

Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald / Institut für Physik
Physikalisches Grundpraktikum

Praktikum für Physiker		
Versuch 04 : Messung der Lichtgeschwindigkeit		
Name:	Versuchsgruppe:	Datum:
Mitarbeiter der Versuchsgruppe:		lfd. Versuchs-Nr:

Aufgabe Bestimmen Sie die Lichtgeschwindigkeiten und Brechungsindizes für verschiedene Medien.

Physikalische Schwerpunkte des Versuches

- Licht als elektromagnetische Welle
- Wellenlänge, Frequenz, Phasenwinkel, Amplitude
- das elektromagnetische Spektrum
- Phasenwinkelmessung mittels Lissajous-Figuren
- Meilensteine bei der Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit

Versuchsablauf

1. 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 .

2. Berechnungen und Auswertungen

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

Lichtgeschwindigkeit

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

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

Darin bedeuten ε die Dielektrizitätskonstante, $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ A s V}^{-1} \text{ m}^{-1}$ die elektrische Feldkonstante, μ die relative Permeabilität und $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ V s A}^{-1} \text{ m}^{-1}$ 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 sogenannte Maxwellsche Relation Gl. (2), die in der Regel nur für elektromagnetische Wellen hinreichend großer Wellenlänge $\lambda > 1 \text{ mm}$ erfüllt ist:

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

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

Versuchsanordnung und Messprinzip

Im Versuch zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit benutzen wir einen Messplatz der Lehrmittelfirma PHYWE (Abb. 1). Das Messprinzip beruht auf dem Phasenvergleich zweier Lichtwellen, die auf unterschiedlich langen Wegen vom Sender (Leuchtdiode) zum Empfänger (Photodiode) gelangen. Die Phasendifferenzen lassen sich mit der **Methode der Lissajousfiguren** oszillographisch bestimmen. Letztlich kommt es auf die Laufzeitmessung des Lichtes auf einer definierten Messstrecke an.

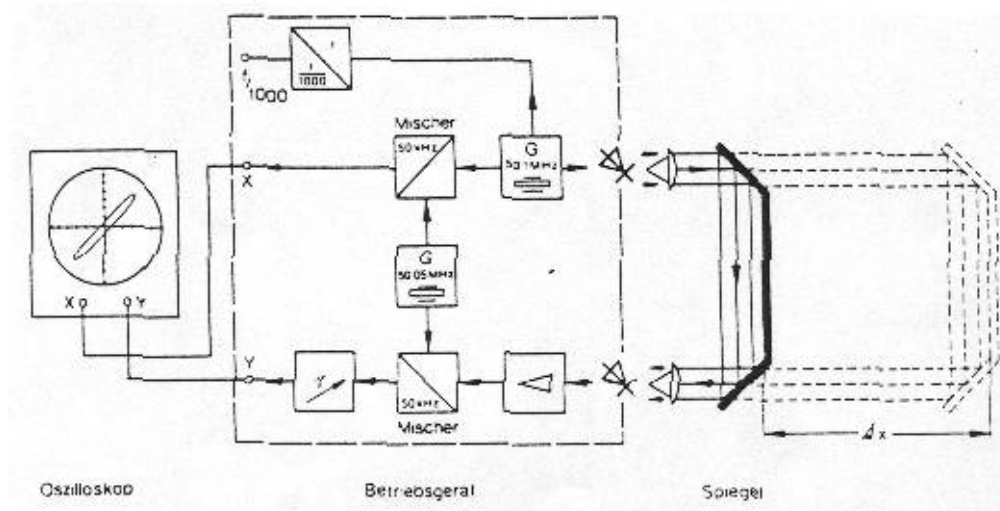


Abb. 1 Schema des Versuchsaufbaues.

Die Lichtintensität der Leuchtdiode wird mit einer Hochfrequenz-Wechselspannung der Frequenz ca. 50 MHz moduliert. Das Licht erzeugt nach Durchlaufen einer Messstrecke am Empfänger eine Wechselspannung gleicher Frequenz, die jedoch gegenüber der ursprünglichen HF-Spannung eine vom Lichtweg abhängige Phasenverschiebung aufweist. Die Messung dieser Phasenverschiebung ermöglicht die Berechnung der Laufzeit der Lichtwelle.

Bei einer Modulationsfrequenz von $f = 50 \text{ MHz}$ beträgt die Periodendauer $T = 2 \cdot 10^{-8} \text{ s}$. Einer Phasenverschiebung von z.B. $\Delta\varphi = 1^\circ$ entspricht in diesem Fall eine Laufzeitdifferenz von

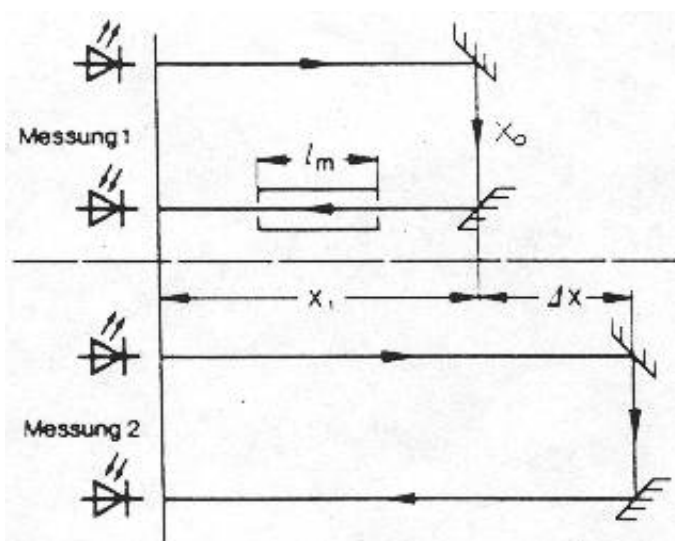
$$\Delta t = T \cdot \frac{\Delta\varphi}{360^\circ} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ s} \cdot \frac{1}{360} = 5,56 \cdot 10^{-11} \text{ s} \quad (3)$$

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 Linearabmessung der Apparatur nahezu halbiert werden. Mit dem Regler "Phase" im Betriebsgerät kann man den Phasenabgleich auf $\Delta\varphi = 0^\circ$ genau bei der Marke "O" 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):

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

Die Lichtgeschwindigkeiten in Wasser c_W und im Kunstharzquader c_K werden aufbauend auf dem Wert c_L für Luft nach Abb. 2 bestimmt. Die wassergefüllte Küvette der Länge $l = 1,00 \text{ m}$ bzw. der Kunststoffblock der Länge $l = 0,30 \text{ m}$ werden so in den Strahlengang gebracht, dass die Fenster bzw. die Endflächen senkrecht zum Strahlengang stehen. Der Spiegel wird dicht dahinter aufgestellt (Abb. 2 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. 2 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. 2 Zur Erläuterung der Messung der Lichtgeschwindigkeit in Wasser bzw. Kunststoff.

Bei einer Messung mit einem Medium M im Strahlengang (s. Abb. 2) 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:

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

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

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

Wichtige Hinweise zum Experiment

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.

Zur Erzeugung der Lissajous-Ellipse ist der 2-Kanal-Elektronenstrahl-Oszillograph im X-Y-Regime zu betreiben.

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!