

MS Michelson-Interferometer

Stichworte: Interferenz, Interferometer, Bestimmung von Brechungsindizes

Literatur

- Gerthsen Physik: 22. Auflage, Kap. 10.1.13
- Bergmann/Schaefer: *Lehrbuch der Experimentalphysik*, Vol. III (Optik), Kap. 3.4 und 15.4.2, Zum Thema Laser: Kap. 8.4 oder auch Vol. V (Festkörper)
- A.Savitzky, M.Golay: *Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures*, Analytical Chemistry 36, 1627 (1964)
<http://dx.DOI.org/10.1021/ac60214a047>

1. Fragen zur Vorbereitung

- Interferenzen gleicher Neigung & Interferenzen gleicher Dicke
- Kohärenzbedingungen
- Wie funktioniert ein (Halbleiter-) Laser?
- Wie ergeben sich die ausgedehnten Interferenzmuster im Interferometer?
- In welchen Anwendungen wird ein Michelson Interferometer genutzt?
- Überlegen Sie, wie eine sinnvolle Auswertung mit CASSY-Lab erfolgen kann.

2. Aufgaben

1. Erläutern Sie Aufbau und Eigenschaften des Michelson-Interferometers.
2. Bestimmen Sie die Wellenlänge eines Halbleiterlasers.
3. Messen Sie den Brechungsindex von Gasen (Luft).
4. Messen Sie den Brechungsindex und die Dicke dünner Glasplättchen.

3. Grundlagen

Im Versuch wird ein Halbleiterlaser verwendet. Je nach Leistung und Wellenlänge eines Lasers können sehr schnell dauerhafte Schäden hervorgerufen werden. Der direkte und indirekte Blick (Reflektionen) in den Strahl ist daher unter allen Umständen zu verhindern. Bei Experimenten mit Laserstrahlen sind sehr empfindliche Spiegel notwendig. Der Umgang mit diesen muss daher mit entsprechender Sorgfalt erfolgen. Entscheidend für das Gelingen des Versuches ist, dass der Strahl stets parallel zum Optischen Tisch verläuft!

In diesem Versuch soll ein Michelson-Interferometer aufgebaut werden. Hierfür benötigt man eine Lichtquelle, zwei Spiegel und einen Strahlteiler. Der Strahl läuft vom Laser auf den Strahlteiler und wird dort in zwei Teilstrahlen aufgetrennt. Diese Teilstrahlen laufen unabhängig voneinander auf zwei Spiegel. Dort reflektiert kommen sie zum Strahlteiler zurück, werden wieder vereinigt und auf den Beobachtungsschirm gelenkt. Auf diesem kann man nun die Interferenz der beiden Strahlen beobachten, die von der Differenz der optischen Wege (d.h. den geometrischen Wegen und den Brechungsindizes der durchlaufenen Materialien) abhängt. Geben Sie die Bedingungen an, unter denen die Intensität maximal bzw. minimal wird.

Abhängig davon, ob ein paralleles oder divergentes Lichtbündel verwendet wird, lassen sich nun auf dem Schirm konzentrische Kreise (*Haidingersche Ringe*) oder äquidistante Linien erkennen oder überhaupt kein Muster. Die Orientierung und Abstände der Linien lassen sich zudem einstellen. Erklären Sie die Beobachtungen, beispielsweise mit Hilfe der Abbildung MS.1.

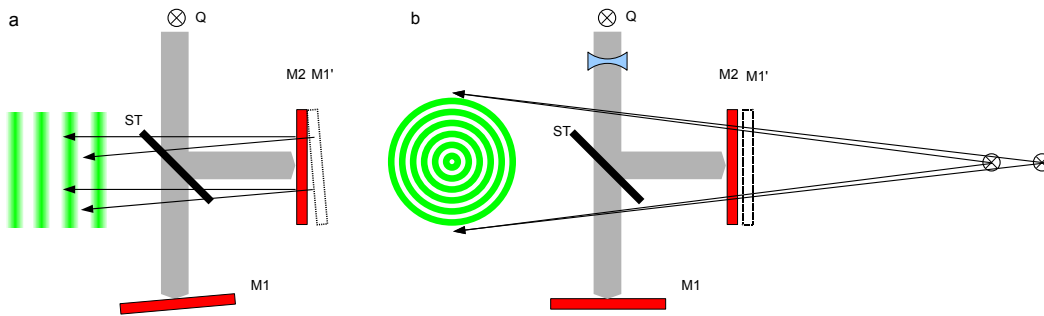


Abbildung MS.1: Entstehung der Interferenzmuster

Der Versuch lässt sich nicht nur mit einem Laser durchführen, sondern auch mit einer einfachen Glühlampe. Hierbei treten allerdings sehr weitreichende Effekte auf, die zu völlig anderen Interferenzmustern führen. Hierbei kommt – im Gegensatz zum Laser – auch sehr schnell die endliche *Kohärenzlänge* zu tragen. Bekanntermaßen gilt die *Heisenberg'sche Unschärferelation*. Daraus folgt unmittelbar

$$\frac{\hbar}{2} \geq \Delta p \cdot \Delta x = \Delta E \cdot \Delta t = h\Delta\nu \cdot \Delta t \tag{MS.1}$$

$$\frac{1}{4\pi} \geq \Delta\nu \cdot \Delta t \tag{MS.2}$$

Damit existiert die Welle, mit der wir das Licht beschreiben, nur eine endliche Zeit Δt . Breitet sich die Welle mit der Lichtgeschwindigkeit c aus, so ergibt sich die *Kohärenzlänge*

$$L = c \cdot \Delta t \tag{MS.3}$$

4. Versuche

4.1. Justierung

Sinnvollerweise beginnt man mit dem Laser. Dieser wird mit Spannpratzen auf dem Optischen Tisch befestigt und so justiert, dass der Strahl parallel zur Oberfläche des Tisches verläuft. Als zweites wird vor dem Laser ein Spiegel positioniert. Durch Verstellen der Justierschrauben kippt man diesen so, dass der Strahl in den Laser reflektiert wird. Zwischen Laser und Spiegel bringt man den Strahlteiler an. Wird nun der zweite Teilstrahl ebenfalls durch einen Spiegel zum Strahlteiler reflektiert, so gelangt ein gewisser Anteil ebenfalls zum Laser. Dieser zweite Spiegel wird nun genauso justiert. Auf dem Schirm sollte nun ein Interferenzmuster zu erkennen sein. Falls notwendig kann dieses mit einer Linse vergrößert werden.

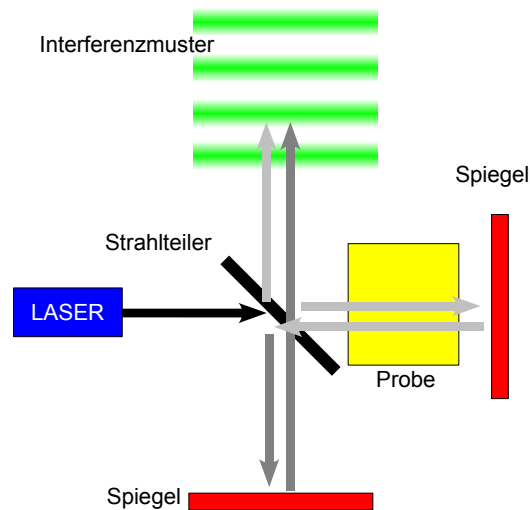


Abbildung MS.2: Schematischer Aufbau eines Michelson-Interferometers

4.2. Interferenzen im Interferometer

Das Interferometer lässt sich nun auf verschiedene Arten verwenden. Zunächst sollen die verschiedenen Interferenzmuster durch vorsichtige(!) Verstellung der Spiegel und unter Verwendung der Linsen eingestellt und identifiziert werden.

4.3. Bestimmung der Wellenlänge des Lasers

Einer der Spiegel lässt sich durch eine Mikrometerschraube verstellen. Die Mikrometerschraube hat eine Steigung von 0.35 mm und kann mit einem Getriebe (Untersetzung ca. $(118 \pm 1):1$) bedient werden. Dadurch kann man den relativen Abstand der Spiegel verändern, wodurch sich das Interferenzmuster verschiebt. Aus dieser Änderung der Interferenz kann die Wellenlänge des Lasers bestimmt werden. Messen Sie zum Vergleich die Wellenlänge

des Lasers mit einer weiteren Methode Ihrer Wahl. Die Ableitungen der verwendeten Gleichungen sind anzugeben.

4.4. Messung des Brechungsindex von Luft

Wird in einen Arm des Interferometers ein anderes Medium eingebracht, so ändert sich in diesem Abschnitt die Lichtgeschwindigkeit. Dies führt zu einem effektiven Gangunterschied. Wird das Medium kontinuierlich eingebracht, so lässt sich damit eine ebenso kontinuierliche Veränderung des Interferenzmusters beobachten. Aus dieser Änderung soll der Brechungsindex des Mediums bestimmt werden. Die einfachste Möglichkeit, das Medium kontinuierlich einzubringen, ist die Messung an Gasen unter Verwendung einer Vakuum-/Druckzelle. In diesem Versuch soll als gasförmiges Medium die Luft genutzt werden. Hierzu wird die Gaszelle (Länge 10 ± 0.1 cm) evakuiert und über ein Ventil langsam wieder belüftet. Überlegen Sie wie daraus der Brechungsindex bestimmt werden kann. In der Literatur sind in der Regel die Werte bei „Normbedingungen“ (20°C , 1013 mbar) angegeben. Um vergleichbare Messergebnisse zu erhalten ist daher eine Umrechnung auf Normbedingungen notwendig. Der Brechungsindex ändert sich linear mit dem Druck, die Änderung aufgrund der Temperatur kann vernachlässigt werden. Die Messung des Druckes erfolgt mit einem IC an der Vakuumzelle, der eine Gleichspannung zwischen 0.5 Volt ($\hat{=}$ 0 bar) und 4.5 Volt ($\hat{=}$ 1 bar) ausgibt. Die Genauigkeit beträgt ± 0.04 Volt.

4.5. Messungen an dünnen Glasplättchen

Zum Abschluss des Versuches soll eine etwas schwierigere Aufgabe gelöst werden. Solange der Brechungsindex von Gasen gemessen werden soll, ist es verhältnismäßig einfach, das Medium kontinuierlich in den Strahlengang einzubringen. Aber wie kann die Messung an Feststoffen erfolgen? Für diesen Versuch stehen dünne Glasplättchen bereit, die man im Strahlengang langsam kippen kann. Leiten Sie schriftlich her, wie sich der Gangunterschied in Abhängigkeit von Glasdicke, Brechungsindex und Kippwinkel ändert.

5. Messung mit CASSY

Der Assistent entscheidet entsprechend der Vorbereitung und der Kenntnisse über CASSY ob eine oder mehrere Messungen mit CASSY ausgeführt werden. Überlegen Sie daher bereits in der Vorbereitung, wie die Auswertung mit CASSY-Lab erfolgen kann.

Zusätzlich zum Druck-IC in der Vakuumzelle ist am Schneckengetriebe ein Drehgeber (300 TTL-Pulse/Umdrehung) montiert und es steht eine Photodiode (Ausgang 0 bis 5 Volt) zur Messung der Intensität (in einem Ausschnitt) des Interferenzmusters zur Verfügung. Somit können – im Prinzip – alle Messungen dieses Versuches mit CASSY (oder vergleichbarem ...) durchgeführt werden. Die Energie-Versorgung der Sensoren wird ggf. ebenfalls von CASSY übernommen. Hierzu wurden zwei Typen von Sensorboxen entwickelt:

- **Analoger Eingang:** 3-polige LEMO Stecker (oder direkt D-SUB15), hier wird ein UI-Sensor simuliert, wobei allerdings die Strommessung nicht korrekt wiedergegeben wird.
- **2-fach TTL Eingang:** 4-poliger LEMO Stecker, die Sensorbox wird erkannt als Timer-S. Hiermit kann CASSY die Drehbewegung (und -Richtung) der Schnecke am Getriebe erfassen. Als Messgröße eignet sich hierfür Winkel $\Delta s \pm 1\text{mm}$, die Skalierung muss über die Angabe eines Radius kalibriert werden.

Da auf Grund von Schwingungen und anderer Einflüsse das Signal der Photodiode stets einen großen Rauschanteil enthält, ist es empfehlenswert die Messdaten bereits bei der Aufnahme über ein gewisses Intervall zu mitteln.

CASSY-Lab besitzt keine internen Algorithmen zur Auswertung der Intensitätsänderungen, dies muss daher durch eigene Definitionen vorgenommen werden. Im Regelfall ist hierbei (auch wenn während der Messwerterfassung zeitlich gemittelt wurde) eine zusätzliche Glättung der Messdaten mittels geeigneter Verfahren (gleitende Mittelwerte, Savitzky-Golay-Filter,...) notwendig, um Fehlinterpretation zu vermeiden. Vorsicht: Eine derartige Glättung würde bei anderen Versuchen unter Umständen die Erkenntnisse der Messreihe vernichten!

Die einfachste Form einen gleitenden Mittelwert für einen Messpunkt x_i zu realisieren ist der arithmetische Mittelwert mit seinen Nachbarn

$$\bar{x}_i = \frac{1}{3}(x_{i-1} + x_i + x_{i+1}) . \quad (\text{MS.4})$$

Dieses Verfahren hat den Nachteil, dass eventuell korrekterweise im Signal vorhandene Spitzen verbreitert und in ihrer Höhe reduziert werden. Die Hinzunahme weiter entfernter Punkte verstärkt diesen Effekt. Über zusätzliche Faktoren kann man die Gewichtung (z.B. exponentiell fallend mit dem Abstand) der einzelnen Datenpunkte festlegen.

Eine bessere Variante besteht darin ein Polynom über einen verschiebaren Datenbereich anzupassen, gerade so wie man mit dem Bleistift eine Ausgleichskurve zeichnen würde. Der Rechenaufwand um für jeden Punkt x_i die notwendigen Koeffizienten zu bestimmen ist allerdings hoch. Interessanterweise lässt sich diese Aufgabe auch durch einen gleitenden Mittelwert mit entsprechenden Gewichtungen realisieren (\rightarrow Savitzky-Golay-Filter). Werden $2m$ Nachbarpunkte berücksichtigt, so gilt für den gemittelten Datenpunkt

$$\bar{x}_i = \sum_{j=-m}^m a_{i+j} x_{i+j} . \quad (\text{MS.5})$$

Die notwendigen Gewichtungsfaktoren a_j sind entsprechend des Polynomgrades und der Zahl der Punkte tabelliert. Diese Methode eignet sich zudem um (über passende Faktoren a_j) direkt die Ableitung zu bilden.

Die gesuchten Größen ergeben sich schließlich durch Anpassen der theoretischen Zusammenhänge an die so ermittelten Datensätze. Beweisen Sie so auch die in der Anleitung geäußerte Behauptung „der Brechungsindex eines Gases ändert sich linear mit dem Druck“.