

V401

Das Michelson-Interferometer

Lukas Rolf

lukas.rolf@tu-dortmund.de

Yannik Brune

yannik.brune@tu-dortmund.de

Durchführung: 27.06.2017

Abgabe: 04.07.2017

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
2.1 Das Michelson-Interferometer	4
3 Aufbau	5
4 Durchführung	6
5 Auswertung	6
5.1 Bestimmung der Wellenlänge des Lichtes eines Lasers	6
5.2 Bestimmung des Brechungsindex von Luft unter Normalbedingungen . .	7
6 Diskussion	7
Literatur	9

1 Zielsetzung

Es soll die Bestimmung der Wellenlängen und von Brechungsindices mithilfe von Interferenzmustern durchgeführt werden.

2 Theorie

Die Ausbreitungsvorgänge von Licht können gut beschrieben werden, indem angenommen wird, dass Licht eine elektromagnetische Welle ist. Aus den maxwellschen Gleichungen ergibt sich zusätzlich, dass mehrere Welle durch Superposition überlagert werden können. Jedoch ergeben sich für sichtbares Licht Frequenzen im Bereich von $10 \cdot 10^{15}$ Hz, weswegen der Zusammenhang nicht auf direktem Weg experimentell prüfbar ist. Daher erfolgt die Superposition indirekt über die Lichtintensität I . Für eine Überlagerung von zwei unabhängigen, ebenen Wellen gleicher Intensität ergibt sich:

$$I_{\text{Ges}} = 2A|E_0|^2 (1 + \cos(\delta_2 - \delta_1)), \quad (1)$$

mit der Summe der Einzelintensitäten $2A|E_0|^2$ und einem Interferenzterm. Letzterer ist abhängig von der Phasenverschiebung beider Welle und kann die Gesamtintensität entweder verstärken oder bis zur Auslöschung reduzieren. Auf einem Schirm zeigt sich das entstehende Interferenzbild in Form von dunklen und hellen Streifen.

Es zeigt sich jedoch, dass bei der Überlagerung von Lichtstrahlen aus unabhängigen Lichtquellen im Regelfall keine Interferenz zu erkennen ist. Der Grund hierfür liegt in den unterschiedlichen Phasenkonstanten, welche bei normalen Leuchtmitteln aufgrund der quantenmechanischen Natur der Lichtemission durch Elektronen statistisch verteilt sind. Solches Licht wird als inkohärent bezeichnet. Daher wird ein Laser verwendet, bei welchem die Lichtemission gleich getaktet ist. Eine weitere Möglichkeit Interferenzeffekte beobachten zu können liegt darin, dass Licht einer Quelle zu teilen und. Die entstandenen Lichtstrahlen sind natürlich gleich getaktet und erzeugen bei einer erneuten Zusammenführung daher ein erkennbares Interferenzbild. Für die Gangunterschiede zu Erzeugung von Interferenzmaxima und Minima gilt:

$$\Delta_{\text{max}} = n\lambda \quad (2)$$

$$\Delta_{\text{min}} = (2n + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (3)$$

Es ist jedoch darauf zu achten das die Gangunterschiede nicht deutlich größer als die Wellenlänge ausfällt, da die Elektronen nur endliche Wellenzüge emittiert. Fallen die Gangunterschiede nun zu groß aus, treffen Lichtstrahlen aus unterschiedlichen Emissionen zusammen und sind daher nicht mehr kohärent. Für den maximal möglichen Gangunterschied gilt:

$$l = N\lambda, \quad (4)$$

mit der maximal auf dem Schirm beobachtbaren Maximumanzahl N . Wird eine punktförmige Lichtquelle angenommen, ist eine Intensitätsverteilung für eine Lichtwelle der

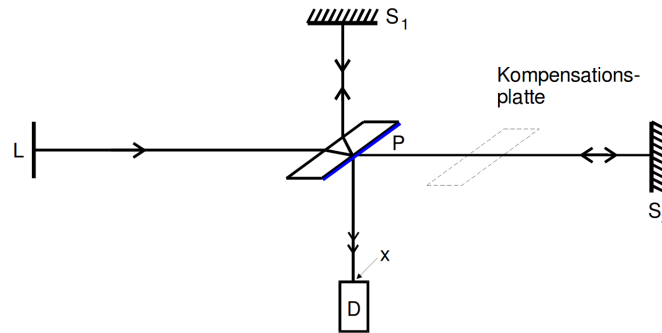
Winkelgeschwindigkeit ω gegeben durch:

$$I(\omega) = 4E_0^2 \frac{\sin(\omega - \omega_0)l}{(\omega - \omega_0)^2 2c}. \quad (5)$$

In der Praxis liegen jedoch Lichtquellen mit endlicher Ausbreitung vor. Daher kommt es bei Betrachtung eines festen Punktes auf dem Schirm wieder zu einer Überlagerung von Wellen mit einem kontinuierlichem Spektrum von Gangunterschieden und einem resultierenden Verschwinden des Interferenzbildes. Der Effekt kann nicht aufgehoben werden, ist jedoch reduzierbar. Hierzu müssen entweder die Abmessungen der Lichtquelle oder der beobachtete Winkelbereich klein gehalten werden.

2.1 Das Michelson-Interferometer

Abbildung 1: Der prinzipielle Aufbau des Michelson-Interferometer [1].



Für das Michelson-Interferometer werden nun die Vorteile eines Lasers und die einer Interferenz mithilfe einer einzigen Lichtquelle kombiniert. Ein Laser trifft auf einen halbdurchlässigen Spiegel, welcher im 45° aufgestellt ist und den Strahl in zwei zueinander kohärente Teilstrahlen aufspaltet. Beide Strahlen gelangen anschließend gemäß Abb. 1 jeweils auf einen Spiegel und werden wieder zurückgeworfen. Beim Halbdurchlässigen Spiegel kommen beide wieder zur Interferenz und werden wieder zum Teil auf einen Detektor reflektiert. Da der über den Spiegel S_1 laufende Lichtstrahl, den halbdurchlässigen Spiegel drei mal durchquert, der über den Spiegel S_2 laufende jedoch nur einmal, entsteht ein zusätzlicher Gangunterschied. Dieser kann über eine Kompensationsplatte im Strahlenweg von S_2 ausgeglichen werden, welche den optischen Weg entsprechend verlängert. Wird nun der obere Spiegel weiter nach oben verschoben, ändert sich der Gangunterschied und damit auch das Interferenzbild. Aus der Verschiebungsstrecke Δd sowie in der Strecke auftretenden Maximalanzahl z lässt sich die Wellenlänge der Lichtquelle durch:

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

bestimmen. Auf ganz ähnliche Weise kann auch eine Veränderung der optischen Wegstrecke auch durch Veränderung Δn des Brechungsindices erfolgen. In diesem Fall wird eine

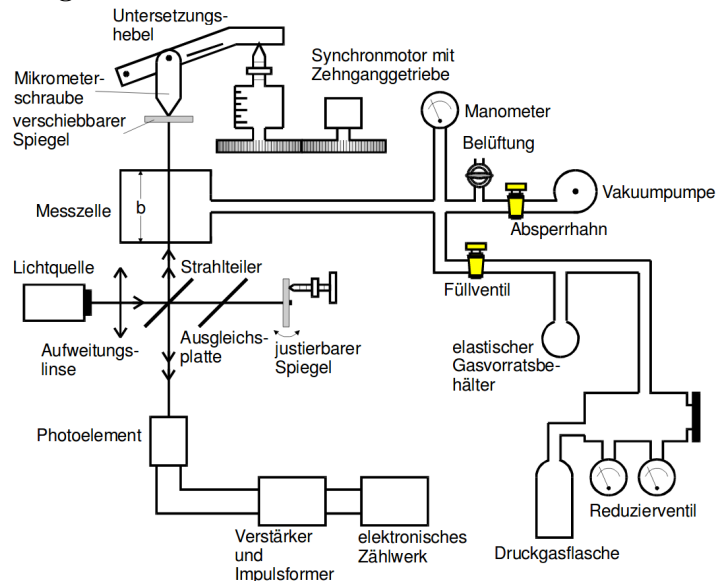
teilweise evakuierte Messzelle verwendet. Für die Wellenlänge gilt dann:

$$\lambda = \frac{2b\Delta n}{z}. \quad (7)$$

Da beim Michelson-Interferometer normalerweise mit divergenten Lichtstrahlen gearbeitet wird, bilden die Interferenzmaxima und Minima Ringe, welche entweder aus dem Zentrum entstehen oder in ihm verschwinden.

3 Aufbau

Abbildung 2: Der schematische Aufbau des Michelson-Interferometer [1].



Der Messaufbau besteht im Kern aus dem in der Theorie beschriebenen Konzept der Interferenz zweier kohärenter Lichtstrahlen. Hierzu wird der Strahl eines Helium-Neon-Lasers über eine Aufweitungslinse auf einen halbdurchlässigen Spiegel gelenkt, welcher den Strahl in zwei neue Strahlen aufteilt. Ein Strahl läuft über eine Ausgleichsplatte auf einen justierbaren Spiegel und wieder zurück. Der andere Strahl läuft durch eine Messzelle, in welcher der vorherrschende Luftdruck modifiziert werden kann. Hierzu wird eine handbetriebene Vakuumpumpe mit integriertem Manometer verwendet. Auch dieser Lichtstrahl trifft anschließend auf einen Spiegel und wird wieder zurück reflektiert. Der Spiegel lässt sich über eine Mikrometerschraube und einen untersetzten Synchronmotor langsam verschieben. Beide Strahlen kommen beim halbdurchlässigen Spiegel zur Interferenz und treffen anschließend auf ein Photoelement. Über einen Verstärker und einen Impulsformer kann anschließend die Zahl der auftretenden Interferenzmaxima gezählt werden.

4 Durchführung

Als erstes muss der optische Teil der Apparatur justiert. Dazu wird der justierbare Spiegel so eingestellt, dass beide Lichtstrahlen parallel liegen und zentral auf das Photoelement fallen. Zunächst wird die Wellenlänge des Lasers über sein Interferenzbild bestimmt. Hierzu wird der verschiebbare Spiegel über den Motor langsam verschoben. An diesem wird eine Geschwindigkeit von 1 eingestellt. Zudem wird die aktuelle Einstellung der Mikrometerschraube notiert. Der Spiegel wird nun solange verschoben bis der Detektor ca. 1000 Maxima gezählt hat. Es wird die neue Einstellung der Mikrometerschraube, sowie die gemessene Zahl der Maxima notiert. Dieser Vorgang wird Zehn mal wiederholt. Für den zweiten Versuchsteil wird nun der Luftdruck in der Messzelle variiert. Dazu wird in der Messzelle mit der Vakuumpumpe ein Unterdruck von ca. $-0,7$ bar erzeugt. Anschließend wird der Druck wieder langsam auf Normaldruck erhöht. Dabei wird wieder die Anzahl der auftretenden Maxima notiert.

5 Auswertung

Die Graphen wurden sowohl mit Matplotlib [2] als auch NumPy [6] erstellt. Die Fehlerrechnung wurde mithilfe von Uncertainties [4] durchgeführt. Die Konstanten T_0 und p_0 sind vom NIST [5].

5.1 Bestimmung der Wellenlänge des Lichtes eines Lasers

Tabelle 1: Die gemessene Anzahl von Lichtimpulsen N bei einer Verschiebung des Spiegels um Δs .

$\frac{10\Delta s}{\text{mm}}$	N
1,67	1006
1,66	1004
1,66	1004
1,66	1004
1,66	1004
1,66	1003
1,66	1003
1,66	1002
1,66	1003
1,70	1026
1,67	1011

Aus der gemessenen Anzahl von Lichtimpulsen N bei einer Verschiebung des Spiegels um Δs lässt sich nach Formel (6) die Wellenlänge λ berechnen. Für die Werte aus Tabelle

1 ergibt sich

$$\lambda = 4 \frac{\Delta s}{N} = (662,0 \pm 0,3) \text{ nm.} \quad (8)$$

5.2 Bestimmung des Brechungsindex von Luft unter Normalbedingungen

Tabelle 2: Die gemessene Anzahl von Lichtimpulsen N bei einer Änderung des Druckes in der Messzelle um Δp bei einer Temperatur T von ca. 20 °C.

$\frac{\Delta p}{\text{bar}}$	N
0,50	21
0,60	25
0,68	29
0,70	30
0,70	31
0,70	29
0,69	25
0,68	27
0,80	33
0,60	24
0,60	25
0,60	24
0,70	28
0,60	24
0,60	24

Aus der gemessenen Anzahl von Lichtimpulsen N bei einer Änderung des Druckes in der Messzelle um Δp lässt sich nach Formel (7) der Brechungsindex n von Luft unter Normalbedingungen berechnen. Für die Werte aus Tabelle 2 und mit $L = 50 \text{ mm}$ ergibt sich

$$n = 1 + \Delta n \frac{T p_0}{T_0 \Delta p} = 1 + \frac{N \lambda T p_0}{2 L T_0 \Delta p} = 1,000\,30 \pm 0,000\,01, \quad (9)$$

wobei $T_0 = 273,15 \text{ K}$ und $p_0 = 1,0132 \text{ bar}$ sind.

6 Diskussion

Die Auswertung liefert Ergebnisse die nun diskutiert werden sollen. Die ermittelte Wellenlänge liegt mit $\lambda = (662,0 \pm 0,3) \text{ nm}$ im Bereich des roten sichtbaren Lichtes [7], was während der Durchführung auch beobachtet werden konnte. Die ermittelte Wellenlänge weicht um 2 % von dem angegebenen Wert für die Wellenlänge des Lasers von 650 nm nach oben ab. Dies könnte durch den Ablesefehler oder auch durch das Übergehen einiger Maxima, wodurch nach Formel (6) auch die Wellenlänge größer ausfallen würde, erklärt werden. Der ermittelte Brechungsindex $n = 1,000\,30 \pm 0,000\,01$ liegt mit seiner

σ -Umgebung im Bereich des Literaturwertes von $n_{\text{lit}} = 1,000\,292$ [3] und widerspricht somit nicht dem Literaturwert.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *V401 Das Michelson-Interferometer*. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/V401.pdf> (besucht am 27.06.2017).
- [2] John D. Hunter. *Matplotlib: A 2D Graphics Environment*. Version 1.5.3. URL: <http://matplotlib.org/> (besucht am 09.12.2016).
- [3] National Physical Laboratory. *Refractive index of gases*. URL: <https://refractiveindex.info/?shelf=other&book=air&page=Ciddor> (besucht am 02.07.2017).
- [4] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 3.0.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/> (besucht am 09.12.2016).
- [5] NIST. *Numpy Konstanten*. URL: <http://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html> (besucht am 25.04.2017).
- [6] Travis E. Oliphant. *NumPy: Python for Scientific Computing*. Version 1.11.1. URL: <http://www.numpy.org/> (besucht am 09.12.2016).
- [7] HUG Technik und Sicherheit GmbH. *UMRECHNUNGSTABELLE WELLENLÄNGE DER FARBEN*. URL: <https://www.hug-technik.com/inhalt/ta/farben.html> (besucht am 02.07.2017).