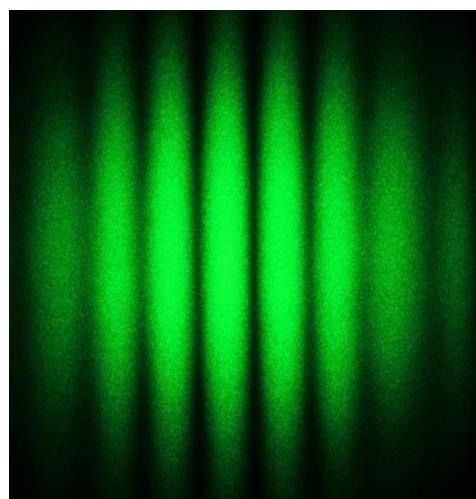


Fortgeschrittenenpraktikum 1/2



Interferenz und Polarisation

- Young'scher Doppelspalt, Beugungsgitter
- Shearing Interferometer, Wellenfront-Analyse
- Polarisations-Analyse
- Michelson Interferometer

Joachim Krenn

UNIVERSITÄT GRAZ
UNIVERSITY OF GRAZ



Inhalt

1.	Einführung und Übersicht	3
1.1.	Überblick zur Aufgabenstellung	5
1.2.	Wichtige Informationen zu den Experimenten	6
1.3.	Notwendige Vorkenntnisse	7
1.4.	Empfohlene Literatur	7
2.	Experimente	7
2.1.	Aufgabe 1: Young'scher Doppelspalt, Beugungsgitter	7
2.1.1.	Grundlagen	7
2.1.2.	Versuchsdurchführung	8
2.1.3.	Kontrollfragen.....	9
2.2.	Aufgabe 2: Shearing-Interferometer, Wellenfront-Analyse	9
2.2.1.	Grundlagen	9
2.2.2.	Versuchsdurchführung	10
2.2.3.	Kontrollfragen.....	10
2.3.	Aufgabe 3: Polarisations-Analyse	10
2.3.1.	Grundlagen.....	10
2.3.2.	Versuchsdurchführung.....	11
2.3.3.	Kontrollfragen	11
2.4	Aufgabe 4: Michelson-Interferometer	12
2.4.1	Grundlagen.....	12
2.4.2	Versuchsdurchführung	13
2.4.3.	Kontrollfragen	14
3.	Informationen zu Auswertung und Protokoll	14
4.	Appendix	15

1. Einführung und Übersicht

Im Folgenden werden zunächst die relevanten physikalischen Grundlagen dieses Praktikumsteils kurz angesprochen. Die spezifischen Grundlagen finden sich dann in den Abschnitten zu den jeweiligen Experimenten. In jedem Fall wird auf die Wiederholung der meisten elementaren Aspekte und auf Zwischenschritte in Herleitungen verzichtet, diese können in einschlägigen Lehrbüchern nachgeschlagen werden. Spezifische Literaturangaben in diesem Skriptum beziehen sich auf das Lehrbuch von Wolfgang Demtröder, Experimentalphysik 2 (Springer).

Licht ist eine elektromagnetische Welle, die sich – im sichtbaren Spektralbereich – mit Vakuumwellenlängen λ_0 von etwa 400 bis 780 nm mit einer Geschwindigkeit c_0 (im Vakuum) von etwa 3×10^8 m/s ausbreitet. Die Frequenzen ν sind durch $\lambda_0\nu = c_0$ bestimmt. Der elektrische und der magnetische Feldvektor stehen normal zueinander und normal zur Ausbreitungsrichtung des Lichts. Letztere ist durch den Wellenvektor \mathbf{k} bestimmt, dessen Betrag der Wellenzahl $2\pi/\lambda$ entspricht. Für die Lichtausbreitung in einem Medium der Brechzahl n gilt $(\lambda_0/n)\nu = c_0/n$.

Die Welleneigenschaften von Licht können vernachlässigt werden, wenn sämtliche Abmessungen der mit Licht wechselwirkenden Komponenten deutlich größer sind als die Lichtwellenlänge (Geltungsbereich der geometrischen Optik) und keine kohärenten Überlagerungseffekte von zwei oder mehr Lichtwellen (wie in Interferometern) auftreten. Bei Gegenständen mit Abmessungen im Bereich der Wellenlänge bzw. in Abhängigkeit von der Beobachtungsgeometrie auch bei größeren Längenskalen (vgl. z.B. Abb. 1a) kommt es aber zum Effekt der Beugung. Das heißt, Licht erreicht auch Gebiete im geometrischen Schatten.

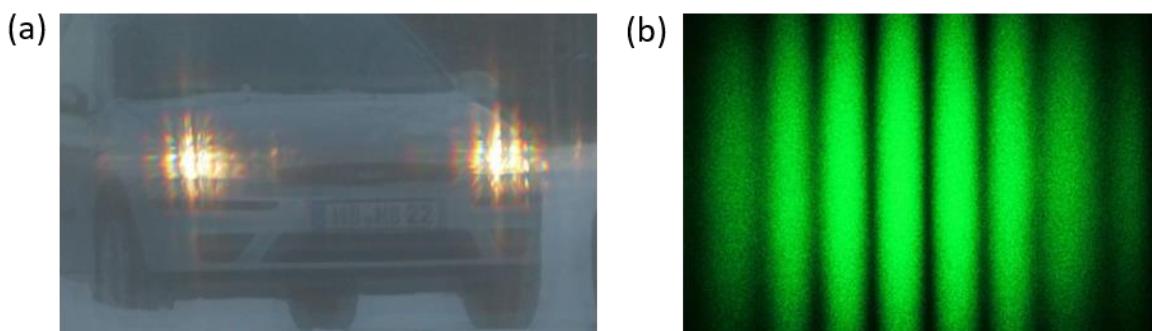
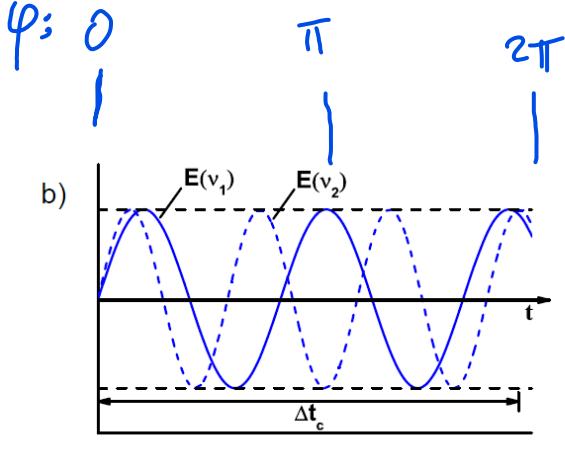


Abb.1. Interferenz und Beugung. (a) Beugung durch eine feinmaschige Gardine (© D. Zawischa, Univ. Hannover), (b) mit einem grünen Laser generierte Interferenzstreifen.

Interferenz bezeichnet die (zeitlich konstante) Überlagerung zweier oder mehrerer Lichtwellen (Abb. 1b). Je nach ihrer gegenseitigen Phasenlage kommt es dabei zur Verstärkung (konstruktive Interferenz) oder Abschwächung (destruktive Interferenz) der entstehenden Feld- und Intensitätsverteilung, bezogen auf die Einzelwellen. Zwei Wellen der gleichen maximalen Feldamplitude E_0 ergeben somit eine maximale Feldstärke von $2E_0$ und eine maximale Intensität, die der vierfachen Intensität der Einzelwelle entspricht.

Kohärenz bezeichnet die Fähigkeit von Lichtwellen zur Interferenz, definiert über ihre Phasenbeziehungen. Zum Verständnis der Kohärenz einer Lichtquelle mit einer bestimmten spektralen Breite (wie in Abb. 2a dargestellt) betrachtet man zwei Frequenzen mit dem Abstand $\Delta\nu$. Diese sind interferenzfähig, so lange sich ihre Phasendifferenz um weniger als 2π ändert (Abb. 2b). Damit ergibt

$$\tau = \frac{1}{\nu} \rightarrow \Delta t_c = \frac{1}{\Delta \nu}$$



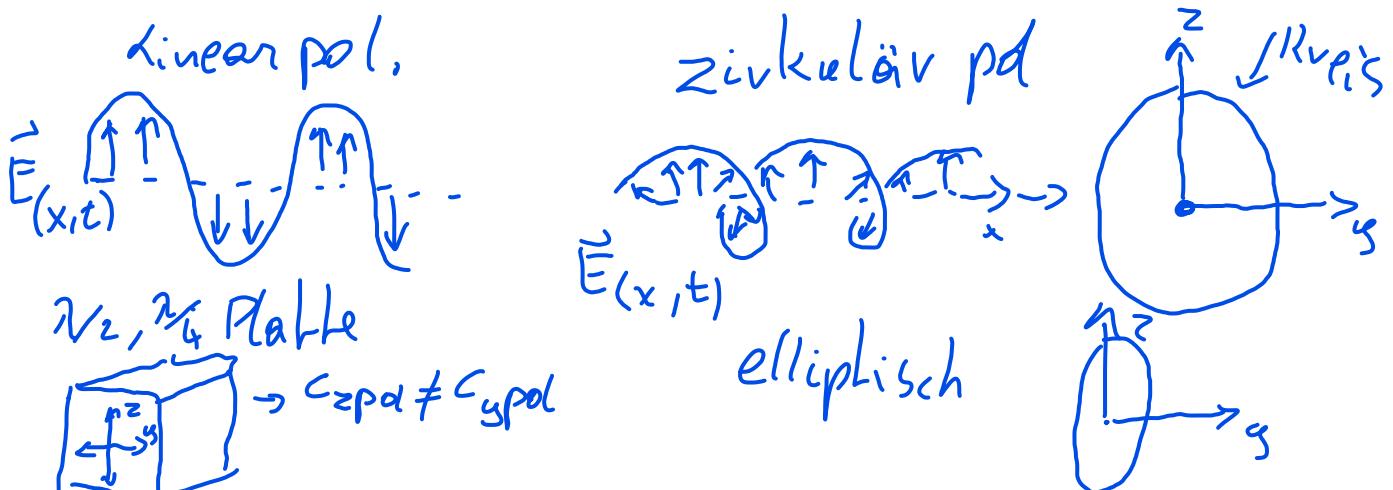
4

Abb. 2. Spektrale Breite und Kohärenzzeit bzw. -länge. (a) Zwei Frequenzen eines Frequenzbands mit dem Abstand $\Delta\nu$ haben (b) nach der Kohärenzzeit Δt_c einen Phasenunterschied von 2π . © Thorlabs.

sich die **Kohärenzzeit** als $\tau_c = 1/\Delta\nu$. Der dabei vom Licht zurückgelegte Weg, die **Kohärenzlänge** entspricht $L_c = c\Delta t_c$. Analoge Überlegungen zur Phasendifferenz ergeben die Bedingungen für **räumliche Kohärenz**, welche etwa die Interferenzfähigkeit einer ausgedehnten thermischen Lichtquelle definiert.

In **Interferometern** werden Lichtwellen überlagert, wobei zwei (z.B. in Michelson- oder Mach-Zehnder Interferometern) oder viele Wellen (z.B. in Fabry-Perot Interferometern) zur Überlagerung gelangen. Oft wird die gemessene Änderung der Interferenzbedingung dazu benutzt, um einen (optischen) Weglängenunterschied zu detektieren und damit beispielsweise kleinste Längenänderungen oder auch Brechzahlunterschiede festzustellen. Die interferometrische Messmethode erlaubt extrem genaue Messungen, so ist ein Michelson-Interferometer das zentrale Element der derzeit empfindlichsten Gravitationswellen-Detektoren, mit einer Messgenauigkeit von etwa 10^{-18} m (entsprechend einem 1/1000 eines Protonendurchmessers; siehe www.ligo.caltech.edu).

Eine wichtige Bestimmungsgröße von Lichtwellen ist die Richtung des elektrischen Feldvektors, definiert als die **Polarisationsrichtung** (somit ist aber auch die Richtung des magnetischen Feldvektors festgelegt). Licht kann beispielsweise linear (der elektrische Feldvektor zeigt während der Ausbreitung immer in die gleiche Richtung) oder elliptisch bzw. zirkular polarisiert sein (der elektrische Feldvektor überstreicht, beobachtet entlang der Ausbreitungsrichtung eine Ellipse bzw. einen Kreis). **Polarisatoren**, also Komponenten zur Herstellung eines bestimmten Polarisationszustandes gibt es in verschiedenen Formen. Einfache Polarisationsfolien beruhen auf der bevorzugten Absorption von Licht einer Feldorientierung, während doppelbrechende Kristalle nichtabsorbierende und damit verlustfreie Lichtpolarisation ermöglichen. Damit ist beispielsweise auch die Drehung der linearen Polarisationsrichtung („ $\lambda/2$ Platte“) und die Umwandlung von linearer in zirkulare Polarisation (und vice versa, „ $\lambda/4$ Platte“) möglich. Eine wichtige Rolle spielt die Polarisation auch bei der Interferenz. Hier muss nämlich zumindest eine gemeinsame Feldkomponente der Teilwellen vorliegen, zwei zueinander senkrecht polarisierte Lichtwellen interferieren also nicht.



1.1. Überblick zur Aufgabenstellung

Diese Aufstellung dient Ihrem Überblick, die detaillierten Beschreibungen und Aufgabestellungen sind bei den jeweiligen Experimenten zu finden.

Die Experimente werden auf einem optischen Tisch mit Granitplatte durchgeführt, die meisten optischen Elemente sind auf einer zusätzlich darauf befestigten Metallplatte mit Bohrungen in einem quadratischen 25 mm Raster fixiert (Abb. 3).



Abb. 3. Experimenteller Aufbau in Seitenansicht und Aufsicht. (OT) Optischer Tisch (Granitplatte), (GP) Grundplatte aus Aluminium mit Bohrungen im quadratischen 25 mm Raster, (MI) Michelson Interferometer, (L) Laser mit (GF) Graufilter, (St) Ständer, (KL) Klemme, (SP) Spiegel, (S) Schirm.

Bauen Sie für jedes Experiment die optischen Elemente nach der jeweiligen Vorgabe auf. Wie aus Abb. 3 ersichtlich, werden die optischen Elemente durch Ständer (ST) auf einer einheitlichen Höhe gehalten, in welcher der vom Laser (L) emittierte Strahl horizontal geführt wird. Die Ständer werden durch Klemmen (KL) auf der Unterlage fixiert, wobei die Klemmen durch Inbusschrauben auf der Metallplatte befestigt werden.

Überlegen Sie in jedem Fall vorab, mit welcher Abfolge bzw. Anzahl von Messungen Sie einen aussagekräftigen Wert für den systematischen Fehler bekommen und führen Sie die Messungen entsprechend durch.

$$\begin{aligned} & \text{Diagramm eines Doppelspaltes: Ein vertikaler Balken von Breite } b \text{ ist in zwei Spalten von Breite } a_n \text{ unterteilt. Der Abstand zwischen den Spalten ist } d. \\ & \text{Berechnung der Wellenlänge } \lambda: \quad \left. \begin{aligned} n\lambda &= b \sin(\alpha_n) \\ \frac{y_n}{d} &= \tan(\alpha_n) \end{aligned} \right\} \lambda = \frac{b}{d} \sin(\arctan(\frac{y_n}{d})) \end{aligned}$$

Versuch 1: Young'scher Doppelspalt, Beugungsgitter

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

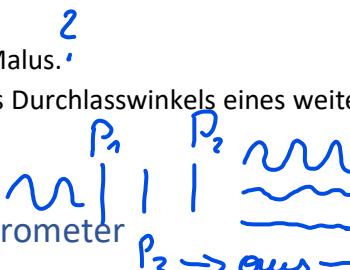
$$GK = \frac{\text{Spalte}}{m} = \frac{1}{b} = \frac{n\lambda}{\sin(\arctan(\frac{y_n}{d}))}$$

Versuch 2: Wellenfront-Analyse *Zaige ehscho wissen*

- Untersuchen Sie mit dem Shearing Interferometer die Wellenfront des verwendeten Lasers.

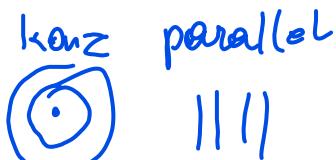
Versuch 3: Polarisation

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



Versuch 4: Michelson Interferometer

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



1.2. Wichtige Informationen zu den Experimenten

WICHTIG!

Der Umgang mit dem Laser bedarf größter Vorsicht, weshalb Sie zu Beginn des Praktikums eine Sicherheitsunterweisung erhalten. Blicken Sie niemals in den Laserstrahl und vermeiden Sie unkontrollierte Reflexionen, z.B. von Schraubenziehern. Legen Sie vor den Experimenten auch Ringe und Uhren oder Armbänder mit metallischen Oberflächen ab.

Die Laserquelle ist ein diodengepumpter Festkörperlaser (diode pumped solid state, DPSS) mit einer Wellenlänge von 532 nm und einer Ausgangsleistung von 4,5 mW und 12 mrad Strahldivergenz. Die Sicherheitsklasse ist 3R. Das Datenblatt liegt beim Experiment auf, ein hochauflöses Spektrum der Laseremission findet sich im Appendix.

Der Laser wird mit einem Graufilter betrieben, der die Strahlintensität um einen Faktor 10 auf etwa 0,5 mW verringert. Dieser Filter darf selbstständig keinesfalls entfernt werden!

Gehen Sie beim Umbau und der Justage vorsichtig vor, insbesondere vermeiden Sie das Berühren oder Zerkratzen der optischen Oberflächen. Fixieren Sie nicht benötigte Element am Rand der Grundplatte mit freien Klemmen.

$$\lambda_u \cdot V_u = c \quad \Delta V = |V_o - V_u| = c \left| \frac{\lambda_o - \lambda_u}{\lambda_o \lambda_u} \right| = c \frac{\Delta \lambda}{\lambda_o \lambda_u}$$

$$\lambda_o \cdot V_o = c$$

$$\begin{aligned} \lambda_o \lambda_u &= (\bar{\lambda} + \frac{\Delta \lambda}{2}) \cdot (\bar{\lambda} - \frac{\Delta \lambda}{2}) = c \frac{1}{\bar{\lambda}^2 - \bar{\lambda} + \Delta \lambda} \\ &= \bar{\lambda}^2 - \bar{\lambda} \Delta \lambda + \Delta \lambda^2 \end{aligned}$$

1.3. Notwendige Vorkenntnisse

Die Kenntnis der folgenden Themenfelder ist zur Durchführung der Experimente notwendig (in Klammern sind die entsprechenden Kapitel im Lehrbuch von Wolfgang Demtröder, Experimentalphysik 2 (Springer) angegeben: Lichtwellen (7.3), Polarisation (7.4), Kohärenz (10.1), Interferenz (10.3, nicht die Unterpunkte), Beugung am Spalt (10.5.2), Doppelbrechung (nur die Abschnitte zu den Polarisatoren 8.6.3, 8.6.4). Zur Überprüfung Ihres Verständnisses dienen die Kontrollfragen bei den jeweiligen Experimenten.

1.4. Empfohlene Literatur

Wolfgang Demtröder, Experimentalphysik 2, (Springer). Verfügbar als Buch und E-Book von den Bibliotheken der KFU und der TU. Die in diesem Skriptum genannten Kapitelnummern sind in den verschiedenen Auflagen des Lehrbuchs ident.

2. Experimente

2.1. Aufgabe 1: Young'scher Doppelspalt, Beugungsgitter

2.1.1. Grundlagen

Bescheint man mit einer Lichtquelle zwei eng beieinander liegende Spalte mit dem Abstand d in einem ansonsten undurchsichtigen Schirm, so wirkt die Spalte als kohärente Lichtquellen (Anmerkung: Dies ist evident für einen kohärenten 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 (λ Wellenlänge)

$$\Delta = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin\phi$$

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

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

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

$$I(x)_{\text{Beugung}} = \frac{\sin^2(\pi x D / \lambda z)}{(\pi x D / \lambda z)^2}$$

Das Beugungsmuster des Doppelspalts ergibt sich multiplikativ als $I(x) = I(x)_{\text{Interferenz}} I(x)_{\text{Beugung}}$.

$$12 \text{ mrad} \rightarrow 12 \cdot 10^{-3} \pi \rightarrow 12 \cdot 10^{-3} \frac{\pi}{\pi} 180^\circ = \underline{\underline{2,16^\circ}}$$

$$\sin(12 \text{ mrad}) = \underline{\underline{0,0376891}}$$

8

2.1.2. Versuchsdurchführung

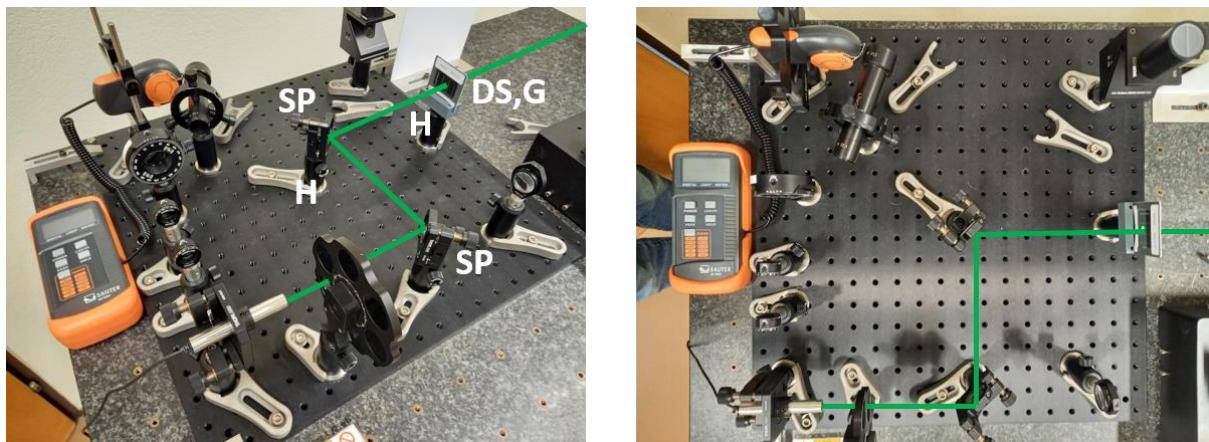


Abb. 4. Experimenteller Aufbau zu Young'scher Doppelspalt, Beugungsgitter. Der Verlauf des Lasers ist als grüne Linie eingezeichnet, (SP) Spiegel, (H) Halterung für (DS) Doppelspalt und (G) Beugungsgitter.

Unbedingt Temperatur am Laser messen

- Justieren Sie zunächst den Laser mit Hilfe des Justierschirms parallel zur Tischoberfläche und entlang des Bohrungsrasters.
- Bauen Sie dann den Spiegel (SP) auf und überprüfen Sie wieder die Parallelität des Laserstrahls. Um ein gut auswertbares Beugungsbild zu erhalten, wird die Entfernung zum Schirm groß gewählt und dieser an der Laborwand befestigt. Bestimmen Sie die Entfernung vom Doppelspalt zum Schirm mit Maßband und Lineal.
- Bringen Sie den ersten (von vier) Doppelspalten in den Strahlengang. Vermessen oder fotografieren Sie das Beugungsmuster am Schirm. Achten Sie dabei auf korrekte Belichtung. Wiederholen Sie die Messung für die anderen drei Doppelspalte.
- Bestimmen Sie die Wellenlänge des Lasers.
- Berechnen Sie die Beugungsmuster für die Doppelspalten 1-4 (die Spaltbreiten und -abstände sind in der Tabelle angegeben) und vergleichen Sie mit dem Experiment. Stellen Sie dazu jeweils einzeln den Interferenzterm und den Beugungsterm dar, sowie das gesamte Beugungsmuster. Vergleichen und erklären Sie auf Basis der berechneten Muster insbesondere die Lage der 1. Nebenmaxima der Doppelspalte 1 und 2.

Doppelspalt Nr.	Spaltbreite / mm	Spaltabstand / mm
1	0,20	0,25
2	0,10	0,25
3	0,10	0,50
4	0,10	1,00

- Bringen Sie das Beugungsgitter in den Strahlengang.
- Vermessen oder fotografieren Sie das Beugungsmuster und bestimmen Sie die Gitterkonstante.

→ es wird oft Fehler entstehen, weil Schirm –
anzustell ↑ ist, oder das ist schon in Inter-
ferenz und Beugung mit einberechnet

2.1.3. Kontrollfragen *→ Schall größer Wellenlänge, daher Beugung am Eck stärker*

- Zur Beugung von Wellen: Wieso können Sie jemanden am Gang ums Eck nicht sehen, sehr wohl aber sprechen hören?
- Erklären Sie qualitativ die Beugungsmuster in Abb. 1a.
- Erklären Sie die Begriffe Kohärenzlänge und Kohärenzzeit.

2.2. Aufgabe 2: Shearing-Interferometer, Wellenfront-Analyse

2.2.1. Grundlagen

Das Erscheinungsbild von optischen Interferenzmustern ist sowohl durch die Natur der Lichtwelle als auch der optischen Grenzflächen bestimmt, man denke an die färbigen 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 Abb. 5a), welche keilförmig ausgeführt ist (**zur Orientierung des Keils siehe die Kontrollfragen**). Durch die Reflexion an der vorderen und hinteren Fläche der Glasplatte entstehen zwei reflektierte Strahlen (Abb. 5a), in deren Überlappungsbereich Interferenz auftritt (Abb. 5b). Durch die keilförmige Geometrie führt dies für einen kollinierten Strahl zu einem zur Einfallsalebene des Lichts parallelen Streifenmuster (Abb. 5b). Ein konvergierender bzw. divergierender Strahl führt dagegen nach Abb. 5b zu einem gedrehten Streifenmuster. Aus dem lateralen Versatz der beiden reflektierten Strahlen l , dem Streifenabstand s und dem (bezogen auf die Senkrechte) Winkel der Interferenzstreifen Θ (siehe Abb. 5b) lässt sich der Radius r der Wellenfront mit $r = (ls)/\lambda \sin \Theta$ berechnen.

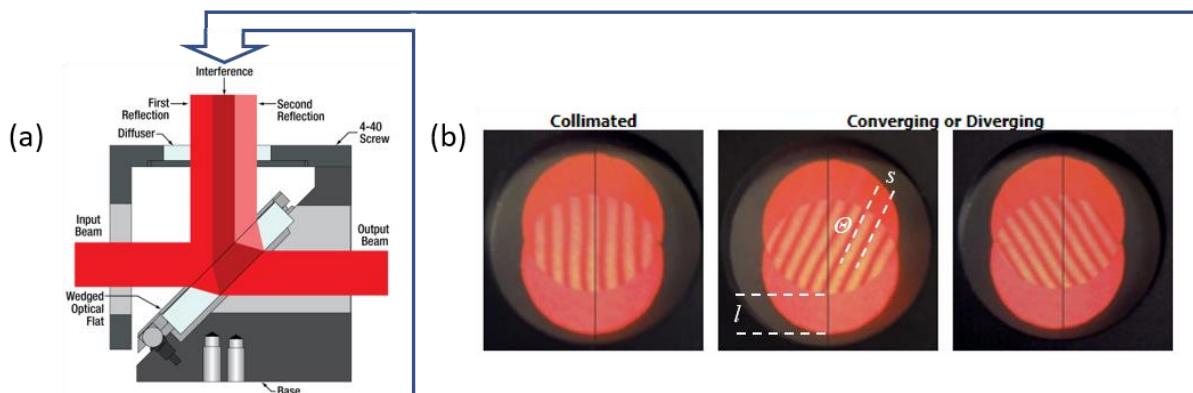
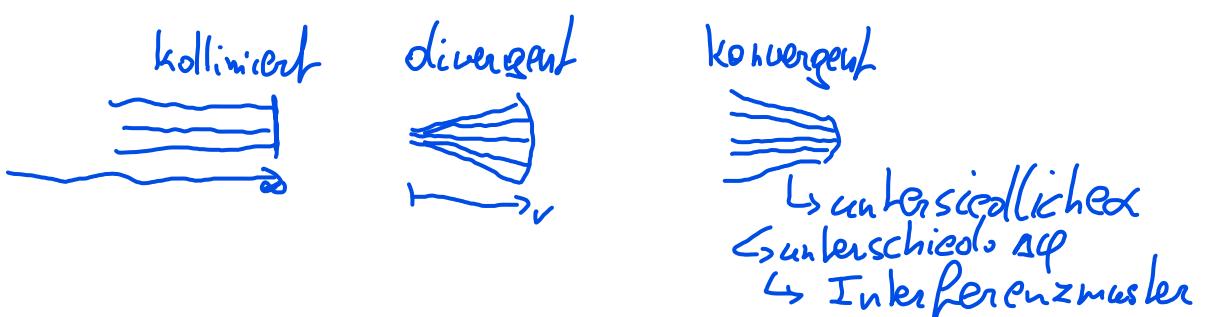


Abb. 5. Shearing Interferometer. (a) Schematischer Aufbau in **Seitenansicht**, (b) beobachtete Interferenzmuster (in **Aufsicht**) für kollimierte, konvergierende und divergierende Wellenfronten, im mittleren Bild sind die im Text besprochenen Bestimmungsgrößen eingezeichnet. © Thorlabs.



$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta s - \pi \rightarrow 180^\circ \text{ Sprung bei Reflexion am dickeren Medium}$$

$$\Delta s = 2 n k \cos(\beta) = 2 d \sqrt{n^2 - \sin^2(\alpha)}$$

10

2.2.2. Versuchsdurchführung

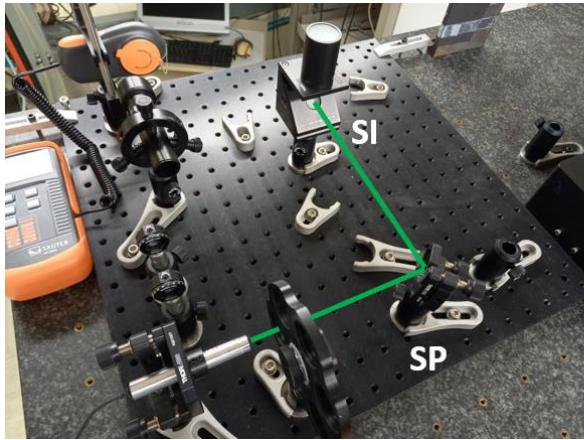


Abb. 6. Experimenteller Aufbau zum Shearing Interferometer. Der Verlauf des Lasers ist als grüne Linie eingezeichnet, (SP) Spiegel, (SI) Shearing Interferometer.

- Kontrollieren Sie die Justage des Laserstrahls.
- Bringen Sie das Shearing Interferometer in den Strahlengang.
- Vermessen Sie das Interferenzmuster und berechnen Sie den Wellenfrontradius. Diskutieren Sie das Ergebnis.

2.2.3. Kontrollfragen

→ ~~Frage~~

- Erläutern Sie anhand des Interferenzmusters in Abb. 5b (für den kollimierten Fall) die Orientierung des Glaskeils im Shearing-Interferometer. Skizze!
- Welche Rolle spielt die Kohärenzzeit bzw. die Kohärenzlänge der im Shearing Interferometer untersuchten Welle?

↪ ?

$$I_{(\alpha)}^1 = I_0 \cos^2(\alpha)$$

2.3. Aufgabe 3: Polarisations-Analyse

2.3.1. Grundlagen

$$I_{(\beta)}^2 = I_{(\alpha)}^1 \cos^2(\beta)$$

$$= I_0 \cos^2(\alpha) \cos^2(\beta)$$

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.

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

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 (**siehe dazu auch einen entsprechenden Versuch mit dem Michelson-Interferometer**).

- In dieselbe Richtung linear polarisierte Lichtstrahlen interferieren (wie nicht polarisiertes Licht).

$$1 = \cos^2 \alpha \sin^2 \beta \rightarrow \cos^2 \alpha = 1 - \sin^2 \beta$$

$$\cos^2 \alpha \cos^2 \beta = \cos^2 \alpha \cos^2 \beta \sin^2 \beta$$

- Zueinander senkrecht linear polarisierte Lichtstrahlen interferieren nicht (mit den folgenden 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.

2.3.2. Versuchsdurchführung

- Bauen Sie den optischen Strahlengang nach Abb. 7 auf und justieren Sie den Laserstrahl.
- Die Durchlassrichtung der Polarisatoren ist in etwa entlang der 0 Grad Markierung am Drehring, eine Abweichung von einigen Grad kann aber auftreten. Die Spezifikationen des verwendeten Polarisatortyps finden Sie im Appendix.
- Positionieren Sie den Photodetektor (PD) und schirmen sie die Detektionsfläche mit dem Rohr (R) von Umgebungslicht. Verifizieren Sie, dass Sie das Umgebungslicht effizient abschirmen.
- Orientieren Sie den Polarisator P1 vertikal. Messen Sie nun die durch den Polarisator P2 transmittierte Lichtintensität als Funktion des Winkels seiner Durchlassrichtung relativ zur Senkrechten.

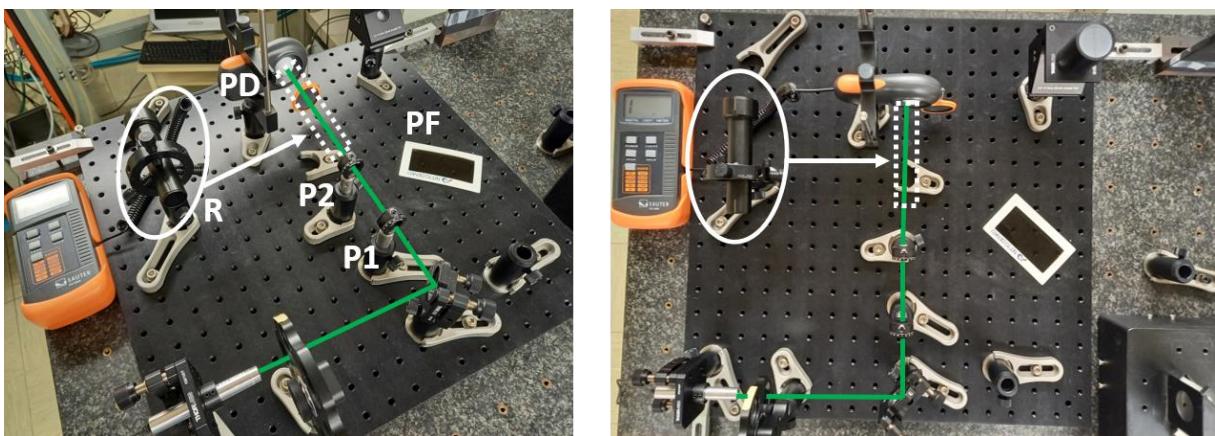


Abb. 7. Experimenteller Aufbau zur Polarisations-Analyse. Der Verlauf des Lasers ist als grüne Linie eingezeichnet, (P1),(P2) Polarisatoren, (PF) Polarisationsfolie, (PD) Photodetektor. Zur Unterdrückung des Hintergrundlichts wird das Rohr (R) in der eingezeichneten Position montiert.

- Stellen Sie die winkelabhängige Transmission zusammen mit dem berechneten Verlauf graphische dar.
- Bringen Sie nun zwischen zwei gekreuzte Polarisatoren einen weiteren Polarisator ein (Polarisationsfolie). Beobachten Sie die jeweilige Transmission durch das Gesamtsystem und erklären Sie die Beobachtungen mit dem Gesetz von Malus.

2.3.3. Kontrollfragen

- Beschreiben Sie die auf die Einfallsseite von Licht bezogene Definition der Polarisationsrichtung „s“ (oder TE) und „p“ (oder TM).
- Wie funktioniert eine „Polarisations-Sonnenbrille“ zur Unterdrückung von Spiegelungen?
- Wie funktioniert eine $\lambda/2$ bzw. $\lambda/4$ Platte?

\hookrightarrow \uparrow PD schneller als \swarrow Pol

2.4 Aufgabe 4: Michelson-Interferometer

2.4.1 Grundlagen

Der prinzipielle Strahlengang eines Michelson-Interferometers ist in Abb. 8 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

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

ist die Lichtintensität am Beobachtungsschirm gegeben durch

$$I = \frac{1}{4} c \epsilon_0 E_0^2 (1 + \cos \Delta\varphi)$$

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.

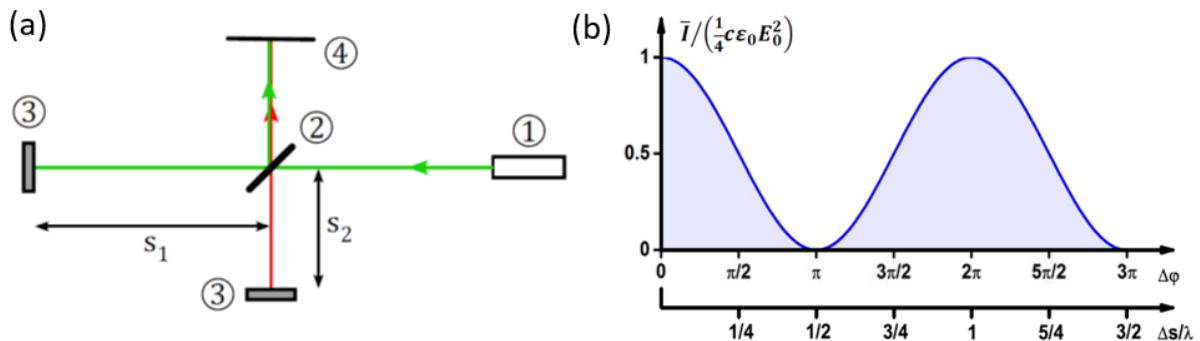


Abb. 8. (a) Strahlengang im Michelson-Interferometer. Ein Laserstrahl aus der Quelle (1) wird am Strahlteiler (2) aufgeteilt, die beiden Teilstrahlen durchlaufen die beiden Interferometerarme der Länge s_1 und s_2 . Nach ihrer Reflexion an den Spiegeln (3,4) werden die Teilstrahlen am Strahlteiler wieder überlagert und interferieren am Beobachtungsschirm (4). (b) Normierte Lichtintensität als Funktion des normierten Weglängenunterschieds. © Thorlabs.

$$\begin{aligned} \rightarrow \varphi_0 = 0 &\rightarrow \text{Spiegel} \rightarrow \varphi_3^* = 0 \rightarrow \text{Spiegel} \rightarrow \varphi_2^* = 180^\circ \\ \rightarrow \varphi_0 = 180^\circ &\rightarrow \text{Spiegel} \rightarrow \varphi_3^* = 180^\circ \rightarrow \text{Spiegel} \rightarrow \varphi_2^* = 360^\circ \end{aligned}$$

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. Es liegt an Ihnen, diesen Sachverhalt zu erklären (siehe Kontrollfragen).

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 Abb. 9a skizziert, können divergierende Strahlen auf (bei

$$\begin{aligned} \varphi_3^* &= 180^\circ + \Delta\varphi \rightarrow \text{trans} \rightarrow 180^\circ + \Delta\varphi \rightarrow \Delta\varphi \rightarrow 180^\circ + \Delta\varphi \rightarrow \text{Interferenz mit Laser} \rightarrow I_{(4)} \text{ um } 180^\circ \rightarrow \text{Zu Schirm verschoben} \\ \varphi_3^* &= 360^\circ \rightarrow \text{Spiegel} \rightarrow 540^\circ \end{aligned}$$

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 Abb. 9b die Größe des zentralen Interferenz“spots“ maximiert. Alternativ könnte dazu eine breitbandige Lichtquelle mit geringer Kohärenzlänge verwendet werden, wobei die Kohärenzlänge durch die Verwendung von Bandpassfiltern erhöht werden kann.

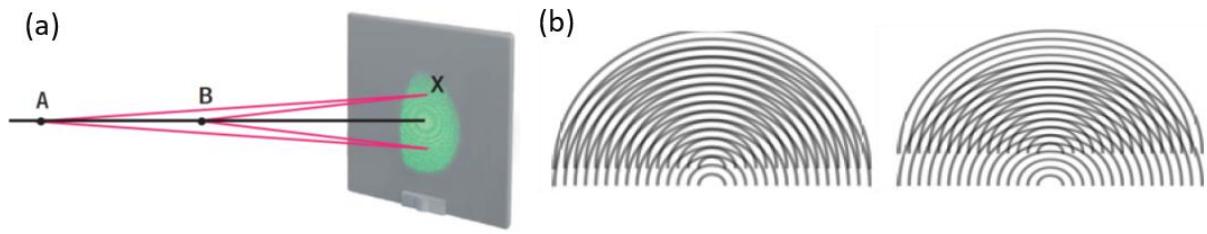


Abb. 9. Zum kreisförmigen Interferenzmuster beim Michelson Interferometer. (a) Skizze zur Erklärung seiner Entstehung, (b) Skizze zur Erklärung der Größe des zentralen Maximums (oder Minimums). © Thorlabs.

2.4.2 Versuchsdurchführung

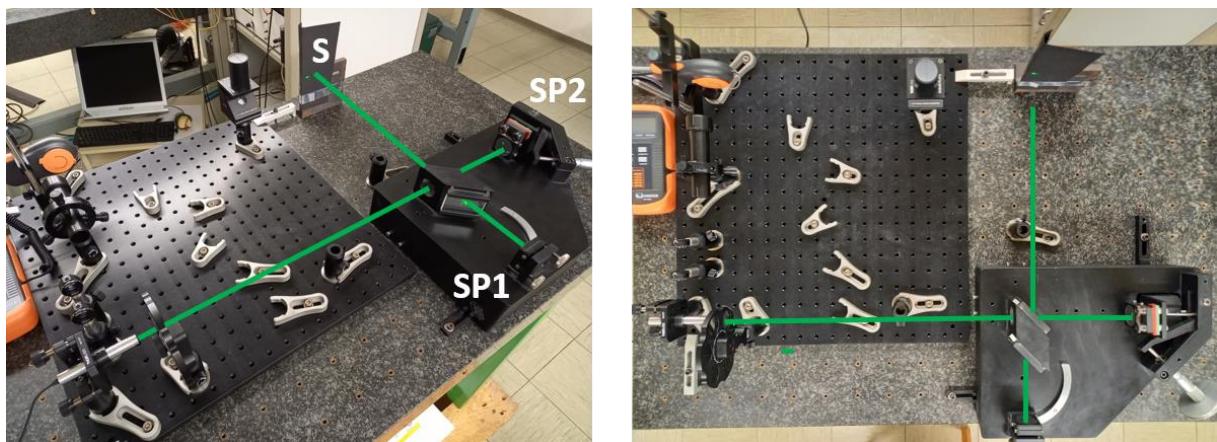
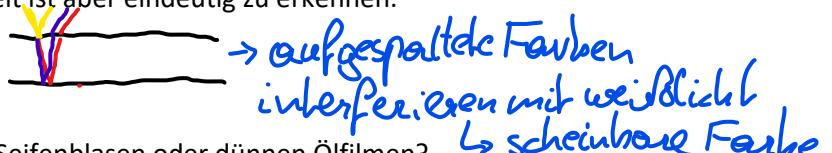


Abb. 10. Experimenteller Aufbau zum Michelson Interferometer. Der Verlauf des Lasers ist als grüne Linie eingezeichnet, (SP1) fixer Interferometerspiegel, (SP2) verschiebbarer Interferometerspiegel, (S) Schirm.

- Kontrollieren Sie die Justage des Laserstrahls und führen Sie diesen in das Michelson Interferometer.
- Justieren Sie den fixen Spiegel (SP1) so, dass am Schirm die Reflexionen aus beiden Interferometerarmen zur Deckung kommen. Unter Umständen sind auch Sekundärreflexionen zu beobachten.
- Bauen Sie die Linse L1 ($f = 40 \text{ mm}$) **vor** dem Interferometer ein.
- Justieren Sie den Spiegel SP1 so, dass ein symmetrisches konzentrisches Interferenzmuster am Schirm sichtbar ist. Beobachten und dokumentieren Sie, wie das Interferenzmuster auf die Einstellungen reagiert.

- Verifizieren Sie die komplementären Muster in den beiden Ausgängen des Interferometers. Im Arm der zum Laser führt ist dies naturgemäß nur neben dem Laserstrahl möglich, z.B. mit einem seitlich eingebrachten Blatt Papier oder am Strahlteiler selbst.
- Bestimmen Sie durch Verfahren des Spiegels SP2 die Wellenlänge des Lasers. Zählen Sie dazu die beim Verfahren der Mikrometerschraube um Δx im Zentrum des konzentrischen Intensitätsmusters auftretende Anzahl N der Maxima (oder Minima). **Achtung:** Die Längenänderung der den Spiegel bewegenden Mikrometerschraube wird durch einen Hebel um den Faktor 5,3 unterstellt, die tatsächliche Spiegelbewegung ist also $\Delta x' = \Delta x / 5,3$. Somit gilt $\lambda = 2\Delta x' / N$. Bestimmen Sie selbst die Anzahl der registrierten Übergänge um den Fehler möglichst zu minimieren.
- Bestimmen Sie (so gut als möglich) durch Verschieben des Spiegels SP2 dessen Position bei absolut gleich langen Interferometerarmen.
- Entfernen Sie die Linse L1 und bauen Sie zwischen dem Ausgang des Interferometers und dem Schirm Linse L2 ($f = -16 \text{ mm}$) ein.
- Justieren Sie den Spiegel S1 so, dass ein paralleles Streifenmuster sichtbar ist. Erklären Sie die Beobachtung.
- Treffen Sie eine Aussage über die kleinste messbare Längenänderung.
- Untersuchen Sie qualitativ die Stabilität des Interferometers durch Beobachten des Interferenzmusters bei Störeinflüssen durch Vibration oder Temperaturänderung.
- Zu den Gesetzen von Fresnel und Arago: Bauen Sie vor dem Interferometer einen Polarisator auf, dessen Durchlassrichtung 45 Grad zur Horizontalen orientiert ist und stellen Sie ein Streifenmuster am Schirm dar. Bringen Sie nun die großen Folienpolarisatoren in die Interferometerarme und beobachten Sie das Interferenzmuster für verschiedene senkrecht/horizontal Kombinationen der Durchlassrichtungen. Anmerkung: Durch die Folien werden die Wellenfronten und damit das Interferenzmuster verzerrt, das Auftreten von Interferenz oder dessen Abwesenheit ist aber eindeutig zu erkennen.



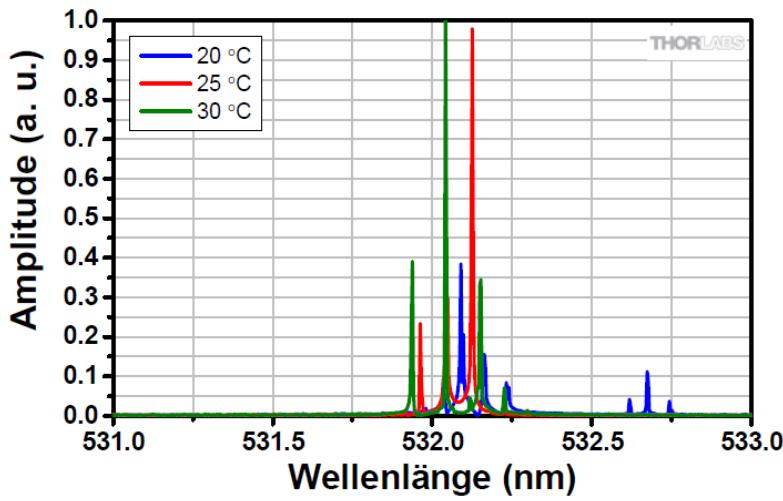
2.4.3. Kontrollfragen

- Wie entstehen die Farbeffekte von Seifenblasen oder dünnen Ölfilmen?
- Die Kohärenzlänge des verwendeten Lasers beträgt mehrere Meter, jene von thermischen Weißlicht um $1 \mu\text{m}$. Wie können Sie Interferenz von letzterem mit dem Michelson Interferometer beobachten? \rightarrow Lichtwege müssen in Szene $< 1 \mu\text{m}$ sein
- Erklären Sie die im Text besprochene gegengleiche Interferenzbedingung an den beiden Ausgängen des Michelson Interferometers. Hinweis: Analysieren Sie die Lichtwege durch den Strahlteiler (geometrisch eine planparallele Platte mit einer auf einer Fläche aufgebrachten Reflexionsschicht) und beachten Sie den Phasensprung bei den jeweiligen Reflexionen. Dieser beträgt π beim Übergang vom optisch dünneren zum optisch dichteren Medium, im umgekehrten Fall beträgt er Null.

3. Informationen zu Auswertung und Protokoll

Es gelten die Vorgaben in den allgemeinen Informationen zum Labor.

4. Appendix



$$\lambda_0 = 531,9 \text{ nm}$$

$$\lambda_u = 532,2 \text{ nm}$$

$$\left. \begin{aligned} v_0 &= \frac{c}{\lambda_0} \\ v_u &= \frac{c}{\lambda_u} \end{aligned} \right\} \Delta v = c \left(\frac{1}{\lambda_0} - \frac{1}{\lambda_u} \right)$$

$$\Delta v = 3,17 \cdot 10^{11} \text{ Hz}$$

$$\text{bei } v = 5,65 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

$$\Delta t_c = \frac{1}{\Delta v_{\text{max}}} = 3,15 \cdot 10^{-12} \text{ s}$$

$$L_c = 946,4 \mu\text{m}$$

Abb. A1. Hochauflöste Spektrum des Lasers Thorlabs CPS532-C2. © Thorlabs.

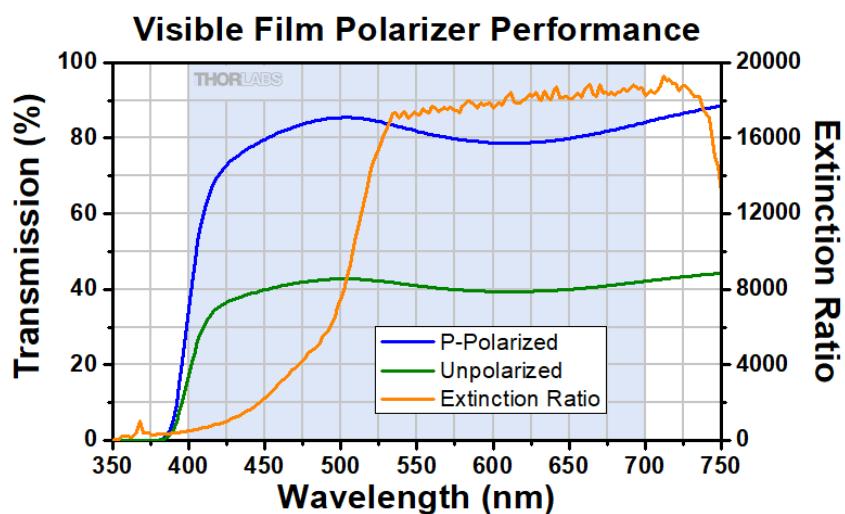


Abb. A2. Transmissionscharakteristik des Polarisators Thorlabs LPVISE050-A. © Thorlabs.