

V64 - Interferometrie

1 Ziel des Versuchs

In diesem Versuch soll die Funktionsweise eines Sagnac-Interferometers kennengelernt werden. Der Fokus des Experimentes liegt zum einen auf der Justage des optischen Strahlengangs und zum anderen auf der Nutzung von Interferenzeffekten, um materialspezifische Eigenschaften, wie zB. den Brechungsindex, mit sehr hoher Genauigkeit zu bestimmen.

2 Vorbereitung

Für eine erfolgreiche Bearbeitung des Versuchs ist eine Einarbeitung in die elementaren Grundlagen der Interferometrie notwendig. Bereiten Sie sich deshalb auf die folgenden Fragestellungen vor.

1. Was bedeutet Kohärenz? Machen Sie sich mit den Begriffen Kohärenzgrad, sowie zeitlicher und räumlicher Kohärenz vertraut (Referenz [1], Kapitel 12.4.1).
2. Welche unterschiedlichen Polarisationsseigenschaften hat Licht? Wie müssen zwei Lichtstrahlen zueinander polarisiert sein, damit Interferenzeffekte beobachtet werden können? (Referenz [1], Kapitel 9.1).
3. Informieren Sie sich über die grundsätzlichen Eigenschaften eines Mach-Zehnder-, eines Michelson- und eines Sagnac- Interferometers. Bei welchem der drei Interferometer-Typen erwarten Sie eine besonders hohe Stabilität des Interferenzsignals gegenüber äußeren Einflüssen? (Referenz [1], Kapitel 9.4.2, S. 813 ff.)

4. Wie kann der Kontrast (auch Sichtbarkeit) eines Interferometers definiert werden? (Referenz [1], Kapitel 12.3 und 12.4)
5. Welche Aufgabe erfüllen die Strahlteilerwürfel bzw. PBSCs (*engl. polarizing beam splitter cube (PBSC)*)? Überlegen Sie, wie sich linear polarisiertes Licht, dessen Polarisationsrichtung in der Vertikalen liegt, hinter einem um 45° dazu gedrehten PBSC verhält (Referenz [1], Kapitel 8.6).
6. Zeigen Sie, dass zwischen dem Polarisationswinkel ϕ des ersten Polarisators hinter dem Laser und dem von der Diode detektierten maximalen Signal bei konstruktiver Interferenz bzw. minimalem Signal bei destruktiver Interferenz folgender Zusammenhang besteht (I_{Laser} : mittlere Ausgangsintensität des Lasers) (Referenz [1], Kapitel 9.1)

$$I_{\text{max/min}} \propto I_{\text{Laser}} [1 \pm 2 \cos(\phi) \sin(\phi)] \quad (1)$$

Gehen Sie hierzu von der Gleichung $I \propto \langle |E_1 \cos(\omega t) + E_2 \cos(\omega t + \delta)|^2 \rangle$ aus, wobei E_i die Amplitude des elektrischen Feldes der im Interferometer gegenläufigen Lichtstrahlen bezeichnet und $\langle \dots \rangle$ eine Zeitmittelung über eine Periode bedeutet. Erläutern Sie, wieso diese Annahme über das detektierte Diodensignal gerechtfertigt ist. Welche Bedeutung hat die Variable δ ? Welcher Zusammenhang besteht zwischen I_{Laser} , ϕ und den Komponenten E_i ?

7. Welche Polarisationswinkelabhängigkeit ergibt sich für den Kontrast?
8. Warum werden je nach Messung eine bzw. zwei Dioden verwendet? Welchen Vorteil hat die Messung der Differenzspannung beider Dioden (Differenzspannungsmethode)?
9. Wie können Sie anhand der Anzahl der Interferenzmaxima und -Minima den Brechungsindex n bestimmen?
10. Welche Abhängigkeit besteht zwischen dem Brechungsindex n und der Temperatur T bzw. dem Druck p eines Gases (Lorentz-Lorenz-Gesetz)?

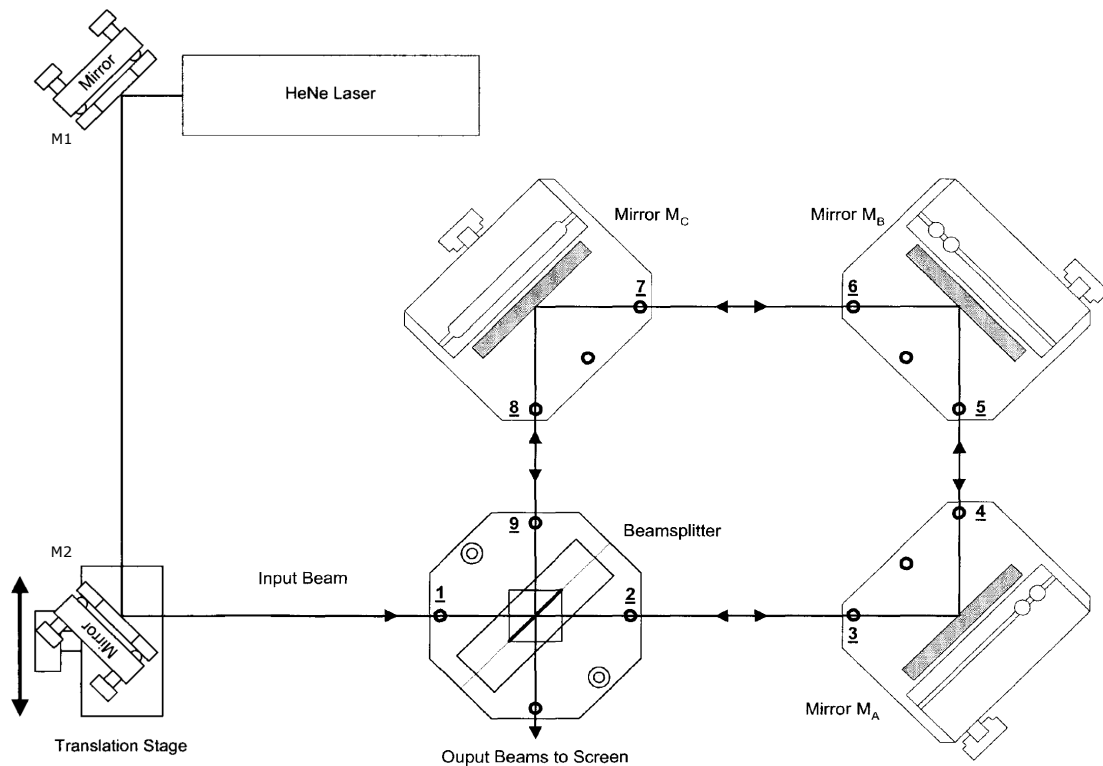


Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines Sagnac-Interferometers

3 Versuchsaufbau und Justage

Abbildung 1 zeigt eine Skizze des hier verwendeten Sagnac-Interferometers. Die Lichtquelle besteht aus einem HeNe-Laser mit einer Wellenlänge von 632,990 nm. Dieser emittiert linear polarisiertes Licht, wobei die Polarisationsrichtung idealerweise um 45° gegenüber der Vertikalen verkippt ist. Über die zwei Spiegel M1 und M2 wird dieser in das eigentliche Interferometer gelenkt. Dieses besteht aus einem PBSC und den 3 Spiegeln M_A , M_B und M_C . Der Laser sollte die beiden Spiegel M1 und M2 möglichst mittig und unter 45° treffen. Zur weiteren Justage dienen die 2 Justageplatten, welche in die dafür vorgesehenen Löcher auf den Bodenplatten des PBSC und der Spiegel M_i passen.

1. Nutzen Sie die beiden Spiegel M1 und M2, um den den PBSC passierenden Strahl

durch die Justageplatten in den Positionen 2 und 3 und mittig auf Spiegel M_A zu justieren. **Blockieren Sie zunächst den vom PBSC abgelenkten Strahl!**

2. Wiederholen Sie Punkt 1 für den abgelenkten Strahl mit den Justageplatten in den Positionen 8 und 9. Justieren Sie den Strahl diesmal, indem Sie die Bodenplatte des PBSC selbst bewegen. Die vertikale Achse lässt sich einstellen, indem unter die Bodenplatte des PBSC unterschiedlich dicke Metallplättchen gelegt werden.
3. Justieren Sie nun beide Strahlen, die von den Spiegeln M_A und M_C kommen, durch die Justageplatten an den Stellen 5 und 6, indem Sie zunächst die Bodenplatten der beiden Spiegel bewegen. Zur feineren Justage befinden sich auf der Rückseite der Spiegel Feinjustierschrauben. Sie sollten nun einen Punkt auf Spiegel M_B sehen.
4. Justieren Sie anschließend Spiegel M_B so, dass der von Spiegel M_A (M_C) kommende Strahl auch mittig durch die Justierplatte an Position 7 (4) trifft. Beide gegenläufige Strahlen sollten sich nun am PBSC in einem Punkt treffen. Sollte dies nicht der Fall sein, können Sie nun mit den Feinjustierschrauben an den Spiegeln M_A und M_C nachjustieren.
5. Betrachten Sie nun die beiden sich überlappenden Strahlen hinter dem Interferometer auf einem Schirm. Diese interferieren dort nicht, da sie senkrecht zueinander polarisiert sind. Um hier Interferenz beobachten zu können, benötigen Sie einen um 45° gedrehten Polarisationsfilter. Hinter diesem sollten Sie nun ein Muster aus Interferenzstreifen sehen, s. Abb. 2. Das Ziel ist es, diese Streifen zu **eliminieren**, indem man beide Strahlen auf der gesamten Länge perfekt parallel zueinander ausrichtet.
6. Nutzen Sie nun ein wesentliches Feature des Sagnac-Interferometers: Verfahren Sie Spiegel M_2 , um den eingehenden Strahl parallel zur ersten Oberfläche des PBSC zu bewegen. Dadurch trennen sie die beiden zuvor überlappenden Strahlen in zwei horizontal zueinander versetzte Strahlen auf. Nutzen sie die äußeren Löcher der Justageplatten, die Sie an den Stellen 2 und 3 platzieren. Anschließend sollten Sie das Interferenzmuster wie oben auf Interferenzstreifen untersuchen und

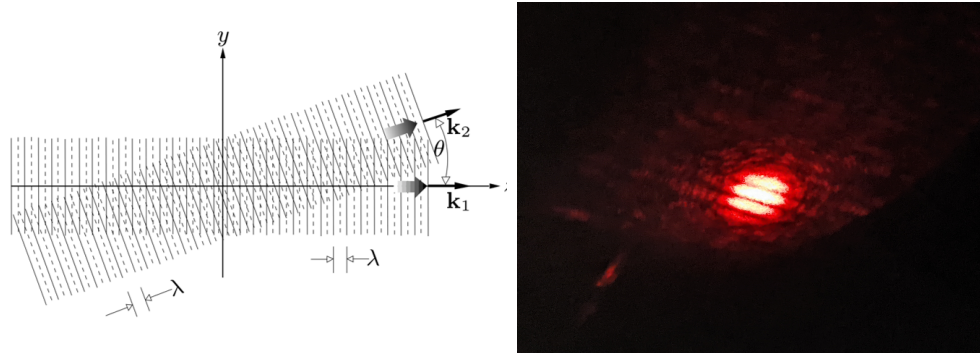


Abbildung 2: Links: Skizze zur Überlagerung der Wellenfronten zweier ebener Wellen, die sich in unterschiedliche Richtungen fortpflanzen. Übernommen aus Ref. [1]. Rechts: Resultierendes Muster aus Interferenzstreifen hinter dem Interferometer, wie es im Experiment beobachtet werden kann, wenn die beiden Strahlen das Interferometer nicht unter demselben Winkel verlassen.

- ggf. nachjustieren. Es ist nun möglich, einen dieser Strahlen zu manipulieren, während der zweite unbeeinflusst bleibt.
7. Bauen Sie nun den Rotationshalter mitsamt der 2 verkippten dünnen Glasplatten in den Strahlengang ein. Die Platten haben eine Dicke $T = 1$ mm. Auch hier kann eine erneute Feinjustage nötig sein. Beobachten Sie das Interferenzmuster in Abhängigkeit des Rotationswinkels.
 8. Zur weiteren Detektion wird nun der Polarisationsfilter durch den um 45° gedrehten PBSC ersetzt. Sie sollten in beiden aus diesem PBSC austretenden Strahlen nun Interferenz beobachten können. Wie verhalten sich die beiden Spots zueinander? Überprüfen Sie Ihre Erwartung, indem Sie die beiden Spots mit Photodioden detektieren und auf einem Oszilloskop als Funktion der Zeit darstellen lassen.
 9. Verschalten Sie nun beide Dioden über den Modern Interferometry Controller so, dass Sie die Differenz messen können. Welche Vorteile bietet diese Methode?
 10. Schlussendlich können Sie Schwankungen in der Luftdichte minimieren, indem Sie die beiliegende Haube auf das Interferometer setzen.

4 Messprogramm und Auswertung

1. Bestimmen Sie den **Kontrast des Interferometers** in Abhängigkeit der Polarisationsrichtung ϕ des Laserstrahls. Hierfür soll die Diodenspannung jeweils für das Interferenzmaximum und -Minimum (einstellbar durch den Doppelglashalter im Interferometer) in Abhängigkeit der Orientierung eines Linearpolarisationsfilters vor dem ersten Beamsplittercube gemessen werden.

Vergleichen Sie die gemessenen Werte mit der zuvor berechneten Theoriekurve (Punkt 7 in der Vorbereitung)!

2. Stellen Sie den Polarisator nun so ein, dass der Kontrast maximal ist und führen Sie die folgenden Messungen mit der Differenzspannungsmethode durch.

3. Brechungsindex von Glas

Bestimmen Sie den Brechungsindex des Glases aus dem Doppelglashalter, indem Sie wiederholt die Anzahl der Interferenzmaxima bzw. -Minima $M = \frac{\Delta\Phi}{2\pi}$ in Abhängigkeit des Drehwinkels Θ der Glasplatten messen (10 Wiederholungen).

Eine **einzelne** planparallele Platte mit Brechungsindex n erzeugt für kleine Drehwinkel Θ näherungsweise eine Phasenverschiebung

$$\Delta\Phi(\Theta) = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{vac}}} T \left(\frac{n-1}{2n} \Theta^2 + \mathcal{O}(\Theta^4) \right) \quad (2)$$

Hier ist λ_{vac} die Wellenlänge des Lichtes in Vakuum und T die Dicke des Glasplättchens.

Bedenken Sie, dass in dem verwendeten Halter 2 Glasplättchen verbaut sind, die bereits um $\Theta_0 = \pm 10^\circ$ verkippt sind. Modifizieren Sie Gleichung 2 entsprechend!

4. Brechungsindex von Gasen

Bauen Sie anstelle des Doppelglashalters nun die Gaszelle in einen der beiden Strahlen ein. Bestimmen Sie den Brechungsindex n von Luft (Bachelor) bzw. Luft und einem weiteren Gas (Master), indem Sie in die zuvor evakuierte Gaszelle das entsprechende Gas einleiten und die Anzahl M der Interferenzmaxima- bzw. Minima in Abhängigkeit des Drucks messen (50 mbar Schritte). Es sollten mindestens 3 Messreihen pro Gas aufgenommen werden. Die Gaszelle hat eine Länge von 100.0 ± 0.1 mm.

Der Lichtstrahl, der durch die Gaszelle läuft, erfährt eine Phasenverschiebung

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{vac}}} \Delta n L \quad (3)$$

gegenüber dem freien Strahl. Bestimmen Sie darüber hinaus den Brechungsindex der beiden Gase bei Normatmosphäre (15°C, 1013 hPa) über das Lorentz-Lorenz-Gesetz. Notieren Sie auch die Temperatur im Raum!

5 Literatur

[1] E. Hecht, K. Lippert, Optik, 7. Ausgabe, De Gruyter 2018 (auch als E-Book erhältlich)