

V401

Das Michelson-Interferometer

Theodor Zies

theodor.zies@tu-dortmund.de

Tom Troska

tom.troska@tu-dortmund.de

Durchführung: 24.05.2022

Abgabe: 31.05.2022

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1. Zielsetzung	3
2. Theorie	3
2.1. Interferenz und Kohärenz	3
2.2. Michelson Interferometer	3
2.3. Druckabhängigkeit des Brechungsindex	5
3. Durchführung	5
3.1. Messung der Wellenlänge des Lasers	6
3.2. Messung des Brechungsindex von Luft	6
4. Auswertung	7
4.1. Messung der Wellenlänge des Lasers	7
4.2. Messung des Brechungsindex von Luft	7
5. Diskussion	8
Literatur	8
A. Anhang	9
A.1. Originaldaten	9

1. Zielsetzung

Ziel dieses Versuches ist es, mithilfe eines Michelson-Interferometer die Wellenlänge eines Lasers zu bestimmen sowie über Druckvariation den Brechungsindex von Luft zu bestimmen.

2. Theorie

2.1. Interferenz und Kohärenz

Licht ist eine elektromagnetische Welle und wird mathematisch somit durch die Lösung einer Wellengleichung beschrieben:

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

Wie allgemein von allen Wellenphänomenen bekannt, können aufeinandertreffende Wellen superponiert werden, dabei entsteht sogenannte Interferenz. Bei identischer Phase addieren sich die Amplituden und es liegt konstruktive Interferenz vor, während ein Phasenversatz von $\frac{\lambda}{2}$ zu einer Auslöschung, auch destruktive Interferenz genannt, führt. Aufgrund der sehr großen Frequenz von Licht ist eine Messung der Feldstärke \vec{E} ausgeschlossen, stattdessen wird die Intensität betrachtet, für die gilt:

$$I = \text{const} |\vec{E}|^2$$

Die Intensität von zwei überlagerten Lichtwellen mit Phasen δ_1 und δ_2 ergibt sich dann zu

$$I_{\text{Ges}} = 2\text{const} \vec{E}_0^2 (1 + \cos(\delta_2 - \delta_1))$$

Wichtig ist hierbei, dass die Phasenversätze δ_i konstant bleiben, also zeitunabhängig sind. Nur dann kann über messbare Zeiträume eine Intensität bestimmt werden, die auf konstruktive oder destruktive Interferenz schließen lässt. Solches Licht nennt man kohärent, und diese Eigenschaft ist zwingend nötig um Untersuchungen mit optischen Aufbauten durchzuführen. Am einfachsten lässt sich kohärentes Licht mithilfe von Lasern erzeugen, da diese monochromatische Lichtbündel mit konstanter Phase emittieren. In sogenannten Interferometern werden Lichtbündel dann gespalten und auf unterschiedliche Wege wieder zusammengeführt, um Interferenzphänomene beobachten zu können.

2.2. Michelson Interferometer

Der schematische Aufbau des 1882 von A. Michelson erfundenen Michelson-Interferometer ist in Abbildung 1 dargestellt.

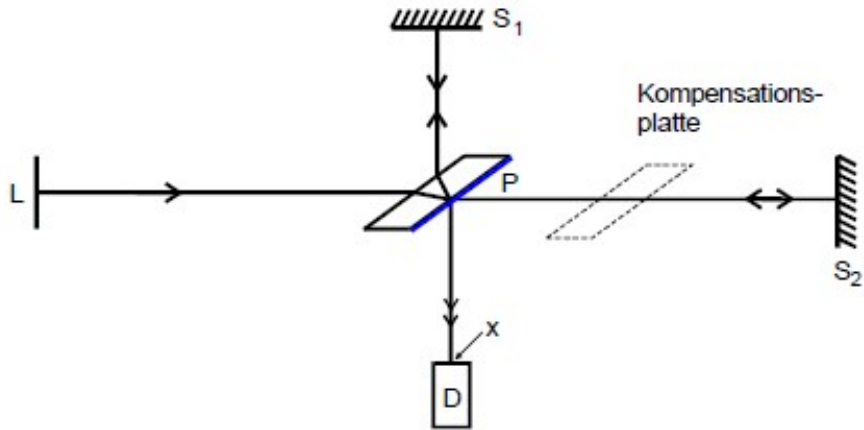


Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines Michelson Interferometers [3].

Der Lichtstrahl aus einer Quelle L wird zuerst durch eine semipermeable Platte P geteilt und somit in zwei Bündel gespalten, welche sich senkrecht zueinander weiterbewegen. Die beiden Teilbündel fallen auf zwei Spiegel S_1 und S_2 und werden zurückgeworfen. Somit treffen die Strahlen wieder in P aufeinander. Von jedem Strahl wird jeweils ein Teil transmittiert, diese Teilbündel laufen abschließend parallel zueinander zum Detektor D . Damit die erwähnten Teilbündel kohärent sind, werden die Längen der beiden Arme möglichst gleich gewählt. Im Strahlenweg zum Spiegel S_2 muss eine Kompensationsplatte platziert werden, da der Strahl durch S_1 zwei mal mehr durch die semipermeable Platte P hindurch läuft. Dementsprechend hat die Kompensationsplatte die selbe Dicke und den selben Brechungsindex wie P .

Wählt man identische Armlängen, so löschen sich die Lichtstrahlen am Detektor aus, da bei der Reflexion des von S_2 kommenden Lichtstrahls an P ein Phasensprung von $\frac{\lambda}{2}$ auftritt. Durch kontinuierliches Verschieben von einem der Spiegel um ein Stück d kann ein Wegunterschied $w = 2d$ erzeugt werden, die Intensität am Detektor wechselt dann fortlaufend aufgrund von konstruktiver und destruktiver Interferenz zwischen Null und einem Maximum. Deren räumlicher Abstand beträgt $\frac{\lambda}{2}$, bei z auftretenden Maxima während einer Verschiebung um Δd gilt somit der Zusammenhang

$$\Delta d = z \cdot \frac{\lambda}{2}. \quad (1)$$

Ausgenommen der Variation einer der Armlänge besteht eine andere Möglichkeit einen optischen Wegunterschied zu erreichen darin, den Brechungsindex n in einem der Arme zu variieren. Es wird also in einem Arm ein Medium der Länge b mit Brechungsindex $n + \Delta n$ hinzugefügt, die neue Anordnung ist in Abbildung 2 dargestellt.

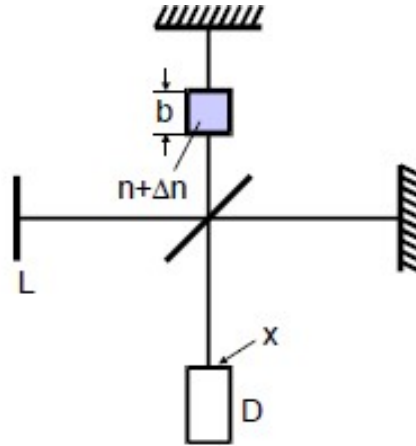


Abbildung 2: Intefferenz am Michelson-Interferometer über Brechungsindexunterschiede [3].

Für den optischen Wegunterschied gilt nun der Zusammenhang

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

2.3. Druckabhängigkeit des Brechungsindex

Die Lichtwellen im Inteferometer werden auch durch die Luft, die sich überall im Interferometer befindet, gebrochen. Bei den vorherigen Betrachtungen ist der Luftdruck konstant, daher hat diese Tatsache keinen Einfluss auf die Intefferenz im Inteferometer. Wird jedoch der Druck variiert, so ändert sich der Brechungsindex n in Luft und damit auch die Interferenz. Der neue Brechungsindex lässt sich unter Normalbedingungen ($p_0 = 1013,2 \text{ mbar}$ und $T_0 = 273,15 \text{ K}$) über die folgende Beziehung berechnen

$$n(p_0, T_0) = 1 + \Delta n(p, p') \frac{T}{T_0} \frac{p_0}{p - p'}. \quad (3)$$

Dabei ist die Änderung des Brechungsindex $\Delta n(p, p')$ bereits in Abschnitt 2.2 mit (2) beschrieben, sie hängt von der Länge b der Region mit verändertem Druck und der Wellenlänge λ ab.

3. Durchführung

Für diesen Versuch wird ein Aufbau verwendet, der in Abbildung 3 zu sehen ist.

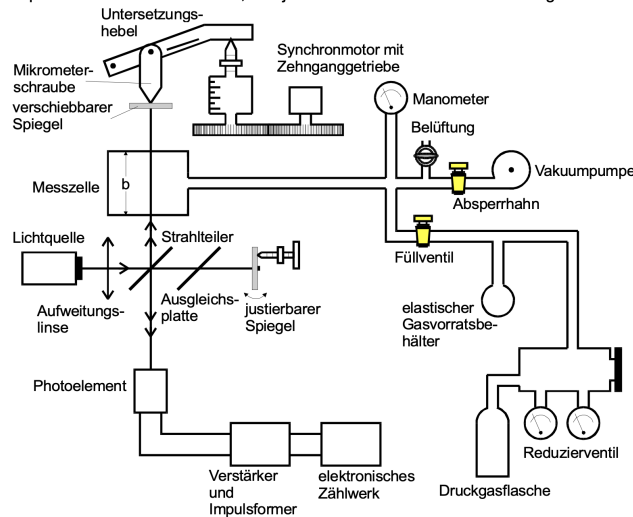


Abbildung 3: Skizze des Versuchaufbaus [3].

Bevor die eigentlichen Messungen starten, wird mithilfe der Stellschrauben am justierbaren Spiegel die Überlagerung der Strahlen so eingestellt, dass diese möglichst exakt übereinander liegen und die Intensitätsextrema breit sind.

Die Photodiode registriert die Maxima und Minima des Interferenzbildes und ein elektronisches Zählwerk zählt diese.

3.1. Messung der Wellenlänge des Lasers

Damit die Wellenlänge des Lasers bestimmt werden kann, wird die Mikrometerstellschraube über einen den Synchronmotor in einem Bereich von 5 mm bis 10 mm in angemessener Geschwindigkeit gedreht. Die tatsächliche Änderung der Armlänge ist jedoch um das Übersetzungsverhältnis $u = 1 : 5,017$ verschieden.

Insgesamt wird dies zehnmal wiederholt, wobei auch das Zurückdrehen der Schraube als Messvorgang verwendet wird.

3.2. Messung des Brechungsindex von Luft

Der Brechungsindex von Luft lässt sich bestimmen, indem eine Kammer in dem Strahlengang evakuiert wird. Während der Evakuierung registriert die Photodiode erneut die Maxima und Minima. Nachdem ein Druck p' erreicht ist, wird ein Belüftungsventil geöffnet und der Druck steigt wieder auf den ursprünglichen Druck p an, während abermals die Maxima und Minima gezählt werden.

Dies wird dreimal durchgeführt, sodass sich hier 6 Messdaten ergeben.

4. Auswertung

In der Auswertung werden alle Mittelwerte und deren Unsicherheiten mithilfe der *python*-Erweiterung *uncertainties* [2] berechnet.

4.1. Messung der Wellenlänge des Lasers

Die Messwerte zur Bestimmung der Wellenlänge des Lasers sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Messwerte zur Bestimmung der Wellenlänge des Lasers.

Messung	Zählrate
1	3111
2	3138
3	3117
4	3096
5	3047
6	3117
7	3040
8	3119
9	3033
10	3118
Mittelwert	3090 ± 40

Aufgrund des Übersetzungsverhältnisses von $u = 1 : 5,017$ ergibt die Verstellung der Stellschraube um 5 mm eine Veränderung der Armlänge von $\Delta s = 0,997$ mm. Mit Formel (1) folgt für die Wellenlänge des Laserlichts

$$\lambda_{\text{exp}} = (644 \pm 7) \text{ nm.}$$

4.2. Messung des Brechungsindex von Luft

Die Zählraten der Photodiode für diesen Teil des Versuches sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Messwerte zur Bestimmung des Brechungsindex von Luft.

Messung	Zählrate
1	36
2	33
3	34
4	33
5	30
6	32
Mittelwert	$33,0 \pm 1,8$

Die Länge der Kammer, die evakuiert werden kann, beträgt $b = 5$ cm. Mit der Wellenlänge des Lasers von $\lambda_{\text{lit}} = 635$ nm und dem Zusammenhang (2) ergibt sich eine Veränderung des Brechungsindex von

$$\Delta n = 0,000\,210 \pm 0,000\,012.$$

Der Druck in der Kammer wird auf $p' = 20$ kPa abgesenkt und die Temperatur wird zu $T = 23^\circ\text{C} = 296$ K bestimmt. Mithilfe von Formel (3) ergibt sich der Brechungsindex von Luft unter Normalbedingungen zu

$$n_{\text{Luft}} = 1,000\,28 \pm 0,000\,02.$$

5. Diskussion

Die experimentell ermittelte Wellenlänge des Lasers, sowie der Brechungsindex von Luft unter Normalbedingungen werden in Tabelle 3 mit Literaturwerten verglichen.

Tabelle 3: Experimentell ermittelte Größen im Vergleich zu Literaturwerten ([3], [1]).

Größe	Exp.	Lit.	relative Abweichung
λ	(644 ± 7) nm	635 nm	1,465 %
n	$1,000\,28 \pm 0,000\,02$	1,0003	0,002 %

Es fällt auf, dass sich die experimentell bestimmte Wellenlänge λ des Lasers auch mit den Messunsicherheiten nicht mit der theoretischen Wellenlänge vereinen lässt. Dennoch ist die relative Abweichung mit $\Delta\lambda = 1,465$ % sehr gering. Mögliche Fehlerquellen hierbei sind eventuelle andere Lichtquellen, die Messsignale an der Photodiode auslösen könnten. Außerdem denkbar ist, dass die Kalibrierung der Spiegel nicht perfekt ist, was zur Folge hat, dass nicht alle Maxima und Minima detektiert werden können. Ebenfalls denkbar ist es, dass der Synchronmotor nicht absolut gleichmäßig läuft, sodass auch hier Maxima und Minima übersprungen werden.

Der experimentelle Brechungsindex von Luft unter Normalbedingungen stimmt mit der geringen Messunsicherheit mit dem Theoriewert überein. Dennoch sind Ungenauigkeiten, aus denselben Gründen wie bereits beschreiben, nicht auszuschließen.

Literatur

- [1] Universität Wien. URL: https://www.univie.ac.at/mikroskopie/1_grundlagen/optik/strahlenoptik/2_lichtbrechung.htm (besucht am 24.05.2022).
- [2] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [3] *Versuch V401: Das Michelson-Interferometer*. TU Dortmund, Fakultät Physik.

A. Anhang

A.1. Originaldaten

V401 - Des. Middelst-herkometer

N

2991
2443
2486
2515
3111
3138
3117
3056
3047
3117
3040
3119
3033
3118

Übersetzung: 1:5,017 λ

$\lambda = 635 \text{ nm}$ $\Delta s = 5 \text{ mm}$

P variabel

N:	0	-0,85	-0,85	0
	<u>P → P</u>		<u>P → P</u>	
	36		33	
	34		33	
	30		32	

K. Peppo
24.05.2022