

# MZI — Mach-Zehnder-Interferometer

P3A — Praktikum

20. Februar 2021

## Ziele

Konstruktion eines Mach-Zehnder Interferometers aus verschiedenen optischen Komponenten. Anwendung desselben zur Bestimmung der Brechungsindizes zweier Gase auf zwei verschiedene Arten.

## Teilversuche

### 1. Aufbau eines Mach-Zehnder-Interferometers

### 2. Bestimmung des Brechungsindex von Luft

Licht wird mit Hilfe zweier Spiegel und zweier Strahlteiler zur Interferenz im Mach-Zehnder Interferometer gebracht. Durch Veränderung des Drucks in einer Küvette, die sich im Strahlengang befindet, wird der Brechungsindex von Luft bestimmt.

### 3. Bestimmung des Brechungsindex von CO<sub>2</sub>

Eine Messkapsel wird mit Kohlendioxid gefüllt. An Hand der Veränderung des Interferenzbildes wird der Brechungsindex von CO<sub>2</sub> bestimmt.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Physikalischer Hintergrund</b>	<b>3</b>
1.1	Stichworte zur Vorbereitung . . . . .	3
1.2	Experimentelle Methode . . . . .	4
1.2.1	zu Teilversuch 1: . . . . .	4
1.2.2	zu Teilversuch 2: . . . . .	5
1.2.3	zu Teilversuch 3: . . . . .	8
1.3	Die Modenblende . . . . .	9
<b>2</b>	<b>Durchführung</b>	<b>12</b>
2.1	Material . . . . .	12
2.2	Aufbau eines Mach-Zehnder-Interferometers . . . . .	12
2.3	Bestimmung des Brechungsindex von Luft . . . . .	14
2.4	Bestimmung des Brechungsindex von CO <sub>2</sub> . . . . .	15

## Literatur

- [BW99] BORN, M. ; WOLF, E.: *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*. Cambridge University Press, 1999. – ISBN 9780521784498

### Sicherheitshinweise



- Vor Versuchsbeginn müssen Sie die Laserbelehrung zur Kenntnis genommen haben!
- Bei Verwendung von Lasern oberhalb von Klasse 2 muss jede Person im Raum eine Justierbrille tragen! Trotz Justierbrille ist darauf zu achten, nicht in den Laserstrahl hineinzusehen.
- Die Justierbrillen sind auch für Brillenträger geeignet, es empfiehlt sich jedoch, falls möglich, Kontaktlinsen zu verwenden.
- Niemals absichtlich in den Strahl blicken. Die Augen bewusst schließen und den Kopf abwenden, wenn der Laserstrahl ins Auge trifft.
- Zur Überprüfung der Position des Laserstrahls ist es ratsam, ein Stück Papier in den Strahl zu halten.
- Uhren sowie Schmuck müssen abgelegt werden, um Reflexionen zu vermeiden.
- Berührungen des Laserstrahls mit der Haut sind zu vermeiden. Tragen Sie daher bitte Baumwollhandschuhe!

## 1 Physikalischer Hintergrund

### 1.1 Stichworte zur Vorbereitung

- Interferenz
- Wellenlänge und Phase
- Interferenz am Beispiel des Mach-Zehnder-Interferometers
- Brechungsindex
- Lichtgeschwindigkeit
- virtuelle Lichtquelle
- Aufgaben im Text!

## 1.2 Experimentelle Methode

### 1.2.1 zu Teilversuch 1:

Fallen zwei Wellen gleicher Frequenz  $\omega$  aber unterschiedlicher Amplitude ( $a_1$  bzw.  $a_2$ ) und verschiedener Phase ( $\alpha_1$  bzw.  $\alpha_2$ ) an einem Ort zusammen, so überlagern sie sich zu

$$Y = a_1 \sin(\omega t - \alpha_1) + a_2 \sin(\omega t - \alpha_2).$$

Die resultierende Welle kann geschrieben werden als

$$Y = A \sin(\omega t - \alpha)$$

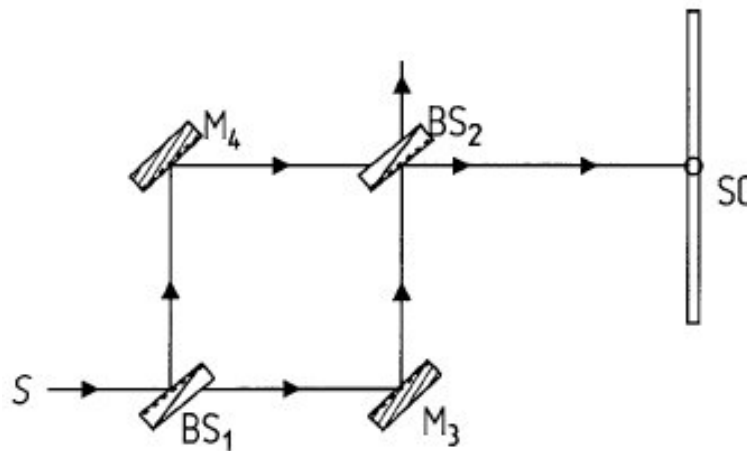
mit der Amplitude

$$A = \sqrt{(a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos \delta)} \quad (1)$$

und der Phasendifferenz

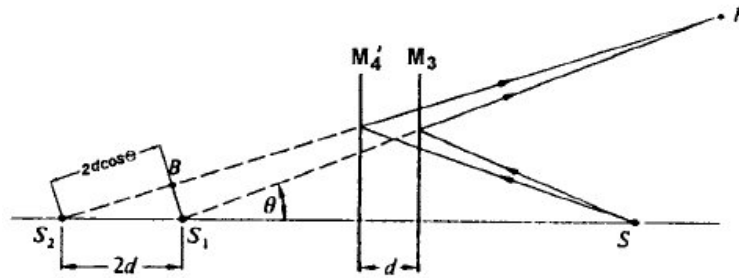
$$\delta = \alpha_1 - \alpha_2.$$

In einem Mach-Zehnder Interferometer wird Licht durch eine halbdurchlässige Glasplatte in zwei Teilstrahlen aufgespalten („amplitude splitting“). Diese Strahlen laufen dann über verschiedene Wege (im Gegensatz zum Michelson Interferometer) und werden an einem weiteren Strahlteiler wieder zusammen gebracht (vgl. Abbildung 1).



**Abbildung 1:** Mach-Zehnder Anordnung zur Interferenz. S stellt die Lichtquelle dar, SC den Detektor (Schirm)

Da Interferenzphänomene vor allem bei räumlich ausgedehnten Wellen gut beobachtet werden, wird der Lichtstrahl zwischen Laser und dem Interferometer durch ein Strahlaufweitungssystem (siehe **E20× in Abbildung 7**) aufgeweitet.



**Abbildung 2:** Entstehung von Interferenzmustern mit parallelen Spiegeln

Ersetzt man den Spiegel  $M_4$  durch sein virtuelles Abbild  $M'_4$ , welches durch Reflexion am Strahlteiler  $BS_1$  entsteht, erscheint die wahre Lichtquelle  $S$  als die virtuellen Lichtquellen  $S_1$  und  $S_2$  (vgl. Abbildung 2).

Auf Grund der unterschiedlichen Lichtwege und unter Benutzung der Bezeichnungen von Abbildung 2, ist die Phasendifferenz gegeben durch:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2 \cdot d \cdot \cos \Theta \quad (2)$$

$\lambda$  ist die Wellenlänge des benutzten Laserlichts.

Aus (1) ergibt sich die Intensitätsverteilung für  $a_1 = a_2 = a$  zu

$$I \sim A^2 = 4 \cdot a^2 \cdot \cos^2 \frac{\delta}{2}$$

Maxima entstehen, wenn  $\delta$  ein Vielfaches von  $2\pi$  ist, d. h. mit (2) folgt

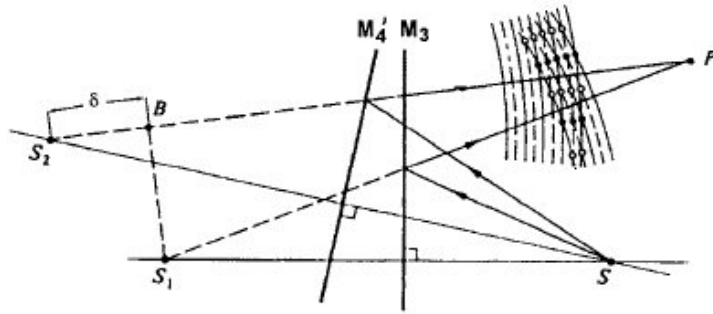
$$2 \cdot d \cdot \cos \Theta = m \cdot \lambda; \quad m = 1, 2, \dots$$

Somit existieren kreisförmige Streifen für feste Werte von  $m$  und  $d$ , wenn  $\Theta$  konstant bleibt (vgl. Abbildung 2). In den meisten Fällen führt die Justage der Spiegel im Interferometer dazu, dass die Spiegeloberflächen von  $M_3$  und  $M_4$  gegeneinander geneigt sind; das erzeugt die sog. Fizeau-Streifen (vgl. Abbildung 3).

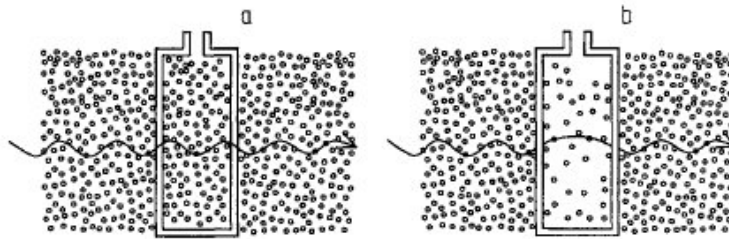
Dennoch bleibt die Korrelation zwischen der Änderung der optischen Wegstrecke und der Phasendifferenz während eines Wechsels von einem Intensitätsmaximum zum nächsten bei festem Beobachtungspunkt erhalten. Das bedeutet, dass ein Wechsel von Maximum zu Maximum dann auftritt, wenn die Phasendifferenz sich um  $2\pi$  (das entspricht einem Gangunterschied von  $\lambda$ ) ändert.

### 1.2.2 zu Teilversuch 2:

Um den Brechungsindex  $n$  von Luft zu messen, wird eine transparente, mit Luft gefüllte Küvette mit planparallelen Oberflächen benutzt (siehe Abbildung 4). Der Brechungsindex  $n$  eines Gases ist für geringe Dichten (wie z. B. bei vielen Gasen unter Normalbedingungen) eine



**Abbildung 3:** Entstehung von Interferenzmustern mit Spiegeln die gegeneinander geneigt sind - Fizeau Streifen



**Abbildung 4:** Schematische Darstellung der Zelle mit Normaldruck (a) und nahe dem absoluten Vakuum (b)

lineare Funktion der Dichte  $\rho$ . Für  $\rho = 0$  existiert ein absolutes Vakuum und es gilt  $n = 1$ . Für kleine  $\rho$  gilt deshalb:

$$n(\rho) = 1 + \kappa \rho \quad (3)$$

Für ideale Gase gilt ferner  $\rho \sim \frac{p}{T}$ , wobei  $p$  der Druck des Gases und  $T$  seine Temperatur ist. Damit lässt sich (3) schreiben als

$$n(p) = 1 + \tilde{k} \frac{p}{T} \quad (4)$$

Im Raum kann die Temperatur als konstant angenommen werden, daher vereinfacht sich (4) noch weiter zu

$$n(p) = 1 + k \cdot p \quad (5)$$

Da  $k$  eine (materialabhängige) Konstante ist erhält man durch Variation von  $n(p)$ :

$$\begin{aligned} \Delta n &= k \Delta p \\ k &= \frac{\Delta n}{\Delta p} \end{aligned} \quad (6)$$

Im Experiment wird aus der Küvette Luft abgepumpt, wodurch der Luftdruck  $p$  in der Küvette um  $\Delta p$  abnimmt. Für die Änderung des Brechungsindex  $\Delta n$  gilt:

$$\frac{\Delta n}{\Delta p} = \frac{n(p + \Delta p) - n(p)}{\Delta p} \quad (7)$$

## 1 Physikalischer Hintergrund

Die Küvette wird von einem Teilstrahl des Laserlichtes durchquert. Für diesen verändert sich die optische Weglänge. Allgemein gilt für die optische Wegstrecke  $d$  innerhalb der Küvette:

$$d = ns$$

$s$  ist die geometrische Länge der evakuierten Küvette und  $n$  der Brechungsindex des Gases

Durch die Druckänderung  $\Delta p$  ergibt sich:

$$\Delta d = \Delta n \cdot s = n(p + \Delta p) \cdot s - n(p) \cdot s \quad (8)$$

Im Mach-Zehnder-Interferometer sieht man bei Änderung des Drucks an einer beliebigen festen Position auf dem Schirm einen Wechsel im Interferenzmuster.

Ausgehend vom Unterdruck  $p$  lässt man vorsichtig Luft in die Küvette einströmen. Dabei beobachtet man die Wiederkehr des Ausgangsmusters  $\Delta m$  mal, bis der Umgebungsdruck  $p_0$  wieder erreicht ist. Ein Wechsel z. B. von Minimum zu Minimum entspricht einer Veränderung der optischen Weglänge um die Wellenlänge  $\lambda$ . Zwischen den Drücken  $p$  und  $p + \Delta p$  ändert sich die optische Wegstrecke daher um

$$\Delta d = [m(p + \Delta p) - m(p)] \cdot \lambda \quad (9)$$

Aus (8) und (9) folgt:

$$n(p + \Delta p) - n(p) = [(m(p + \Delta p) - m(p))] \cdot \frac{\lambda}{s}$$

und mit (7) und  $\Delta m = m(p + \Delta p) - m(p)$  erhält man

$$\frac{\Delta n}{\Delta p} = \frac{\Delta m}{\Delta p} \cdot \frac{\lambda}{s} \quad (10)$$

### Auswertung

Der Druck in der Küvette wird kontinuierlich vergrößert. Die Zahl der verschwundenen Maxima  $\Delta m$  wird gegen den Druck  $p$  aufgetragen. Aus der Steigung ergibt sich der Brechungsindex von Luft.

Die zur Auswertung benötigte Formel ergibt sich aus (5), (6) und (10); die optische Länge der Küvette ist vom Hersteller mit  $l = (256,38 \pm 0,03) \text{ mm}$  angegeben.

$$n(p) = 1 + \frac{\Delta n}{\Delta p} \cdot p = 1 + \frac{\Delta m}{\Delta p} \cdot \frac{\lambda}{s} \cdot p_0 \quad (11)$$

Der Literaturwert<sup>1</sup> des Brechungsindex von Luft bei einer Temperatur von 22 °C, Normaldruck (1013 hPa) und Licht mit einer Wellenlänge von 632,8 nm ist  $n_{\text{Luft}} = 1,000269$ .

### 1.2.3 zu Teilversuch 3:

Um den Brechungsindex  $n_{\text{CO}_2}$  zu bestimmen, wird zunächst eine Kapsel mit planparallelen Oberflächen in einen Strahlengang zwischen Strahlteiler und einem Spiegel gestellt.

Der Brechungsindex kann nun bestimmt werden, indem man die Luft in der Kapsel durch  $\text{CO}_2$  ersetzt. Dabei wird die Materialabhängigkeit von  $k$  aus (5) ausgenutzt. Die Änderung des Brechungsindex ist proportional zur Menge an  $\text{CO}_2$ , die zugeführt wird.

Die optische Weglänge  $r$  in der Kapsel mit der geometrischen Länge  $l$  ist  $r = n \cdot s$ , wobei  $s$  die Strecke ist, die das Licht tatsächlich zurücklegt. Demnach gilt:  $s = l$ . Wir halten also fest:

$$\begin{aligned} r_1 &= n_1 s \quad \text{für: Luft mit Brechungsindex } n_1 \\ r_2 &= n_2 s \quad \text{für: CO}_2 \text{ mit Brechungsindex } n_2 \end{aligned} \tag{12}$$

Indem man nun die Anzahl  $N$  der Wechsel zwischen Minima und Maxima feststellt, misst man die Veränderung der optischen Weglänge  $\Delta r$ . Ein Wechsel von Minimum zu Maximum geht einher mit einer Änderung um  $\lambda/2$ . Daraus ergibt sich

$$N \cdot \lambda/2 = \Delta r \tag{13}$$

und es folgt:

$$r_2 = r_1 + \Delta r \tag{14}$$

$$n_2 = n_1 + \Delta n \tag{15}$$

Kombiniert man (12), (14) und (15) ergibt sich

$$\Delta r = \Delta n \cdot s \tag{16}$$

Im Versuch ist die geometrische Länge der Kapsel  $s = 50 \text{ mm}$ . Ob der Brechungsindex von Kohlendioxid größer oder kleiner ist als der von Luft kann am Verhalten der Interferenzstreifen beobachtet werden: Falls die optische Wegstrecke länger wird, d. h. der Brechungsindex wird größer, werden die Radien der kreisförmigen Interferenzstreifen kleiner. Daher scheint es so, als würde es eine Senke von Ringen im Zentrum geben (die englische Bezeichnung hierfür ist „fringe sink“). Wird die optische Wegstrecke (und damit auch der Brechungsindex) hingegen kleiner, so kann das umgekehrte Verhalten beobachtet werden. Es scheint, als ob es eine Quelle von kreisförmigen Interferenzstreifen gibt.

### Auswertung

Unter Verwendung von (13) und (16) erhält man:

$$\Delta n = \frac{\Delta r}{s} = \frac{N \cdot \lambda}{2 \cdot l}$$



Unter Benutzung des Literaturwertes von  $n_{\text{Luft}} = 1,000272$  bei Normaldruck  $p = 1013 \text{ hPa}$  und  $20^\circ\text{C}$ , ergibt sich aus (15) der Brechungsindex für Kohlendioxid. Der Wert für Luft ist bei anderen Raumwerten für  $p$  und  $T$  umzurechnen.

Der Literaturwert<sup>1</sup> bei Normaldruck und  $20^\circ\text{C}$  beträgt  $n_{\text{CO}_2} = 1,000416$ .

### 1.3 Die Modenblende

Im Versuch verwendet man aufgeweitete Laserstrahlen, um ein ausgedehntes Objektfeld auszuleuchten. Erzeugt man die Aufweitung mit einer einfachen Konvexlinse, so erhält man keinen gleichmäßigen Lichtfleck, sondern einen „ausgefranst“ und mit wilden Mustern übersäten Klecks. Folgende Ursachen sind denkbar:

- Mangelhafte Linsen. Durch Abweichungen des Linsenprofils von der sphärischen Referenz oder Dichteviationen des Glaskörpers wird die Wellenfront unregelmäßig deformiert. Es treten Aberrationen auf. [BW99]
- Jede Art von Staub und Schmutz auf der Linse oder im Strahlengang. Verunreinigungen sind niemals ganz zu vermeiden und führen ebenfalls zu lokalen Störungen der kugelförmigen Wellenfront.

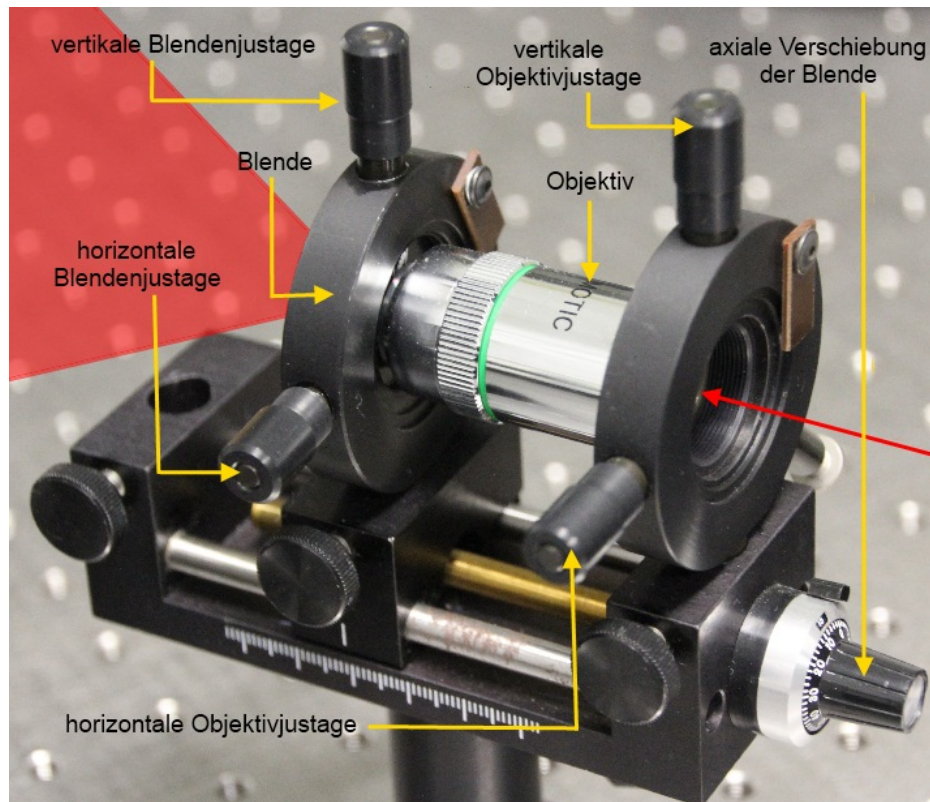
In der Praxis verwendet man statt dessen eine in Abbildung 5 dargestellte „Modenblende“, auch als „Raumfilter“ oder „Pinhole“ bezeichnet. Der Witz dieser Anordnung besteht darin, dass der fokussierte Laserstrahl am Ort der Strahltaile – der Stelle des Strahles mit dem kleinsten Durchmesser – einen Durchmesser von ca.  $15 \mu\text{m}$  aufweist und dabei durch eine etwas größere Lochblende – im Praktikum  $30 \mu\text{m}$  – geschickt wird. Außerdem wird meist statt einer einfachen Linse ein ganzes Linsensystem verwendet. Damit erreicht man kürzere Brennweiten und somit auch eine stärkere Aufweitung. Derartige Linsensysteme sind in jedem Mikroskop zu finden und werden deshalb auch in der Holografie gerne eingesetzt. Physikalisch passiert im Pinhole Folgendes: Schmutz z.B. auf der Linse führt zu einer *Beugung* des die Linse passierenden Lichts. Dieses Licht wird von der Linse nicht mehr in den Brennpunkt fokussiert, sondern läuft außerhalb des Brennpunktes vorbei und interferiert dort mit dem Licht, das aus dem Brennpunkt kommt. Dadurch entstehen die „wirren“ Muster. Unsere Lochblende fängt dieses Licht ab und verhindert somit, dass es Schaden in Form von Interferenzmustern anrichtet.

### Aufbau der Modenblende

Die im Versuch eingesetzte Modenblende ist folgendermaßen aufgebaut: Der Laserstrahl trifft zunächst auf das Objektiv, das fest am Rand einer Verschiebeeinheit montiert ist. Dahinter kann die  $30 \mu\text{m}$  große Blende eingesetzt werden. Beachten Sie, dass Sie ein Loch von  $30 \mu\text{m}$  nicht sehen können, da es unterhalb des Auflösungsvermögens des Auges liegt. Den Abstand zwischen Blende und Objektiv können Sie mit der Justierschraube am Verschiebetisch verändern. Um das Blendenloch senkrecht zur optischen Achse zu verschieben, werden die beiden kleineren Justierschrauben an der Blende verwendet.

---

<sup>1</sup>Taschenbuch für Chemiker und Physiker; Ed: Dr. Jean D’Ans, Springer Verlag 1949

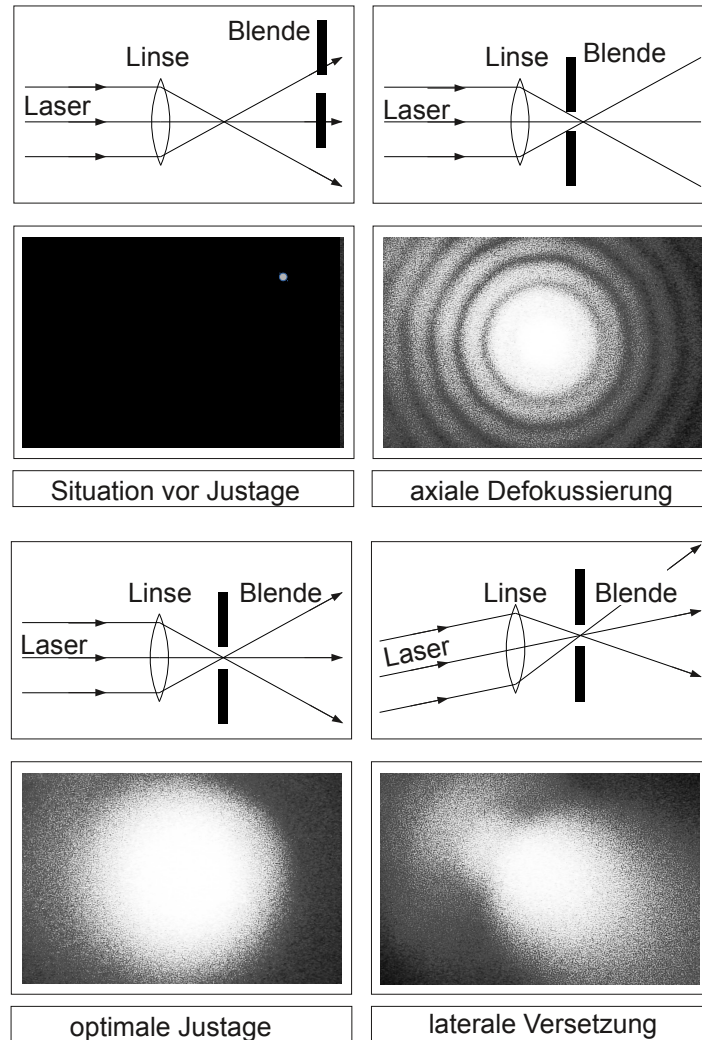


**Abbildung 5:** Detailansicht der Modenblende mit dem Strahlengang des Lasers (rot). Sowohl die  $30\text{ }\mu\text{m}$ -Blende („Pinhole“) als auch das Objektiv können horizontal und vertikal unabhängig justiert werden. Zusätzlich kann der Abstand zwischen Pinhole und Objektiv verändert werden.

### Aufgabe

#### Einstellen der Modenblende

Damit die Strahltaille genau im Blendenloch liegt, muss die Lochblende in allen drei Raumrichtungen bis auf einige Mikrometer genau justiert sein. Machen Sie sich Gedanken darüber, wie Sie dies am besten erreichen können. Betrachten Sie dazu auch Abbildung 6.



**Abbildung 6:** Justierung der Modenblende. Auf den Bildern der oberen Hälfte führt ein falscher Abstand der Lochblende von der Linse zunächst zu einem einfachen schwachen Lichtpunkt und nach einigen Schritten der Justage zu Beugungsringen. Die Bilder links unten zeigen eine optimal eingestellte Modenblende, während rechts unten die Blende gegenüber der Linse lateral versetzt ist.

## 2 Durchführung

### 2.1 Material

Grundplatte mit Gummifüßen	08700.00	1
HeNe-Laser, (5 mW, 632,8 nm)	08701.00	1
oder Lasermodul Diodenlaser <1.0 mW; 520 nm (Klasse 2)	PL201	
oder Lasermodul Diodenlaser <1.0 mW; 635 nm (Klasse 2)	PL202	
Justierhalterung 35 mm × 35 mm	08711.00	4
Oberflächenspiegel 30 mm × 30 mm	08711.01	4
Magnetfuß	08710.00	10
Verschiebeeinrichtung, horizontal	08713.00	1
Verstelleinrichtung xy	08714.00	2
Adapterring	08714.01	1
Lochblende, 30 µm	08743.00	1
Objektiv, 20 ×	62171.22	1
Plattenhalter	08719.00	2
Strahlteiler, 50:50	08741.00	2
Schirm, weiß, 150 mm × 150 mm	09826.00	1
Kapselhalter mit Stiel	08706.00	1
Glaskapsel, $s = 50$ mm	-	1
Handvakuumpumpe	08745.10	1
Manometer, digital	03106.00	1
Universalklemme mit Gelenk	37716.00	1
Verbindungsstück, T-förmig, $d_i = 8$ mm – 9 mm	47519.03	1
Reduktionsstück 8/4 mm	47517.01	1
Vakuumschlauch, $d_i = 6$ mm, 6 × 5, 1 m	39286.00	1
Silikonschlauch, $d_i = 3$ mm, 1 m	39292.00	1
Pipette	64701.00	1
Druckdose, CO <sub>2</sub>	41772.06	1
Feinregulierungsventil für die Druckdose	33499.00	1

dazu eine Küvette mit Länge  $l = (256,38 \pm 0,03)$  mm

und Schraubklemmen mit Dichtung zur Fixierung der Schläuche an der Küvette

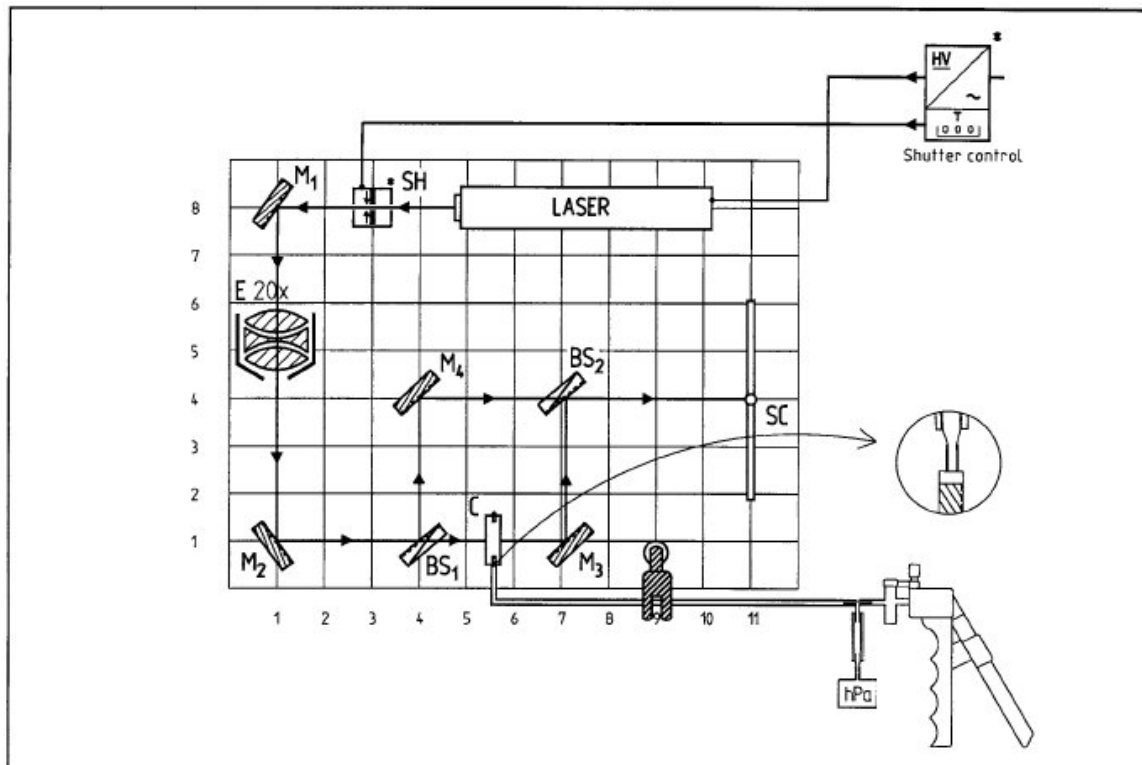
### 2.2 Aufbau eines Mach-Zehnder-Interferometers

*Bitte lesen Sie diesen Abschnitt erst einmal ganz durch, ehe Sie mit dem Versuch beginnen!*

- Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 7. Die empfohlene Aufbauhöhe (Strahlenganghöhe) sollte bei 130 mm liegen. Der Laser ist schon auf die richtige Höhe eingestellt und muss im Regelfall nicht nachjustiert werden. Im folgenden Text werden Nummern der Art [...] erscheinen. Diese beziehen sich auf die Koordinaten auf der optischen Grundplatte. Diese Koordinaten sind nur als ungefähre Richtlinie zu verstehen, um den Aufbau zu erleichtern. Achten Sie darauf, ausreichend Platz für die Küvette einzurichten!

## 2 Durchführung

Beachten Sie, dass Abbildung 7 nur schematisch zu verstehen ist, die für den Aufbau nötigen, korrekten Koordinaten entnehmen Sie bitte dem Fließtext!



**Abbildung 7:** Experimenteller Aufbau für die Bestimmung des Brechungsindex von Luft mit dem Mach-Zehnder Interferometer

- Beginnen Sie damit, den Strahlengang nur mit Hilfe der Spiegel  $M_1$  [1,8] und  $M_2$  [1,1] entlang der ersten y-Koordinate der optischen Platte zu justieren.
- Der Strahl – zunächst ohne den Strahlteiler  $BS_1$  – trifft auf den einstellbaren Spiegel  $M_3$  [9,1], der den Strahl entlang der x-Koordinate zum Strahlteiler  $BS_2$  [9,4] reflektiert. Der Strahlteiler  $BS_2$  wiederum reflektiert einen Teilstrahl zum Schirm  $SC$  [11,4] entlang der y-Koordinate.
- Setzen Sie nun den Strahlteiler  $BS_1$  [2,1] in den Strahlengang und zwar so, dass ein Teilstrahl immer noch Spiegel  $M_3$  ohne Behinderung trifft. Der andere Teilstrahl wird von  $BS_1$  auf den Spiegel  $M_4$  [2,4] reflektiert (entlang der x-Koordinate). Dieser Strahl wird nun vom Spiegel  $M_4$  entlang der y-Koordinate reflektiert und trifft auf den Strahlteiler  $BS_2$ . Dort wird der Strahl erneut gespalten und ein Teilstrahl trifft auf den Schirm  $SC$  [11,4] ohne die Richtung zu verändern.
- Zwei Lichtpunkte sind nun auf dem Schirm zu sehen. Bringen Sie diese zur Deckung, indem Sie mit der Feineinstellung an den Spiegeln  $M_3$  und  $M_4$  den Strahlengang verändern. Dabei ist zu beachten, dass die Strahlen wirklich parallel sein müssen! Dies ist der Fall, wenn sie sich nicht nur an einer Schirmposition schneiden, sondern

## 2 Durchführung

auch noch weiter hinten. Benutzen Sie zwei Schirme (einer halbdurchlässig), um dies zu testen und justieren Sie so lange, bis die Parallelität gewährleistet ist. Ggf. muss auch Strahlteiler  $BS_2$  ein wenig verschoben werden, bevor Sie mit der Feineinstellung beginnen.

- Setzen Sie nun das Strahlaufweitungssystem **E 20**  $\times$  [1,5.5] in den Strahlengang. Letzterer wird dadurch aufgeweitet und erscheint als erleuchtete Fläche auf dem Schirm. Zu diesem Zeitpunkt können schon Interferenzstreifen auf dem Schirm zu sehen sein. Falls nicht, genügen minimale Veränderungen der Einstellung von  $M_3$  und/oder  $M_4$  um diese sichtbar zu machen. Es ist nicht ganz einfach, den Strahl durch das Strahlaufweitungssystem hindurch zu fädeln. Bei Problemen können Sie Ihren Betreuer um Rat fragen, doch sollten Sie sich ruhig zuerst ein wenig mit der Justierung beschäftigen.

### 2.3 Bestimmung des Brechungsindex von Luft

*Bitte lesen Sie diesen Abschnitt erst einmal ganz durch, ehe Sie mit dem Versuch beginnen!*

- Nachdem Sie den Aufbau des Mach-Zehnder-Interferometers vorgenommen haben, setzen Sie die Küvette **C** [5.5,1] mit den Vorderseiten senkrecht zur Strahlrichtung zwischen Spiegel  $M_3$  und Strahlteiler  $BS_1$ . Achten Sie darauf, mit der Küvette nicht an den Spiegeln anzustoßen, ihr Aufbau würde zerstört werden!
- Verbinden Sie nun den Vakuumschlauch mit der Handvakuumpumpe und einer Öffnung der Küvette. Die andere Öffnung (ein Ventil mit einer Schraube zum Druckausgleich) wird über einen weiteren Schlauch mit dem Druckmessgerät verbunden.
- Verringern Sie jetzt den Druck in der Küvette mit der Handpumpe. Sie werden eine Veränderung des Interferenzmusters feststellen. Verringern Sie den Druck weiter, bis auf etwa 500 hPa (oder noch weiter bis auf ca. 350 hPa, wenn Sie wollen, aber es wird schwierig, die genaue Anzahl an Interferenzstreifen zu zählen, weil es sehr viele werden und man sehr lange konzentriert auf das Interferenzmuster schauen muss). Wenn Sie sehr sorgfältig justiert haben, sollten Sie das Zentrum sehen. Merken Sie sich in diesem Fall die Phasenlage des Zentrums (hell bzw. dunkel). Andernfalls markieren Sie sich nun einen willkürlichen Punkt (z. B. ein Maximum oder ein Minimum) im Muster (am besten wird ein Papier auf den Schirm geklebt und markiert) und notieren Sie ihren momentanen Druck. Lassen Sie dann mit dem Ventil an der Küvette langsam Luft einströmen und zählen Sie auf dem Schirm die Anzahl der Maxima (oder Minima), welche die markierte Stelle passieren. Notieren Sie nach jeweils 10 Durchgängen im Interferenzmuster den Druck am Druckmessgerät. Schließen Sie zum genauen Ablesen bei Bedarf das Ventil. Machen Sie weiter mit diesem Verfahren, bis die Küvette wieder vollständig gefüllt ist, d. h. Umgebungsdruck herrscht.
- Auswertung: Diskutieren Sie mit Ihrem Betreuer, wie Sie auf geeignete Weise den Brechungsindex von Luft bestimmen können und führen Sie die Auswertung zu Hause entsprechend durch.

### 2.4 Bestimmung des Brechungsindex von CO<sub>2</sub>

*Bitte lesen Sie diesen Abschnitt erst einmal ganz durch, ehe Sie mit dem Versuch beginnen!*

- Der grundlegende Aufbau ist identisch mit Versuchsteil 1. Insbesondere ist keine Neujustierung des Strahls notwendig. Der Unterschied zeigt sich nur am Aufbau der Kapsel. Bauen Sie Handpumpe, Druckmessgerät, Vakuumschläuche und Küvette ab. An die Stelle der Küvette setzen Sie nun die Glaskapsel mit den zwei Stöpseln.
- An der Dose mit dem CO<sub>2</sub> befindet sich ein Plastikschlauch mit einer Glaspipette an der Spitze. Führen Sie diese zu einer der Öffnungen der Glaskapsel und schieben Sie sie hinein. Passen Sie bitte auf die Glaspipette auf, da dies keine sehr stabile Anordnung ist, d. h. die Pipette fällt leicht wieder aus der Kapsel heraus.
- Öffnen Sie nun das Ventil sehr langsam und kontrolliert. Während das Gas in die Kapsel einströmt, kann im Interferenzbild eine Wanderung der Maxima zu den Minima und umgekehrt beobachtet werden. Diese Veränderungen hören nach einer gewissen Zeit auf, wenn nämlich die Kapsel mit CO<sub>2</sub> angefüllt ist. Zählen Sie die Gesamtzahl der Intensitätsveränderungen (bezogen auf eine von Ihnen willkürlich gewählte Stelle, vgl. Versuchsteil 1).
- Beachten Sie, dass CO<sub>2</sub> schwerer ist als Luft, daher müssen Sie die Kapsel auf den Kopf stellen, um das CO<sub>2</sub> „auszuleeren“.
- *Vergessen Sie nicht, die CO<sub>2</sub>-Dose wieder zu verschließen, wenn Sie fertig sind!*
- Auswertung: Diskutieren Sie mit Ihrem Betreuer, wie Sie auf geeignete Weise den Brechungsindex von CO<sub>2</sub> bestimmen können und führen Sie die Auswertung entsprechend zu Hause durch.