

## Mach-Zehnder-Interferometer 1014617

### Bedienungsanleitung

07/15 ALF



### 1. Sicherheitshinweise

Das Interferometer sollte mit einem He-Ne-Laser der Klasse 2 betrieben werden. Ein direkter Blick in den Strahl des Lasers kann zu Netzhautverbrennungen führen und ist unbedingt zu vermeiden.

- Die dem Laser beiliegenden Sicherheitsvorschriften sind strikt einzuhalten!

Der mit (4) beschriftete Strahlteiler wird das Laserlicht nicht nur auf die beiden Spiegel (9), sondern auch nach unten (bezogen auf Fig. 1) reflektieren. Weiterhin kann je nach Experimentieraufbau auch vom zweiten Strahlteiler ein Laserstrahl ausgehen, der über den Bereich der Grundplatte hinausreicht.

- Zum Schutz der Experimentatoren sind je nach örtlichen Gegebenheiten lichtundurchlässige Schirme aufzustellen.
- Das Interferometer ist auf einem stabilen

Tisch oder an einem anderen geeigneten Ort so aufzustellen, dass es nicht herunterfallen und durch sein Gewicht Personen verletzen kann.

Die Trageknöpfe (6) dienen dazu, das Interferometer anzuheben, um sicher unter die Grundplatte greifen zu können.

Der maximal zulässige Druck in der Vakuumzelle (11) beträgt 200 kPa (2 bar) entsprechend 100 kPa (1 bar) Überdruck.

- Bei Beschädigungen des Zellenglases, wie z. B. Kratzern oder Rissen, ist die Vakuumzelle sofort außer Betrieb zu nehmen und reparieren zu lassen.
- Bei Experimenten mit Überdruck ist sicherzustellen, dass sich keine Personen im Explosionsbereich der Zelle aufhalten. Gegebenenfalls Schutzbrille verwenden.

## 2. Lieferumfang

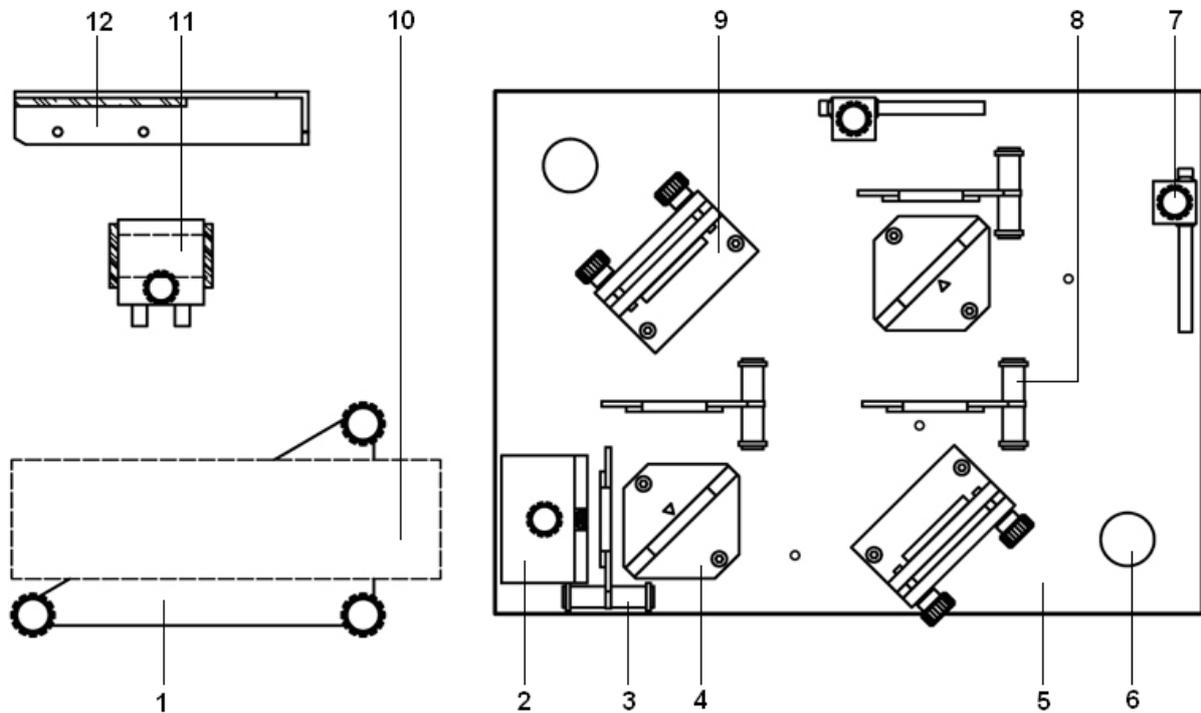


Fig. 1 Lieferumfang und evtl. zusätzlich benötigte Komponenten

- 1 Laserträger
- 2 Aufweitungslinse
- 3 Polarisationsfilter, Folie (2x)
- 4 Strahlteiler (2x)
- 5 Grundplatte
- 6 Trageknopf
- 7 Schirm (2x)
- 8 Polarisationsfilter, Glas (2x)
- 9 justierbarer Oberflächenspiegel (2x)
- 10 Laser (nicht im Lieferumfang enthalten)
- 11 Vakuumzelle (im Ergänzungsgerätesatz 1002652)
- 12 Glasplatte auf Halter (im Ergänzungsgerätesatz 1002652)

nicht abgebildet:

- 13 stabiler Kunststoffbehälter
- 14 Sechskant-Schraubendreher
- 15 Justage-Werkzeug für Strahlteiler
- 16 Bedienungsanleitung

### 3. Beschreibung

Das Mach-Zehnder-Interferometer ist eine Weiterentwicklung des Jamin-Interferometers. Es wurde 1891 von Ludwig Zehnder vorgestellt und unabhängig zu etwa der gleichen Zeit auch von Ludwig Mach entwickelt, aber von ihm erst 1892 erwähnt.

Einfallendes Licht wird durch einen Strahlteiler in zwei Teilstrahlen aufgeteilt, die auf unterschiedlichen Wegen zu einem zweiten Strahlteiler gelangen, in dem sie wieder überlagert werden, wodurch es bei unterschiedlichen optischen Weglängen zur Interferenz (Auslöschung oder Verstärkung) kommt.

Bei bekannter Lichtwellenlänge kann ein Interferometer zur Messung sehr kurzer Strecken eingesetzt werden, was u. a. bei der Prüfung der Oberflächengüte optischer Bauteile wichtig ist.

Mit dem Mach-Zehnder-Interferometer können u. a. folgende Experimente durchgeführt werden:

1. Untersuchung der Änderung der Polarisationsrichtung am Strahlteiler und am Oberflächenspiegel
2. Oberflächengüte optischer Bauteile (qualitativ, nicht quantitativ) \*
3. Bestimmung der Brechzahl von Luft \*\*
4. Analogieexperiment zum Quantenradierer („Analogie“ da das hier beschriebene Experiment nicht mit Einzelphotonen durchgeführt wird.)
5. Weißlicht-Interferenz\*\*\*

\* mit Ergänzungsgerätesatz zum Interferometer (1002652)

\*\* mit Ergänzungsgerätesatz zum Interferometer (1002652) und Hand-Vakuumpumpe (1012856)

\*\*\* mit Optikleuchte mit Lochblende (1017284)

Dank der vorgegebenen Komponenten-Positionen ist ein schneller Umbau zur Durchführung der verschiedenen Experimente möglich.

Der Gerätesatz Mach-Zehnder-Interferometer besteht aus zwei Strahlteilern, zwei Oberflächenspiegeln, zwei Beobachtungsschirmen und vier Polarisationsfiltern. Die hochwertigen optischen Komponenten auf schwerer, biegesteifer Grundplatte gewährleisten präzise und reproduzierbare Messungen. Die großen optischen Bauteile ermöglichen die Abbildung klarer und scharfer Interferenzbilder, die auch bei Tageslicht betrachtet werden können, da die beiden reflektierenden Beobachtungsschirme in der Neigung verstellbar sind. Durch vorgegebene Komponenten-Positionen ist ein schneller Umbau zur Durchführung der verschiedenen Expe-

rimente möglich und dadurch eine extrem kurze Vorbereitungszeit gewährleistet.

Inklusive stabiler Kunststoffbox zur Aufbewahrung des montierten und justierten Interferometers sowie Trägerplatte für Laser.

### 4. Technische Daten

#### Strahlteiler:

Durchmesser:	40 mm
Ebenheit:	$\lambda/10$ (Vorderseite), $\lambda/4$ (Rückseite)

#### Oberflächenspiegel:

Abmessungen:	40x40 mm <sup>2</sup>
Ebenheit:	$<\lambda/2$

#### Polarisationsfilter:

Durchmesser:	30 mm
Verstellbereich:	$\pm 105^\circ$
Material:	Glas (2x), Folie (2x)
Winkelteilung:	$3^\circ, 15^\circ$

#### Grundplatte:

Masse:	5,5 kg
Abmessungen:	245x330x25 mm <sup>3</sup>

### 5. Bedienung

#### 5.1 Lasermontage

- Laser auf den Laserträger montieren.

Da der Laserträger für verschiedene Laser konzipiert ist, hat er drei Bohrungen für Senkschrauben (M5 oder M6) von denen normalerweise nur eine benötigt wird. Die für den jeweiligen Laser richtige Bohrung ergibt sich aus dem Schwerpunkt des Lasers und seinen Befestigungsmöglichkeiten. Nach der Montage sollte der Schwerpunkt des Lasers in etwa über der mittleren Bohrung liegen.

Die erforderliche Höhe des Lichtstrahls über der Arbeitsplatte beträgt 60-62 mm. Wenn der Verstellbereich der Rändelschrauben nicht ausreichen sollte, ist ein geeigneter Distanzring o. ä. unter dem Laser zu montieren.

Die Länge der Befestigungsschraube ist so auszuwählen, dass das Lasergehäuse bzw. innere Laserteile nicht zerstört werden.

- Dazu zweckmäßigerweise zuerst die maximal mögliche Einschraubtiefe der Schraube in die Laseraufnahme bestimmen und dann eine Schraube auswählen, deren Gewinde um ca. 2 mm weniger weit aus dem Laserträger heraussteht (beigefügt sind eine

Schraube und eine Vierkantmutter, die in gängige Nuten passen).

## 5.2 Strahlteiler

Das Glas des Strahlteilers ist auf einer Seite entspiegelt und auf der anderen Seite mit einer zu 50% durchlässigen Beschichtung versehen, die mit einem Dreieck gekennzeichnet ist, welches auch bei den gezeichneten Experimentieraufbauten eingetragen ist.

## 5.3 Montage, Grundeinstellungen

Der Aufbau der Komponenten auf der Grundplatte ist in Fig. 1 dargestellt. Bei der folgenden Beschreibung des Aufbaus wird davon ausgegangen, dass alle Grundeinstellungen vorgenommen werden müssen.

- 1. Strahlteiler ( $\nabla$  beachten) lose anschrauben und Montagewerkzeug aufsetzen und anschrauben (vgl. Fig. 2). Die Spiegel sollten sich jetzt gemeinsam minimal auf der Grundplatte verschieben lassen. Beim Festschrauben der Spiegel kontrollieren, dass sich kein Spalt zwischen Spiegelträger und Werkzeug bildet. Werkzeug abnehmen.



Fig. 2 Montagewerkzeug für Strahlteiler

- 2. Bei beiden Oberflächenspiegeln den Spalt zwischen Spiegelträger und Rückwand umlaufend auf 4 mm einstellen (siehe Fig. 3).
- Als Einstellhilfe können 2 Münzen zu je 10 Eurocent verwendet werden. Spiegel lose auf die Grundplatte schrauben. Beim Festschrauben die Spiegel so nach außen drücken, dass das Spiel in den Bohrungen nicht zu einer Verdrehung der Spiegel relativ zu den Strahlteilern führt.



Fig. 3 Grundeinstellung der Oberflächenspiegel

- 3. Schirme montieren.
- 4. Linse lose anschrauben und parallel zur Grundplatte ausrichten.
- 5. Laser einschalten und so zur Linse und zur Grundplatte ausrichten, dass auf beiden Schirmen etwa mittig ein Lichtfleck erscheint.
- 6. Linse um ca.  $90^\circ$  gegen den Uhrzeigersinn aus dem Strahlengang drehen.

Auf den Schirmen sind jetzt 2 helle und weitere schwächere Lichtpunkte zu sehen (bei zufälliger optimaler Einstellung tritt nur 1 heller Punkt auf).

- Die hellen Lichtpunkte durch verdrehen der Rändelschrauben an den Oberflächenspiegeln zur Deckung bringen.

Bei optimaler Überdeckung ist evtl. ein Flimmern (Interferenz) zu sehen.

- Linse wieder in den Strahlengang drehen.

Mit etwas Glück sind jetzt bereits Interferenzstreifen zu sehen. Falls nicht, dann folgendermaßen scannen:

- An einem Spiegel die untere Rändelschraube langsam um ca.  $+90^\circ$  verdrehen, zurückstellen, langsam auf ca.  $-90^\circ$  verdrehen und wieder zurück auf  $0^\circ$ .
- Treten auch dabei keine Interferenzstreifen auf, dann die obere Rändelschraube um max.  $+30^\circ$  (= Abstand von 2 Vertiefungen der Rändelschraube) verdrehen und die untere Rändelschraube wieder um  $\pm 90^\circ$  langsam verdrehen. Diesen Vorgang mit  $-30^\circ$ ,  $+60^\circ$  und  $-60^\circ$  der oberen Rändelschraube wiederholen, wobei der Scenvorgang abgebrochen wird, wenn Interferenzstreifen auftreten. Andernfalls nochmals mit der Montage der Strahlteiler beginnen.
- Nach dem Auftreten der Interferenzstreifen die Rändelschrauben ganz langsam verstellen, wobei die Streifen immer breiter werden und schließlich das Zentrum des Interferenzmusters erreicht wird.

Da die beiden Strahlwege bei dieser Vorgehensweise nahezu gleich lang sind, erscheint das Zentrum des Interferenzmusters als großer heller bzw. dunkler Fleck. Dabei ist schön zu beobachten, dass das Muster auf den beiden Schirmen komplementär ist.

7. Um ein Interferenzmuster mit „schönen“ Ringen zu erhalten, müssen die Strahlwege unterschiedlich lang sein.

- Dazu die 3 Schrauben des hinteren Oberflächenspiegels um jeweils 1,5 Umdrehungen eindrehen (= längerer Lichtweg) und die 3 Schrauben des vorderen Spiegels um jeweils 1,5 Umdrehungen herausdrehen (= kürzerer Lichtweg).

- 8. Aufweitungslinse aus dem Strahl heraus-schwenken.

Die Interferenz tritt jetzt nicht mehr bei einer Überlagerung der beiden hellen Punkte auf, sondern bei einem Abstand von ca. 6 - 7 mm, wobei der Punkt des vorderen Spiegels auf dem hinteren Schirm links liegt (auf dem rechten Schirm liegt er rechts).

- Zum Auffinden des Interferenzmusters jetzt wieder wie unter 6. beschrieben scannen.

Damit ist die Grundeinstellung abgeschlossen.

**Alternative 1:** Die Länge der optischen Wege kann auch durch das Einsetzen der Vakuumzelle (Position gemäß Fig. 7) verändert werden. Die Schritte 7. und 8. der obigen Einstellanleitung sind dann nicht erforderlich.

**Alternative 2:** Nach Durchführung der Einstellschritte 1. bis 5. kann die Aufweitungslinse auch am Strahlaustritt montiert werden. Der Laser wird ggf. etwas nachjustiert, bis auf dem rechten Schirm 1 - 2 Lichtflecke erscheinen. Die Lichtflecke können durch Verstellen der Rändelschrauben der Oberflächenspiegel leicht zur Interferenz gebracht werden. Ein Ringmuster ist bei diesem Aufbau aber nicht zu erzielen.



Fig. 4 Alternative 2

#### 5.4 Reinigung der optischen Komponenten

- Die Oberflächenspiegel, der Strahlteiler, die Glas-Polarisationsfilter, die Aufweitungslinse und die Scheiben der Vakuumzelle mit einem weichen Lappen, der ggf. mit Ethanol (Spiritus) getränkt ist, vorsichtig abwischen.
- Dabei nicht unter Druck reiben! Besser ist es, mit viel Ethanol und wenig Kraft zu arbeiten.
- Die Glasplatte auf dem Halter (12) nur trocken abwischen (ggf. anhauchen), da sonst der Klebefilm-Streifen abgelöst werden kann.
- Die Folien-Polarisationsfilter möglichst nur abpusten.

## 6. Experimentierbeispiele

### 6.1 Polarisationsexperimente

Diese Vorexperimente können entfallen, doch sind sie bei der Interpretation von unerwarteten Effekten bei eigenen Interferenzexperimenten mit Polarisationsfiltern nützlich.

#### Polarisation des verwendeten Lasers

Wenn ein Laser mit angegebener Polarisationsrichtung (üblicherweise horizontal oder vertikal) zum Einsatz kommt, dann sind die Verhältnisse klar. Häufig jedoch wird die Polarisationsrichtung mit „random“ angegeben, was aber nicht eindeutig definiert ist. Folgende Fälle sind zu unterscheiden:

1. Der Laser hat genau eine Polarisationsrichtung, die beim Einbau aber nicht weiter beachtet wurde (Diodenlaser haben immer nur eine Polarisationsrichtung).
2. Der Laser hat zwei Polarisationsrichtungen, die üblicherweise orthogonal zueinander sind, die aber zeitlich nicht mit konstanter Intensität abgestrahlt werden.
3. Der Laser hat mehr als zwei Polarisationsrichtungen. Dies scheint aber nur bei sehr langen Laserröhren aufzutreten, die nicht mehr in die Laserklasse 2 fallen.

Die Bestimmung der Polarisationsrichtung des eingesetzten Lasers ist mit einem der beiden Glas-Polarisationsfilter einfach möglich, vgl. Experimentieraufbau in Fig. 7 aber ohne Glasplatte und mit nur einem Polarisationsfilter. Bestimmt wird der Winkel, bei dem das Laserlicht maximal abgedunkelt wird. Zu diesem Winkel ist die Polarisationsrichtung um  $90^\circ$  verdreht.

Zu empfehlen ist ein He-Ne-Laser oder ein stabiler Diodenlaser, da einfache Laserdioden in Abhängigkeit von der Temperatur leicht unterschiedliche Wellenlängen emittieren und diese evtl. gleichzeitig auftreten, was dazu führt, dass keine eindeutigen Interferenzmuster zu sehen sind (Tipp: leichte Erwärmung mit der Hand kann Abhilfe schaffen).

#### Polarisation des Lichts bei der Reflexion am Strahlteiler

- Experiment gemäß Fig. 5 aufbauen.
- Auf die Positionen 1 und 2 die beiden Glas-Polarisationsfilter stellen und auf die Position 4 die Aufweitungslinse, die hier nur den Strahlengang unterbricht.
- Am ersten Polarisationsfilter den Winkel  $\alpha$  des eintretenden Strahls einstellen.
- Den Polarisationsfilter hinter dem Strahlteiler jetzt solange verdrehen, bis die Lichtpunkte

auf dem Schirm eine minimale Helligkeit aufweisen. Den zugehörigen Winkel  $\gamma$  notieren.

Die Haupt-Polarisationsrichtung des reflektierten Lichts  $\beta$  ist zu  $\gamma$  um  $90^\circ$  verdreht.

Typische Experimentierergebnisse sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Polarisationswinkel $\alpha$ , Eintritt	Polarisationswinkel $\gamma$ , Austritt, dunkel	Polarisationswinkel $\beta$ , Austritt = $\gamma - 90^\circ$
$0^\circ$	$90^\circ$	$0^\circ$
$15^\circ$	$81^\circ$	$-9^\circ$
$30^\circ$	$69^\circ$	$-21^\circ$
$45^\circ$	$57^\circ$	$-33^\circ$
$60^\circ$	$39^\circ$	$-51^\circ$
$75^\circ$	$18^\circ$	$-72^\circ$
$90^\circ$	$0^\circ$	$-90^\circ$

#### Polarisation des Lichts beim Durchgang durch den Strahlteiler

- Die beiden Glas-Strahlteiler jetzt auf die Positionen 1 und 3 gemäß Fig. 5 stellen und die Aufweitungslinse auf Position 2, um den oberen Lichtweg zu unterbrechen.

#### Polarisation des Lichts bei der Reflexion am Spiegel

- Für dieses Experiment die beiden Glas-Strahlteiler auf die Positionen 3 und 4 stellen. Die Aufweitungslinse bleibt auf Position 2.

Messergebnisse der 3 Experimente sind in Fig. 6 zusammengefasst. Es ist zu erkennen, dass bei der Reflexion die horizontale Komponente gespiegelt wird, während die vertikale erhalten bleibt. Die Krümmung der beiden Strahlteiler-Kurven deutet auf eine leichte optische Aktivität hin.

#### Doppelbrechung von transparentem Klebeband

Ein interessantes Experiment zur Doppelbrechung ist in diesem Zusammenhang noch möglich, wenn die „Glasplatte auf Halter“ aus dem Ergänzungsgerätesatz zur Verfügung steht. Der Experimentieraufbau ist in Fig. 7 gezeigt.

- Die beiden Polfilter auf  $45^\circ$  und  $-45^\circ$  einstellen, so dass ohne Glasplatte praktisch kein Licht auf den Beobachtungsschirm gelangt.

Wenn jetzt die Glasplatte mit dem Klebeband in den Strahl geschoben wird, dann erscheint ein Lichtfleck auf dem Schirm. Bei der Winkelkombination  $90^\circ$  am ersten Strahlteiler und  $0^\circ$  am Zweiten bleibt der Schirm auch mit Klebeband im Strahl dunkel (Winkelkombination senkrecht zueinander aber gemeinsam mit ca.  $\pm 10^\circ$  durch Toleranzen des Klebebandes).

Die Doppelbrechung des Klebebandes kommt folgendermaßen zustande: Bei der Herstellung wird das Trägermaterial in einer Richtung stark gedehnt, wodurch die Kohlenwasserstoffketten in dieser Richtung gestreckt und ausgerichtet werden. Dadurch ist der Brechungsindex unterschiedlich, je nachdem ob der E-Vektor der Lichtwelle parallel oder senkrecht zur Dehnungsrichtung schwingt.

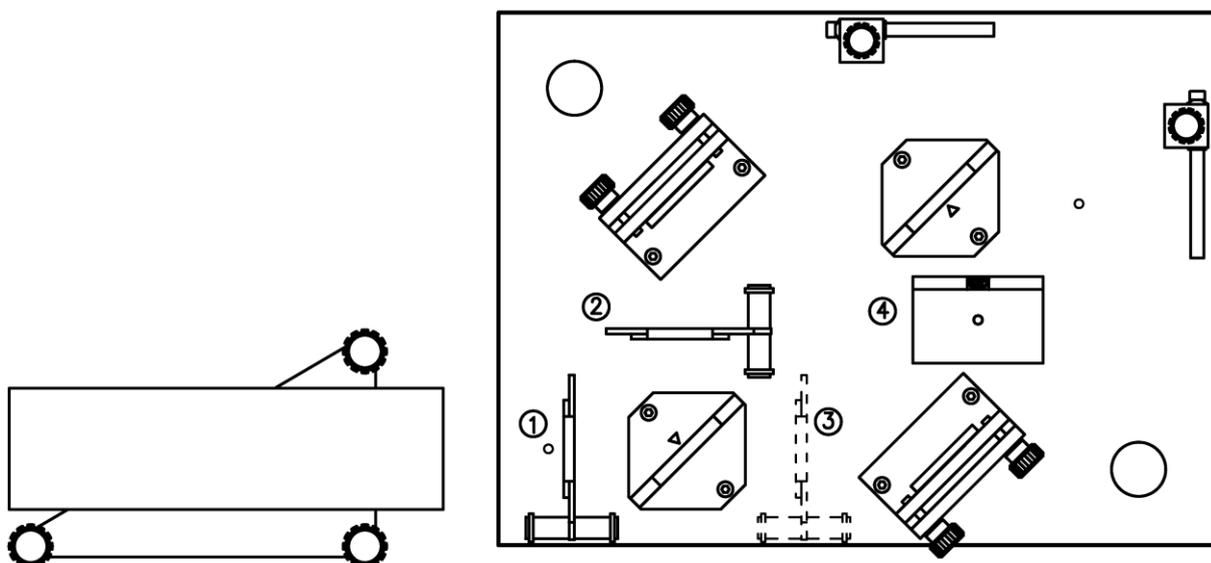


Fig. 5 Experimentieraufbau für die Polarisationsuntersuchungen. Die Aufweitungslinse dient hier nur zur Unterbrechung eines Strahlweges

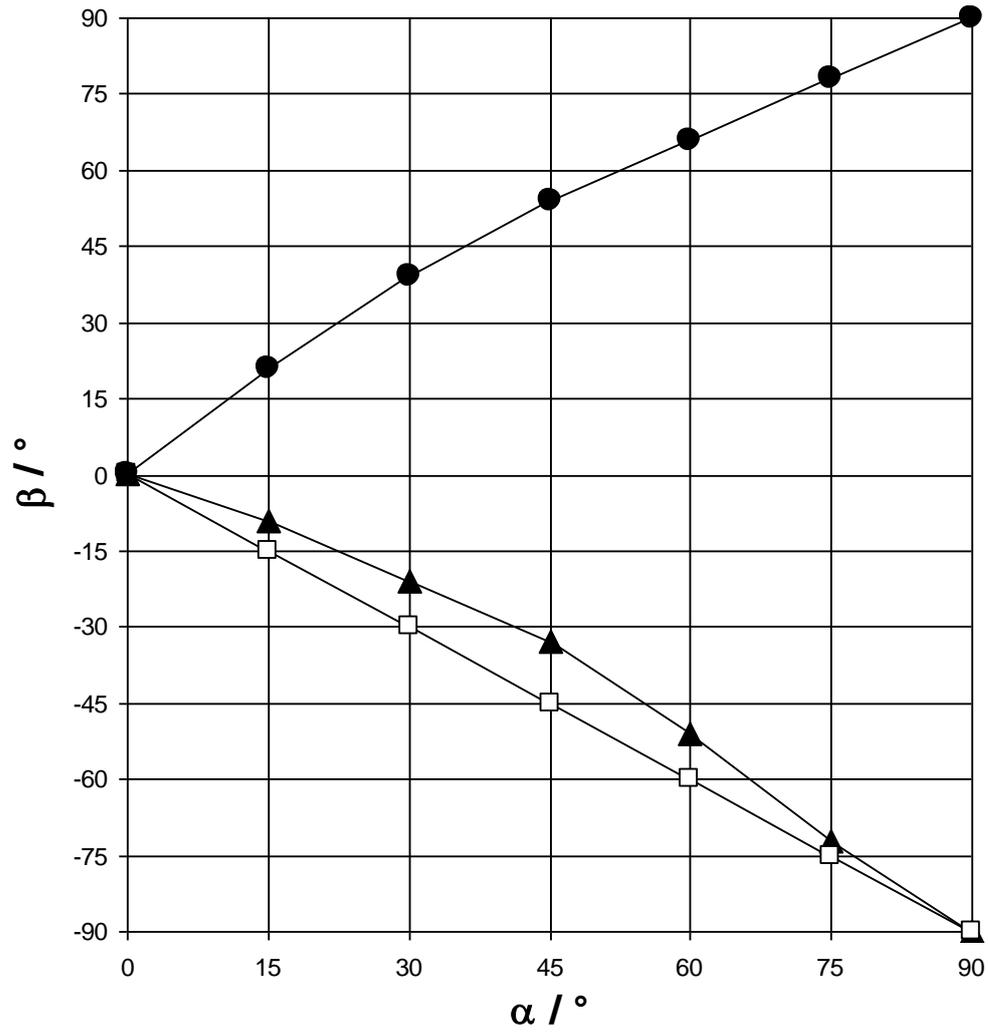


Fig. 6 Ergebnisse der Polarisationsexperimente. Kreise = Durchgang durch Strahlteiler, Dreiecke = Reflexion am Strahlteiler, offene Quadrate = Reflexion am Oberflächenspiegel

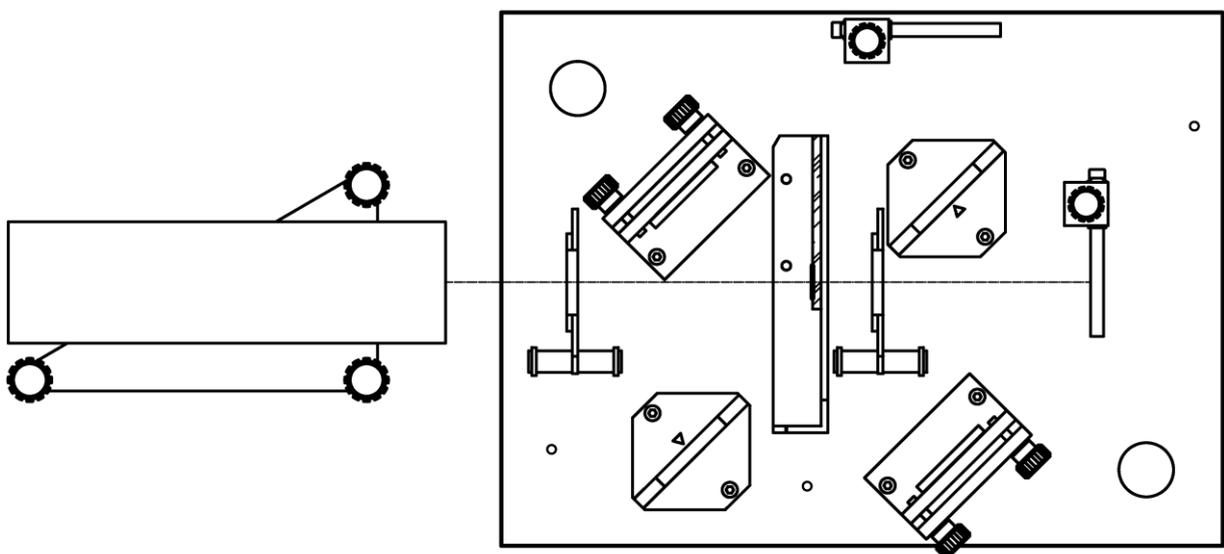


Fig. 7 Experimentieraufbau zur Untersuchung der Doppelbrechung von transparentem Klebeband

## 6.2 Oberflächengüte optischer Bauteile

Mit diesem Experiment kann die Oberflächengüte optischer Bauteile qualitativ beurteilt werden. Normalerweise werden solche Messungen mit einem Twyman-Green Interferometer durchgeführt, bei dem der (Laser-) Lichtstrahl aufgeweitet und parallel ist. Zum qualitativen Verständnis des Funktionsprinzips kann aber auch aufgeweitetes, nicht paralleles Licht verwendet werden.

Als Beispiel für eine schlechte optische Oberfläche wird ein transparenter Klebfilm verwendet, der auf einer Glasplatte aufgeklebt ist und beim normalen Durchschauen durchaus homogen aussieht.

- Experiment gemäß Fig. 8 aufbauen.

- Nachdem die Grundeinstellungen gemäß Abschnitt 5 durchgeführt und Interferenzringe mittig auf beiden Schirmen zu sehen sind, die Glasplatte mit dem Halter in den rechten Teilstrahl schieben.

Wenn der Klebfilm in den Strahl kommt, dann fransen die Interferenzringe aus und teilweise befinden sich in eigentlich dunklen Bereichen helle Punkte und umgekehrt. Dies ist auf die ungleichmäßige, hügelige Oberfläche des Klebfilms zurückzuführen, da sich bereits kleinste Schichtdickenänderungen in einer Verschiebung der Interferenzringe bemerkbar machen.

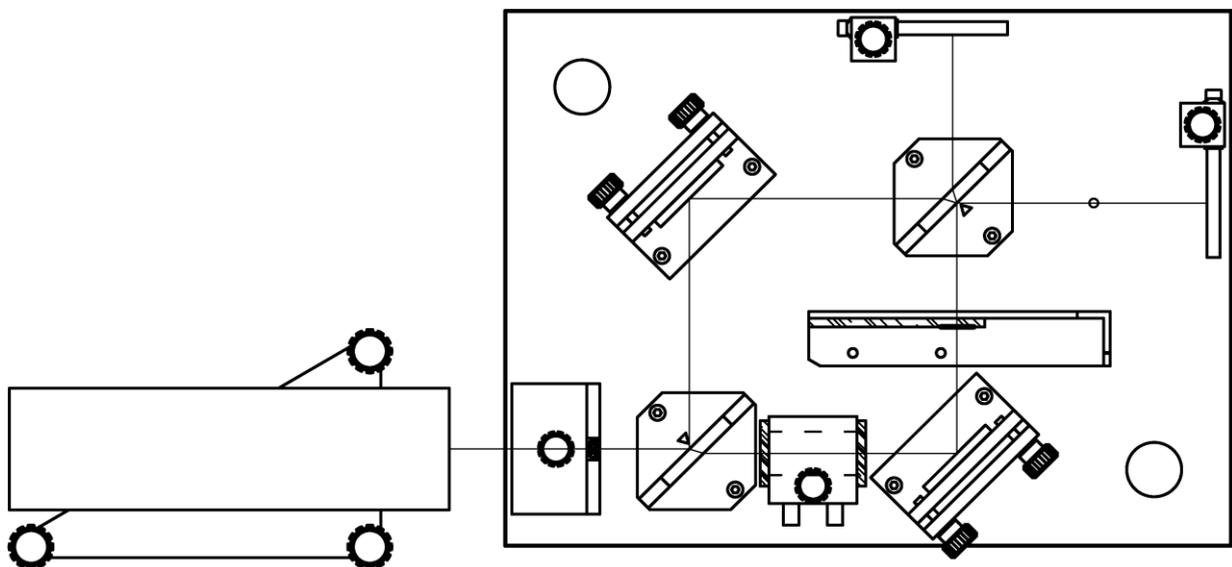


Fig. 8 Experimentieraufbau zur Messung der Oberflächengüte optischer Bauteile (ohne Vakuumzelle) und Experimentieraufbau zur Messung der Brechzahl von Luft (ohne Glasplatte auf Halter)

## 6.3 Brechzahl von Luft

### Experimentieraufbau

- Experiment gemäß Fig. 8 aufbauen.
- Nachdem die Grundeinstellungen gemäß Abschnitt 5 durchgeführt und Interferenzringe mittig auf beiden Schirmen zu sehen sind, die Vakuumzelle in den unteren Teilstrahl stellen und festschrauben.
- Evtl. noch einen Oberflächenspiegel minimal nachstellen, um die Interferenzringe mittig auf dem hinteren Schirm zu erhalten.

### Durchführung

- Geeignete Handvakuumpumpe an die Vakuumzelle anschließen und den angezeigten Druck  $p$  notieren.
- Dann die Zelle langsam evakuieren und die Anzahl  $m$  der entstehenden Ringe zählen.

- In regelmäßigen Abständen den Druck und die zugehörige Anzahl notieren.
- Wenn der minimale Druck erreicht ist (bei einer einfachen Handpumpe ca. 10 kPa), die Vakuumzelle wieder mit Luft füllen.
- Jetzt noch eine Messreihe bei Überdruck (bis max. 200 kPa entsprechend 1 bar Überdruck) durchführen.

### Auswertung

Beim Druck  $p = 0$  ist die Brechzahl  $n(p = 0) = 1$ . Mit zunehmendem Druck steigt die Brechzahl gemäß

$$n(p) = 1 + \frac{\Delta n}{\Delta p} p$$

an. Zur Ermittlung der Brechzahl beim Normaldruck ist also zunächst die Steigung  $\Delta n / \Delta p$  zu

bestimmen. In erster Näherung gilt:

$$\frac{\Delta n}{\Delta p} = \frac{\lambda}{l_z} \left| \frac{\Delta m}{\Delta p} \right|$$

Dabei ist  $m$  die Anzahl der entstehenden bzw. verschwindenden Ringe,  $\lambda$  ist die Lichtwellenlänge und  $l_z$  ist die innere Länge der Vakuumzelle (hier 41 mm). Wurde also beispielsweise bei einer Druckabsenkung um  $\Delta p = 80$  kPa das zugehörige  $\Delta m = 14$  bestimmt, dann ergibt sich  $\Delta n / \Delta p = 2,7 \cdot 10^{-9}$  1/Pa. Demnach beträgt die Brechzahl von Luft bei Umgebungsdruck (100 kPa)  $n = 1,00027$ . In der Literatur ist  $n = 1,00029$  zu finden. (H. Stöcker, Taschenbuch der Physik, Deutsch, 1998)

#### 6.4 Analogieexperiment zum Quantenradierer

- Experiment gemäß Fig. 9 aufbauen.
- Nachdem die Grundeinstellungen gemäß Abschnitt 5 durchgeführt und Interferenzringe mittig auf beiden Schirmen zu sehen sind, einen Folien-Polarisationsfilter auf  $45^\circ$  einstellen und zwischen Aufweitungslinse und erstem Strahlteiler platzieren.

Dies ist erforderlich, da die Polarisationssebene von Lasern üblicherweise nicht auf  $45^\circ$  eingestellt ist und die weitere Polarisation auf  $0^\circ$  bzw.  $90^\circ$  zu sehr ungleichen Lichtintensitäten der beiden Teilstrahlen führen würde.

Die Interferenzringe auf den Schirmen sind jetzt etwas abgeschwächt, aber weiterhin sehr deutlich. Falls störende Rückreflexionen vom Polarisationsfilter zum Laser auftreten, kann eine leichte Schrägstellung des Filters Abhilfe schaffen.

- Als nächstes die beiden Glas-Polarisationsfilter in die beiden Teilstrahlen stellen.

Die optimale Lichtintensität für dieses Experiment wird erhalten, wenn der linke Filter auf  $0^\circ$  und der rechte auf  $90^\circ$  eingestellt ist (vgl. Fig. 6: hinter dem Strahlteiler ist der reflektierte Strahl etwas Richtung  $0^\circ$  gedreht, während der durchgehende leicht in Richtung  $90^\circ$  verdreht ist).

Die Interferenzringe auf den Schirmen sind jetzt verschwunden, da orthogonale Wellen sich nicht überlagern oder auslöschen können.

- Jetzt noch den zweiten Folien-Polarisationsfilter auf  $45^\circ$  einstellen und zwischen hinterem Strahlteiler und Schirm platzieren.

Jetzt sind wieder Interferenzringe zu sehen. Die Weginformation der Lichtquanten ist ausradiert.

Nach der Wellentheorie ist dies nicht weiter verwunderlich. In der Quantenmechanik jedoch werden Photonen als unteilbare Quantenobjekte angesehen und nur das Auslöschen der vorher prinzipiell vorhandenen Weginformation (Polarisation) durch den letzten Strahlteiler soll dazu führen, dass die Photonen wieder Interferenz zeigen und sogar bei extrem schwachem Laserlicht - wenn praktisch nur Einzelphotonen im Interferometer sind - mit sich selbst interferieren, trotz der Unteilbarkeit und daher des Unvermögens beide Wege zu durchlaufen. Mit solchen Vorstellungen hatte auch Erwin Schrödinger Probleme - 1926 sagte er: "Wenn es doch bei dieser verdammten Quantenspringerei bleiben soll, so bedaure ich, mich mit der Quantentheorie überhaupt beschäftigt zu haben."

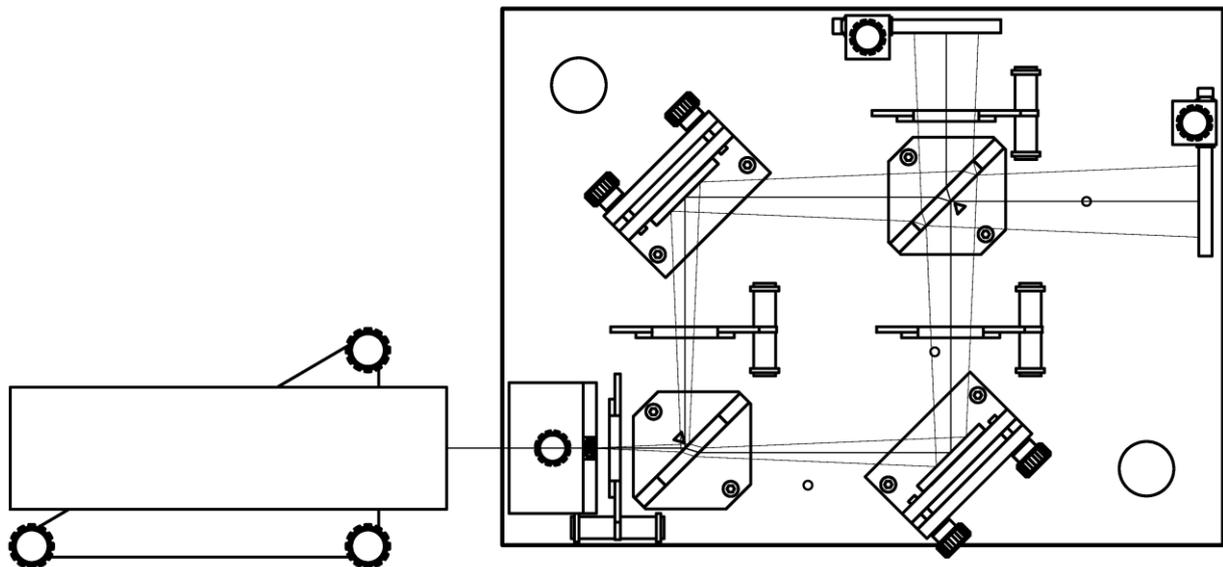


Fig. 9 Experimentieraufbau für das Analogieexperiment zum Quantenradierer. Der Strahlengang gilt für den Fall gleicher Lichtwege in beiden Teilstrahlen und entspricht nicht der Experimentierbeschreibung mit Interferenzringen.

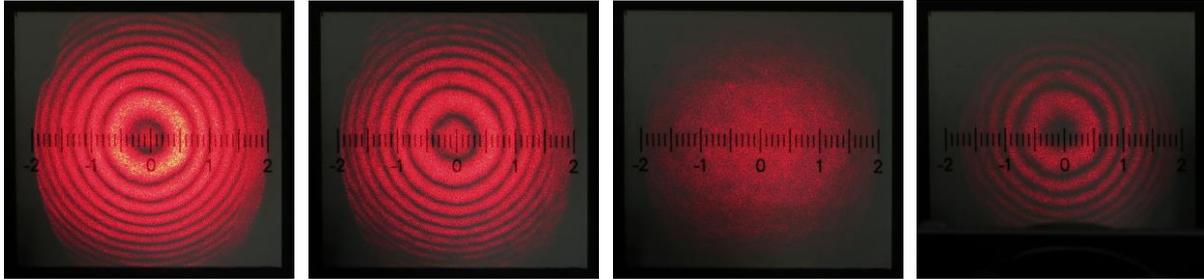


Fig. 10 von links nach rechts: 1. ohne Polarisationsfilter, 2. ein Polarisationsfilter ( $45^\circ$ ) zwischen Linse und Strahlteiler, 3. zwei weitere Polarisationsfilter ( $0^\circ$  bzw.  $90^\circ$ ) in beiden Teilstrahlen, 4. vierter Polarisationsfilter ( $45^\circ$ ) zwischen zweitem Strahlteiler und Schirm

### 6.5 Weißlicht-Interferenz

Weißlicht hat, bedingt durch das breite Spektrum, eine sehr kurze Kohärenzlänge. Daher müssen die beiden Lichtwege zur Beobachtung von Interferenzen nahezu exakt gleich lang sein. Diese Forderung ist bei einem Mach-Zehnder-Interferometer prinzipiell erfüllbar, allerdings erfordert die Einstellung Geduld und Feingefühl.

**Experimentieraufbau:** Der Experimentieraufbau ist in Fig. 11 dargestellt. Die Aufweitungslinse ist zunächst noch zwischen Laser und erstem Strahlteiler montiert.

- Grundeinstellungen mit Laserlicht gemäß Abschnitt 5.3, Punkte 1 bis 6, durchführen. Dabei darauf achten, dass bei beiden Oberflächenspiegeln der 4 mm breite Spalt zwischen Spiegelträger und Rückwand sehr genau eingestellt wird.
- Auch den Laser sorgfältig höhenjustieren.

Nach den Grundeinstellungen ist das Zentrum der Interferenzringe als großer heller bzw. dunkler Fleck auf den Schirmen zu sehen.

- Jetzt den hinteren Schirm umklappen und das Muster auf einen mindestens 0,5 m entfernten weiteren Schirm (Blatt Papier, weiße Wand) projizieren.

Die größere Distanz verhindert Fehlinterpretationen durch schleifende Schnitte bei den folgenden Einstellungen, die alle am **vorderen** Oberflächenspiegel vorgenommen werden:

- 1. Linse aus dem Strahlengang drehen.
- 2. Obere Rändelschraube des Spiegels hin- und herdrehen. Wenn der wandernde Lichtpunkt dabei rechts von dem anderen liegt, dann die Innensechskant-Schraube herausdrehen, bis der jetzt nach links wandernde Punkt etwa soweit links vom anderen liegt, wie er vorher zu weit rechts war (Höhenverschiebung ignorieren).
- 3. Mit den beiden Rändelschrauben wieder beide Punkte zur Deckung bringen, die Linse wieder einschwenken und die Interferenzringe wieder mittig einstellen.

- 4. Die Schritte 1 bis 3 solange durchführen, bis keine Verbesserung mehr zu erreichen ist.
- Jetzt statt des Lasers die Optikleuchte mit Lochblende in etwa 25 cm Abstand vor die Grundplatte stellen, wobei die Vorderkanten von Grundplatte und Leuchtenständer fluchten.
- Die Lochblende verdrehen, bis das Loch mit 0,7 mm Durchmesser vor der LED ist.
- Die Linse aus dem Strahlengang drehen, den hinteren Schirm wieder hochklappen und die Polfilter gemäß Fig. 11 aufstellen, wobei sie so platziert werden, dass die Schatten auf dem hinteren Schirm bei 1 cm liegen.

Die Schattenkanten erleichtern die folgende Feineinstellung:

- A. Am vorderen Spiegel die untere Schraube sehr langsam hin- und herdrehen, wobei die zugehörige Schattenkante um etwa 1-2 mm nach links bzw. rechts wandern sollte.
- B. Wenn keine Interferenzstreifen zu sehen sind, dann die untere Schraube des hinteren Spiegels um ca.  $1/50$  Umdrehung (entspricht 1 mm auf dem Umfang des Rändel-Kopfes bzw. etwa der Breite der Rändel-Vertiefung) im Uhrzeigersinn verdrehen und Schritt A wiederholen. Wenn nach einigen Versuchen im Uhrzeigersinn kein Erfolg zu verzeichnen ist, dann entgegen des Uhrzeigersinns probieren.
- C. Gegebenenfalls die Einstellungen mit Laserlicht überprüfen. Dabei besonders auf die vertikale Justage achten, da sich die oberen Rändelschrauben an den Spiegeln zwischenzeitlich eventuell leicht verstellt haben.
- D. Wenn auf den Schirmen ein mindestens sehr schmales Weißlicht-Interferenzmuster zu sehen ist, dann die Aufweitungslinse zur Vergrößerung gemäß Fig. 11 montieren.

**Tipp:** Wird ein Farbfilter mit schmaler Durchlassbreite vor die Optikleuchte gehalten, dann

ist ein Interferenzmuster schon bei etwas ungenauerer Justage zu sehen.

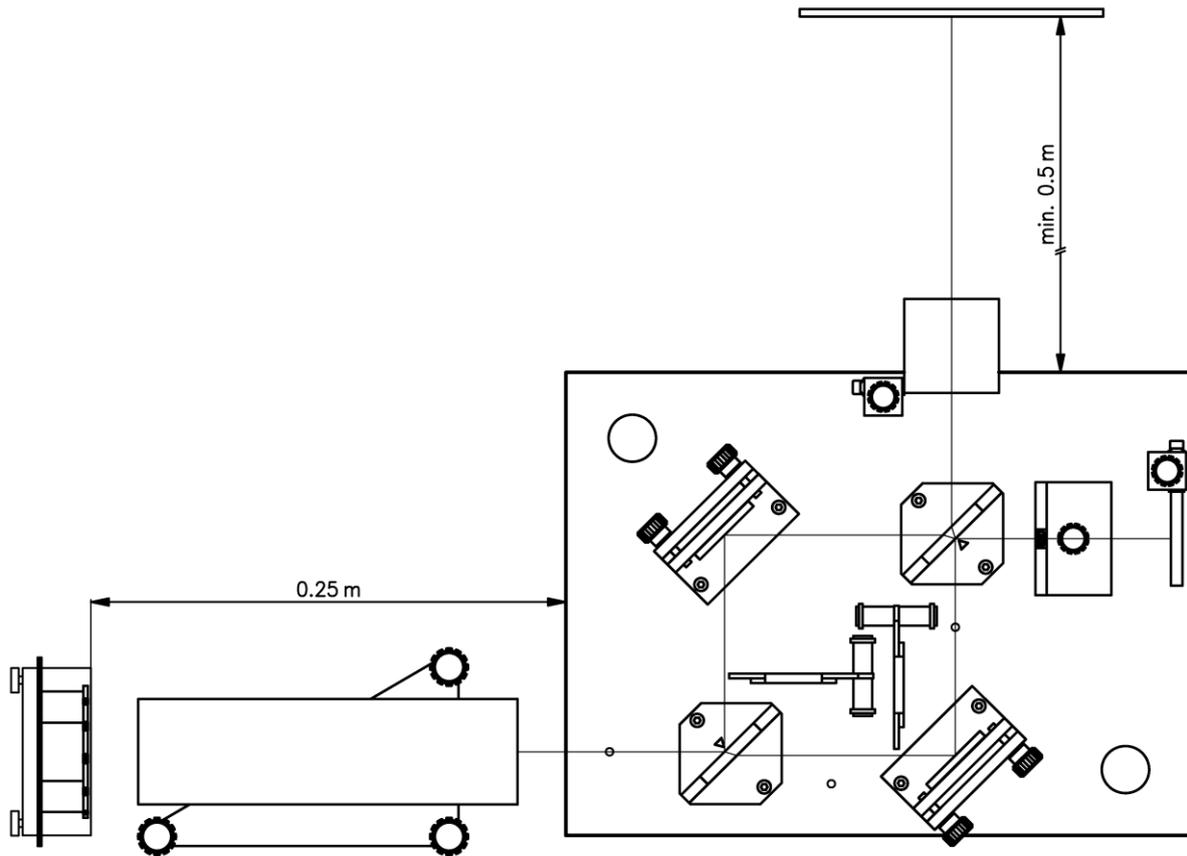


Fig. 11 Experimentieraufbau zur Weißlicht Interferenz

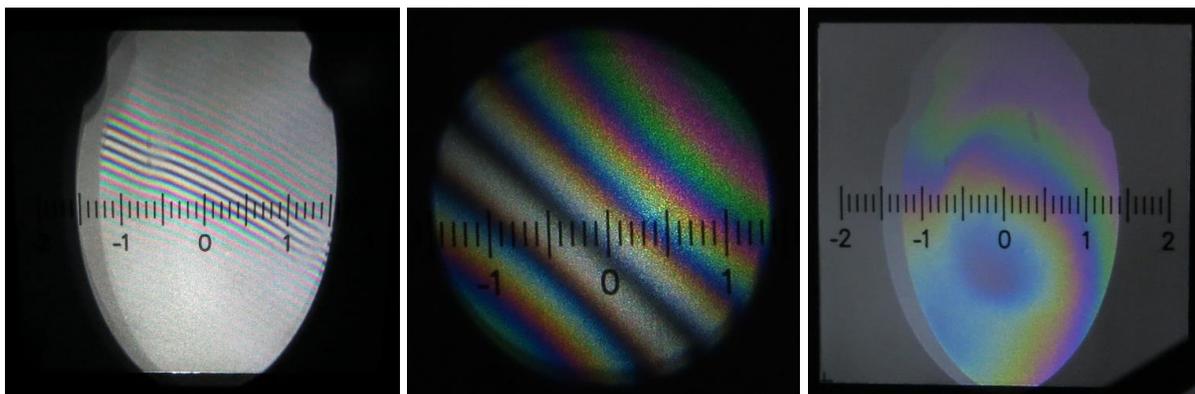


Fig. 12 Weißlicht-Interferenzmuster. Das linke Bild zeigt Streifen bei noch nicht optimaler Einstellung auf dem hinteren Schirm. Ein durch die Aufweitungslinse vergrößerter Ausschnitt ist in der Mitte dargestellt. Das rechte Bild zeigt wieder den hinteren Schirm, aber bei besserer Justage.

