

O-04 – Das Michelson-Interferometer

(Version 5 – 6. Februar 2020)

Albert A. Michelson erhielt 1907 den Nobelpreis in Physik für die Entwicklung dieses hochpräzisen Messgerätes (Abbildung 1), mit dem er die Relativgeschwindigkeit der Erde zu einem ruhenden kosmischen Äther messen wollte. Gemeinsam mit Edward Morley konnte er experimentell die damals gängige Ätherhypothese widerlegen, was später zur Entwicklung der Relativitätstheorie führte. Dieses historische Experiment stellt damit einen Meilenstein der modernen Physik dar.



Abbildung 1: Originalgetreuer Nachbau des 1881 in Potsdam von Michelson durchgeföhrten Experiments. Foto: D. E. Liebscher, © Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam, www.aip.de.

In der aktuellen Wissenschaft und Forschung finden Michelson-Interferometer vielfältige Anwendung, z.B. in der optischen Spektroskopie, etwa zur Bestimmung von Mikroorganismen, und in der chemischen Analytik. In der Gravitationsforschung wurde mit einem Michelson-Interferometer mit einer Armlänge von 4 km der Nachweis für Gravitationswellen entdeckt, welcher 2017 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet worden ist (LIGO Hanford Observatory, USA).

Aufbau

Wie bei den meisten Beugungsexperimenten (z.B. Doppelspalt, Fresnelspiegel) wird auch beim Michelson-Interferometer ein Lichtstrahl in zwei Teilstrahlen aufgespalten, die nach Durchgang unterschiedlicher Wege wieder überlagert werden. Der Gangunterschied der beiden Teilstrahlen resultiert in einer Phasendifferenz bei der Überlagerung, die zu Interferenzerscheinungen führt.

Vorbereitung: Was versteht man unter *Interferenz* zweier Lichtstrahlen?

Welche Bedeutung hat dabei die *Kohärenzlänge*?

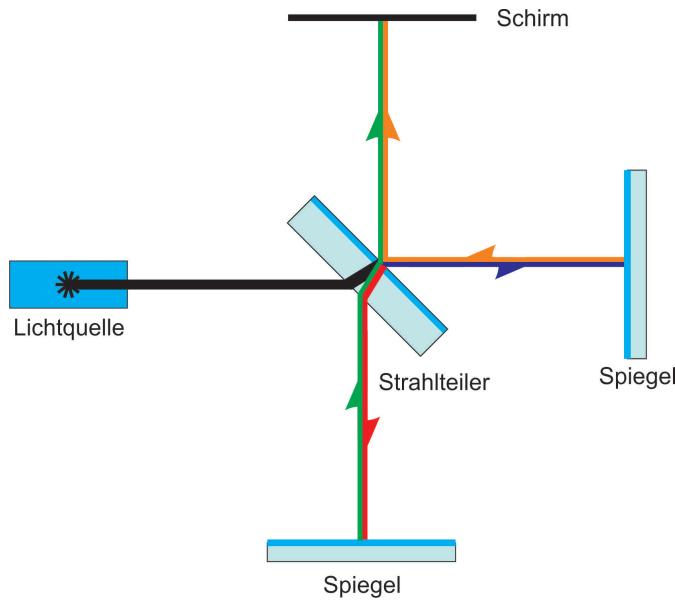


Abbildung 2: Strahlengang im Michelson-Interferometer. Der einfallende Strahl (schwarz) wird am Strahlteiler in zwei Teilstrahlen aufgespalten (rot und blau), und nach Rückreflexion an Spiegeln (orange bzw. grün) wieder am Strahlteiler überlagert.

Der Strahlengang im Michelson-Interferometer ist in Abb. 2 dargestellt. Der einfallende Lichtstrahl trifft auf einen halbdurchlässigen Spiegel, den *Strahlteiler*, der im Winkel von 45° zur Strahlachse steht. Dabei wird das Licht zum Teil transmittiert (in Abb. 2 blau dargestellt) und zum Teil im rechten Winkel dazu reflektiert (rot in Abb. 2). Jeder der beiden Strahlen trifft in ungefähr demselben Abstand vom Strahlteiler wiederum senkrecht auf einen Spiegel, und wird zum Strahlteiler zurück reflektiert. Nach erneuter Transmission bzw. Reflexion am Strahlteiler werden die beiden Teilstrahlen wieder überlagert, so dass auf einem Schirm das Interferenzbild beobachtet werden kann, das aus dem Gangunterschied der beiden Teilstrahlen resultiert.

Vorbereitung: Wie sieht das Interferenzbild eines idealen punktförmigen Lichtstrahles aus, wie es beim Laser nahezu realisiert ist?

Wie verändert sich der Strahlengang und damit das Interferenzmuster durch den Einbau einer Linse in den Strahlengang?

Da bereits geringste Änderungen im Strahlengang zu deutlich erkennbaren Änderungen im Interferenzbild führen, kann das Michelson-Interferometer zur hochpräzisen Bestimmung physikalischer Messgrößen benutzt werden. Dies geschieht über eine Änderung der optischen Weglänge eines der beiden Strahlen, die eine Änderung im Gangunterschied und somit in der Phasendifferenz der beiden Teilstrahlen bewirkt.

Vorbereitung: Welche Möglichkeiten gibt es, die *optische* Weglänge zu verändern?

Justage

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 3 gezeigt. Als Lichtquelle dient ein Laser (1). Das Michelson-Interferometer wird auf einem optischen Tisch (2) mit vordefinierten Positionen für die optischen Komponenten und einer Mikrometerschraube (3) zum Antrieb des verschiebbaren Spiegels (4) aufgebaut.

ACHTUNG: LASERSTRÄHLUNG! NICHT DIREKT IN DEN STRAHL SCHAUEN! WÄHREND DES AUFBAUS KÖNNEN UNKONTROLIERTE REFLEXIONEN DES LASERSTRÄHLES AUFTRÉTEN.

DIE OBERFLÄCHEN DER SPIEGEL UND STRAHLTEILER DÜRFEN NICHT BERÜHRT WERDEN, DAMIT SIE SAUBER BLEIBEN UND NICHT VERKRATZEN. ALLE KOMPONENTEN AUSSCHLIESSLICH AN DER FASSUNG UND MIT LABORHANDSCHUHEN ANFASSEN!

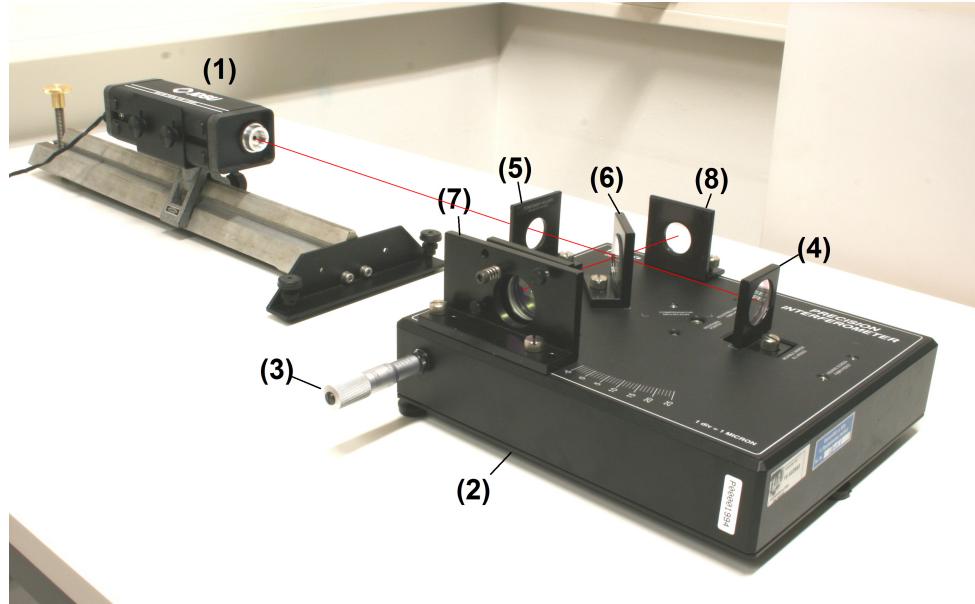


Abbildung 3: Experimentelle Anordnung. (1) Laser, (2) optischer Tisch, (3) Mikrometerschraube, (4) verschiebbbarer Spiegel, (5) Komponentenhalter für Linse, (6) Strahlteiler, (7) fester Spiegel (einstellbare Neigung), (8) Komponentenhalter Schirm

Um ein gutes Interferenzmuster zu erhalten, muss der Strahlengang sehr sorgfältig justiert werden. Für Aufbau und Justage des Interferometers sollte man sich daher ausreichend Zeit nehmen. Die Mühe lohnt sich aber und zahlt sich aus, da eine Messung am schlecht justierten Interferometer viel schwieriger ist und länger dauert.

Zur Justage wird auf dem optischen Tisch zunächst nur der verschiebbare Spiegel (4) und der Komponentenhalter (5) für die Linse (ohne Linse!) montiert. Durch Verstellen der Höhe und Neigung des Lasers oder des optischen Tisches wird der Strahlengang so eingestellt, dass der Strahl den Spiegel und den Komponentenhalter ungefähr in der Mitte trifft und parallel zur Oberfläche des optischen Tisches verläuft. Um den Strahl sichtbar zu machen kann eine Mattscheibe mit mm-Teilung verwendet werden, die sich an dem Komponentenhalter befestigen lässt.

Vorbereitung: Woran erkennt man, dass der Strahl parallel zum optischen Tisch verläuft?

Als nächstes können der Strahlteiler (6) und der feste Spiegel (7) eingesetzt werden, die wieder so justiert werden, dass der Strahl sie ungefähr in der Mitte trifft. Auf dem Schirm, für den sich z. B. die gegenüber liegende Wand eignet, erscheinen nun mehrere Punkte unterschiedlicher Intensität. Neben den beiden Hauptstrahlen, die besonders hell erscheinen, sind meistens auf beiden Seiten noch jeweils ein oder zwei schwächere Punkte zu sehen, die von Mehrfachreflexionen

am Strahlteiler entstehen. Die beiden hellen Punkte werden zur Deckung gebracht, indem man die Neigung des festen Spiegels mittels der Stellschrauben auf der Rückseite exakt einstellt. Um ein gut erkennbares Interferenzbild zu erzeugen, wird eine Linse zwischen dem Laser und dem Strahlteiler in den Strahlengang gebracht. Dazu dient der Komponentenhalter (5). Die Linse muss so ausgerichtet werden, dass konzentrische Interferenzringe auf dem Schirm zu sehen sind wie in Abbildung 4, entsprechend dem Weglängenunterschied der beiden überlagerten Strahlen.

Vorbereitung: Warum kann man die einzelnen Ringe im Interferenzbild in der Regel nicht mit einer bestimmten Beugungsordnung identifizieren, wie z. B. beim Doppelspalt?

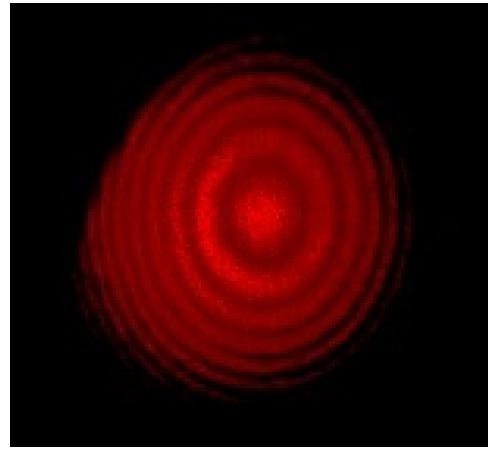


Abbildung 4: Interferenzmuster des Michelson-Interferometers auf dem Beobachtungsschirm

Vorversuch: Messung der Wellenlänge des Lasers

Zu Beginn jeder Messreihe wird die Mikrometerschraube in eine mittlere Position gebracht, da der Antrieb in der Nähe der Endanschläge nicht mehr linear ist. Um einen Leerlauffehler (“Totgang”, *backlash*) zu vermeiden, wird während einer Messreihe immer in die gleiche Richtung gedreht. Eine volle Umdrehung der Schraube entspricht im linearen Bereich einer Verschiebung des Spiegels um $25\ \mu\text{m}$. Bei Verschiebung des Spiegels verändert sich der Weg des auf diesen Spiegel treffenden Strahles. Damit ändert sich die Phasenbeziehung der interferierenden Strahlen in einem festen Punkt auf der Wand. Da dies für jeden Punkt des Musters gilt, verändert sich das gesamte Interferenzmuster, so dass je nach Drehrichtung die Ringe von Innen nach Außen “wandern”, bzw. umgekehrt. Das Zentrum wird dabei dunkel und wieder hell.

Vorbereitung: In welche Richtung wandern die Ringe, wenn der Spiegel vom Strahlteiler weg bewegt wird?

Messung: Man betrachtet die Veränderung des Interferenzbildes an einem festen Punkt auf dem Schirm, und misst die Verschiebung d_N des beweglichen Spiegels für mindestens $N = 20$ “durchgelaufene” Ringe in diesem Punkt. Die Messung wird mindestens fünfmal wiederholt.

Vorbereitung: Wie kann man eine *optische* Markierung auf dem Schirm erzeugen, an der man die hindurchlaufenden Ringe zählen kann?

$N=20$

$25\mu m - 18,3\mu m$

$25\mu m - 18,1\mu m$

$18,1\mu m - 11,5\mu m$

$11,5\mu m - 5,9\mu m$

$25\mu m - 18,8\mu m$

$$\lambda_{\text{Laser}} = 633\text{nm}$$

Auswertung: Aus den Messdaten wird die Wellenlänge λ_0 des Laser nach folgender Gleichung bestimmt:

$$\lambda_0 = \frac{2d_N}{N} \quad (1)$$

Vorbereitung: Wie kommt man auf den Ausdruck (1) für die Wellenlänge?

Unmittelbar nach der Messung ist eine Überschlagsrechnung durchzuführen, um die Messwerte auf ihre Plausibilität zu überprüfen. In der Auswertung werden die Ergebnisse der Einzelmessungen *sinnvoll* gemittelt, und die Messgenauigkeit mit Hilfe einer ausführlichen Fehlerrechnung bestimmt.

Bestimmung des Brechungsindex einer Glasplatte

Der Brechungsindex n_G einer Glasplatte lässt sich mit Hilfe des Michelson-Interferometers bestimmen, indem man einen der beiden Teilstrahlen durch die Glasplatte schickt, und dann die Weglänge des Lichtes durch das Glas kontrolliert verändert.

Vorbereitung: Wie sieht der Strahlengang des Teilstrahles aus, der durch die Glasplatte geht, wenn dieser die Platte unter einem Winkel ϑ zur Normalen trifft (Skizze!)? Wie ändert sich die optische Weglänge dieses Teilstrahles bei Variation des Winkels?



Abbildung 5: Aufbau zur Messung des Brechungsindex von Glas

Abbildung 5 zeigt die experimentelle Anordnung. Die Glasplatte wird an dem drehbaren Zeiger befestigt, und zwischen dem Strahlteiler und dem beweglichen Spiegel in den Strahlengang gebracht. Zunächst ist die *Nullposition* ϑ_0 des Zeigers zu bestimmen, für die der Laserstrahl senkrecht auf die Glasplatte trifft.

Vorbereitung: Wie kann man die Nullposition finden? Tipp: Wie ändert sich das Interferenzmuster, wenn der Zeiger über die Nullposition hinweg gedreht wird?

Messung: Man beobachtet wieder einen festen Punkt auf dem Schirm, und bestimmt die Anzahl $N(\vartheta)$ der Ringe, die unter einer Drehung des Zeigers um den Winkel ϑ durch diesen Punkt laufen. Die Messung wird für mindestens fünf verschiedene Winkel bzw. Werte von N wiederholt. Dabei ist das numerische Ergebnis umso genauer, je größer N ist.

Auswertung: Der Brechungsindex n_G der Glasplatte lässt sich aus den Messwerten mit folgender Näherungsformel berechnen:

$$n_G = \frac{2t(1 - \cos \vartheta)}{2t(1 - \cos \vartheta) - N(\vartheta)\lambda_0} \quad (2)$$

Die Dicke der Glasplatte beträgt $t = 5,7 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, so dass die oben gemachte Näherung $N(\vartheta)\lambda_0 \ll 2t$ gerechtfertigt ist. Eine Überschlagsrechnung der Ergebnisse sollte einen Brechungsindex im Bereich typischer Werte für Glas von 1,5 liegen.

Vorbereitung: Physikstudenten leiten anhand ihrer Skizze des Strahlengangs den Ausdruck (2) für den Brechungsindex her.

Aus den Einzelmessungen wird der mittlere Brechungsindex \bar{n}_G bestimmt. Das Ergebnis soll mit plausiblen Werten verglichen und anhand einer Fehlerrechnung diskutiert werden.

Messung des Brechungsindex von Luft

Der Brechungsindex des Vakuums hat per Definition den Wert $n_0 = 1$. Bei endlichem Druck p weicht der Wert des Brechungsindex von Luft $n_L(p)$ von diesem Idealwert ab. Dieser Unterschied ist jedoch sehr gering, und beträgt bei Atmosphärendruck weniger als 0,5 %. Mit Hilfe des Michelson-Interferometers kann diese winzige Änderung präzise gemessen, und damit der Brechungsindex von Luft bei $p_0 = 101.3 \text{ kPa}$ bestimmt werden.

Vorbereitung: Wie hängt der Brechungsindex eines Gases vom Druck ab?

Wie kann man dies leicht in der Vorstellung eines Kontinuumsmodells erklären?



Abbildung 6: Aufbau zur Bestimmung des Brechungsindex von Luft

Zur Messung der Änderung des Brechungsindex wird anstelle der Glasplatte aus dem vorigen Versuchsteil nun eine evakuierbare Luftzelle an dem drehbaren Zeiger in den Strahlengang gebracht, und mit der Handpumpe verbunden. Der Aufbau ist in Abbildung 6 zu sehen.

$N \approx 2$	ΔP	$\mathcal{V}_0 = 0,3 \pm 0,5$
20	5	
40	7	
60	85	
80	10	
100	11	

N	$\Delta P \pm 0,1$
10	0,46
19	0,84
16	0,7
13	0,6
8	0,38
6	0,31

6.6.2012
47

Vor Beginn der Messung muss erneut die Nullposition ermittelt werden, für die der Laserstrahl senkrecht auf die Zelle trifft. Die Position des drehbaren Zeigers darf jetzt nicht mehr verändert werden. Tipp: der Schlauch sollte möglichst keine Kräfte auf den drehbaren Zeiger ausüben, damit sich die Lage der Luftzelle im Strahlengang während der Messung nicht verändert. Die Änderung der optischen Weglänge geschieht ausschließlich über die Variation des Luftdrucks in der Vakuumzelle. Dazu ist es sehr nützlich, die Handhabung der Pumpe vorher auszuprobieren und ein bisschen zu üben.

Messung: Während der Luftdruck in der Zelle kontrolliert verändert wird, wird die Anzahl der Ringe gezählt, die einen festen Punkt auf dem Schirm durchlaufen. Dabei werden der Anfangsdruck p_1 und der Enddruck p_2 mit dem Manometer an der Pumpe gemessen, und die Änderung des Druckes $\Delta p = p_2 - p_1$ bestimmt. Es sollten mindestens zehn Ringe abgezählt werden, und die Messung mindestens fünfmal für verschiedene Druckdifferenzen bzw. Werte von $N(\Delta p)$ wiederholt werden.

Auswertung: Aus den Messdaten wird die Änderung des Brechungsindex $\Delta n(\Delta p)$ mit folgender Gleichung berechnet:

$$\Delta n(\Delta p) = n_L(p_2) - n_L(p_1) = \frac{N(\Delta p)\lambda_0}{2d} \quad (3)$$

Die Dicke der Vakuumzelle beträgt $d = 3\text{ cm}$. Während der Messung wird eine Überschlagsrechnung durchgeführt, um die Messwerte auf ihre Plausibilität zu überprüfen.

Vorbereitung: Herleitung des Ausdrückes (3) für die Änderung des Brechungsindex

Man trägt die Änderung des Brechungsindex als Funktion der Änderung des Druckes auf, und bestimmt grafisch die Geradensteigung. Daraus wird der Brechungsindex von Luft bei Atmosphärendruck berechnet, und mit dem Literaturwert $n_{\text{atm}} = 1,00028$ verglichen.

Zusammenfassung

Das Versuchsprotokoll soll mit einer Zusammenfassung der Aufgabenstellung, des Experiments, sowie der Messergebnisse abgeschlossen werden. Welche Erkenntnisse hat dieses Experiment geliefert? Nebenfachstudenten sollen einen Bezug herstellen zu ihrem Hauptfach, Lehramtskandidaten zur Erfahrungswelt eines Schülers.

Vertiefende Quellen

- Prof. Dr. D. E. Liebscher, Leibnitz-Institut für Astrophysik Potsdam:
dierck-e-liebscher.de/lectures/michelsonAll.html