

Versuch 64

Moderne Interferometrie

Maik Becker
maik.becker@udo.edu

Kevin Sedlaczek
kevin.sedlaczek@udo.edu

Durchführung: 17.05.2017

Abgabe: 09.10.2017

TU Dortmund – Fakultät Physik

1 Zielsetzung

Ziel des Versuchs ist die Bestimmung der Brechungsindices von Luft, Kohlenstoffdioxid und Glas. Dazu wird ein Sagnac Interferometer verwendet, welches aufgebaut und einjustiert wird. Zur qualitativen Beurteilung des verwendeten Aufbau wird zusätzlich der Kontrast des Interferometers bestimmt.

2 Theorie

2.1 Das Sagnac Interferometer

Abbildung 1 zeigt den Aufbau des Sagnac Interferometers. Der Strahl eines Helium-Neon-Lasers ($\lambda = 632,8 \text{ nm}$) wird über zwei Spiegel auf den Eingang des Interferometers gelenkt. Dort trifft dieser senkrecht auf einen polarisierenden Strahlteiler. Während ein Teil des Strahls den Strahlteiler auf geradem Weg passiert, wird der andere Teil im rechten Winkel reflektiert. Die zwei Teilstrahlen sind nach Austritt aus dem Strahlteiler senkrecht zueinander polarisiert. Der Strahlteiler selbst besteht aus zwei Prismen mit dreieckiger Grundfläche, die auf ihren Hypothenusen miteinander verbunden sind. Der Normalenvektor der Hypothenusenfläche steht im 45° Winkel zum einfallenden und reflektierten Strahl. Die zwei Strahlen laufen nun über drei Spiegel in einem Rechteck, wobei sie sich dabei überlagern. Danach treffen sie erneut auf den Strahlteiler und verlassen das Interferometer in Richtung einer Messvorrichtung bestehend aus zwei Photodioden.

Durch vorsichtiges Verschieben des Spiegels vor dem Eingang des Interferometers, kann der überlagerte Strahl im Interferometer in zwei entgegengesetzt laufende Strahlen räumlich getrennt werden. Es besteht nun die Möglichkeit ein optisches Element in einen der beiden Teilstrahlen zu stellen, ohne den anderen Teilstrahl zu beeinflussen. Ein weiterer Vorteil des Sagnac Interferometers ist, dass es unempfindlich gegenüber kleineren Erschütterungen ist, da beide Strahlen die gleiche Wegstrecke durchlaufen.

2.2 Kontrast des Sagnac Interferometers

Der Kontrast eines Interferometers ist gegeben durch

$$K = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}. \quad (1)$$

Hierbei bezeichnet I_{\max} die Intensität eines Interferenzmaximums und I_{\min} die Intensität eines Interferenzminimums. Im Idealfall ist $I_{\min} = 0$ und somit $K = 1$. Im schlechtesten Fall ist kein Unterschied in der Intensität zwischen Maxima und Minima zu erkennen. Dann gilt $I_{\max} = I_{\min}$ und somit $K = 0$.

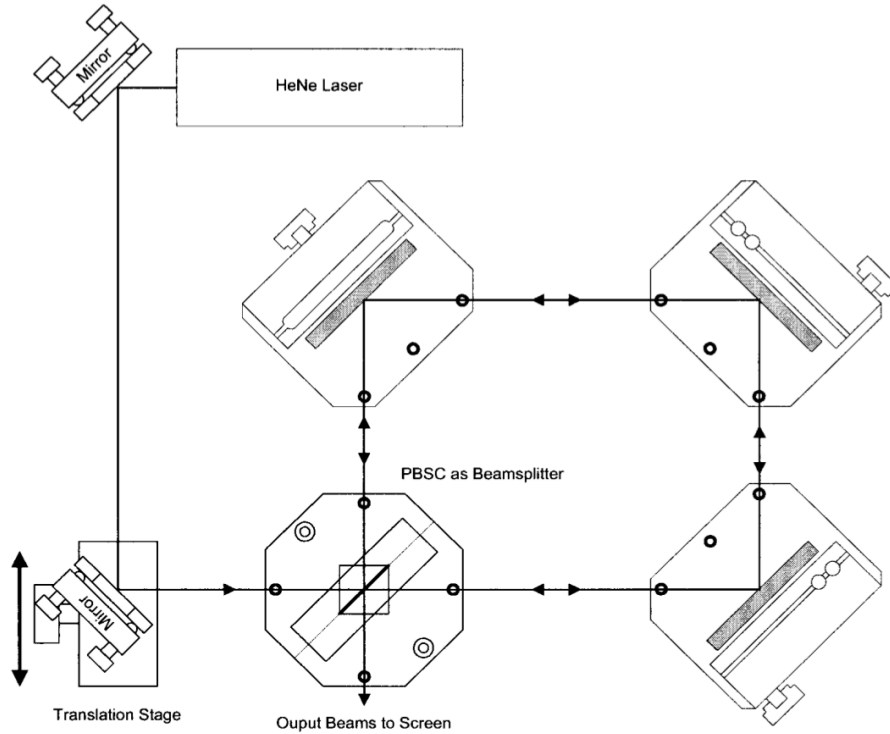


Abbildung 1: Aufbau des verwendeten Sagnac Interferometers [1].

Im durchgeführten Experiment wird der Kontrast in Abhängigkeit der Einstellung eines im Strahlgang befindlichen Polarisationsfilters gemessen. Ausgedrückt durch einen Polarisationswinkel φ , einem Phasenwinkel δ und einer Amplitude A beträgt der Kontrast

$$K = A|\sin(2\varphi + \delta)|, \quad (2)$$

2.3 Bestimmung des Brechungsindex eines Gases

Der Brechungsindex n von Materie ist definiert als Quotient der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum und der Lichtgeschwindigkeit in der Materie. Daraus folgt für die Wellenzahl k des Lichts in Materie

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

wobei λ_{vac} die Wellenlänge des Lichts im Vakuum ist.

Für die Bestimmung des Brechungsindex eines Gases wird nun eine Gaszelle der Länge L in einem(!) Strahl des Interferometers platziert. Durch die leicht unterschiedliche Geschwindigkeit des Lichts in der Gaszelle, kommt es zu einer Phasendifferenz zwischen den beiden Strahlen

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi L}{\lambda_{\text{vac}}} \Delta n, \quad (4)$$

die linear mit der Differenz der Brechungsindices des Gases und der Umgebungsluft zusammenhängt. Durch Überlagerung der beiden Strahlen ergibt sich ein Interferenzmuster. Die Anzahl M der beobachteten Interferenzmaxima ist proportional zur Phasendifferenz. Es gilt

$$M = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} = \frac{L}{\lambda_{\text{vac}}}(n - 1) \quad (5)$$

und somit

$$n = \frac{\lambda_{\text{vac}}}{L}M + 1. \quad (6)$$

wobei die Annahme gemacht wurde, dass für den Brechungsindex der Umgebungsluft $n_{\text{Luft}} = 1$ gilt. Im Allgemeinen ist der Brechungsindex temperatur- und druckabhängig. Einen Zusammenhang liefert die Lorentz-Lorenz-Gleichung

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{4\pi}{3}N\alpha = \frac{Ap}{RT} \quad (7)$$

mit der Polarisierbarkeit α , der Anzahl N der Moleküle im Einheitsvolumen, der molaren Refraktivität A , der universellen Gaskonstante R , sowie Druck p und Temperatur T . Für Gase liegt der Brechungsindex in der Regel nahe Eins, weswegen $n^2 + 2 \approx 3$ gilt. Damit ergibt sich in guter Näherung

$$n \approx \sqrt{1 + \frac{3Ap}{RT}} \quad (8)$$

2.4 Bestimmung des Brechungsindex eines lichtdurchlässigen Festkörpers

Während die Bestimmung des Brechungsindex eines Gases mit Hilfe der Variation des Gasdrucks und der Temperatur erfolgen kann, so ist dies für Festkörper nicht ohne Weiteres praktikabel. Ein im Folgenden diskutiertes Verfahren ermöglicht die Bestimmung des Brechungsindex von lichtdurchlässigen, planparallelen Festkörpern, wie zum Beispiel eines kleinen Glasplättchens.

Abbildung 2 zeigt schematisch den Strahlengang des Lichtes in einem Glasplättchen der Dicke T . Hierbei wird deutlich, dass die Brechung des Lichtes eine Trajektorie \overline{CD} verursacht, die im Vergleich zum direkten Weg \overline{AB} länger ist. Dies verursacht den zur Interferenz benötigten Phasenunterschied. Dieser berechnet sich über den Zusammenhang

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{vac}}} (n_{\text{Glas}} \cdot \overline{CD} - n_{\text{Luft}} \cdot \overline{AB}). \quad (9)$$

Er hängt damit von der effektiven Weglänge des Lichtes ab, die wiederum abhängig vom Brechungsindex ist. Aus Abbildung 2 folgen für \overline{AB} und \overline{CD} die geometrischen

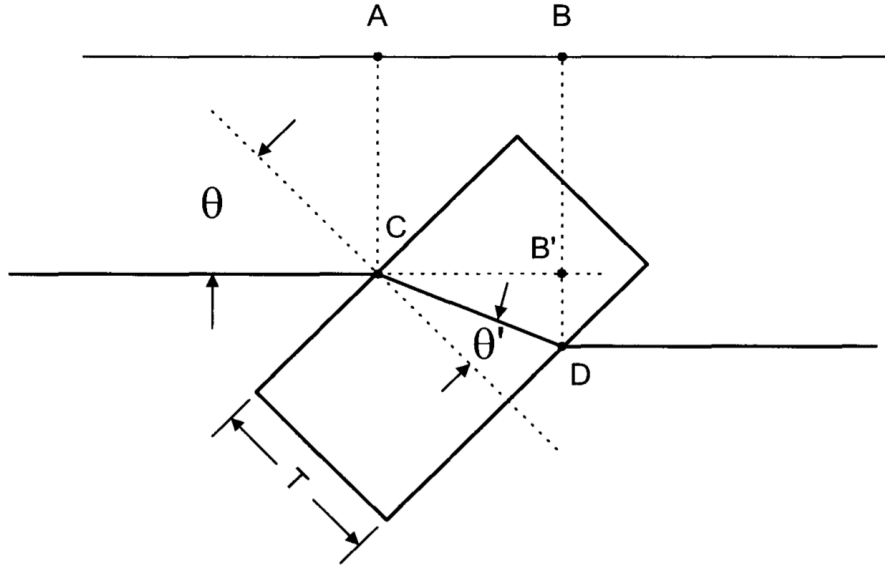


Abbildung 2: Schematischer Strahlengang des Lichtes an einem Glasplättchen.

Zusammenhänge

$$\cos \theta' = \frac{T}{\overline{CD}} \Rightarrow \overline{CD} = \frac{T}{\cos \theta'} \quad (10)$$

$$\cos(\theta - \theta') = \frac{\overline{AB}}{\overline{CD}} \quad (11)$$

Der Phasenunterschied berechnet sich dann für $n_{\text{Luft}} = 1$ und $n_{\text{Glas}} = n$ zu

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{vac}}} (n \cdot \overline{CD} - \overline{AB}) \quad (12)$$

$$= \frac{2\pi}{\lambda_{\text{vac}}} \left(n \frac{T}{\cos \theta'} - \overline{CD} \cos(\theta - \theta') \right) \quad (13)$$

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

Mit Hilfe des Brechungsgesetzes von Snellius lässt sich nun der Winkel θ' durch den Winkel θ ausdrücken. Es gilt demnach

$$n \cdot \sin \theta' = 1 \cdot \sin \theta \Rightarrow \theta' = \arcsin \left(\frac{\sin \theta}{n} \right) \quad (15)$$

Im Versuchsaufbau wird anstatt eines einzelnen Glasplättchens ein Doppelglashalter verwendet. Dabei handelt es sich um zwei(!) Glasplättchen, die sich mit einem festen Winkel von 20° zueinander in jeweils einem Teilstrahl befinden und dort gemeinsam rotieren können. Symmetrisiert man das System gelten die obigen Formeln mit $\theta \rightarrow \theta_{\pm} = \theta \pm \theta_0$

und $\theta_0 = 10^\circ$ für zwei einzelne Glasplättchen, wobei die jeweils berechneten Phasenunterschiede aufgrund der unterschiedlichen Lichtaufrichtung voneinander subtrahiert werden müssen. Für die Anzahl M der beobachteten Interferenzmaxima gilt dann

$$M = \frac{\Delta\Phi}{2\pi} \quad (16)$$

$$= \frac{T}{\lambda_{\text{vac}}} \left(\frac{n - \cos\left(\theta_+ - \arcsin\left(\frac{\sin\theta_+}{n}\right)\right)}{\cos\left(\arcsin\left(\frac{\sin\theta_+}{n}\right)\right)} - \frac{n - \cos\left(\theta_- - \arcsin\left(\frac{\sin\theta_-}{n}\right)\right)}{\cos\left(\arcsin\left(\frac{\sin\theta_-}{n}\right)\right)} \right) \quad (17)$$

wobei nur noch der Drehwinkel θ eine unabhängige Variable ist.

3 Durchführung

3.1 Versuchsaufbau

Zunächst wird das Sagnac Interferometer, wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, aufgebaut. Dabei müssen die Spiegel mit Hilfe von sogenannten Strahlpaddeln präzise justiert werden, um zu gewährleisten, dass die beiden entgegengesetzt laufenden Strahlen im Interferometer an jedem Ort deckungsgleich aufeinanderliegen. Anschließend wird durch vorsichtiges Verschieben des Spiegels vor dem Eingang des Interferometers der Strahl im Interferometer aufgeteilt. Ist dies erreicht, wird der Aufbau mit Hilfe einer durchsichtigen Kunststoffhaube geschützt.

Der am Interferometer austretende Strahl wird auf einen zweiten Strahlteiler gelenkt, der den Strahl erneut aufteilt, wobei der reflektierte Strahl nun um 45° aus der horizontalen Ebene herausgelenkt wird. Die Intensitäten beider Teilstrahlen werden anschließend von je einer Photodiode gemessen, die ihre Spannungssignale an eine automatische Zählapparatur weitergeben.

3.2 Versuchsdurchführung

In einer ersten Messung wird der Kontrast des verwendeten Interferometers bestimmt. Dazu wird vor dem Strahlteiler ein Polarisationsfilter platziert und in 15° Schritten von 0° bis 360° variiert. Eine der beiden Dioden wird mit einem Amperemeter verbunden, welches den detektierten Strom in Abhängigkeit vom eingestellten Polarisationswinkel misst. Für jeden eingestellten Polarisationswinkel wird durch Drehung des Doppelglashalters die minimale und die maximale Intensität gesucht. Für die folgenden Versuchsteile wird stets die Konfiguration verwendet, die einem maximalen Kontrast entspricht.

Die zweite Messung dient der Bestimmung des Brechungsindex von Glas. Dazu wird der Winkel am Doppelglashalter zehnmal langsam von 0° auf 10° gedreht. Die Ausgänge der Photodioden wurden vorher mit der Zählautomatik verbunden, die in der Lage

ist durch Subtraktion der Stromstärken und Zählung der Nulldurchgänge die Anzahl von Interferenzmaxima zu zählen. Es werden zehnmal die Anzahl an gezählten Maxima abgelesen.

Im dritten Versuchsteil wird eine Gaszelle in einen der beiden Strahlgänge im Interferometer eingebracht. Durch Evakuierung und Ventilierung der Gaszelle mit Luft bzw. Kohlenstoffdioxid, werden je drei Messreihen in Abhängigkeit des Drucks aufgenommen. Nach erfolgter Evakuierung wird die Gaszelle langsam wieder befüllt und die Anzahl der Interferenzmaxima wird in 50 mbar abgelesen.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuch 64: Moderne Interferometrie*. URL: <http://129.217.224.2/HOME PAGE/PHYSIKER/MASTER/SKRIPT/Interferometrie.pdf> (besucht am 09.05.2017).