

V401

Das Michelson-Interferometer

Sonia Chander

sonia.chander@tu-dortmund.de

Jana Schlücking

jana.schluecking@tu-dortmund.de

Durchführung: 27.04.2021

Abgabe: 04.05.2021

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	3
2	Theorie	3
2.1	Interferenz und Kohärenz von Licht	3
2.2	Prinzipieller Aufbau des Michelson-Interferometers	4
3	Durchführung	6
3.1	Bestimmung der Wellenlänge des Lasers	7
3.2	Bestimmung des Brechungsindex von Luft	7
4	Auswertung	9
4.1	Bestimmung der Wellenlänge des Lasers	9
4.2	Bestimmung des Brechungsindex von Luft	9
5	Diskussion	10
6	Anhang	10
	Literatur	12

1 Zielsetzung

Dieser Versuch beschäftigt sich mit dem Michelson-Interferometer. Mit dessen Hilfe wird zuerst die Wellenlänge eines Lasers ausgemessen. Anschließend wird noch der Brechungsindex von Luft ermittelt.

2 Theorie

2.1 Interferenz und Kohärenz von Licht

Da im Interferometer Interferenzeffekte auftreten, werden im folgenden Abschnitt die Voraussetzung für Interferenz vorgestellt. Licht wird in diesem Fall als elektromagnetische Welle betrachtet, sodass seine Ausbreitung mit den Maxwellgleichungen beschrieben werden können. Die Beschreibung der Lichtwelle erfolgt über

$$\vec{E}(x, t) = \vec{E}_0 \cos(kx - \omega t - \delta), \quad (1)$$

wobei k die Wellenzahl ist, welche über $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ im Zusammenhang mit der Wellenlänge λ steht, ω die Kreisfrequenz, und δ der Phasenwinkel ist. Die messbare Größe ist aber die Intensität I des Lichtes, welche über $I = |\vec{E}|^2$ berechnet wird. Sie beschreibt den Zeitmittelwert der Lichtleistung, die auf eine Flächeneinheit trifft.

Treffen zwei Lichtwellen auf einen Punkt auf, überlagern sie sich nach dem Superpositionsprinzip. Daher folgt für die Intensität:

$$I_{\text{ges}} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} |\vec{E}(x, t)|^2 dt = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} |\vec{E}_1 + \vec{E}_2|^2(x, t) dt$$

Hierbei sollte der Beobachtungszeitraum groß gegenüber der Periodendauer sein. Werden nun beide der Lichtwellen mit Funktionen der Form (1) beschrieben, dann ergibt sich für die Gesamtintensität der Wert $I_{\text{ges}} = 2\vec{E}_0^2(1 + \cos(\delta_2 - \delta_1))$. Der sogenannte Interferenzterm $2\vec{E}_0^2 \cos(\delta_2 - \delta_1)$ zeigt, dass sich die einzelnen Intensitäten der Lichtwellen nicht einfach addieren.

Interferenz tritt nicht bei jedem Licht auf; um Interferenzeffekte zu beobachten, wird kohärentes Licht benötigt. Das bedeutet, dass sich das Licht durch eine Funktion der Form (1) darstellen lässt, wobei die Parameter k , ω und δ einen festen Wert haben. Laser erzeugen kohärentes Licht, jedoch ist auch mit normalen Lichtquellen kohärentes Licht erzeugbar. Hierfür wird, wie in der Abbildung 1 zu sehen ist, das Licht aus einer Lichtquelle durch eine Doppelblende aufgeteilt und über Spiegel auf einen Schirm gelenkt. Jedoch ist zu beachten, dass der Emissionsakt nur eine endliche Zeit τ währt, also der emittierte Wellenzug eine endliche Länge. Ist der Wegunterschied Δ (in Abbildung 1 $\Delta = \overline{\text{LSP}} - \overline{\text{LP}}$) deutlich größer als die Länge des Wellenzuges, treten keine Interferenzeffekte auf. Dies kommt daher, dass die Lichtwellen, welche dann zeitgleich an dem Punkt P ankommen, keine feste Phasenbeziehung mehr haben, also nicht mehr kohärent sind. Der Wegunterschied, bei dem gerade keine Interferenzeffekte mehr beobachtet werden,

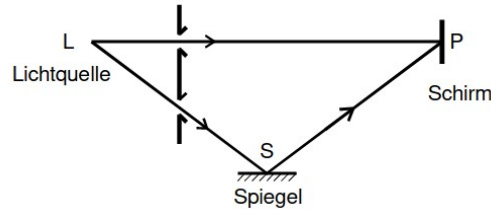


Abbildung 1: Versuchsanordnung zur Erzeugung von kohärentem Licht aus einer konventionellen Lichtquelle [2].

wird Kohärenzlänge genannt.

Nach dem Fourierschem Theorem kann ein Wellenzug endlicher Länge nicht monochromatisch sein, jedoch ist polychromatisch oder nicht-monochromatisches Licht im allgemeinen nicht interferenzfähig. Daher muss darauf geachtet werden, dass das Frequenzspektrum so schmal oder der Wegunterschied klein genug ist, sodass die Maximums- und Minimumsbedingungen von zwei Wellenlängen nicht an demselben Ort realisiert werden können.

2.2 Prinzipieller Aufbau des Michelson-Interferometers

Das Michelson-Interferometer wurde entwickelt um im Michelson-Morley-Experiment den Äther nachzuweisen, welches nicht funktionierte, jedoch werden ähnliche Interferometer benutzt um Gravitationswellen nachzuweisen. Der prinzipielle Aufbau des Michelson-Interferometers ist in Abbildung 2 zu sehen. In dem Punkt L ist die Lichtquelle stationiert, welche das Licht auf eine semipermeable Platte P emittiert. Dort wird der Lichtstrahl aufgespalten. Der reflektierte Strahl wird auf die Strecke zum Spiegel S_1 geschickt, an dem Spiegel wird das Licht komplett reflektiert. Der transmittierte Strahl läuft auf den Spiegel S_2 zu und wird dort reflektiert. Beide Strahlen treffen wieder auf den semipermeablen Spiegel, der vorher transmittierte Strahl wird reflektiert und der vorher reflektierte Strahl wird transmittiert, sodass beide Strahlen auf dem Weg zum Detektor D sind. Damit die einzelnen Strahlen beim Wiederaufeinandertreffen am semipermeablen Spiegel P interferenzfähig sind, darf der Weglängenunterschied $\Delta = 2\overline{PS_2} - 2\overline{PS_1}$ nicht länger als die Kohärenzlänge sein. Die Kompensationsplatte in der Strecke $\overline{PS_2}$ hat den gleichen Brechungsindex wie der semipermeable Spiegel; somit wird ausgeglichen, dass der reflektierte Strahl dreimal, während der transmittierte Strahl nur einmal durch P geht.

Sind die Strecken $\overline{PS_1}$ und $\overline{PS_2}$ gleich lang, haben die Lichtstrahlen am Detektor D einen Gangunterschied von $\frac{\lambda}{2}$, sodass destruktive Interferenz auftritt und sich die Strahlen auslöschen, es wird keine Intensität gemessen. Wird nun einer der Spiegel um die Strecke Δd bewegt, ändert sich das Interferenzbild. Es gilt die Formel

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

wobei z die Anzahl der beobachteten Interferenzmaxima beschreibt.

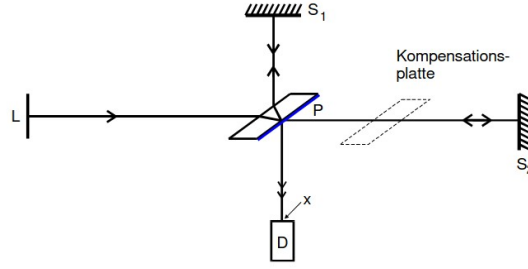


Abbildung 2: Der schematische Aufbau des Michelson-Interferometers [2].

Außerdem kann in dem Michelson-Interferometer ein optischer Weglängenunterschied aufgebaut werden, in dem, wie in Abbildung 3 zu sehen ist, in eine der Strecken ein Medium mit einem anderen Brechungsindex eingebaut ist. Der Weglängenunterschied

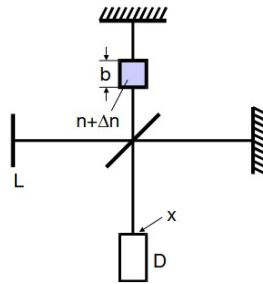


Abbildung 3: Der prinzipielle Versuchsaufbau zur Messung von Brechungsindices mit Hilfe des Michelson-Interferometers [2].

der beiden Strahlen beträgt hier $\Delta = \Delta n \cdot b$. Bei der Änderung von dem Druck in der Kammer, lassen sich z Maxima beobachten. Es gilt

$$\Delta n \cdot b = z \cdot \frac{\lambda}{2}$$

Beschreibt N die Anzahl der Dipole pro Volumeneinheit, die von der Lichtwelle zu Schwingungen erzwungen wurden, so kann aus der klassischen Dispersionstheorie

$$n = \sqrt{1 + f(\lambda)N}$$

gefolgert werden. Da die hier zu untersuchende Gase im Bereich von 0 bis 1 bar sich wie ideale Gase verhalten, kann die Ideale Gasgleichung benutzt werden, sodass gilt:

$$N(r, T) = \frac{p}{T} \frac{T_0}{p_0} N_L$$

Der Unterschied des Brechungsindex des Gases zu dem der Umgebung lässt sich angeben durch $\Delta n(p, p') = \frac{f}{2}(N(p, T) - N(p', T))$. Soll der Brechungsindex unter Normalbedingungen angegeben werden, so ergibt sich die Formel zu:

$$n(p_0, T_0) = 1 + \Delta n(p, p') \frac{T}{T_0} \frac{p_0}{p - p'}$$

Somit kann der Brechungsindex des Gases schließlich über

$$n = 1 + z \cdot \frac{\lambda}{2b} \cdot \frac{T}{T_0} \frac{p_0}{p - p'} \quad (3)$$

errechnet werden.

3 Durchführung

Die Messapparatur vor Ort ist nach dem Schema in Abbildung 4 aufgebaut.

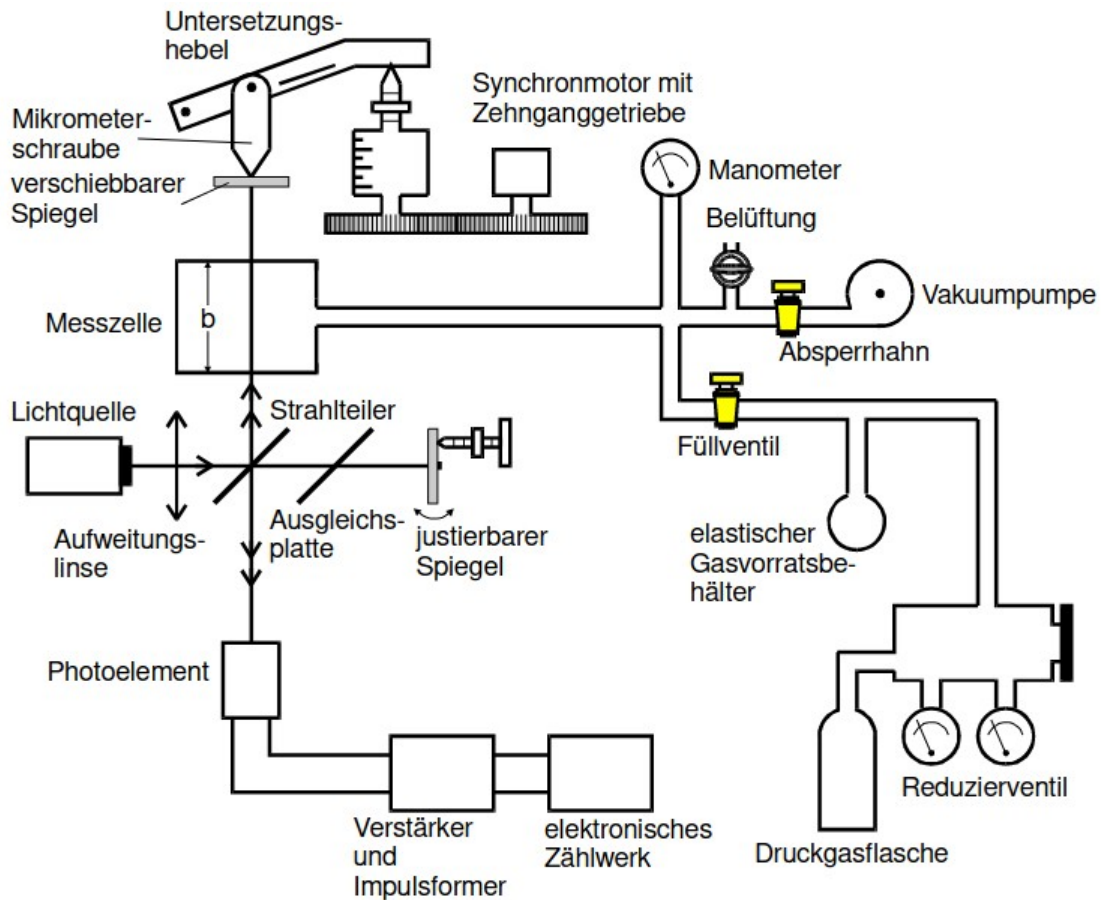


Abbildung 4: Der schematische Aufbau der Messapparatur vor Ort [2].

Nachdem der Raum vollständig abgedunkelt wird, damit keine Änderung der Lichtverhältnisse das Messergebnis verfälschen kann, wird das Interferometer einjustiert. Dafür wird vor den Detektor eine Mattscheibe gehalten und die am hellsten zu sehenden Punkte werden zur Deckung gebracht. Außerdem wird die als Detektor verwendete Photozelle so ausgerichtet, dass das Interferenzbild genau auf den Eintrittsspalt fällt.

3.1 Bestimmung der Wellenlänge des Lasers

Nun kann die Messung zur Bestimmung der Wellenlänge des Lasers begonnen werden. Dafür wird mit Hilfe eines Motors und einer Mikrometerschraube der verschiebbare Spiegel jeweils um 5 mm bewegt und die in diesem Vorgang durchlaufenden Maxima gezählt. Das Zählen der durchlaufenden Maxima wird von der Photozelle übernommen. Es ist wichtig, darauf zu achten, dass der Spiegel nicht zu schnell verschoben wird, da sonst nicht alle Maxima detektiert werden können. Es wird darauf geachtet, dass die Mikrometerschraube auf 0 steht und dann vom Motor auf 5 mm gedreht wird. Die bei dieser Bewegung durchlaufende Maximaanzahl wird notiert. Die Schraube wird etwas weiter aufgedreht, um anschließend den Spiegel um 5 mm zurück zu bewegen. Auch hier werden die Maximaanzahl notiert. Dieser Messvorgang wird fünf mal wiederholt, sodass 10 Wertepaare aufgenommen werden.

3.2 Bestimmung des Brechungsindex von Luft

Zur Bestimmung des Brechungsindex wird der Aufbau des Experimentes nicht verändert. In einer der beiden Strecken befindet sich eine Messzelle, welche mit Luft gefüllt ist. Nun wird die Anzahl der durchlaufenden Maxima gezählt, während mit einer Vakuumpumpe bis zu einer gewissen Druckanzahl die Luft aus der Messzelle gepumpt wird. Dann wird langsam die Luft wieder in die Messzelle gelassen; hierbei wird auch nochmal die Maximaanzahl notiert. Es ist hier sehr wichtig, schnell den Wert zu notieren und die Luft einströmen zu lassen, da der erreichte Druck von der Messapparatur nicht lange gehalten wird. Der Messvorgang wird einige Male wiederholt.

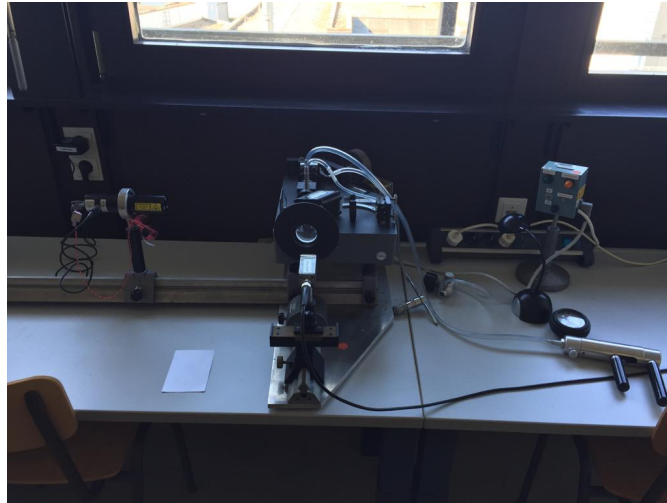


Abbildung 5: Der Versuchsaufbau vor Ort. Links ist der Laser zu sehen, welcher auf den semipermeablen Spiegel gerichtet ist. Hinter den Schläuchen ist der verstellbare Spiegel und der Motor zu erkennen. Der Spiegel rechts auf der Apparatur hat die Schrauben zum Justieren. Vor der Apparatur ist die Zerstreuungslinse und der Detektor. Der bläuliche Kasten beinhaltet die Schalter für den Motor und die Schläuche verbinden die Messzelle auf der Apparatur mit der Vakuumpumpe auf dem Tisch.

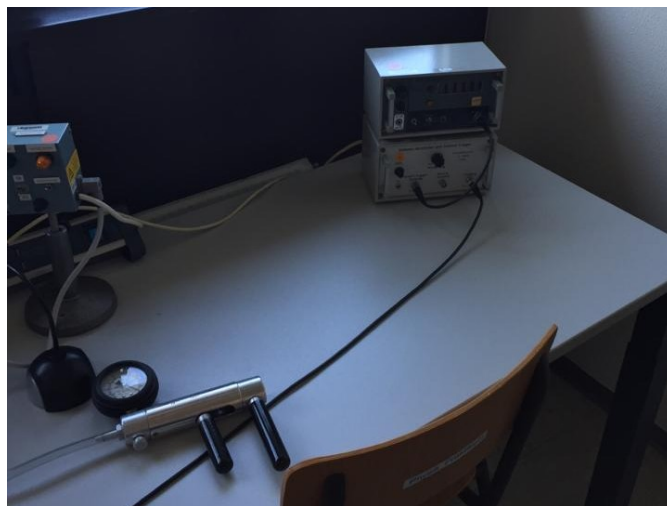


Abbildung 6: Hier ist der Impulszähler auf dem Selektivverstärker zu sehen.

4 Auswertung

4.1 Bestimmung der Wellenlänge des Lasers

Mithilfe der Gleichung (2) wird die Wellenlänge des Lasers bestimmt. Da die Verschiebung des Spiegels Δd nicht genau der Mikrometerschraube entspricht, wird die Formel (2) um $1/\ddot{U}$ erweitert. Hierbei ist \ddot{U} die Hebelübersetzung und beträgt 5.046. Die aufgenommenen und verwendeten Messwerte sowie die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zu finden.

Tabelle 1: Die aufgenommenen Messwerte und die daraus bestimmte Wellenlänge.

Δd [mm]	z	λ [nm]
5.0	3016 ± 4	657.0848 ± 0.8715
5.0	2972 ± 4	666.8128 ± 0.8975
5.0	2976 ± 4	665.9166 ± 0.8950
5.0	2963 ± 4	668.8383 ± 0.9029
5.1	2988 ± 4	676.5071 ± 0.9056
4.9	2964 ± 4	655.2403 ± 0.8843
5.1	2987 ± 4	676.7335 ± 0.9062
5.1	2974 ± 4	679.6917 ± 0.9142
5.1	2967 ± 4	681.2953 ± 0.9185
4.9	2967 ± 4	654.5778 ± 0.8825

Durch eine Mittlung ergibt sich für die Wellenlänge

$$\lambda = (668,27 \pm 0,28) \text{ nm.}$$

4.2 Bestimmung des Brechungsindex von Luft

Nach der Formel (3) kann der Brechungsindex von Luft bestimmt werden. Hierzu werden folgende Werte benötigt:

Größe der Messzelle :	$b = 50 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
Umgebungstemperatur :	$T = 293,15 \text{ K}$
Normalbedingungen	
Normaldruck :	$p_0 = 1,0132 \text{ bar}$
Normaltemperatur :	$T_0 = 273,15 \text{ K}$

Die Messwerte sowie den dazu berechneten Brechungsindex sind in Tabelle 2 zu finden. Durch eine Mittlung ergibt sich für den Brechungsindex von Luft:

$$n = 1.395 \pm 0.012.$$

Tabelle 2: Messwerte und die daraus bestimmten Brechungsindex.

Δp [bar]	z	n
600	22	1.1999 ± 0.03634
600	33	1.2998 ± 0.03634
600	52	1.4724 ± 0.03634
600	45	1.4088 ± 0.03634
520	54	1.5660 ± 0.04193
600	43	1.3906 ± 0.03634
600	56	1.5087 ± 0.03634
600	34	1.3089 ± 0.03634
600	44	1.3997 ± 0.03634

5 Diskussion

Die Versuchsdurchführung verlief ohne Probleme. Die aufgenommenen Messwerte zeigen keine größeren Unregelmäßigkeiten. Der verwendete Laser hat eine Wellenlänge von 635 nm. Aus den Messwerten heraus wurde eine Wellenlänge von $(668,27 \pm 0,28)$ nm bestimmt. Somit ergibt sich eine Abweichung von $(5.24 \pm 0.04)\%$.

Bei der Bestimmung des Brechungsindex für Luft wurde $n = 1.395 \pm 0.012$ ermittelt. Im Vergleich zum Theoriewert von 1.00028 [1] ergibt sich daraus eine Abweichung von $(28.3 \pm 0.6)\%$. Diese Abweichung ist erheblich größer als die der Wellenlänge, aber kann durch einen Vorfall während der Versuchsdurchführung erklärt werden. Durch das Evakuieren der Messzelle mithilfe der Vakuumpumpe gerieten die Schläuche, die die Pumpe und Messzelle verbinden, an die Schraube des justierbaren Spiegels. Dadurch wurden kleine, aber merkliche Änderungen vorgenommen, sodass einige Versuchsgänge wiederholt wurden.

6 Anhang

Laser 635nm

$$50 \cdot 10^{-3} \text{ m} = b$$

Breite der Vakuum-
kammer

V401 - Michelson - Interferometer

Messung der Wellenlänge:

1) ~~Impulszahl~~:

1. Impulsaufnahme von 0mm - 5mm „vorwärts“: 3016 Impulse

→ Weiterlaufen des Motors

2. Impulsaufnahme von 5~~mm~~ - 0,5mm „rückwärts“: 2972

2. Startwert 2

3. Impulsaufnahme von 0,0mm - 5,0mm „vorwärts“: 2982 - 6 = 2976

4. Impulsaufnahme von 5,5mm - 0,5mm „rückwärts“: 2970 - 7 = 2963

5. Impulsaufnahme 0,0mm - 5,1¹mm „vor“: 2989 - 1 = 2988

6. 5,5mm - 0,6mm „rück“: 2972 - 6 = 2966

7. 0mm - 5,1mm „vor“: 2987 - 0 = 2987

8. 5,6mm - 0,5mm „rück“: 2985 - 11 = 2974

9. 0mm - 5,1mm „vor“: 2967 - 0 = 2967

10. 5,5mm - 0,6mm „rück“: 2967 - 0 = 2967

Torr

Impuls

1. 0 - 600 25 - 3 = 22

2. 600 - ~~600~~ 0 33 - 0 = 33

3. 0 - 600 62 - ~~10~~ = 52

4. 600 - 0 45 - 0 = 45

5. 0 - 600 10 - 0 = 10

6. 600 - 0 2 - 0 = 2

7. 0 - 600 9 - 1 = 8

8. 600 - 0 4 - 0 = 4

9. 0 - ~~600~~ 520 5 - 1 = 4

10. 520 - 0 54 - 0 = 54

11. 0 - 600 52 - 9 = 43

12. 600 - 0 56 - 0 = 56

13. 0 - 600 54 - ~~20~~ = 34

14. 600 - 0 44 - 0 = 44

Abbildung 7: Die notierten Werte von der Versuchsdurchführung.

Literatur

- [1] *Brechzahl*. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/brechzahl/1958> (besucht am 03.05.2021).
- [2] TU Dortmund. *Das Michelson-Interferometer*. 2021.