

V64

Interferometrie

Fabian Schierok
fabian.schierok@udo.edu

Carlo Tasillo
carlo.tasillo@udo.edu

Durchführung: 18.04.2018

Abgabe: Datum

AUFGABEN

1 Überblick

Im durchgeführten Versuch V64 – Interferometrie wurde ein Sagnac-Interferometer des Herstellers TeachSpin aufgebaut, dessen Kontrast in Abhängigkeit von der Polarisationsrichtung des verwendeten HeNe-Laserlichts vermessen und schließlich mit der Differenzspannungsmethode der Brechungsindex der Raumluft und einer Glasplatte bestimmt.

2 Theorie

2.1 Mathematische Beschreibung der Interferenz

Das in diesem Versuch verwendete, monochromatische Laserlicht kann als elektromagnetische Welle beschrieben werden. Der elektrische Wellenanteil des Lichtes kann also durch die in Gleichung (1) angegebene Funktion von Raum und Zeit mathematisch ausgedrückt werden. Der Vektor \vec{E}_0 gibt dabei die Polarisation des Lichtes an.

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 \cdot \exp i(\omega t - \vec{k}\vec{r}) \quad (1)$$

Der verwendete HeNe-Laser liefert kohärentes, also interferenzfähiges Licht. Bei der Interferenz addieren sich die elektrischen Feldstärken zweier elektromagnetischen Wellen in jedem Raumzeitpunkt, sodass eine überlagerte Welle entsteht. Die beiden Wellen werden demnach wie folgt beschrieben, wobei die zweite Welle im Vergleich zur ersten eine Phasenverschiebung von ϕ besitzt und der Winkel zwischen den beiden Polarisationsachsen \vec{E}_{01} und \vec{E}_{02} mit δ bezeichnet werde:

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_{01} \cdot \exp i(\omega t - \vec{k}\vec{r}), \quad (2)$$

$$\vec{E}_2 = \vec{E}_{02} \cdot \exp i(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \phi). \quad (3)$$

Die beobachtete Intensität ergibt sich also zu

$$I \propto \left\langle |\vec{E}_1 + \vec{E}_2|^2 \right\rangle = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos \delta \cos \phi. \quad (4)$$

Bei gleicher Polarisation, also bei $\delta = 0$, sind die Fälle der destruktiven und konstruktiven Interferenz leicht zu identifizieren:

$$\phi = \pi : I \propto E_{01}^2 + E_{02}^2 - 2E_{01}E_{02} = 0 \quad \text{für } E_{01} = E_{02} \quad (5)$$

$$\phi = 0 : I \propto E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} = 4E_{01}^2 \quad \text{für } E_{01} = E_{02} \quad (6)$$

Stehen die Polarisationsrichtungen der beiden Wellen hingegen senkrecht aufeinander, ist also $\delta = \pi/2$, so ergibt sich

$$I \propto E_{01}^2 + E_{02}^2. \quad (7)$$

Bei senkrecht zueinander polarisierten Wellen tauchen also keine Interferenzeffekte auf.

2.2 Kontrast des Interferometers

Eine wichtige Größe eines Interferometers ist dessen Kontrast K . Dieser gibt die auf den Bereich zwischen 0% und 100% normierte Differenz zwischen der maximal und minimal einstellbaren Intensität des Lichtstrahls an, welcher aus dem Interferometer austritt. Der Kontrast kann durch Gleichung (8) definiert werden.

$$K = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \in [0, 1] \quad (8)$$

Zur Kontrastmessung werden in diesem Versuch zwei Polarisationsfilter verwendet. Der erste lässt nur den Anteil des Lichtes hindurch, welcher im Winkel θ zur horizontalen Achse liegt. Dadurch gilt für die Beträge der beiden Teilstrahlen, welche durch den PBSC entstehen, folgender Zusammenhang:

$$\begin{aligned} E_{01} &= E \cdot \cos \theta, \\ E_{02} &= E \cdot \sin \theta. \end{aligned}$$

Der zweite Filter lässt von beiden senkrecht zueinander polarisierten Strahlen nur jeweils die Komponenten der elektrischen Felder durch, welche parallel zur Polarisationsrichtung des Filters stehen, sodass beide Teilstrahlen anschließend die gleiche Polarisationsrichtung aufweisen und der Winkel δ zwischen den beiden Polarisationsvektoren verschwindet.

Eingesetzt ergibt sich also für die Intensität des Lichtes am Ende des Interferometers in Abhängigkeit des eingestellten Winkels des ersten Polarisationsfilters der in Formel (9) angegebene Zusammenhang.

$$I \propto E^2 \cdot (1 + 2 \cos \theta \sin \theta \cos \phi) \quad (9)$$

Für den Phasenunterschied $\phi = 0$ ergibt sich die maximale Intensität

$$I_{\max} \propto E^2 \cdot (1 + 2 \cos \theta \sin \theta). \quad (10)$$

Die minimale Intensität folgt für $\phi = \pi$ zu

$$I_{\min} \propto E^2 \cdot (1 - 2 \cos \theta \sin \theta). \quad (11)$$

Für den Kontrast gilt also in Abhängigkeit vom eingestellten Winkel θ des Polarisationsfilters der in Gleichung (12) beschriebene Zusammenhang. Für $\theta = 0$ und $\theta = \pi/2$ sind I_{\min} und I_{\max} identisch und bei $\theta = \pi/4$ liegt ein maximaler Kontrast von 100% vor.

$$K = 2 \cos \theta \sin \theta = \sin 2\theta \quad (12)$$

2.3 Brechungsindizes

Im Vakuum propagiert eine elektromagnetische Welle mit der Lichtgeschwindigkeit c , Materie hingegen wird von Licht langsamer durchdrungen. Diese Verlangsamung des Lichtes ist der Grund für das Phänomen der Lichtbrechung. Daher kann der Brechungsindex n wie in Formel (13) angegeben, definiert werden. Dabei bezeichnet v die Materielichtgeschwindigkeit.

$$n = \frac{c}{v} \quad (13)$$

Durch die Verlangsamung des Lichtes in Materie wird dessen Wellenlänge größer und somit dessen Wellenzahl kleiner. Bei eindimensionaler Betrachtung wird die Wellenzahl in Materie zu

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{vac}}} n.$$

Brechungsindex von Glasplatten Fällt Licht im Winkel Θ zum Lot auf eine Glasplatte der Dicke T mit Brechungsindex n und schließt der eingetretene Strahl mit dem Lot den Winkel Θ' ein, so kann durch das Snelliussche Brechungsgesetz der Phasenunterschied ϕ zwischen einem Strahl, der am Glas vorbeiläuft und einem, der durch das Glas hindurchgeht, nach Formel (14) errechnet werden. Abbildung 1 visualisiert die vorliegende Situation.

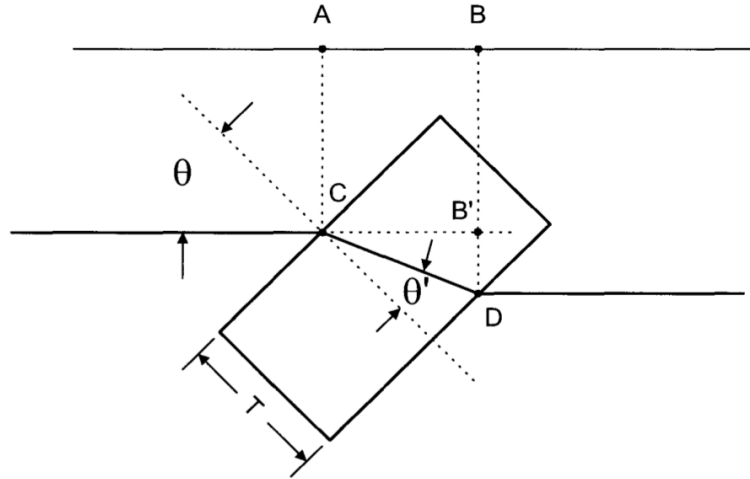


Abbildung 1: Darstellung des Strahlengangs bei der Bestimmung des Brechungsindex einer Glasplatte. [Quelle!]

$$\Delta\phi(\theta) = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{vac}}} T \left(\frac{n - \cos(\theta - \theta')}{\cos(\theta')} - n + 1 \right) \quad (14)$$

Einsetzen von θ' und eine Kleinwinkelnäherung um $\theta = 0$ ergeben die einfachere Formel (15).

$$\Delta\phi(\theta) = \frac{2\pi T}{\lambda_{\text{vac}}} \frac{n-1}{2n} \theta^2 + \mathcal{O}(\theta^4) \quad (15)$$

In diesem Versuch wird die Anzahl M der 2π -Phasenverschiebungen der Strahlen während einer Rotation zweier Glasplatten um den Winkel θ gemessen. Diese Anzahl ergibt sich mit Formel (15) zu

$$M = 2 \frac{\Delta\phi}{2\pi} \approx \frac{2T}{\lambda_{\text{vac}}} \frac{n-1}{2n} \theta^2. \quad (16)$$

Aus dieser Formel kann in diesem Versuch der Brechungsindex n von Glasplatten bestimmt werden.

Brechungsindex von Gas Durchläuft Licht ein Gas mit dem Brechungsindex n auf einer Strecke L , so beträgt der Phasenunterschied zu einem parallel dazu im Vakuum laufenden Strahl

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{vac}}}(n-1)L. \quad (17)$$

Hieraus ergibt sich ein Ausdruck für die Anzahl M der gezählten 2π -Phasenverschiebungen durch Division mit 2π . Also kann mithilfe von Formel (18) der Brechungsindex eines Gases in diesem Versuch bestimmt werden.

$$M = \frac{\Delta\phi}{2\pi} = \frac{n-1}{\lambda_{\text{vac}}} \cdot L \quad (18)$$

3 Versuchsaufbau und Durchführung

Zwei wichtige Bauteile in diesem Experiment sind Polarisationsfilter und PBSCs:

Polarisationsfilter Mit einem Polarisationsfilter wird der Anteil des Lichtes absorbiert, dessen Polarisationsachse senkrecht zu einer einstellbaren Achse liegt. Durch eine Drehung des Polarisationsfilters kann bewirkt werden, dass nur die gewünschten Lichtanteile transmittiert werden.

Polarizing beam-splitter cube, PBSC Ein PBSC ist ein Glaswürfel, der einen halbdurchlässigen Spiegel enthält, welcher zwischen zwei diametrisch zueinander liegenden Kanten verläuft. Auf diesem ist ebenfalls eine dünne dielektrische Schicht aufgetragen. Das führt dazu, dass ein PBSC einfallendes Licht in zwei Komponenten aufteilt, welche zueinander senkrecht polarisiert sind. Dabei durchquert eine Komponente das Glas, während die andere um 90° reflektiert wird.

3.1 Aufbau und Besonderheiten des Sagnac-Interferometers

Das in diesem Versuch verwendete Sagnac-Interferometer besteht im Wesentlichen aus einem Helium-Neon-Laser, welcher linear polarisiertes Licht mit einer Wellenlänge von $632,8\text{ nm}$ liefert, fünf Spiegeln, einem PBSC und einem Polarisationsfilter. Des Weiteren werden für spezielle Messverfahren noch ein weiterer PBSC, ein weiterer Polarisationsfilter und zwei Photodioden verwendet, sowie zur Untersuchung der Brechungsindizes zwei im festen Winkel zueinander angeordnete Glasplatten und eine Gaskammer. Eine schematische Zeichnung des Interferometers ist in Abbildung 2 zu sehen.

Alle Bauteile werden an einem Schraub Brett befestigt und während der Messungen von einem Plexiglas Käfig überdacht, um Luftströmung innerhalb der Interferometeranordnung zu verhindern, die messbare Störungen verursachen würden. Die Besonderheit dieses

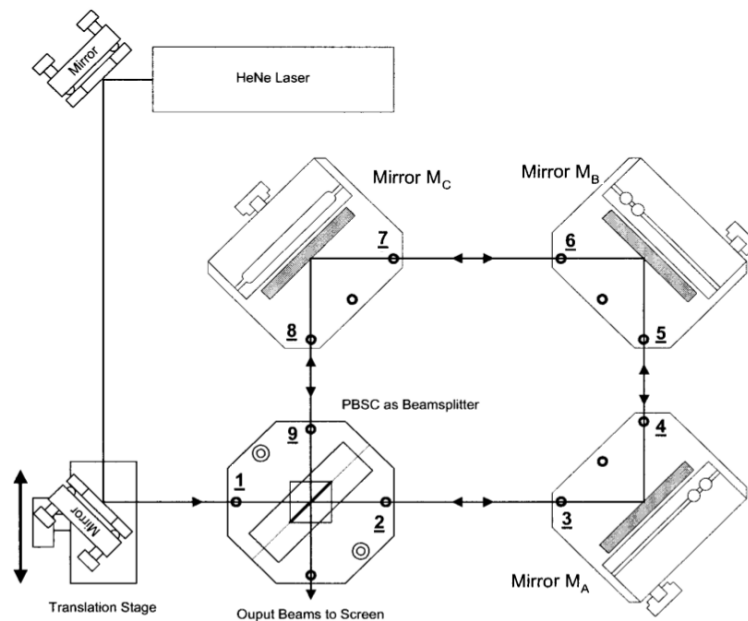


Abbildung 2: Schematische Darstellung des verwendeten Sagnac-Interferometers. Die Beschriftungen wurden einem Bild der gleichen Quelle entnommen. [Quelle!]

Interferometertyps liegt in der Toleranz gegenüber Vibrationen der Apparatur, da die gegenläufigen Strahlen die selben Weglängen zurücklegen und somit die Phasendifferenz der beiden Strahlen weitestgehend unverändert bleibt. Experimente mit einem einzelnen Strahl im Inneren des Interferometers sind möglich, wenn der eingehende Strahl mit einem horizontal verschiebbaren Spiegel verschoben wird. Dadurch erhalten die aufgeteilten Strahlen horizontal einen räumlichen Abstand, wobei sich der zurückgelegte Weg der beiden Strahlen um den gleichen Wert ändert, sodass auch dadurch keine Phasendifferenz auftritt.

3.2 Justierung der Apparatur

Die Justierung des Sagnac Interferometers wird mittels der in Abbildung 2 verwendeten Bezeichnung der Spiegel und Halteplätze für Justierhilfen erläutert. Die Justierhilfen sind Metallplatten mit kleinen Löchern zum Durchlassen des Laserlichts.

Als erstes werden der HeNe-Laser und die beiden Steuerspiegel auf dem Schraub Brett befestigt und ausgerichtet. Dann wird der PBSC und die Spiegel A, B und C, wie in Abbildung 2 zu sehen, platziert. Der durch den PBSC reflektierte Strahl wird zunächst blockiert, um Spiegel A in seine endgültige Position zu bringen. Die beiden Steuerspiegel werden so justiert, dass das Strahl in den Positionen 1, 2 und 3 zentral durch die Löcher der Justierhilfe treten kann. Anschließend wird der vom PBSC durchgelassene Strahl

blockiert und Spiegel C befestigt. Dafür wird der PBSC so fixiert, dass auch hier der Lichtstrahl durch die Justierhilfe an den Positionen 9 und 8 treten kann.

Die Justierhilfen werden nun in die Plätze 5 und 6 gesteckt und die Spiegel A und C so bewegt und anschließend festgeschraubt, dass der Strahl auch hier durch die Justierhilfe tritt. Wenn das getan wurde, werden die Justierhilfen in die Positionen 4 und 7 gesteckt. Spiegel C wird zurechtgerückt, bis beide Teilstrahlen durch jeweils beide Seiten der Löcher der Justierhilfen gelangen. Spiegel C wird daraufhin auch an dem Schraubbrett festgeschraubt.

Zu diesem Zeitpunkt sind die beiden Teilstrahlen im Interferometer noch nicht räumlich getrennt. Werden die aus der vierten Seite des PBSCs austretenden Lichtstrahlen auf einem Schirm betrachtet, zeigt sich aber, dass die beiden Lichtstrahlen sich nicht vollkommen überlappen. Um dies zu erreichen, werden die Fingerschrauben bei den Spiegeln A und C verwendet. Nach diesem Schritt sind die Spiegel richtig justiert.

Wird vor den PBSC ein Polarisationsfilter gestellt, können die Intensitäten der beiden Teilstrahlen im Interferometer eingestellt werden. Wird der zweite Steuerspiegel seitlich bewegt kann eine räumliche Trennung der vom PBSC getrennten Strahlen erreicht werden. Um die Qualität des (noch nicht interferierenden) Strahls, der aus der vierten Seite des PBSC tritt, zu verbessern und die beiden entstehenden Strahlen aufeinander auszurichten, kann noch an den Fingerschrauben der Spiegel A, B und C gedreht werden.

3.3 Messung des Kontrasts

Zur Kontrastmessung wird ein zweiter Polfilter hinter dem PBSC aufgestellt und auf 45° zur Vertikalen gestellt, damit von beiden Strahlen nur der entsprechende Teil durchlassen wird und diese durchgelassenen Komponenten interferieren können. Dahinter wird eine Photodiode aufgestellt, deren Photostrom in eine dazu proportionale Spannung umgewandelt wird. Diese wird mit einem angeschlossenen Oszilloskop gemessen. Nun wird der Glasplattenhalter in den Strahlengang im Interferometer positioniert, sodass je eine der Glasplatten in einem der gegenläufigen Teilstrahlen steht.

Die Messreihe zur Bestimmung des Kontrastes des Interferometers in Abhängigkeit vom eingestellten Winkel des ersten Polarisationsfilters wird wie folgt durchgeführt: Die Glasplattengeometrie wird bei fester Einstellung des Polarisationsfilters kontinuierlich so gedreht, dass auf dem Oszilloskop erkannt werden kann, zwischen welchen zu den Intensitäten proportionalen Spannungen sich das Signal bewegt. Diese Spannungen werden mit dem Cursor abgelesen und die nächste Einstellung des Polarisationsfilters kann überprüft werden.

3.4 Messung des Brechungsindex von Glas

Um den Brechungsindex von Glas zu bestimmen, werden ein zweiter, schräg stehender PBSC mit Spiegeln zum Interferieren und räumlichen Trennen der aus dem Interferometer kommenden Teilstrahlen, sowie zwei Photodioden benutzt. Mit dem Photostrom der Photodioden wird wieder jeweils eine dazu proportionale Spannung erzeugt. Diese Spannungen werden elektronisch voneinander subtrahiert. Da die Intensitäten der aus dem zweiten PBSC kommenden Strahlen zueinander komplementär sind, ergibt die Betrachtung der Spannungsdifferenz eine Methode zum Feststellen von 2π -Phasenshifts zwischen den beiden Interferometerstrahlen anhand von Nulldurchgängen der Spannungsdifferenz. Die Anzahl der Nulldurchgänge kann mit einer digitalen Zählvorrichtung gezählt werden. Da diese fehleranfällig ist, kann es hier sinnvoll sein, zusätzlich auch noch analog am Oszilloskop die Nulldurchgänge zu zählen. Die Messung wird durchgeführt, indem die Glasplattengeometrie um 10 bis 14 Grad um die vertikale Achse gedreht wird und die Anzahl der 2π -Phasenshifts abgelesen wird.

3.5 Bestimmung des Brechungsindex von Luft

Zur Bestimmung des Brechungsindex von Luft, wird anstelle der Glasplattengeometrie evakuierbare Zelle eingebaut, die nur von einem der gegenläufigen Interferometerstrahlen das Gasmedium durchquert wird. Die Gaskammer wird evakuiert und anschließend langsam wieder mit Luft gefüllt, bis der Umgebungsdruck in der Zelle wieder erreicht ist. Durch diesen Vorgang ändert sich der Brechungsindex der enthaltenen Luft. Die Messreihe besteht auch hier im Zählen von 2π -Phasenverschiebungen, wie schon im Abschnitt 3.4 beschrieben.

4 Diskussion