

Die Lichtgeschwindigkeitsmessung wird nach zwei verschiedenen Verfahren ausgeführt, der Foucault-Michelsonschen Drehspiegelmethode und der Phasenvergleichsmethode. Die erstere mißt die Gruppengeschwindigkeit, die letztere die Phasengeschwindigkeit des Lichts. Im Vakuum (bzw. in Luft) sind keine Unterschiede zu erwarten, da das Medium „Vakuum“ dispersionsfrei ist, d.h. die Phasengeschwindigkeit nicht wellenlängenabhängig ist. Das Ziel der Versuche ist nicht nur das Kennenlernen von Methoden sondern die gründliche gedankliche und experimentelle Beschäftigung mit den Details, die Diskussion optimaler Auslegungen, das Erkennen technischer Grenzen für die erreichbaren Genauigkeiten und der kritische Vergleich der beiden Verfahren.

Achtung! (zu Aufg.1): Die Strahlung des verwendeten Justierlasers (Laserklasse 2) ist beim direkten Hineinblicken in den Strahl gefährlich für die Augen! Ganz besonders deshalb, weil Sie mit Spiegeln arbeiten. Die Beobachtung der Lichtmarke bei der Drehspiegelmethode darf nur hinter der Mattglasscheibe erfolgen; bei ruhendem (oder sehr langsam rotierendem) Spiegel muss zusätzlich noch das Filterglas in den Strahlengang gestellt werden.

Aufgaben:

1) Drehspiegelmethode (diese Apparatur ist nur einfach vorhanden, und muss deshalb nacheinander von den drei Gruppen verwendet werden)

1.1 Vorbereitung auf den Versuch

Diskutieren Sie das Meßverfahren sowie Aufbau und Eigenschaften des Strahlenganges gründlich. Fest vorgegeben sind: d (Endspiegel - Umlenkspiegel) = 6,57m und d (Umlenkspiegel – Drehspiegel) = 7,23 m. Der Maximalabstand d_{\max} (Laseraustrittsöffnung - Drehspiegel) beträgt 6,80 m. Berechnen Sie die Positionen von Linse ($f = 5\text{m}$), Laseraustrittsöffnung, Beobachtungsschirm mit Skala und Beobachtungslupe ($f = 10\text{cm}$). Überlegen Sie sich die Auswerteformel und berechnen Sie die Größe des erwarteten Effektes im voraus. Die maximale Rotationsfrequenz des Drehspiegels beträgt 500Hz. Diskutieren Sie bei der Vorbereitung eingehend, welche Aufgaben die Linse erfüllt. Wieso ruht der beobachtete Leuchtfleck auf der Skala, obwohl der Spiegel rotiert?

1.2 Justierung der Apparatur und Messung.

Justieren Sie die Apparatur: Laserort / Horizontaler Strahl, der die Mitte des ruhenden Drehspiegels trifft und den Drehspiegel horizontal wieder verläßt / Drehspiegelwinkel so, daß der reflektierte Strahl (noch ohne Linse) auf die Mitte des Umlenkspiegels fällt (Endspiegel abdecken) / Linsenort und Linsenausrichtung / Umlenkspiegel so, daß der Strahl auf die Mitte des Endspiegels fällt / Endspiegel so, daß der Strahl in sich reflektiert wird (Lichtfleck auf dem Umlenkspiegel beobachten) / Kontrolle und evtl. Feinjustierung so, daß der rückkehrende Strahl den Drehspiegel und die Laseraustrittsöffnung trifft / Ort des Schirms mit Skala / Ort der Lupe / Ort des Phototransistors in Drehspiegelnähe für die Frequenzmessung.

Registrieren Sie den Lichtmarkenort in Abhängigkeit von der Rotationsfrequenz des Drehspiegels und entnehmen Sie der Auftragung den Wert der Lichtgeschwindigkeit. Stellen Sie eine vorgegebene Rotationsfrequenz des Drehspiegels (440 Hz) anhand der auftretenden Schwebungen zwischen Motorgeräusch und Stimmgabelton ein und vergleichen Sie mit der elektronischen Frequenzanzeige. Diskutieren Sie systematische und statistische Fehler bei der c -Bestimmung und geben Sie Fehlergrenzen für den gefundenen Wert an.

2) Phasenvergleichsmethode

2.1 Vorbereitung auf den Versuch

Überlegen Sie sich, mit welcher Frequenz Licht moduliert (d.h. mit periodischen Zeitmarken versehen) sein müßte, damit bei einem Laufweg von z.B. 1m eine deutliche Zeitmarkenverschiebung, z.B. ein Zehntel der Periodendauer, auftritt. Überlegen Sie sich, welche Ablenkgeschwindigkeit ein Oszilloskop haben müßte, um diese Zeitmarkenverschiebung auf dem Schirm deutlich, z.B. als 5mm-Verschiebung, darzustellen. Sie finden, daß die Frequenz im 10 bis 100 MHz-Bereich liegen sollte und daß konventionelle Oszilloskope (etwa bis zu 10 cm/µs) zu langsam sind. Überlegen Sie sich, daß bei multiplikativer Mischung des hochfrequenten Signals, $a \cdot \cos(\omega t + \phi)$, mit einem Hilfssignal, $A \cdot \cos \Omega t$, das resultierende Signal:

$\frac{a \cdot A}{2} [\cos((\omega - \Omega)t + \phi) + \cos((\omega + \Omega)t + \phi)]$ die unveränderte Phasenverschiebung ϕ aufweist. Durch Tiefpässe

wird der höherfrequente Anteil $(\omega + \Omega)$ unterdrückt. Sowohl das Signal des Lichtsenders (Leuchtdiode, moduliert mit $\omega \cong 2\pi \cdot 60$ MHz) als auch das des Lichtempfängers (Photodiode) werden im Versuch auf diese Weise mit $\Omega \cong 2\pi \cdot 59,9$ MHz 'aufbereitet' und mit einem Zweistrahloszilloskop über derselben Zeitbasis dargestellt, so daß die ϕ -Änderung bei Änderung des Lichtweges direkt beobachtbar ist. Überlegen Sie sich, daß für das Signal mit der Frequenz $(\omega - \Omega)$ die gleiche Phasenverschiebung ϕ wie beim Signal mit der Frequenz ω eine um den Zeitdehnungsfaktor $\omega/(\omega - \Omega)$ größere Zeitdifferenz bewirkt, die mit einfachen Oszilloskopen gemessen werden kann.

2.2 Justierung der Apparatur. Sorgfältige Justierung auch bei großen Abständen von Sender und Empfänger ist wichtig für das Gelingen des Versuchs! Überprüfen Sie die Verbindungskabel anhand des Anschlußschemas das auf der Gerätefrontplatte aufgedruckt ist. Justieren Sie den Lichtsender: Erzeugen Sie mit Hilfe der Justierschrauben (Zentrierung der Leuchtdiode) und des verschieblichen Kondensators am Lichtsendergehäuse möglichst einen Parallelstrahl in Richtung Empfänger. Stellen Sie die Sammellinse ($f = 20$ cm) so auf, daß die Fotodiode optimal beleuchtet wird (oszilloskopische Beobachtung). Das Empfängersignal muß auch bei maximalem Abstand erkannt werden.

Überprüfen (und notieren) Sie mit dem Picoscope die Differenzfrequenz $(\omega - \Omega)$. Das Picoscope braucht zur Frequenzmessung mehrere vollständige Wellenzüge im Anzeigebereich.

2.3 Lichtgeschwindigkeits- und Brechzahlmessungen

2.3.1 Messen Sie oszilloskopisch die zeitliche Verschiebung zwischen Sender- und Empfänger-Signal in Abhängigkeit vom Sender – Empfänger -- Abstand. Entnehmen Sie der Auftragung unter Berücksichtigung des Zeitdehnungsfaktors die Lichtgeschwindigkeit in Luft. Diskutieren Sie Fehlerquellen und geben Sie Fehlergrenzen für den gefundenen Wert an.

(**Hinweise:** 1) Die Anfangsphasenlage sollte per Stellknopf vernünftig gewählt werden. 2) Die Amplitude am Empfänger sollte $\sim \pm 2V$ bei allen Entfernungen nicht überschreiten, weil die internen Mischerstufen der Elektronik leicht übersteuern und dabei die Phasenlage verfälschen!)

2.3.2 Bestimmen Sie die Brechzahl von Wasser aus der Messung der Laufzeitdifferenz, wenn 1m Lichtweg in Luft durch 1m Lichtweg in Wasser ersetzt wird.

2.3.3 Bestimmen Sie analog die Brechzahl von Plexiglas mit den beiden 8cm und 30cm langen Plexiglaszylindern.

2.3.4 Bestimmen Sie die Lichtgeschwindigkeit in Luft durch Messung von $\lambda/2$ mit Hilfe von Lissajous-Figuren im X/Y-Betrieb des Picoscopes. Da Sie fast die gesamte zur Verfügung stehende Strecke benötigen, müssen Sie bei minimalem Abstand die Phase am Betriebsgerät geeignet einstellen (nämlich wie?).

3) Brechzahlbestimmung mit modernem Laserentfernungsmesser

Die in Aufgaben 1) und 2) durchgeführten Methoden erinnern uns an die Zeit, als die Vorstellung einer endlichen Lichtgeschwindigkeit noch keine Selbstverständlichkeit war, und der Nachweis ein ganzes Weltbild verändert hatte. Heute benutzt fast jeder Handwerker einen handlichen und preiswerten Laserentfernungsmesser um z.B. die verputzten Flächen eines Neubaus zu ermitteln. Welche Voraussetzungen sind wahrscheinlich in solch einem Gerät implementiert?

Wir wollen viel einfacher als in Aufgabe (2) mit einem solchen Gerät die Brechungsindizes verschiedener Medien bestimmen. Stellen Sie dazu die bereitstehenden Küvetten längs und quer in den Strahlengang zwischen Entfernungsmesser und einem beliebigen Reflektor. Berechnen Sie aus den „falsch“ gemessenen Entfernungen den jeweiligen Brechungsindex.

Zubehör:Drehspiegelmethode (insgesamt nur einfach vorhanden):

Drehspiegel (1cm breit, 2cm hoch, zweiseitig, max. ca. 500 U/s) mit Regeltransformator, mit Phototransistor und mit Frequenzzähler;

He-Ne-Laser (Strahlleistung etwa 1mW, Strahldurchmesser etwa 0,8mm, Strahldivergenz etwa 1mrad);

2 Oberflächenplanspiegel (Umlenkspiegel und Endspiegel, $r > 100\text{m}$; $d = 11,5\text{cm}$),

Sammellinse, groß ($f = 5\text{m}$, $d = 11,5\text{cm}$),

halbdurchlässiger Spiegel, Sammellinse als Lupe ($f = 10\text{cm}$, $d = 3,8\text{cm}$),

Glasmaßstab mit mm-Teilung, hinterlegt mit Mattglasscheibe, Filterglas

Stimmgabel 440Hz mit Resonanzkasten und Anschlaghammer

Bodenstativ mit Schirm (Justierhilfe), diverses optisches Aufbaumaterial und Stativmaterial

Taschenlampe, Bandmaß, aufrollbar, 10m;

Phasenvergleichsmethode:

Hauptgerät mit 60MHz-Generator, mit 59,9MHz-Generator, mit Mischstufen für Sender- und Empfänger-signal, mit Lichtempfänger (Photodiode, ca. 13mm hinter der Frontplatte), mit zwei Oszilloskop-Ausgängen und mit einem Ausgang zum Betrieb des Lichtsenders;

Lichtsender (Leuchtdiode, rot) im Gehäuse, justierbar, mit verschiebbarer Kondensorlinse;

Sammellinse ($f = 20\text{cm}$, $d = 3,8\text{cm}$) zum Fokussieren des Lichts auf die Photodiode;

PC-gestütztes Picoscope (Zweikanalbetrieb und X/Y-Betrieb möglich);

Führungsschiene mit Reitern;

Rohr mit Endfenstern, mit Wasser gefüllt (994mm Innenlänge + 2 x 3mm Glasdicke) (einfach vorhanden);

zwei Plexiglaszylinder 8cm und 30cm lang, mit polierten Stirnflächen, mit Ständer (einfach vorhanden);

Laserentfernungsmesser Bosch DLE40, (Genauigkeit $\pm 1,5\text{ mm}$);

verschiedenen Küvetten (100mm x 50mm) für Wasser und Silikonöl;

Hinweis:

Die Auswertemethoden zu diesem Versuch sollen mit dem Betreuer diskutiert werden, insbesondere dann, wenn Sie eine ausführliche Fehlerrechnung beabsichtigen.

Literatur:

Hund: *Messung der Lichtgeschwindigkeit*; Leybold-Heraeus-Hauszeitschrift 'CONTACT', Heft 19 (1978)

Pohl: *Optik und Atomphysik*, z.B. 12. Aufl., Kap. IX

Bergmann, Schaefer: *Experimentalphysik*, Bd. 3, z.B. 8.Aufl., Kap. 2