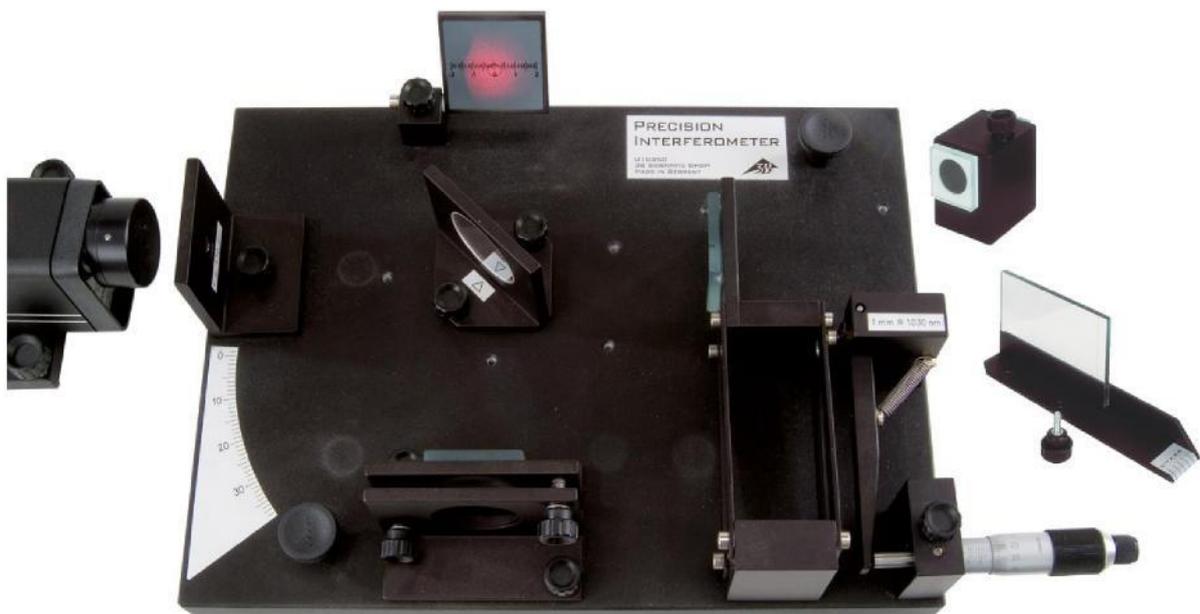


1002651 Interferometer

1002652 Ergänzungssatz zum Interferometer

Bedienungsanleitung

11/15 MH



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!
- 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 (14) dienen dazu, das Interferometer anzuheben, um sicher unter die Grundplatte greifen können.
- Der maximal zulässige Druck in der Vakuumzelle (6) beträgt 200 kPas (2 bar) entsprechend 100 kPas (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 Versuchen mit Überdruck ist sicherzustellen, dass sich keine Personen im Explosionsbereich der Zelle aufhalten. Gegebenenfalls Schutzbrille verwenden.

2. Lieferumfang, Bezeichnung der Komponenten

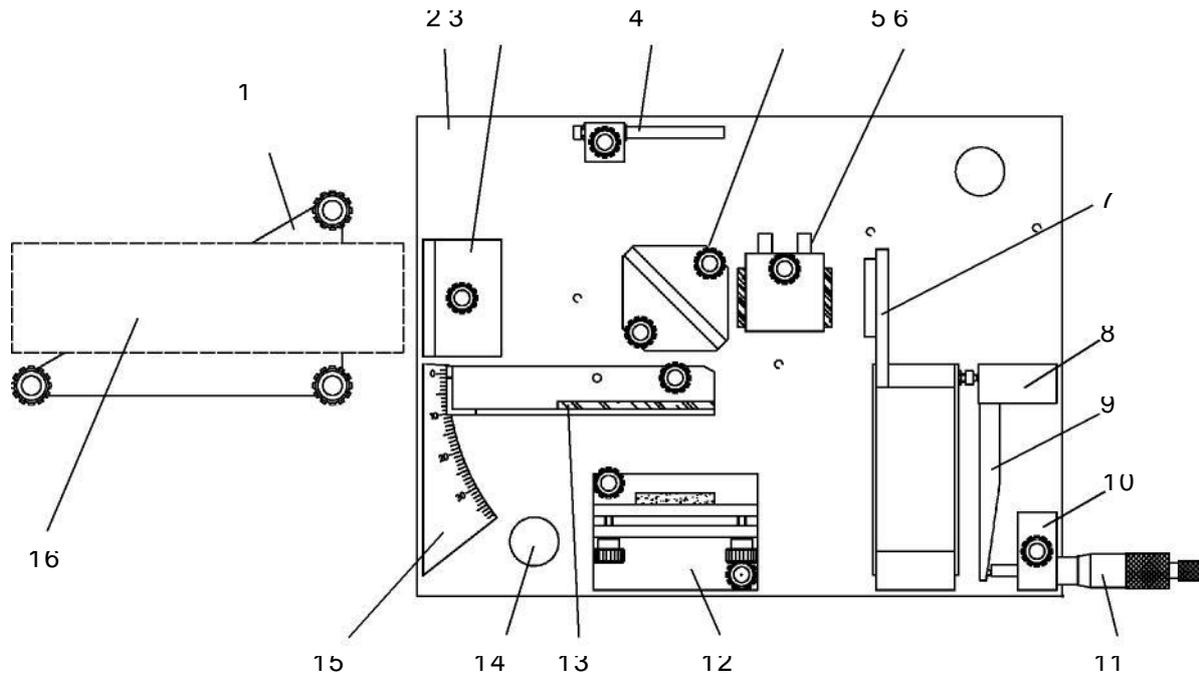


Abb. 1 Lieferumfang

- | | |
|------------------------------------|--|
| 1 Laserträger | 10 Mikrometerhalter |
| 2 Grundplatte | 11 Mikrometer |
| 3 Aufweitungslinse | 12 Justierbarer Spiegel |
| 4 Beobachtungsschirm | 13 Glasplatte und Halter (aus Ergänzungssatz) |
| 5 Strahlenteiler | 14 Tragekopf |
| 6 Vakuumzelle (aus Ergänzungssatz) | 15 Winkelskala |
| 7 Fein verstellbarer Spiegel | 16 Laser (nicht im Lieferumfang enthalten) |
| 8 Exzenter mit Kalibrierschild | Stabiler Kunststoffbehälter (nicht abgebildet) |
| 9 Exzenterarm | |

3. Beschreibung

Im Jahre 1881 führte A. Michelson einen Versuch durch, in dem ein Lichtstrahl mittels Strahlenteiler in zwei Strahlen aufgeteilt wurde (vgl. auch Abb. 2). Die beiden Strahlen wurden von Spiegeln reflektiert und in dem Strahlenteiler wieder überlagert, wodurch es bei unterschiedlichen Weglängen zwischen den beiden Strahlen zur Interferenz (Auslöschung oder Verstärkung) kommt. Da auch unterschiedliche Lichtgeschwindigkeiten in den beiden Teilstrahlen zur Interferenz führen würden, konnte mit dem Versuchsaufbau gezeigt werden, dass kein „Äther“ bzw. „Ätherwind“ existiert, da ja der Teilstrahl mit Rückenwind schneller sein müsste als derjenige mit Seitenwind. Neben dem Nachweis der Nichtexistenz eines Äthers kann ein Interferometer zur Messung von

Lichtwellenlängen bzw. bei bekannter Wellenlänge zur Messung sehr kurzer Strecken eingesetzt werden, was u. a. bei der Prüfung der Oberflächengüte optischer Bauteile wichtig ist. Diese klassischen Versuche und einige weitere können auch mit dem Präzisionsinterferometer durchgeführt werden. Im Einzelnen sind dies:

1. Michelson Interferometer
2. Fabry-Perot Interferometer
3. Bestimmung der Brechzahl von Glas *
4. Bestimmung der Brechzahl von Luft **
5. Twyman-Green Test für optische Bauteile (qualitativ, nicht quantitativ) *

* mit Ergänzungssatz (Vakuumzelle und Glasplatte auf drehbarem Halter)

** mit Ergänzungssatz und Vakuumpumpe

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

4. Technische Daten

- 5,5 kg schwere, biegesteife, große Grundplatte (245 x 330 x 25 mm³) für präzise und reproduzierbare Messungen.
- Große optische Bauteile für klare und scharfe Interferenzbilder: (40 mm Ø bzw. 40 x 40 mm).
- Oberflächenspiegel: Durchlass 15%, Reflexion 85% bei senkrechtem Strahleinfall.
- Äußerst planer Strahlenteiler: Vorderseite 1/10 Å, Rückseite 1/4 Å. Durchlass 50%, Reflexion 50% bei 45° Einfallswinkel, Rückseite entspiegelt.
- Bedienerfreundliche Spiegelverstellung durch Exzenter-Untersetzung von ca. 1:1000 (ein Teilstrich am Mikrometer entspricht einem Spiegelweg von ca. 10 nm) bei einer fertigungsbedingten Genauigkeit von ±30%. Das nach der Fertigung gemessene Verhältnis von Mikrometerverstellung zu Spiegelverstellung ist auf dem Kalibrierschild z.B. mit 1 mm 830 nm angegeben. Unter Verwendung dieser Angabe sollte die Wellenlängenmessung auf mindestens ± 5% (Linearitätsabweichung und sonstige Fehler) genau sein.
- Durch den in der Neigung verstellbaren, reflektierenden Beobachtungsschirm lassen sich die Experimente auch bei Tageslicht (keine direkte Sonneneinstrahlung) durchführen.

5. Bedienung und Wartung

- Lasermontage: Zunächst ist der Laser auf den Laserträger zu 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 wird zweckmäßigerweise zuerst die maximal mögliche Einschraubtiefe der Schraube in die Laseraufnahme bestimmt und dann eine Schraube ausgewählt, deren Gewinde um ca. 2 mm weniger weit aus dem Laserträger heraussteht (beigefügt sind eine Schraube und eine Vierkantmutter, die in gängige Nuten passen).

- Strahlenteiler: Das Glas des Strahlenteilers 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 Versuchsaufbauten eingetragen ist.
- Transport, Aufbewahrung: Wie im Auslieferungszustand sollte der Exzenterarm (9) zum Transport und zur Aufbewahrung immer am Sockel des fein verstellbaren Spiegels (7) anliegen, um Druckstellen am präzisionsgedrehten Exzenter zu vermeiden.
- Exzenterreinigung und -wartung: Der aus Messing gedrehte Exzenter drückt auf eine polierte Stahlkugel am Halter des fein verstellbaren Spiegels. Durch Staub oder andere Verunreinigungen kann es vorkommen, dass die Spiegelverstellung nicht mehr gleichmäßig sondern „ruckelig“ vonstatten geht. In diesem Fall ist der Exzentersockel (8) abzuschrauben (die Schraubenköpfe befinden sich auf der Unterseite der Grundplatte (2)) und der Messing-Exzenter sowie die Stahlkugel zu reinigen. Dazu sollte ein weicher Lappen verwendet werden, der ggf. mit Waschbenzin, Aceton o.ä. getränkt ist. Bei der Montage des Exzenters ist darauf zu achten, dass ein leichter Druck auf die Stahlkugel ausgeübt wird. Nach der Montage ist ein Tropfen harzfreies Öl (Nähmaschinen- oder Waffenöl) auf die Berührungsstelle zwischen Exzenter und Stahlkugel zu geben.
- Reinigung der optischen Komponenten aus Glas: Die Oberflächenspiegel, der Strahlenteiler, die Aufweitungslinse und die Scheiben der Vakuumzelle können mit einem weichen Lappen, der ggf. mit Ethanol (Spiritus) getränkt ist, vorsichtig abgewischt werden. Dabei darf nicht unter Druck gerieben werden! Besser ist es, mit viel Ethanol und wenig Kraft zu arbeiten. Die Glasplatte auf dem Halter sollte nur trocken abgewischt werden (ggf. anhauchen), da sonst der Klebefilm-Streifen (Twyman-Green Versuch) abgelöst werden kann.

6. Experimente

6.1 Michelson Interferometer

6.1.1 Versuchsaufbau

Folgende Geräte werden benötigt:

1 Interferometer	1002651
1 He-Ne-Laser	1003165

Der Aufbau der Komponenten auf der Grundplatte ist in Abb. 2 dargestellt. Bei der folgenden Beschreibung des Aufbaus wird davon ausgegangen, dass alle Grundeinstellungen vorgenommen werden müssen.

- He-Ne-Laser an den Laserträger schrauben (s. a. Bedienungshinweise, Lasermontage) und ungefähr gerade vor die Aufweitungslinse stellen.
- Justierbaren Spiegel und Strahlenteiler entfernen und Aufweitungslinse gerade auf der Grundplatte befestigen.
- Den Laser so einstellen, dass der vom fein verschiebbaren Spiegel reflektierte Strahl zentrisch zurück auf die Aufweitungslinse fällt.
- Rändelschraube der Aufweitungslinse lösen und die Linse um etwa 90° aus dem Laserstrahl schwenken.
- Justierbaren Spiegel montieren und mit den Einstellschrauben so justieren, dass der Abstand zwischen der Spiegelträgerplatte und dem eigentlichen Träger rundum gleich ist (5 - 6 mm).
- Den Strahlenteiler mit der teilreflektierenden Seite in Richtung Winkelteilung zunächst lose anschrauben und innerhalb der engen möglichen Grenzen so verdrehen, dass die beiden hellsten auf dem Beobachtungsschirm sichtbaren Punkte in etwa auf einer vertikalen Linie liegen. Dann den Strahlenteiler festschrauben.
- Mit den Einstellschrauben des justierbaren Spiegels diesen solange verstellen, bis sich die beiden hellsten Punkte auf dem Schirm exakt decken. Dabei sollte jetzt schon Interferenz stattfinden, die sich durch ein Flimmern bemerkbar macht.
- Aufweitungslinse wieder in den Strahl drehen und in der Position festschrauben, die ein mittiges Bild (bezüglich der Helligkeit, nicht der Interferenzringe) auf dem Schirm ergibt. Den Schirm so gegenüber der Vertikalen neigen, dass sich für den Beobachter ein optimal helles und klares Bild ergibt.
- Den justierbaren Spiegel noch minimal

nachstellen, um die Interferenzringe mittig auf dem Schirm zu erhalten.

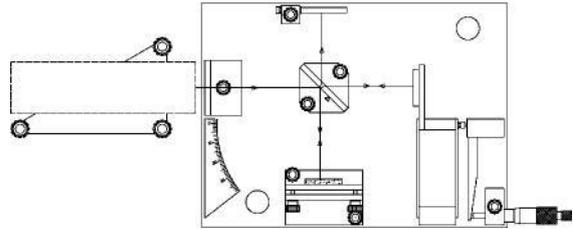


Abb. 2 Versuchsaufbau Michelson Interferometer

- Bei diesem Aufbau sind die Lichtlaufzeiten nahezu gleich lang, was zu großen, gut beobachtbaren Abständen der Interferenzringe führt. Dadurch bedingt kommt es aber auch zu einer elliptischen Verzerrung der Ringe (auch bei exakt gleichen Lichtlaufzeiten der Mittelpunktsstrahlen ergeben sich noch Interferenzmuster auf dem Schirm, die dann hyperbelförmig sind). Um nahezu kreisrunde Ringe zu erhalten, kann der Strahlenteiler um 180° gedreht werden.

6.1.2 Versuchsdurchführung

- Die Mikrometerschraube gegen den Uhrzeigersinn bis ca. 25 mm herausdrehen und dann langsam bis auf 20 mm zurückdrehen, um Messungenauigkeiten zu vermeiden, die bei der Umkehr der Drehrichtung auftreten.
- Die Mikrometerschraube langsam weiter im Uhrzeigersinn drehen und dabei die Anzahl m der entstehenden Ringe zählen. Zur Beurteilung, ob ein vollständiger Ring entstanden ist, kann die auf den Beobachtungsschirm aufgedruckte Skala verwendet werden. Während der Messungen sollte möglichst keine Atemluft in die Lichtstrahlen gelangen, da sich Luftdichteänderungen direkt durch „laufende“ Interferenzringe bemerkbar machen.
- Nachdem mindestens 20 Ringe (je mehr, desto genauer ist die Messung) gezählt wurden, wird die Mikrometerschraube abgelesen und das Ergebnis Δm notiert.
- Um mögliche Fehler beim Zählen der Ringe beurteilen zu können, sollten die Schritte 1 – 3 mindestens 3-mal wiederholt werden.

6.1.3 Versuchsauswertung

Wurden beispielsweise bei der ersten Messung $m = 30$ Ringe gezählt und $20 \text{ mm} - \Delta m = 11,76 \text{ mm}$ gemessen, dann ergibt sich unter Berücksichtigung der Untersetzung von beispielsweise 1:830 ein Spiegel-

weg von $\lambda_s = 9761 \text{ nm}$ und damit die Lichtwellenlänge zu:

Die Ergebnisse aller Messungen sollten bei sorgfältiger Versuchsdurchführung um nicht mehr als 2 % vom Mittelwert abweichen. Werden größere Abweichungen festgestellt, kann eine Reinigung des Exzenters erforderlich sein (siehe Abschnitt 5, Exzenterreinigung und -wartung).

Das Messergebnis der Wellenlänge sollte auf mindestens $\pm 5\%$ genau sein. Eine Überprüfung ist mit einem Laser bekannter Wellenlänge (He-Ne-Laser: $\lambda = 632,8 \text{ nm}$) möglich.

6.2 Brechzahl von Glas

6.2.1 Versuchsaufbau

Folgende Geräte werden benötigt:

1 Interferometer	1002651
1 He-Ne-Laser	1003165
1 Ergänzungssatzgerätesatz zum Interferometer	1002652

Der Versuchsaufbau entspricht zunächst dem Standardversuch (siehe Abschnitt 6.1.1). Dann wird die Glasplatte mit Drehhalter gemäß Abb. 3 in den vorderen Teilstrahl eingebracht und der justierbare Spiegel wird noch minimal nachgestellt, um die Interferenzringe mittig auf dem Schirm zu erhalten.

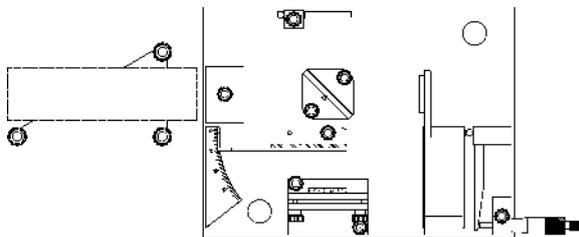
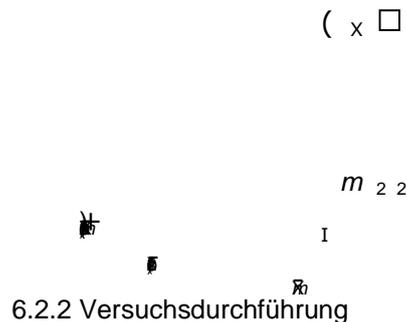


Abb. 3 Versuchsaufbau zur Messung der Brechzahl von Glas.

- Wenn die Glasplatte jetzt im Bereich um 0° etwas vor- und zurückgedreht wird, sollte der Übergang von entstehenden zu verschwindenden Interferenzringen genau bei 0° liegen. Wenn dies nicht der Fall ist, dann steht der Strahlenteiler nicht exakt im 45° Winkel zum fein verschiebbaren Spiegel. Da eine vollkommen exakte Ausrichtung des Strahlenteilers praktisch unmöglich ist, wird der Winkel α_0 notiert, bei dem der Übergang von entstehenden zu ver-

schwindenden Interferenzringen stattfindet. Bei der Auswertung wird dieser Winkel vom Messwert α_M abgezogen um den tatsächlichen Drehwinkel α zu erhalten.



6.2.2 Versuchsdurchführung

$$\frac{m \cdot \lambda}{2t} = 1.55$$

Vom Winkel α_0 ausgehend die Glasplatte langsam drehen. Dabei die Anzahl m der verschwindenden Ringe zählen. Je größer der Drehwinkel wird, desto kleiner wird die Winkeländerung, die zum Verschwinden eines Ringes führt. Daher ist zur Zählung von mehr als ca. 20 Ringen eine sehr ruhige Hand erforderlich.

6.2.3 Versuchsauswertung

- Mit dem Winkel α (z. B. $5,4^\circ$), der gemessenen Ringzahl m (z.B. 20), der Wellenlänge λ (in Luft) des verwendeten Lasers (z. B. 633 nm) und der Dicke der Glasplatte t (hier 4 mm) ergibt sich die Brechzahl n_g des Glases zu:
- Beim Vergleich eigener Ergebnisse mit Literaturwerten ist immer zu berücksichtigen, dass die Brechzahl wellenlängenabhängig ist und entsprechend nur Werte bei gleichen Wellenlängen verglichen werden dürfen.

6.3 Brechzahl von Luft

6.3.1 Versuchsaufbau

Folgende Geräte werden benötigt:

1 Interferometer	1002651
1 He-Ne-Laser	1003165
1 Ergänzungssatzgerätesatz zum Interferometer	1002652
1 Vakuumhandpumpe	1012856
1 Silikonschlauch	1002622

Der Versuchsaufbau entspricht zunächst dem Standardversuch (siehe Abschnitt 6.1.1) mit der Änderung, dass für diesen Versuch zweckmäßigerweise die teilreflektierende Schicht des Strahlenteilers nach rechts hinten zeigt. Dann wird die Vakuumzelle gemäß Abb. 4 in den rechten Teilstrahl eingebracht und der justierbare Spiegel wird noch minimal nachgestellt, um die Interferenzringe mittig auf dem Schirm zu erhalten.

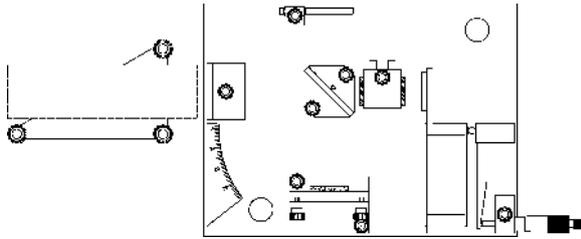


Abb. 4 Versuchsaufbau zur Messung der Brechzahl von Luft.

- Zur Ermittlung der Brechzahl beim Normaldruck ist also zunächst die Steigung A_n / A_p zu bestimmen. In erster Näherung gilt:

A_n

Dabei ist m die Anzahl der entstehenden bzw. verschwindenden Ringe, λ ist die Lichtwellenlänge und r ist die innere Länge der Vakuumzelle (hier 21 mm). Wurde also beispielsweise bei einer Druckabsenkung um $A_p = 90$ kPas das zugehörige $A_m = 29$ bestimmt, dann ergibt sich:

6.3.2 Versuchsdurchführung

- Die Vakuumpumpe wird an die Vakuumzelle angeschlossen und der angezeigte Druck p wird notiert. Dann wird die Zelle langsam evakuiert und die Anzahl m der verschwindenden Ringe wird gezählt. In regelmäßigen Abständen werden der Druck und die zugehörige Anzahl notiert. Wenn der minimale Druck erreicht ist (bei einer einfachen Handpumpe ca. 10 kPas), wird die Vakuumzelle wieder mit Luft gefüllt. Jetzt kann noch eine Messreihe bei Überdruck (bis max. 200 kPas, entsprechend 1 bar Überdruck) durchgeführt werden.

λ

2

6.3.3 Versuchsauswertung

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

$$\left| \begin{array}{c} A_n \\ A_p \end{array} \right|$$

x

n

A

an.

- Demnach beträgt die Brechzahl von Luft bei Umgebungsdruck (100 kPas) also $n = 1,00021$. In der Literatur ist $n = 1,00029$ zu finden.

6.4 Twyman-Green Interferometer

Mit diesem Versuch kann die Oberflächengüte optischer Bauteile bestimmt werden. Normalerweise wird unter einem Twyman-Green Interferometer ein Interferometer verstanden, bei dem der (Laser-) Lichtstrahl aufgeweitet und parallel ist. Zum qualitativen Verständnis des Funktionsprinzips kann aber auch – wie bei den bisherigen Versuchen – aufgeweitetes aber nicht paralleles Licht verwendet werden.

6.4.1 Versuchsaufbau

Folgende Geräte werden benötigt:

1 Interferometer	1002651
1 He-Ne-Laser	1003165
1 Ergänzungssatzgerätesatz zum Interferometer	1002652
1 Klebeband	

- Als Beispiel für eine schlechte optische Oberfläche wird ein transparenter Klebe-

film verwendet, der auf einer Glasplatte aufgeklebt ist und beim normalen Durchschauen durchaus homogen aussieht.

- Der Versuchsaufbau entspricht zunächst dem Standardversuch (siehe Abschnitt 6.1.1). Dann wird die Glasplatte mit Drehhalter gemäß Abb. 5 in den vorderen Teilstrahl eingebracht und der justierbare Spiegel wird noch minimal nachgestellt, um die Interferenzringe mittig auf dem Schirm zu erhalten.

6.4.2 Versuchsdurchführung

- Auf der rechten Seite des Beobachtungsschirms sind, ebenso wie bei Versuch 6.1, gleichmäßige Interferenzringe zu sehen. Auf der linken Seite hingegen sind die Ringe ausgefranst und teilweise befinden sich in eigentlich dunklen Bereichen helle Punkte und umgekehrt. Da aus Versuch 6.2 bekannt ist, dass bereits sehr kleine Schichtdickenänderungen (in Versuch 6.2 durch Drehen der Glasplatte erreicht) zur Verschiebung der Interferenzringe führen, liegt hier die Vermutung nahe, dass die Störungen in den Ringen auf die ungleichmäßige, hügelige Oberfläche des Klebefilms zurückzuführen sind.

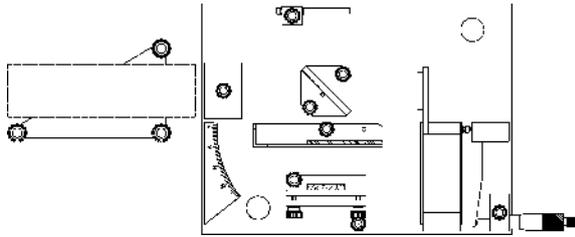


Abb. 5 Versuchsaufbau zur Messung der Oberflächengüte optischer Bauteile.

6.5 Fabry-Perot Interferometer

6.5.1 Versuchsaufbau

Folgende Geräte werden benötigt:

1 Interferometer	1002651
1 He-Ne-Laser	1003165

Der Aufbau der Komponenten auf der Grundplatte ist in Abb. 6 dargestellt. Bei der folgenden Beschreibung des Aufbaus wird davon ausgegangen, dass alle Grundeinstellungen vorgenommen werden müssen.

- He-Ne-Laser an den Laserträger schrauben (s. a. Bedienungshinweise, Lasermontage) und ungefähr gerade vor die Aufweitungslinse stellen.
- Justierbaren Spiegel und Aufweitungslinse entfernen und den Laser leicht um die vertikale Achse gedreht vor die Grundplatte stellen. Dann die Neigung des Lasers so justieren, dass der auf den Laser zurückreflektierte Teilstrahl auf gleicher Höhe mit dem ausgesendeten Strahl liegt. Wenn jetzt der Laser wieder gerade vor die Grundplatte gestellt wird, sollten sich zwei Punkte auf dem Beobachtungsschirm zeigen, die durch eine Nachjustierung zur Deckung zu bringen sind.
- Aufweitungslinse in den Strahlengang bringen und ggf. die Strahlhöhe durch gleichmäßiges Drehen aller 3 Rändelschrauben justieren. Danach ggf. nochmals zu 2. zurückkehren. (Jetzt sind evtl. bereits schwache Interferenzringe auf dem Schirm zu sehen, da die eigentlich durchlässige Glasseite des fein verstellbaren Spiegels auch minimale Reflexionen aufweist.)
- Aufweitungslinse wieder um etwa 90° aus dem Laserstrahl schwenken.

- Justierbaren Spiegel sehr vorsichtig montieren. Der Abstand zwischen den beiden Spiegeln sollte etwa 2 mm betragen.
- Den justierbaren Spiegel so einstellen, dass alle Punkte und ggf. Interferenzmuster auf dem Beobachtungsschirm zusammenfallen.
- Aufweitungslinse wieder in den Strahl drehen und in der Position festschrauben, die ein etwa mittiges Bild (bezüglich der Helligkeit, nicht der Interferenzringe) auf dem Schirm ergibt. Den Schirm so gegenüber der Vertikalen neigen, dass sich für den Beobachter ein optimal helles und klares Bild ergibt.
- Den justierbaren Spiegel noch minimal nachstellen, um die Interferenzringe mittig auf dem Schirm zu erhalten.

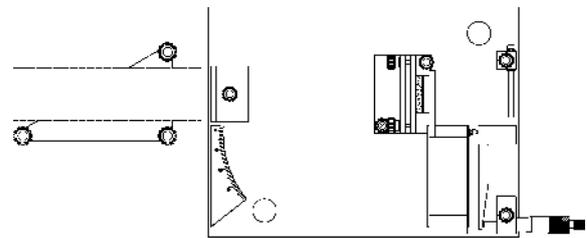


Abb. 6 Versuchsaufbau Fabry-Perot Interferometer.

6.5.2 Versuchsdurchführung

- Die Mikrometerschraube gegen den Uhrzeigersinn bis ca. 25 mm herausdrehen und dann langsam bis auf 20 mm zurückdrehen, um Messungenauigkeiten zu vermeiden, die bei der Umkehr der Drehrichtung auftreten.
- Die Mikrometerschraube langsam weiter im Uhrzeigersinn drehen und dabei die Anzahl m der entstehenden Ringe zählen.
- Nachdem mindestens 20 Ringe gezählt wurden, wird die Mikrometerschraube abgelesen und das Ergebnis M notiert.

- Um Δs mögliche Fehler beim Zählen der Ringe beurteilen zu können, sollten die Schritte $1 - 3$ mindestens 3-mal wiederholt werden.

6.5.3 Versuchsauswertung

- Wurden beispielsweise $m = 40$ Ringe gezählt und $20 \text{ mm} - M = 15,13 \text{ mm}$ gemessen, dann ergibt sich ein Spiegelweg (Exzenter 1:830) von $s = 12560 \text{ nm}$ und damit die Lichtwellenlänge zu (siehe auch Erläuterungen in Abschnitt 6.1.3):

Technische Änderungen vorbehalten
© Copyright 2015 3B Scientific GmbH