Vorbereitung

Lichtgeschwindigkeit
Versuch P1-42, 44

Iris Conradi
Gruppe Mo-02

7. Dezember 2010

Inhaltsverzeichnis

1 Foucault-Michelsonsche Drehspiegelmethode

1.1 Vorbereitung auf den Versuch

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 1 dargestellt.
Das Licht tritt aus dem Laser aus und wird an einem Drehspiegel reflektiert, passiert eine Sammellinse, dann wird an einem Umlenkspiegel und schließlich an dem Endspiegel reflektiert, sodass es den Weg wieder umgekehrt duchläuft. Dabei tifft es nach dem Drehspiegel auf einen Strahlteiler und dann auf einen Schirm. Dort kann der Auftreffende Strahl mit einer Lupe beobachtet werden. Diese Lupe hat eine Brennweite von 10cm und muss somit in 10cm Abstand vom zu betrachteten Punkt gehalten werden.

Die Lichtgeschwindigkeit soll bei rotierendem Drehspiegel aus der Differenz der Auftreffpunkte auf dem Schirm bei ruhendem und rotierendem Drehspiegel bestimmt werden. Dazu müssen der Auftreffpunkt auf dem Schirm nur von der Winkeländerung des Drehspiegels zwischen dem Hinlaufenden und Rücklaufenden Strahl abhängen, also nur von seiner Winkelgeschwindigkeit. Es darf nicht abhängig von dem speziellen Winkel sein.

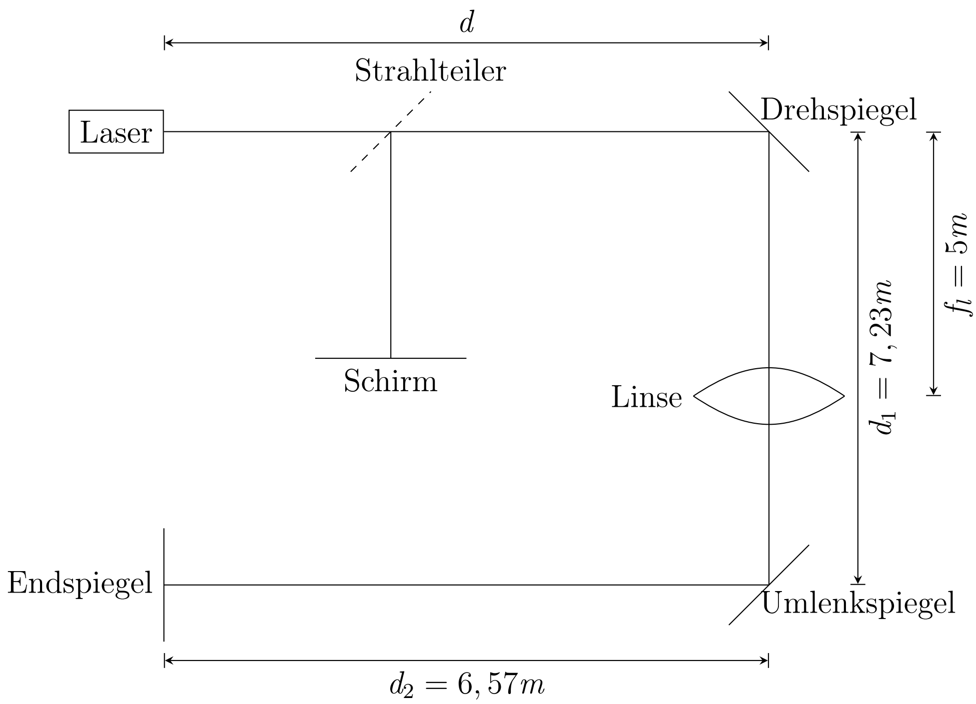

Abbildung 1: Versuchsaufbau

Sonst kann nichts gemessen werden, da die einzelnen „Lichtstrahlen“ nicht getrennt betrachtet werden können.
Dazu wird eine Sammellinse im Strahlengang zwischen Drehspiegel und Umlenkspiegel platziert. Ihr Brennpunkt muss im Drehspiegel liegen. So tritt das Licht hinter der Linse in parallelen Strahlen aus. Wenn es wieder zurückläuft wird es so gebrochen, dass es beim Drehspiegel wieder auf dem Brennpunkt auftrifft (Prinzip der Umkehrbarkeit der Lichtwege). Wenn sich der Spiegel also in der Zeit t zwischen Auftreffen des Hinlaufenden und Auftreffen des Rücklaufenden Strahls noch nicht weiter gedreht hat (sich der Spiegel also langsam oder garnicht dreht), so treffen alle Strahlen auf dem Schirm im gleichen Punkt D_1 auf.
Damit auf dem Schirm ein scharfes Bild zu sehen ist, muss die Apparatur so aufgebaut, dass das Bild, welches die Linse erzeugt, im Endspiegel entsteht. Die Strecke zwischen Laser und Drehspiegel und Laser muss also dementsprechend eingestellt werden. Zur Berechnung dieser Position verwendet man die Linsenformel:

$$\frac{1}{f_l} = \frac{1}{a} + \frac{1}{a^*} \tag{1}$$

wobei $a^* = d_1 - f_l + d_2$ die Entfernung von der Hauptebene der Linse zum Bild darstellt und $a = f_l + d$ die Entfernung zwischen Gegenstand und Hauptebene ist. Damit ergibt sich:

$$d = \frac{f_l^2}{d_1 + d_2 - 2f_l} \approx 6,58m \tag{2}$$

Diese Länge lässt sich auch mit der vorhandenen Apparatur realisieren. Die maximal einstellbare Entfernung zwischen Laser und Drehspiegel beträgt 6,8m.

Wenn man den Strahlteiler nicht verwenden würde, so würde der Strahl bei langsam oder garnicht rotierendem Spiegel wieder im Laser selbst auftreffen. Bei rotierendem Spiegel würde er leicht versetzt zu sehen sein. Um die Messung besser durchführen zu können, wird der Strahlteiler verwendet, um den Punkt auf einem Schirm mit Maßstab sichtbar zu machen. Daher sollte die Gesamtlänge von Drehspiegel zu Strahlteiler und dann zum Schirm genauso lang sein wie von Laser zu Drehspiegel. Somit ist die Linsenformel wieder erfüllt und das Bild ist scharf (der Gegenstand ist hierbei das Bild auf dem Endspiegel).

In einer Zeit $t = {}^{2(d_1+d_2)}/_{c}$ die der Strahl für den Weg von Drehspiegel über Endspeigel und wieder zurück zum Drehspiegel benötigt, hat sich der Spiegel um einen Winkel α gedreht, sodass sich ein Winkel 2α zwischen einfallendem und ausfallendem Strahl bildet. Die Verschiebung des Leuchtpunktes auf dem Schirm zwischen Auftreffpunkt bei langsam drehendem Spiegel und Auftreffpunkt bei schnell drehendem Spiegel ΔD ist also gegeben durch:

$$\Delta D = 8\pi \frac{d(d_1 + d_2)}{c} \nu \tag{3}$$

wenn man verwendet, dass die Winkel α klein sind und somit $\Delta D \approx d \cdot 2\alpha$ ist. ν ist die Frequenz mit der der Spiegel rotiert.

Mit dem Literaturwert für die Lichtgeschwindigkeit $2,9910^8 \frac{m}{s}$ und den angegebenen und berechneten Werten ergibt sich eine zu erwartende Größe bei maximaler Frequenz von $\Delta D \approx 3,8mm$.

Durch Auflösen ergibt sich eine Formel zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit:

$$c = 8\pi \frac{d(d_1 + d_2)}{\Delta D} \nu \tag{4}$$

1.2 Justierung der Apparatur und Messung

Nun müssen die oben errechneten Orte von Lupe, Schirm, Linse und Strahlteiler entsprechend eingestellt werden und Justierungen vorgenommen werden (wie auf dem Aufgabenblatt beschrieben). Beispielsweise wird so justiert, dass der Drehspiegel wirklich senkrecht zum einfallenden Strahl steht und dass der zurückkommende Strahl wieder genau in den Laser trifft.
Nun können die Orte der Lichtpunkte bei verschiedenen Frequenzen gemessen werden.

Außerdem wird die Frequenz des Motors mit Hilfe einer Stimmgabel (440Hz) eingestellt. Wenn Motorengeräusch und Stimmgabel nahezu die gleiche Frequenz haben, ist eine Schwebung zu hören (vgl. Versuch zum Oszilloskop). So kann über das Gehör eine eine Frequenz von 440Hz eingestellt werden. Die angezeigte Frequenz wird damit verglichen.

2 Phasenvergleichsmethode

2.1 Vorbereitung auf den Versuch

In diesem Versuch messen wir im Gegensatz zum vorhergehenden die Phasengeschwindigkeit des Lichtes. Da Luft kaum dispersiv ist, werden sich für die Messung in Luft ähnliche Ergebnisse ergeben wir oben.

An eine Leuchtdiode wird eine Spannung angelegt, die auch mit einem Oszilloskop aufgenommen wird. Im Abstand d zur LED befindet sich eine Photodiode. Die an der Photodiode anliegende Spannung wird auch mit einem Oszilloskop aufgenommen. Beide Schwigungen haben die gleiche Frequenz. Die Spannung an der Photodiode hat jedoch eine Phasenverschiebung, die aus der zurückgelegten Strecke entsteht, $\varphi = \omega \cdot \frac{d}{c}$. Im Zweikanalbetrieb des Oszilloskops können beide Spannungen über die Zeit betrachtet werden. Man kann die Änderung der Phasenverschiebung unter Änderung von d dann einfach ablesen.

Wie im Folgenden gezeigt, lässt sich dies jedoch nicht so leicht durchführen, da das Oszilloskop nur beschränkte Geschwindigkeiten für die Zeitablenkung zur Verfügung stellt.
Wenn eine Strecke von $d = 1m$ zwischen LED und Photodiode liegt und die Zeitdifferenz der beiden Schwingungen $\Delta t = {}^1\!/_{10}T$ betragen soll ergibt sich:

$$\Delta t = \frac{d}{c} \rightarrow \nu \approx 29,94MHz \rightarrow \Delta t = \frac{1}{10}\frac{1}{\nu} \approx 3,34 \cdot 10^{-9}s \tag{5}$$

Um auf dem Schirm des Oszilloskops diese Zeitdifferenz in einer Größe von 5mm sehen zu können wäre ein Zeitablenkung von

$$\frac{0,5cm}{3,34 \cdot 10^{-9}s} \approx 150\frac{cm}{\mu s} \tag{6}$$

nötig. Konventionelle Oszilloskope haben jedoch meist nur Zeitablenkungen von maximal $10\frac{cm}{\mu s}$.

Man umgeht dieses Problem, indem man ein Hilfssignal $Acos(\Omega t)$ verwendet und dieses mit dem eigentlichen Signal $acos(\omega t + \varphi)$ multipliziert (hier für das Signal an der Photodiode berechnet):

$$acos(\omega t + \varphi) \cdot Acos\Omega t \tag{7}$$
$$=\frac{1}{2}aA[cos(\omega t + \varphi - \Omega t) + cos(\omega t + \varphi + \Omega t)] \tag{8}$$
$$=\frac{1}{2}aA[cos((\omega - \Omega)t + \varphi) + cos((\omega + \Omega)t + \varphi)] \tag{9}$$

Sowohl das Signal an der LED als auch das Signal an der Photodiode werden vor dem Eintritt in das Oszilloskop so verändert. Mittels eines Tiefpassfilters wird bei beiden

Signalen der hochfrequente Teil eliminiert. Zurück bleibt jeweils die Schwingung mit $\omega - \Omega$. Sie an der Photodiode trägt sie die gleiche Phasenverschiebung wie die ursprüngliche Schwingung. Somit gilt:

$$\varphi = \omega \cdot \Delta t = (\omega - \Omega)\Delta t' \tag{10}$$

Mit den auf dem Aufgabenblatt angegebenen Werten ergibt sich der Zeitdehnungsfaktor $\frac{\omega}{\omega - \Omega} = 600$. Aus der nun am Oszilloskop abzulesenden Phasenverschiebung $\Delta t'$ lässt sich also die ursprüngliche Zeitdifferenz berechnen:

$$\Delta t = \Delta t' \frac{1}{600} \tag{11}$$

2.2 Justierung der Apparatur und Eichmessungen

In diesem Aufbau soll man zuerst die Schaltung betrachten und mit Hilfe des Blockschaltbildes verstehen. Ich vermute, dass die Spannung über die Photodiode invertiert wird. Denn wenn Licht auf die Photodiode fällt, so sinkt ihr Widerstand. Bei konstantem Strom liegt dann also eine kleinere Spannung an.

Nun soll die Apparatur Justiert wie auf dem Aufgabenblatt beschrieben genau justiert werden.

Mit Hilfe eines Frequenzmessers sollen ω und $\omega - \Omega$ überprüft werden.

In zwei TIME/DIV-Einstellungen soll nun die Zeitbasis des Oszilloskops über das $\omega/10$-Signal geeicht werden, da dieses eine höhere Genauigkeit aufweist als die interne Zeitbasis.

2.3 Lichtgeschwindigkeits- und Brechzahlmessungen

2.3.1 Lichtgeschwindigkeit in Luft

Wie oben beschrieben ergibt sich die Lichtgeschwindigkeit nun aus:

$$c = \frac{d}{\Delta t} = \frac{d}{\Delta t'} \cdot 600 \tag{12}$$

2.3.2 Brechzahl von Wasser

Nun befindet sich in der Strecke d $x = 1m$ Wasser. Durch messen von $\Delta t'$ lässt sich damit die Lichtgeschwindigkeit in Wasser berechnen und daraus dann die Brechzahl von Wasser.

$$n_{Waser} = \frac{c_0}{c_{Wasser}} \approx \frac{c_{Luft}}{c_{Wasser}} \tag{13}$$

Nun zur Berechnung der Lichtgeschwindigkeit in Wasser:

$$\Delta t = \frac{d-x}{c_{Luft}} + \frac{x}{c_{Wasser}} = \Delta t' \frac{1}{600} \tag{14}$$

$$\rightarrow n = 1 + \frac{c_{Luft} \Delta t' - 600d}{600x} \tag{15}$$

2.3.3 Brechzahl von Plexiglas

Das Vorgehen ist analog zur vorherigen Aufgabe.

2.3.4 Lichtgeschwindigkeit in Luft mit Lissajous-Figuren

Wenn man die Signale von Photodiode und LED im XY-Betrieb betrachtet, so ergeben sich wieder die schon aus dem Versuch zum Oszilloskop bekannten Lissajous-Figuren. Für ganzzahlige Vielfache von π als Phasenverschiebung zwischen diesen Signalen gleicher Frequenz, ergeben sich Geraden.
Wenn man einen Abstand d eingestellt hat, bei dem man eine Gerade sieht, kann man den Abstand soweit verringern, bis wieder eine Gerade zu sehen ist. Mit der Differenz der beiden eingestellten Abstände Δd kann man nun die Lichtgeschwindigkeit berechnen.

$$\varphi_1 = \omega \frac{d_1}{c} = m\pi \qquad \text{und} \qquad \varphi_2 = \omega \frac{d_2}{c} = \frac{\omega}{c}(d_1 + \Delta d) = (m+1)\pi \tag{16}$$

$$\rightarrow \Delta d = (m+1)\pi \frac{c}{\omega} - d_1 = \frac{c}{2\pi\nu}\pi = \frac{\lambda}{2} \tag{17}$$

Es ergibt sich für die Lichtgeschwindigkeit:

$$c = \lambda \cdot \nu = 2\Delta d \cdot \nu \tag{18}$$

Es entsteht dann eine Gerade, wenn die Phasenverschiebung entsprechend ist. Die Phasenverschiebung ist, wie oben erklärt für das aufbereitete Signal am Oszilloskop und das original Signal an der LED gleich. So kann man hier mit der Strecke zwischen LED und Photodiode und der Frequenz an der LED rechnen. Man muss keine Korrektur durchführen.

2.3.5 Brechzahlen mit Lissajous-Figuren

Wenn man den Abstand d_{Luft} so einstellt, dass eine Gerade zu sehen ist, dann ein anderes Medium (Länge x) einbringt und danach den Abstand d einstellt bei dem wieder die Figur zu sehen ist, so kann man aus der Strecke Δl um die man korrigieren musst die Brechzahl bestimmen. Es gilt:

$$\Delta l = d_{Luft} - d = \Delta t \cdot c_{Luft} - d \tag{19}$$

Durch vergleichen mit Gleichung(15) ergibt sich dann:

$$n = 1 + \frac{\Delta l}{x} \tag{20}$$

3 Literatur

- Pohl: Opitk und Atomphysik; 12. Auflage
- Bergmann, Schäfer: Experimentalphysik; 6. Auflage