

Praktikum für Studierende der Umweltwissenschaften Versuch O4 - Messung der Lichtgeschwindigkeit		
Namen:		
Gruppennummer:	lfd. Nummer:	Datum:

1. Aufgabenstellung

1.1. Versuchsziel

Bestimmen Sie die Lichtgeschwindigkeiten und Brechungsindizes für verschiedene Medien.

Verschaffen Sie sich Kenntnisse zu folgenden Schwerpunkten des Versuches:

- Licht als elektromagnetische Welle
- Wellenlänge, Frequenz, Phasenwinkel, Amplitude
- das elektromagnetische Spektrum
- Phasenwinkelmessung mittels Lissajous - Figuren

1.2. Messungen

Justieren Sie die Apparatur entsprechend der Anleitung auf optimale Empfindlichkeit. Bestimmen Sie die Lichtgeschwindigkeit in Luft c_L , indem die Position des Spiegels bzw. seine Verschiebung mehrmals gemessen und gemittelt wird. Messen Sie auf gleiche Weise die Lichtgeschwindigkeiten in Wasser c_W und einem Kunststoffblock c_K .

1.3. Auswertungen

- 1.3.1. Schätzen Sie die einzelnen Messfehler ab und wenden Sie das Fehlerfortpflanzungsgesetz an, um die Messunsicherheiten für die ermittelten Lichtgeschwindigkeiten und Brechungsindizes zu bestimmen.
- 1.3.2. Berechnen Sie aus den gemessenen Lichtgeschwindigkeiten die Brechungsindizes für Wasser und Kunststoff und vergleichen Sie diese mit Werten aus der Literatur (z.B. Internet).

2. Grundlagen

2.1. Lichtgeschwindigkeit

Licht ist eine elektromagnetische Welle, die durch die Ausbreitung, d.h. durch örtliche und zeitliche Schwingungen, der elektrischen Feldstärke E und der magnetischen Flussdichte B beschrieben werden.

Aus der Maxwellschen Theorie der Elektrodynamik folgt für die Ausbreitungsgeschwindigkeit c elektromagnetischer Wellen der Ausdruck:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \varepsilon_0 \mu \mu_0}} \quad . \quad (1)$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit beträgt im Vakuum $c = 2,99792458 \cdot 10^8$ m/s. Es sind ε die Dielektrizitätskonstante, $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ As V⁻¹m⁻¹ die elektrische Feldkonstante, μ die relative Permeabilität und $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$ Vs A⁻¹m⁻¹ die magnetische Feldkonstante. Da der Brechungsindex n eines Stoffes über das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeiten im Vakuum c_0 und im Medium c_M definiert ist, d.h. $n = c_0 / c_M$, ergibt sich aus Gl. (1) die so genannte Maxwellsche Relation Gl. (2), die in der Regel nur für hinreichend großer Wellenlänge $\lambda > 1$ mm erfüllt ist

$$n = \sqrt{\varepsilon \mu} \approx \sqrt{\varepsilon} \quad . \quad (2)$$

Ursache für Abweichungen ist die atomare Struktur der Materie. Die Maxwellsche Theorie ist hingegen eine Kontinuumstheorie.

2.2. Verfahren zur Lichtgeschwindigkeitsmessung

Die Lichtgeschwindigkeiten in Luft und im Vakuum sind einander ziemlich ähnlich. Um diese enorm großen Geschwindigkeit als Verhältnis von zurückgelegtem Weg pro Zeitspanne messtechnisch erfassen zu können, bedurfte es beim früheren Stand der Zeitmesstechnik möglichst großer Lichtwege. O. Römer benutzte um 1700 astronomische Entfernungen, und bei der Zahnradmethode, die H. Fizeau um 1850 benutzte, waren Lichtwege von einigen km erforderlich.

Eine Vereinfachung der Lichtgeschwindigkeitsmessung erreicht man bei Anwendung des Phasenmessverfahrens. Dabei wird ein Lichtstrahl in seiner Intensität periodisch mit der Frequenz f moduliert,

2.3. Lissajous - Figuren

Phasenverschiebungen zwischen 2 periodischen Verläufen $X(t)$ und $Y(t)$ lassen sich bequem mittels Lissajous - Figuren darstellen und ausmessen. Dazu betreibt man ein Zweistrahloszilloskop im X-Y-Modus und legt an die beiden Eingänge die Signale $X(t)$ und $Y(t)$ an. Der Elektronenstrahl des Oszilloskops wird jetzt gleichzeitig in Horizontalrichtung mit $X(t)$ und in Vertikalrichtung mit $Y(t)$ abgelenkt. Setzt man voraus, dass $f_1 = f_2$ ist, so wird die entstehende Lissajous - Figur signifikant durch die Phasenverschiebung φ zwischen $Y(t)$ und $X(t)$ bestimmt (s. Abb.1).

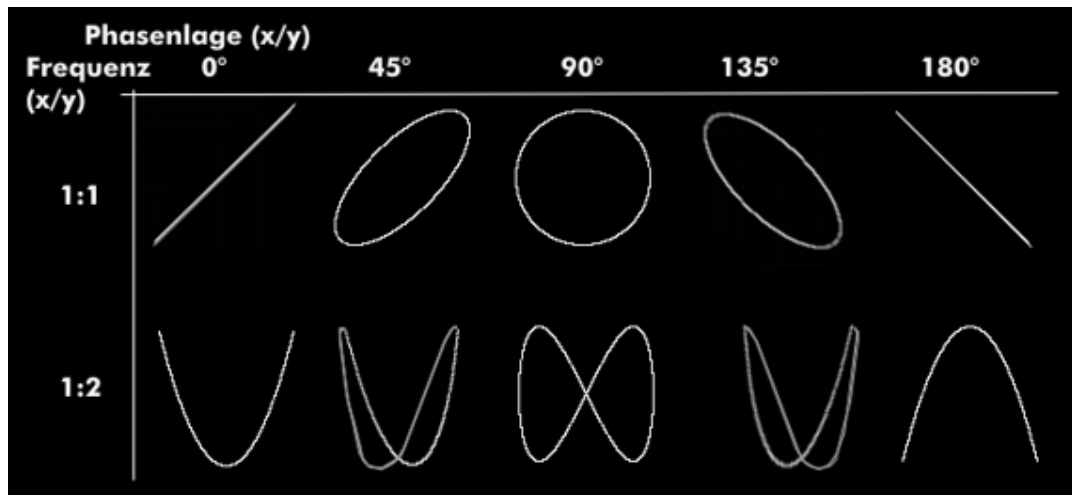


Abb. 1 Beispiele von Lissajous – Figuren.

3. Experiment

3.1. Geräte und Materialien

- 1 - PHYWE - Lichtgeschwindigkeitsmessgerät
- 2 - 2-Kanal-Elektronenstrahl-Oszillograph
- 3 - Kunststoffquader



Abb. 2 Versuchsansicht.

3.2. Versuchsanordnung und Inbetriebnahme

Im Versuch zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit benutzen wir einen Messplatz der Lehrmittelfirma PHYWE (Abb. 3).

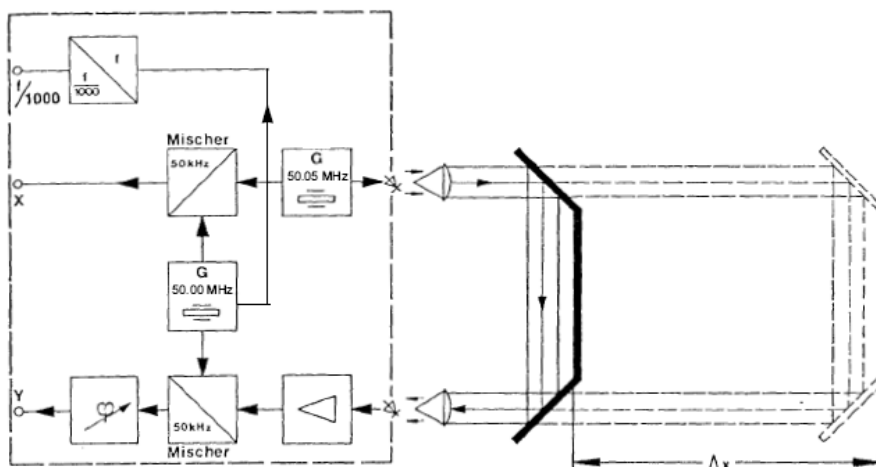


Abb. 3 Schema des Phywe - Lichtgeschwindigkeitsmessgerätes.

Das Messprinzip beruht auf dem Phasenvergleich zweier intensitätsmodulierter Lichtstrahlen, die auf unterschiedlich langen Wegen vom Sender (Leuchtdiode) zum Empfänger (Photodiode) gelangen. Die Phasendifferenzen lassen sich mit der Methode der Lissajous-Figuren oszillographisch bestimmen. Letztlich kommt es auf die Laufzeitmessung des Lichtes auf einer definierten Messstrecke an.

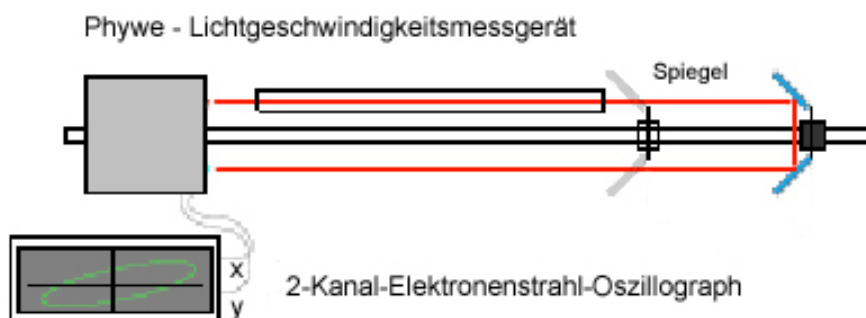


Abb. 4 Schema des Versuchsaufbaus.

Die Lichtintensität der Leuchtdiode wird mit einer Hochfrequenz-Wechselspannung der Frequenz 50 MHz moduliert. Das Licht erzeugt demzufolge nach Durchlaufen einer Messstrecke am Empfänger eine Wechselspannung gleicher Frequenz, die jedoch gegenüber der ursprünglichen HF-Spannung eine vom Lichtweg abhängige Phasenverschiebung aufweist, deren Messung die Berechnung der Laufzeit der Lichtwelle ermöglicht. Bei einer Modulationsfrequenz von $f = 50$ MHz beträgt die Periodendauer $T = 2 \cdot 10^{-8}$ s. Eine Phasenverschiebung von z.B. $\Delta\varphi = 1^\circ$ entspricht in diesem Fall einer Laufzeitdifferenz von

$$\Delta t = T \cdot \frac{\Delta\varphi}{360^\circ} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ s} \cdot \frac{1}{360} = 5,56 \cdot 10^{-11} \text{ s}. \quad (3)$$

Um die Messunsicherheit gering zu halten, empfiehlt es sich, die Lichtgeschwindigkeit in Luft aus der Differenz der Lichtwege bei Phasengleichheit $\Delta\varphi = 0^\circ$ und bei einer Phasendifferenz von $\Delta\varphi = 180^\circ$ zu bestimmen. Diese beiden Phasenlagen lassen sich mit dem Oszillographen am genauesten feststellen, denn in beiden Fällen entartet die Lissajous - Ellipse zu einer Geraden mit positivem bzw. negativem Anstieg. Die Laufzeitdifferenz beträgt dann 10^{-8} s.

Durch den verschiebbaren Winkelspiegel kann die zur Realisierung der notwendigen Messstrecke erforderliche Abmessung der Apparatur nahezu halbiert werden. Mit dem Regler "Phase" im Betriebsgerät lässt sich der Phasenabgleich auf $\Delta\varphi = 0^\circ$ genau bei der Marke "0" des Längsmaßstabes realisieren. Die Spiegelposition für $\Delta\varphi = 180^\circ$ befindet sich dann nahe dem rechten Ende der Messschiene, was eine sehr gute und stabile Justierung der optischen Elemente voraussetzt. Dann gilt unter Berücksichtigung von Gl. (3):

$$c_L = 2 \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} = 2 \cdot \frac{\Delta x}{T} \cdot \frac{360^\circ}{180^\circ} = 4 \cdot f \cdot \Delta x \quad . \quad (4)$$

Die Lichtgeschwindigkeiten in Wasser c_W und im Kunstharzquader c_K werden aufbauend auf dem Wert c_L für Luft nach Abb. 5 bestimmt. Die wassergefüllte Küvette der Länge $l = 1,00$ m bzw. der Kunststoffblock der Länge $l = 0,30$ m werden so in den Strahlengang gebracht, dass die Fenster bzw. die Endflächen senkrecht zum Lichtstrahl stehen. Der Spiegel wird dicht dahinter aufgestellt (Abb. 5 oben). Mit Hilfe des Reglers "Phase" wird auf $\Delta\varphi = 0^\circ$ abgeglichen. Dann wird das Medium aus dem Strahlengang herausgenommen und der Spiegel soweit um Δx nach rechts verschoben (Abb. 5 unten), bis die Lissajous - Ellipse wieder zur Geraden entartet, d.h. wiederum $\Delta\varphi = 0^\circ$ angezeigt wird.

In allen Fällen sind die Verschiebungen Δx mehrfach zu messen und zu mitteln!

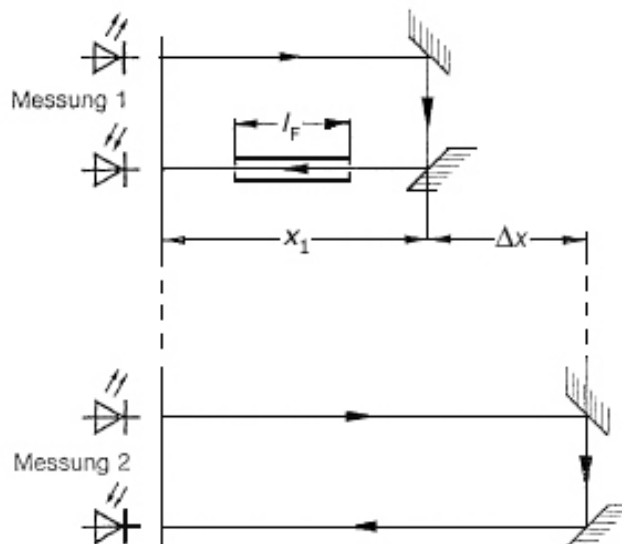


Abb. 5 Zur Erläuterung der Messung der Lichtgeschwindigkeit in Wasser bzw. Kunststoff.

Bei einer Messung mit einem Medium M im Strahlengang (s. Abb. 5) legt das Licht einen geometrischen Weg von $l_1 = 2 \cdot x_1 + x_0$ in der Zeit $t_1 = \frac{l_1 - l_M}{c_L} + \frac{l_M}{c_M}$ zurück. Bei der Messung ohne das Medium M durchläuft das Licht bei erneut realisierter Phasengleichheit den geometrischen Weg $l_2 = l_1 + 2 \cdot \Delta x$ in der Zeit $t_2 = \frac{l_1 + 2 \cdot \Delta x}{c_L}$.

Aus der realisierten Phasengleichheit folgt, dass unter den gegebenen experimentellen Bedingungen $t_1 = t_2$ ist und somit gilt:

$$n = \frac{c_L}{c_M} = 1 + \frac{2 \cdot \Delta x}{l_M} \quad (4)$$

bzw.
$$c_M = \frac{c_L}{n} = \frac{c_L \cdot l_M}{l_M + 2 \cdot \Delta x} \quad (5)$$

Während Gl. (4) den Brechungsindex n liefert, ergibt sich aus Gl. (5) die gesuchte Lichtgeschwindigkeit c_M im Medium M.

3.3. Hinweis

Die gesamte Apparatur erfordert eine präzise Justierung der Grundplatte, der beiden Linsen und insbesondere der Spiegel, um einen optimalen Lichtweg auch bei einer Verschiebung des Winkelspiegels zu garantieren. Die Grobjustierung geschieht am einfachsten, wenn der Spiegel nahe am Betriebsgerät steht.

Die Planflächen der beiden Linsen vor der Sende- und Empfangsdiode müssen den Dioden zugekehrt sein. Ihr Abstand von den Dioden muss ca. 3,7 cm betragen. Im abgedunkelten Raum kann man den Strahlengang (rotes Licht) mit einem Blatt weißen Papiers verfolgen. Den Erfolg von Justiermaßnahmen beobachtet man anhand der Änderung des Y-Signals am Oszillographen. Schon ein Auflehnen auf den Tisch bzw. Berühren des Betriebsgerätes bewirken einen deutlichen Einfluss auf das dem Y-Eingang zuzuführende Empfangssignal.

Die Spiegeloberflächen dürfen nicht mit den Fingern berührt werden. Nach den Messungen ist der Winkelspiegel stets mit einer Staubschutzhülle abzudecken.

Bitte stellen Sie nicht wahllos und unnötig an den Justierschrauben, sondern wenden Sie sich an einen Assistenten.

4. Literatur

Ilberg (Autorenkollektiv): Physikalisches Praktikum. Teubner Verlag, Leipzig/Stuttgart.