

Interferometer

O27

1 Aufgabenstellung

1.1 Ein Michelson-Interferometer ist aus einzelnen optischen Komponenten aufzubauen und zu justieren.

1.2 Der Brechungsindex von Luft und CO₂ ist zu bestimmen.

1.3 Die Magnetostriktion (Längenänderung als Funktion der Magnetfeldstärke) von Eisen und Nickel ist zu untersuchen.

2 Grundlagen

2.1 Michelson-Interferometer

Die Interferometer-Anordnung nach MICHELSON ist durch das Experiment von MICHELSON und MORLEY bekannt, die damit 1887 versuchten, Unterschiede in der Lichtgeschwindigkeit senkrecht und parallel zur Bewegungsrichtung der Erde durch den hypothetischen Äther zu messen - mit dem bekannten Ergebnis.

In der heutigen Messtechnik wird das Michelson-Interferometer eingesetzt, um kleinste Längenänderungen von Materialien oder kleinste Brechzahländerungen in transparenten Medien aufgrund verschiedener physikalischer Effekte zu messen. Weitere Einsatzgebiete sind die Charakterisierung der Planität optischer Oberflächen und die Detektion von

Gravitationswellen.

Treffen zwei Wellen gleicher Polarisation und gleicher Frequenz ω mit unterschiedlichen Amplituden A und Phasen φ an einem Ort zusammen, so überlagern sie sich zu

$$y = A_1 \sin(\omega t - \varphi_1) + A_2 \sin(\omega t - \varphi_2). \quad (1)$$

Die resultierende Welle wird beschrieben durch

$$y = A \sin(\omega t - \varphi)$$

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \delta \quad (2)$$

$$\delta = \varphi_1 - \varphi_2$$

Die messbare Größe der Welle ist nicht die Amplitude, sondern die Intensität $I \sim A^2$. Für $A_1 = A_2 = A_0$ ergibt sich aus (2)

$$I \sim 2A_0^2 (1 + \cos \delta) = 4A_0^2 \cos^2 \frac{\delta}{2}. \quad (3)$$

Der Aufbau eines Michelson-Interferometers ist in Abb. 1 skizziert. Das von der Strahlungsquelle Q kommende Licht am Strahlteiler ST in zwei senkrecht zueinander orientierte Strahlen aufgeteilt. Der Strahlteiler ist eine einseitig zu 50% verspiegelte Glasplatte. Das durch ST nach rechts hindurchtretende Licht wird am Spiegel S₁ reflektiert und trifft nach nochmaliger Reflexion an ST auf den Beobachtungsschirm B. Das an ST nach unten reflektierte Licht von Q wird am Spiegel S₂ reflektiert und trifft nach Durchgang durch ST

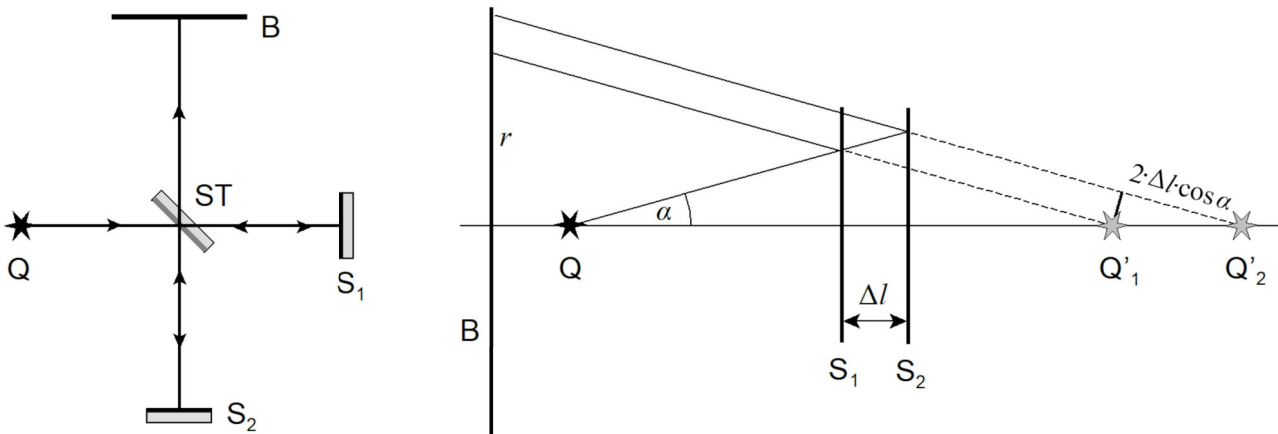


Abb. 1: Michelson-Interferometer. Prinzipieller Aufbau (links) und linearisierte Darstellung (rechts) zur Herleitung des Gangunterschiedes

ebenfalls auf B, wo beide Strahlen miteinander interferieren. Für die Justage muss mindestens einer der beiden Spiegel verschiebbar und einer kippbar sein. Die Strahlungsquelle muss eine ausreichend große Divergenz haben, was man bei parallelem Laserlicht durch eine Sammellinse erreichen kann – Q wird dann durch den Brennpunkt dieser Linse gebildet.

Um die in B entstehenden Interferenzmuster zu verstehen, betrachte man die linearisierte Darstellung des Strahlengangs in Abb. 1, bei der lediglich die Richtungsänderung der Teilstrahlen bei Reflexion an ST „weggelassen“ wurde. Q'1 und Q'2 sind die virtuellen Lichtquellen durch Reflexion von Q an S1 und S2. Man beachte, dass im Gegensatz zur Skizze die Wegdifferenz Δl sehr klein ist verglichen mit der gesamten Strahllänge $l = \overline{Q_1B} \approx \overline{Q_2B}$. Die interferierenden Teilstrahlen können dann als parallel angesehen werden und der Gangunterschied d ergibt sich zu

$$d = 2\Delta l \cos \alpha - \frac{\lambda}{2} = 2\Delta l \sqrt{\frac{l^2}{l^2 + r^2}} - \frac{\lambda}{2} \quad (4)$$

und der Phasenunterschied ist

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d \quad (5)$$

Der zusätzliche Gangunterschied von λ/2 entsteht, weil nur bei Reflexion am optisch dichteren Medium ein Phasensprung von π auftritt. Der Gangunterschied ist bei exakt parallelen Spiegeln rotationssymmetrisch, man sieht Interferenzringe mit dem Radius r. Die Größe der Interferenzringe hängt vom Unterschied Δl in den Längen der beiden Interferometerarme ab. Wird ein Spiegel aus der parallelen Stellung verkippt, so geht das Ringmuster in ein Streifenmuster über. Ändert sich die Länge eines Interferometerarmes um Δl, so verschiebt sich das Interferenzmuster um

$$z = \frac{2\Delta l}{\lambda} \quad (6)$$

Ringe bzw. Streifen (mit $\cos \alpha \approx 1$). Nahezu perfekte Interferenzringe setzen voraus, dass hochwertige Spiegel und Strahltei-

ler verwendet werden, bei denen die Abweichung von der Planität deutlich kleiner als λ/2 sind.

2.2 Brechungsindex von Gasen

Der Brechungsindex bzw. die Brechzahl n eines Mediums ist definiert als Quotient der Vakuumlichtgeschwindigkeit c0 zur Lichtgeschwindigkeit (Phasengeschwindigkeit) c im Medium. Eine Lichtwelle regt die Moleküle des Mediums zu Dipolschwingungen an, die wiederum Licht aussenden, das zum elektromagnetischen Feld der eingestrahlten Welle beiträgt (mit diesem interferiert). Stärke und Phasenlage der angeregten Schwingungen hängen von der Lage der Lichtfrequenz zur Frequenz der Eigenschwingungen (Anregungen) der Moleküle ab. Die Brechzahl hängt daher grundsätzlich von der Moleküldichte N (Anzahl pro Volumen), von der Art der Moleküle (genauer: von ihrer frequenzabhängigen Polarisierbarkeit) und von der Wellenlänge des Lichts ab. Da alle Moleküle Anregungen im UV-Bereich besitzen, nimmt die Brechzahl im Bereich des sichtbaren Lichts mit abnehmender Wellenlänge zu („normale Dispersion“).

Bei nicht zu großen Drücken (n ≈ 1) und bei konstanter molekularer Polarisierbarkeit ist die Differenz (n - 1) proportional zur Teilchendichte:

$$n - 1 \sim N = \frac{N_A \rho}{M} \quad (7)$$

(NA: Avogadro-Konstante, ρ: Dichte und M: Molmasse des Gases) Für ideale Gase folgt:

$$\frac{n - 1}{n_0 - 1} = \frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T} \quad (8)$$

wobei n0, p0 und T0 die Brechzahl, den Druck und die Temperatur bei Normalbedingungen (273 K; 101,3 kPa) bezeichnen. Für konstante Temperatur ist n eine lineare Funktion des Druckes und für p = 0 ist n = 1. Damit ergibt sich aus (8):

$$n_0 = 1 + \frac{\Delta n}{\Delta p} \cdot \frac{p_0 T}{T_0} \quad (9)$$

2.3 Magnetostriktion nennt man die elastische Deformation ferromagnetischer Materialien infolge ihrer Magnetisierung durch ein äußeres Magnetfeld H . Innerhalb der Domänen (Weissche Bezirke) wird das Kristallgitter in Richtung der Domänenmagnetisierung verformt, außerdem richten sich die Domänen im Magnetfeld aus. Da die Verformung proportional zur Magnetisierung ist, tritt bei hohen Feldstärken (bei vollständiger Magnetisierung) eine Sättigung ein.

Ein homogenes Magnetfeld erzeugt eine Längenänderung in Feldrichtung. Ein Draht wird durch ein zirkulares Magnetfeld, welches ein starker Strom durch den Draht erzeugt, tordiert. Die relativen Längenänderungen sind von der Größenordnung 10^{-6} in Eisen bis 10^{-3} in hochmagnetostriktiven Materialien. Der magnetostriktive Effekt verursacht das „Netzbrummen“ in Transformatoren. Er wird (neben dem piezoelektrischen Effekt) zur Erzeugung von Ultraschall eingesetzt und spielt eine Rolle in verschiedenen industriellen Sensoren sowie in Warensicherungsetiketten.

- HeNe-Laser 0,2/1 mW mit/ohne Strahlabschwächer, $\lambda = 632,8$ nm, Laserklasse 2
- Linse L +20 mm in xy-Justierhalterung
- 4 Oberflächenspiegel S1...S4 ($1/8 \lambda$) in Justierhalterung
- Strahlteiler ST 50/50 ($1/10 \lambda$, vergütet) in Halterung, Neigung justierbar
- Küvette K, Länge ($40 \pm 0,1$) mm
- Beobachtungsschirm B (Wand)
- Membranpumpe, Enddruck 5 mbar
- Ventilblock mit 2 Nadelventilen (Vakuum, Gaseinlass) und Druckmesser 0...1,6 bar
- Luftballon mit CO₂
- Magnetspule SP mit Halterung für optische Grundplatte, 1200 Windungen, 4,2 Ω
- Probestäbe aus Fe und Ni für die Messung der Magnetostriktion
- Stromversorgungsgerät 30 V 5 A, Amperemeter, Kabel

Blicken Sie nicht direkt in den Laserstrahl! Schalten Sie den Laser aus, wenn er nicht benötigt wird.

Die Oberflächen der Spiegel und Strahlteiler dürfen nicht berührt werden. Sprechen oder blasen Sie nicht gegen diese Oberflächen!

3 Versuchsaufbau

Geräte:

- Optische Grundplatte 590 × 430 mm

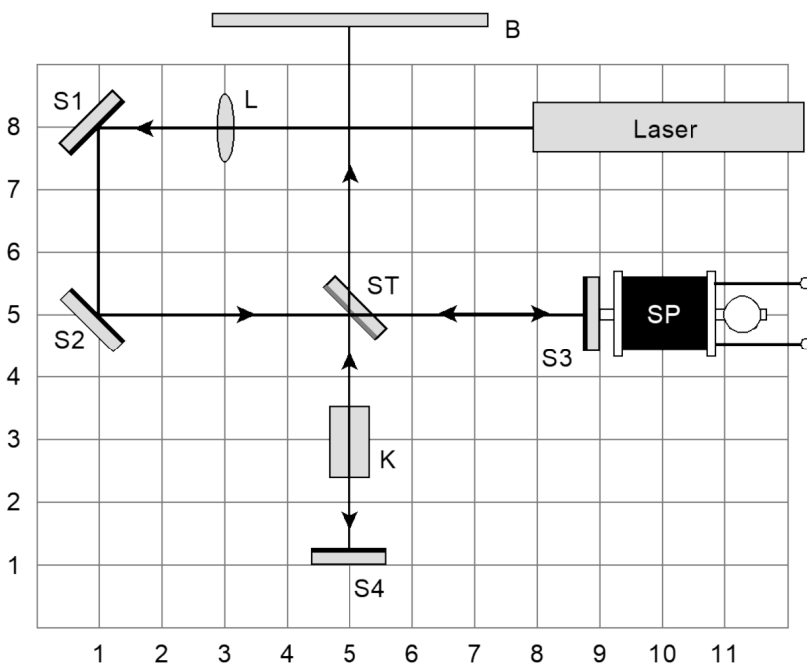


Abb. 2: Versuchsaufbau

3.1 Abb. 2 zeigt den Aufbau der Michelson-Interferometers auf der optischen Grundplatte. Die einzelnen Komponenten werden durch

Magnetfüße gehalten und sind beliebig positionierbar. Ein 5cm-Raster auf der Grundplatte erleichtert die Anordnung. Der Spiegel S3 befindet sich am Ende eines Probestabes aus Nickel oder Eisen, der durch die Magnetspule verläuft. Diese Anordnung wird in Aufgabe 3 zur Untersuchung der Magnetostriktion des Probestabes benutzt.

3.2 Zur Messung der Brechzahl von Gasen durchläuft einer der beiden Teilstrahlen des Interferometers axial eine evakuierbare Küvette der Länge s . Die optische Weglänge durch die Küvette ist dann $n(p) \cdot s$. Ändert sich

der Druck in der Küvette um Δp , so ändert sich der Gangunterschied d zwischen den Teilstrahlen des Interferometers um einen kleinen Wert $\Delta d = 2 \cdot s \cdot \Delta n$. Dies äußert sich in einer Verschiebung des Interferenzmusters um $z = \Delta d / \lambda$ Streifen. Somit ist

$$\Delta d = z \cdot \lambda = 2 \cdot s \cdot \Delta n . \quad (10)$$

3.3 Die Spule zur Erzeugung des Magnetfeldes hat folgende Abmessungen:

innerer Durchmesser $d_i = 16$ mm

äußerer Durchmesser $d_a = 49$ mm

Länge $l = 55$ mm

Windungszahl $N = 1200$

Die Magnetfeldstärke im Zentrum einer Zylinderspule ist

$$H = \frac{N \cdot I}{\sqrt{d^2 + l^2}} . \quad (11)$$

Man kann näherungsweise davon ausgehen, dass das Feld über die gesamte Länge der Spule den durch (11) bestimmten Wert hat und außerhalb der Spule Null ist.

4 Versuchsdurchführung

4.1 Als Hilfsmittel zum Aufbau der Interferometers nach Abb. 2 eignet sich sehr gut ein rechtwinkliges Zeichendreieck, mit dem der senkrechte Abstand zwischen Laserstrahl und Grundplatte gemessen werden kann.

Entfernen Sie zu Beginn alle Komponenten außer dem Laser und dem Spiegel S1 aus dem Strahlengang. Richten Sie den Strahl auf die Mitte von S1. Benutzen Sie die Feinjustierung von S1, um den Strahl exakt parallel zur Linie 1 der Grundplatte auszurichten. Danach platzieren Sie schrittweise S2, S3, ST und S4, wobei nach jedem Schritt der Laserstrahl so exakt wie möglich parallel zu einer Linie auf der Grundplatte ausgerichtet wird.

Die Abstände zwischen dem Strahlteiler und den Spiegeln S3 und S4 sollen etwa gleich sein. Wenn Sie sorgfältig gearbeitet haben, trifft ein Teil der von S3 und S4 reflektierten Strahlen wieder auf die Lichtaustrittsöffnung des Lasers, der andere Teil überlagert sich auf dem Schirm, wobei man aber die Interferenz

jetzt noch kaum sieht.

Nun wird die Linse L so in den Strahlengang gebracht, dass der Strahlteiler vollständig und etwa gleichmäßig ausgeleuchtet wird. Auf dem Schirm sollten jetzt konzentrische Interferenzringe zu sehen sein, deren Zentrum wahrscheinlich noch außerhalb des ausgeleuchteten Bereiches liegt. Durch äußerst vorsichtiges Justieren der Neigung von S4 bringt man das Zentrum etwa in die Mitte.

4.2 Stellen Sie die Küvette in den Strahlengang und korrigieren Sie die Einstellung von S4, so dass das Zentrum der Ringe wieder zu sehen ist. Vakuumpumpe und Ventilblock stehen zur Vermeidung von Vibrationen auf einem anderem Tisch und werden über einen flexiblen Silikonschlauch an die Küvette angeschlossen. Der zweite Schlauch an der Küvette wird mit einer Schlauchklemme verschlossen. **Die Ventile schließen ohne großen Kraftaufwand dicht - bitte nicht sehr fest zudrehen!**

Es soll die Brechzahl von Luft und CO₂ gemessen werden. Für die CO₂-Messung ist der Luftballon am Belüftungsventil anzuschließen. Beim Wechsel des Gases müssen Schlauch und Küvette ausreichend gespült werden (2...3 mal evakuieren und füllen). Bei der Messung geht man wie folgt vor: Küvette füllen und Anfangsdruck ablesen. Küvette langsam bis zum Enddruck evakuieren und dabei die von außen nach innen laufenden Interferenzringe zählen. Enddruck ablesen. Vakuumventil schließen, Belüftungsventil vorsichtig öffnen und die nach außen laufenden Ringe zählen, während das Gas langsam in die Küvette strömt. Die Messung ist mehrmals durchzuführen, bis nach etwas Übung beim Evakuieren und Belüften gleich viele Ringe gezählt werden.

Die Raumtemperatur ist zu protokollieren.

4.3 Schließen Sie Spule und Amperemeter an das Stromversorgungsgerät an.

Die Magnetspule darf maximal 1 min bei 5 A betrieben werden. Achten Sie darauf, dass sie sich nicht zu stark erwärmt!

Zum Wechsel der Probestäbe lösen Sie die

Klemmschraube und schrauben Sie den Stab vorsichtig vom Spiegel ab, **ohne dessen Oberfläche zu berühren!**

Um die Verschiebung des Interferenzmusters um $1/2$ oder sogar $1/4$ Ringabstand noch messen bzw. schätzen zu können, beobachtet man besser nicht das Ringzentrum, sondern eine Stelle auf dem Umfang des 2. oder 3. Ringes. Achten Sie bei der Messung auch auf das Vorzeichen der Magnetostriktion!

Messen Sie für beide Probestäbe die Verschiebung des Interferenzmusters um z Ringe als Funktion des Spulenstromes I zwischen 0 und 5 A. Die Messung der sehr kleinen Längenänderung wird durch mögliche Erschütterungen des Gebäudes und durch thermische Drift (Erwärmung der Spule!) erschwert. Sie sollte zügig durchgeführt und mehrfach wiederholt werden, um sichere und reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten.

5 Auswertung

5.2 Aus der Anzahl der Interferenzringe z ist Δn nach Gleichung (10) zu berechnen. Die Brechzahlen der Gase bei Normalbedingungen sind nach Gleichung (9) zu berechnen, dabei ist Δp die Differenz zwischen Anfangs- und Enddruck.

Vergleichen Sie die Ergebnisse im Rahmen der Fehlerbetrachtung mit Literaturwerten!

5.3 Berechnen Sie aus der Verschiebung des Interferenzmusters nach (6) die Längenänderung Δl und die relative Längenänderung Δ/l des Stabes. Für l ist die Länge der Spule einzusetzen, da die Längenänderung nicht im ganzen Stab sondern nur im Magnetfeld stattfindet. Berechnen Sie aus dem gemessenen Strom nach (11) die Magnetfeldstärke H , wobei für den Spulendurchmesser $(d_i+d_a)/2$ einzusetzen ist. Stellen Sie die relative Längenänderung Δ/l als Funktion der Magnetfeldstärke grafisch dar.

6 Literatur

Eugene Hecht: Optik. Oldenbourgverlag München, 2009

Wolfgang Schenk, Friedrich Kremer: Physikalisches Praktikum. Springer 2014

7 Kontrollfragen

7.1 Wie funktioniert ein Michelson-Interferometer und welche Interferometertypen kennen Sie noch?

7.2 Warum ist die Brechzahl von Gasen streng proportional zum Druck?

7.3 Was ist Magnetostriktion?