||} = (550 \pm 30) \text{ nm}$$

Weiters wurde das Interferometer auf Empfindlichkeit und Auswirkung von Polarisation untersucht.

## 9 Literaturverzeichnis

- [1] Wolfgang Demtröder. *Experimentalphysik 2*. Springer-Verlag GmbH Deutschland, 2017.
- [2] Joachim Krenn. Interferenz und polarisation. [https://moodle.uni-graz.at/pluginfile.php/1762273/mod\\_resource/content/1/Versuch\\_Interferenz\\_Polarisation\\_v1\\_03a.pdf](https://moodle.uni-graz.at/pluginfile.php/1762273/mod_resource/content/1/Versuch_Interferenz_Polarisation_v1_03a.pdf), 2022. Accessed: 2022-05-26.
- [3] Phywe. Phywe 08534. [https://www.phywe.de/geraete-zubehoer/optische-komponenten-systeme/gitter-8-striche-mm\\_1414\\_2345/](https://www.phywe.de/geraete-zubehoer/optische-komponenten-systeme/gitter-8-striche-mm_1414_2345/), 2022. Accessed: 2022-06-02.
- [4] Sauter. Sauter so 200k. <https://www.pkelektronik.com/media/downloads/b/e/bedienungsanleitung-%20sauter%20lichtmessgeraet%20so%20200k.pdf>, 2022. Accessed: 2022-05-26.

## 10 Anhang

### 10.1 Python-Code

```
1 # -*- coding: utf-8 -*-
2 """
3 Created on Fri May 27 16:20:55 2022
4
5 @author: Fabian Michael Dixer
6 """
7
8 from numpy import *
9 from matplotlib.pyplot import *
10 from sklearn.linear_model import LinearRegression
11 from scipy.optimize import curve_fit
12 import math as m
13
14 path='G:\\shortcut-targets-by-id\\1J8znlRK033RDev7DZN8337wJKXN8U7Qe\\L2 -
    Fortgeschrittenenpraktikum 2\\2. Interferometrie\\'
15 files = ['Spalt1.csv', 'Spalt2.csv', 'Spalt3.csv', 'Spalt4.csv', 'Gitter.csv']
16
17 lam = 532 * 10**(-9)
18 z = 260.5 *10**(-2)
19 dz = 0.5 *10**(-2)
20 dx = 0.01 * 10**(-2)
21 spalta = [0.25*10**(-3), 0.25*10**(-3), 0.5*10**(-3), 1.00*10**(-3)] # Spaltabstand d
22 spaltb = [0.2*10**(-3), 0.1*10**(-3), 0.1*10**(-3), 0.1*10**(-3)] # Spaltbreite D
23 bildbreite = 8
24
25 #-----Allgemeines-----
26 #Formel anlegen f r theoretische Berechnung von Interferenz und Beugung
27 def calcint(x, d):
28     return 0.5*(1 + cos((2*pi*x*d)/(lam*z)))
29
30 def calcbeug(x,D):
31     return sin(pi*x*D/(lam*z))**2 / (pi*x*D/(lam*z))**2
32
33 #Maximum der Intensit tsverteilung finden um anschlie end die Intensit t auf 1 normieren
34 #zu k nnen
35 def findmax(graustufe):
36     gmax = graustufe[600]
37     for i in range(600, 650):
38         if graustufe[i] > gmax:
39             gmax = graustufe[i]
40     return gmax
41 #Normierung der Intensit t auf 1
```

```
42 def scaledgrau (graustufe):
43     scaledg = []
44     faktor = 1/findmax(graustufe)
45     for i in range(len(graustufe)):
46         scaledg.append(graustufe[i]*faktor)
47     return scaledg
48
49 #-----Versuch 1 Doppelsplaten-----
50 #Schleife ber alle Bild-Files f r die unterschiedlichen Plots
51
52 for i in range(len(spalta)):
53     my_data = genfromtxt(path + files[i], delimiter=';', skip_header=1) #einlesen der Daten
54     pixel = my_data[:,0] #Daten in Variablen speichern
55     graustufen = scaledgrau(my_data[:,1])
56     pixelfaktor = bildbreite / pixel[-1] #Ausrechnen des Faktors von Pixel zu Bildbreite
57     xtheo = linspace(-4*10**(-2) , 4*10**(-2), 1000) #Variable f r theoretischen Verlauf
58     anlegen
59     xplot = linspace(-4 , 4, 1000)
60     interferenz = calcint(xtheo, spalta[i])
61
62     #print("pixelfaktor: " , pixelfaktor)
63     for ii in range(len(pixel)):
64         pixel[ii] = pixel[ii] * pixelfaktor - 4
65
66     #Plotten der Daten
67     fig = figure(figsize=(6,3), dpi=250)
68     main_axes = fig.add_axes([0.1,0.1,0.8,0.8])
69
70     main_axes.set_title('Interferenz', fontsize=12, fontname='serif')
71     main_axes.set_xlabel('x / cm', fontsize=12, fontname='serif')
72     main_axes.set_ylabel('I / 1', fontsize=12, fontname='serif')
73     grid()
74
75     plot(pixel, graustufen, color='orange', label='Messdaten')
76     plot(xplot, interferenz, color='green', label='Theoretischer Verlauf')
77
78     legend()
79
80     savefig(path + 'Auswertung\\' + 'Interferenz_%i.png' % (i+1), bbox_inches='tight')
81
82 #Wiederholung von oben f r die Beugung
83 for i in range(len(spaltb)):
84     my_data = genfromtxt(path + files[i], delimiter=';', skip_header=1)
85     pixel = my_data[:,0]
86     graustufen = scaledgrau(my_data[:,1])
87     pixelfaktor = bildbreite / pixel[-1]
88     xtheo = linspace(-4*10**(-2) , 4*10**(-2), 1000)
89     xplot = linspace(-4 , 4, 1000)
90     beugung = calcbeug(xtheo, spaltb[i])
91
92     for ii in range(len(pixel)):
93         pixel[ii] = pixel[ii] * pixelfaktor - 4
94
95     #Plotten der Daten
96     fig = figure(figsize=(6,3), dpi=250)
97     main_axes = fig.add_axes([0.1,0.1,0.8,0.8])
98
99     main_axes.set_title('Beugung', fontsize=12, fontname='serif')
100    main_axes.set_xlabel('x / cm', fontsize=12, fontname='serif')
101    main_axes.set_ylabel('I / 1', fontsize=12, fontname='serif')
102    grid()
103
104    plot(pixel, graustufen, color='orange', label='Messdaten')
105    plot(xplot, beugung, color='green', label='Theoretischer Verlauf')
106
107    legend()
108
109    savefig(path + 'Auswertung\\' + 'Beugung_%i.png' % (i+1), bbox_inches='tight')
```

```
109
110 #Ebenso Wiederholung f r das Gesamtbild
111 for i in range(len(spalta)):
112     my_data = genfromtxt(path + files[i], delimiter=';', skip_header=1)
113     pixel = my_data[:,0]
114     graustufen = scaledgrau(my_data[:,1])
115     pixelfaktor = bildbreite / pixel[-1]
116     xtheo = linspace(-4*10**(-2) , 4*10**(-2) , 1000)
117     xplot = linspace(-4 , 4, 1000)
118     beugung = calcbeug(xtheo, spalb[i])
119     interferenz = calcint(xtheo, spalta[i])
120     intbeug = beugung * interferenz
121
122     for ii in range(len(pixel)):
123         pixel[ii] = pixel[ii] * pixelfaktor - 4
124
125     #Plotten der Daten
126     fig = figure(figsize=(6,3), dpi=250)
127     main_axes = fig.add_axes([0.1,0.1,0.8,0.8])
128
129     main_axes.set_title('Intensit tsverlauf Gesamt', fontsize=12, fontname='serif')
130     main_axes.set_xlabel('$x$ / cm', fontsize=12, fontname='serif')
131     main_axes.set_ylabel('$I$ / 1', fontsize=12, fontname='serif')
132     grid()
133
134     plot(pixel, graustufen, color='orange', label='Messdaten')
135     plot(xplot, intbeug, color='green', label='Theoretischer Verlauf')
136
137     legend()
138
139     savefig(path + 'Auswertung\\' + 'IntBeug_%i.png' % (i+1), bbox_inches='tight')
140     #written eines Files f r korrekte darstellung der Pixel Achse in cm
141     f = open(path + 'Auswertung\\' + 'Spalt%i_x.txt' % (i+1), "w")
142     for iii in range(len(pixel)):
143         f.write('%f ; %f\n' % (pixel[iii], graustufen[iii]))
144     f.close()
145
146 #gemessene Peak-Positionen je Spalt im positiven sowie negativen
147 spalt1_pp = [0.464088, 1.120758, 1.670087, 2.238358, 2.857143]
148 spalt1_mp = [-0.546172, -1.152328, -1.707972, -2.213102, -2.844515]
149
150 spalt2_pp = [0.488574, 0.980299, 1.579196, 2.152876, 2.751773]
151 spalt2_mp = [-0.501182, -1.062254, -1.654846, -2.133964, -2.688731]
152
153 spalt3_pp = [0.271293, 0.523659, 0.757098, 1.034700, 1.312303]
154 spalt3_mp = [-0.315457, -0.561514, -0.839117, -1.110410, -1.375394]
155
156 spalt4_pp = [0.161010, 0.318863, 0.457774, 0.628256, 0.760852]
157 spalt4_mp = [-0.135754, -0.306235, -0.470403, -0.615627, -0.773481]
158
159 #formel zur Berechnung von lambda und dessen Unsicherheit anlegen
160 def calclam (m, d, x):
161     return (d*x)/(z*m)
162
163 def calclamd (m, d, x):
164     return d/(z*m) * dx + (d*x)/(z**2 * m) * dz
165
166 #Listen anlegen f r die einzelnen x-Differenzen je Spalt
167 x_spalt1, x_spalt2, x_spalt3, x_spalt4 = [], [], [], []
168
169 #Berechnung der x-Abst nde
170 for i in range(len(spalt1_pp)):
171     x_spalt1.append((spalt1_pp[i] + abs(spalt1_mp[i]))/2 *10**(-2))
172     x_spalt2.append((spalt2_pp[i] + abs(spalt2_mp[i]))/2 *10**(-2))
173     x_spalt3.append((spalt3_pp[i] + abs(spalt3_mp[i]))/2 *10**(-2))
174     x_spalt4.append((spalt4_pp[i] + abs(spalt4_mp[i]))/2 *10**(-2))
175
176 #Listen f r die Wellenl nge und deren Unsicherheit je Spalt anlegen
```

```

177 lam_sp1, lam_sp2, lam_sp3, lam_sp4 = [], [], [], []
178 dlam_sp1, dlam_sp2, dlam_sp3, dlam_sp4 = [], [], [], []
179
180 #Berechnung der Wellenlänge und Unsicherheit je Spalt
181 for i in range(len(x_spalt1)):
182     lam_sp1.append(calclam((i+1), spalta[0], x_spalt1[i])*10**9)
183     lam_sp2.append(calclam((i+1), spalta[1], x_spalt2[i])*10**9)
184     lam_sp3.append(calclam((i+1), spalta[2], x_spalt3[i])*10**9)
185     lam_sp4.append(calclam((i+1), spalta[3], x_spalt4[i])*10**9)
186     dlam_sp1.append(calclamd((i+1), spalta[0], x_spalt1[i])*10**9)
187     dlam_sp2.append(calclamd((i+1), spalta[1], x_spalt2[i])*10**9)
188     dlam_sp3.append(calclamd((i+1), spalta[2], x_spalt3[i])*10**9)
189     dlam_sp4.append(calclamd((i+1), spalta[3], x_spalt4[i])*10**9)
190
191 #Werteausgabe für Protokoll
192 #for i in range(len(lam_sp3)):
193 #    print("m = %i, dx = %f, lambda = %f nm" % (i+1, x_spalt4[i]*10**2, lam_sp4[i],
194 #                                                 dlam_sp4[i]))
195
196 #Berechnung von Mittelwert und Standardabweichung des Mittelwerts der Wellenlängen je
197 #Spalt
198 mean_lam = [mean(lam_sp1), mean(lam_sp2), mean(lam_sp3), mean(lam_sp4)]
199 std_lam = [std(lam_sp1), std(lam_sp2), std(lam_sp3), std(lam_sp4)]
200
201 #Ausgabe der Messwerte für Protokoll
202 #print('Mittelwerte', mean_lam)
203 #print('dMittelwerte', std_lam)
204 #print("mittlerer lambda", mean(mean_lam), mean(std_lam))
205 #-----Versuch 1 Gitter-----
206 #hnliche Vorgehensweise wie für die Doppelspalte
207 my_data= genfromtxt(path + files[-1], delimiter = ';', skip_header= 1)
208 bildbreite2 = 14
209 pixel = my_data[:,0] #Daten in Variablen speichern
210 graustufen = scaledgrau(my_data[:,1])
211 pixelfaktor = bildbreite2 / pixel[-1] #Ausrechnen des Faktors von Pixel zu Bildbreite
212
213 #print("pixelfaktor: " , pixelfaktor)
214
215 #Ausrechnen der x-Achse
216 for ii in range(len(pixel)):
217     pixel[ii] = pixel[ii] * pixelfaktor - 7
218
219 #Plotten der Daten
220 fig = figure(figsize=(6,3), dpi=250)
221 main_axes = fig.add_axes([0.1,0.1,0.8,0.8])
222 main_axes.set_title('Intensitätsverlauf am Beugungsgitter', fontsize=12, fontname='serif')
223 main_axes.set_xlabel('$x$ / cm', fontsize=12, fontname='serif')
224 main_axes.set_ylabel('$I$ / 1', fontsize=12, fontname='serif')
225 grid()
226
227 plot(pixel, graustufen, color='orange', label='Messdaten')
228
229 legend()
230
231 savefig(path + 'Auswertung\\' + 'Gitter.png', bbox_inches='tight')
232 f = open(path + 'Auswertung\\' + 'Gitter_x.txt', "w")
233 for iii in range(len(pixel)):
234     f.write('%f ; %f\n' % (pixel[iii], graustufen[iii]))
235 f.close()
236
237 #gemessene Peaks des Gitterinterferenzmusters
238 gitter_pp = [0.968726, 2.052385, 3.212666, 4.318217, 5.456607, 6.562158]
239 gitter_mp = [-1.220485, -2.424550, -3.519156, -4.624707, -5.664582, -6.682565]
240
241 #Berechnung der x-Abstände des Gitters
242 x_gitter = []

```

```

243 for i in range(len(gitter_pp)):
244     x_gitter.append((gitter_pp[i] + abs(gitter_mp[i]))/2 * 10**(-2))
245
246 #Formel zur Berechnung der Gitterkonstante und deren Unsicherheit anlegen
247 def calcd (m, x):
248     return (m*mean(mean_lam)*10**(-9)*z/x)
249
250 def calcdd (m,x):
251     return m*z/x * mean(std_lam)*10**(-9) + m*mean(mean_lam)*10**(-9)/x * dz + m*mean(
252         mean_lam)*10**(-9)*z/x**2 *dx
253
254 #Gitterkonstante und UNSicherheit je Peak berechnen
255 gitterd = []
256 gitterdd = []
257 for i in range(len(x_gitter)):
258     gitterd.append(calcd((i+1), x_gitter[i])*10**(6))
259     gitterdd.append(calcdd((i+1), x_gitter[i])*10**(6))
260
261 #Ausgabe der Messwerte f rs Protokoll
262 #for i in range(len(x_gitter)):
263 #    print('x_gitter', x_gitter[i]*10**(2))
264 #print('Gitterkonstante', gitterd, gitterdd)
265
266 print('Mittelwert Gitter', mean(gitterd), std(gitterd))
267 #-----Versuch 3 Polarisation-----
268 #Einlesen der Daten
269 file = 'polarisation.txt'
270 my_data = genfromtxt(path + file, delimiter=';')
271
272 #Aufteilen auf die jeweiligen Listen f r Winkel und Intensit t
273 winkel = my_data[:,0]
274 intensit_t = my_data[:,2]
275 dint_d = 3*10**(-2) #Prozentuelle Unsicherheit der Intensit t
276 i0 = 575 #1090 maximal gemessene Intensit t
277
278 #Berechnung der Unsicherheit der Intensit t
279 dint = []
280 for inten in intensit_t:
281     dint.append(inten*dint_d + 10)
282
283 #print(dint)
284
285 #Formel f r den theoretischen Intensit tsverlaufs je Polarisationswinkel
286 def calcpol (alp):
287     return i0 * cos(alp*2*pi/360)**2
288
289 alp_theo = linspace(0, 350, 1000)
290 int_theo = calcpol(alp_theo)
291
292 #Plotten der Daten
293 fig = figure(figsize=(6,3), dpi=250)
294 main_axes = fig.add_axes([0.1,0.1,0.8,0.8])
295 main_axes.set_title('Intensit tsverlauf in Abh ngigkeit des Polarisationswinkels',
296                      fontsize=12, fontname='serif')
297 main_axes.set_xlabel(' $ $ / ', fontsize=12, fontname='serif')
298 main_axes.set_ylabel('$I$ / $I_0$', fontsize=12, fontname='serif')
299 grid()
300 xticks(arange(0,350, step=30), rotation=45)
301 plot(alp_theo, int_theo, color='green', label='Theoretischer Verlauf')
302 scatter(winkel, intensit_t, color='orange', label='Messdaten')
303 errorbar(winkel, intensit_t, yerr= dint, linestyle='None', capthick=1, capsiz
304 e=3, color='orange')
305 legend()
306 savefig(path + 'Auswertung\\' + 'Polarisation.png', bbox_inches='tight')
307

```

```
308 #-----Versuch 2 Shearing-----
309 ss = [3.5,3.0,3.0]
310 sl = [9.0,11.0,10.0]
311 sttheta = [24,23,23]
312
313 print(mean(ss), std(ss))
314 print(mean(sl), std(sl))
315 print(mean(sttheta), std(sttheta))
```