

A 1 Messung der Lichtgeschwindigkeit

1. Aufgabenstellung

- 1.1 Bestimmen Sie die Lichtgeschwindigkeit in verschiedenen Medien.
- 1.2 Bestimmen Sie die Brechzahl n verschiedener Medien.
- 1.3 Führen Sie eine Fehlerbetrachtung durch.

2. Theoretische Grundlagen

Stichworte zur Vorbereitung:

MAXWELL-Gleichung, Welle-Teilchen-Dualismus, FERMAT'sches Prinzip, Brechzahl, Phasen- und Gruppengeschwindigkeit eines Wellenpaketes, LISSAJOUS-Figuren

Literatur:

- Gerthsen, Kneser, Vogel Physik, 18. Auflage, Kap. 4.1-4.3, 7.6, 9.3,
Springer Verlag 1995
- Bergmann-Schäfer Lehrbuch der Experimentalphysik Band 3,
Bd. 2, Kap. 7.7.,
Bd. 3, Kap. 2.1., 9.3;
W. de Gruyter 1993
- E. Grimsehl Lehrbuch der Physik, Bd. 2, Kap. 107, 112,
Bd. 3, Kap. 4, 5, 20,
Teubner Verlag 1991
- W. Demtröder Experimentalphysik II,
Elektrizität und Optik, Kap 7,
Springer Verlag 1995

Die Geschwindigkeit des Lichtes im Vakuum c_0 gehört zu den Naturkonstanten. Wie die Relativitätstheorie beschreibt, ist sie unabhängig von den Geschwindigkeiten der Quelle bzw. des Empfängers. In einem Medium ergibt sich die Geschwindigkeit des Lichtes aus den MAXWELL'schen Gleichungen zu

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

wobei ε_0 - Elektrische Feldkonstante
 μ_0 - Magnetische Feldkonstante
 und ε - Dielektrizitätszahl
 μ - Permeabilitätszahl

des Mediums sind.

Die Brechzahl n eines Mediums ist das Verhältnis der Geschwindigkeiten des Lichtes im Vakuum und im entsprechenden Medium

$$\frac{c_0}{c} = n = \sqrt{\mu \varepsilon} \quad . \quad (2)$$

Für die meisten durchsichtigen Stoffe ist $\mu = 1$.

Die Dielektrizitätszahl und die Brechzahl sind frequenzabhängige Größen (Dispersion).

3. Versuchsaufbau (Messprinzip)

Bei der eingesetzten Methode wird die Geschwindigkeit eines sinusförmig modulierten Signals durch Phasenvergleich bestimmt. Der Abstand zweier Messpunkte gleicher Phase ist dann $\Delta s = \lambda$.

Eine zusätzliche Messung der Modulationsfrequenz erlaubt die Berechnung der Geschwindigkeit aus der Grundgleichung der Wellenbewegung

$$c = \lambda \cdot \nu \quad . \quad (3)$$

Die Modulation ist erforderlich, da die Frequenz des Lichtes $\nu \approx 10^{15}$ Hz nicht direkt messbar ist und die Messung der Wellenlänge zwar möglich, aber um-

ständig ist. Beträgt dagegen die Frequenz der Modulationswelle z.B. $\nu = 50 \text{ MHz}$, so ist die Wellenlänge ($\lambda \approx 6 \text{ m}$) gut messbar.

Für die Durchführung der Messungen wird rotes Licht (Leuchtdiode) verwendet. Die Sendediode wird dabei mit hochfrequenter Wechselspannung gespeist, so dass das emittierte Licht periodisch intensitätsmoduliert ist.

Der Modulationsfrequenz 50 MHz entspricht eine Periodendauer von $2 \cdot 10^{-8} \text{ s}$.

Das Licht, das nach Durchlaufen einer gewissen Wegstrecke auf die Empfängerdiode (Fotodiode) trifft, erzeugt an dieser eine Wechselspannung mit der gleichen Frequenz; die Phasenlage wird im allgemeinen jedoch abweichend sein. Über die Phasenbeziehung zwischen beiden Spannungen ist zunächst keine Aussage möglich, da die einzelnen Perioden nicht unterschieden werden können. Misst man jedoch den Lichtweg, für den die Phasenverschiebung Null ist, und einen zweiten Lichtweg, für den sich die Phasenlage des Empfängersignals gerade um 180° (also π) verschoben hat, so kann die Laufzeitdifferenz zwischen den beiden Lichtwegen errechnet werden:

$$\Delta t = \frac{1}{2} \frac{1}{f} = 10^{-8} \text{ s} \quad (\text{für } f = 50 \text{ MHz}) .$$

Mit der Differenz Δl beider vom Licht durchlaufenen Wegstrecken ergibt sich für

$$c = \frac{\Delta l}{\Delta t} .$$

die Lichtgeschwindigkeit:

Ein sehr empfindlicher Phasenvergleich ist mit Hilfe eines Oszilloskops möglich. Legt man die beiden zu vergleichenden Wechselspannungen an den X- und den Y-Eingang des Oszilloskops, so erscheint auf dem Bildschirm eine LISSAJOUS-Figur. Bei zwei Spannungen gleicher Frequenz ergibt sich eine Ellipse (da die Amplituden der Spannungen nicht exakt gleich sein werden). Die Lage der Ellipse hängt vom Phasenverhältnis beider Spannungen ab. Beim Phasenunterschied Null oder π

(bzw. ganzzahligen Vielfachen von π) entartet die Ellipse zu einer geneigten Geraden.

Das genutzte Gerät zur Messung der Lichtgeschwindigkeit gestattet keinen direkten Vergleich der Phasenverschiebung bei 50 MHz. Es wird hier den Spannungen von Sender und Empfänger (50,1 MHz) zusätzlich eine hochfrequente Spannung (50,05 MHz) überlagert (Abb.1). Die Differenzen werden ausgefiltert und stehen dann zum Phasenvergleich als zwei Spannungen mit einer Frequenz von etwa 50 kHz bereit. Die ursprüngliche Phasenbeziehung zwischen Sender und Empfängerspannung bleibt dabei erhalten.

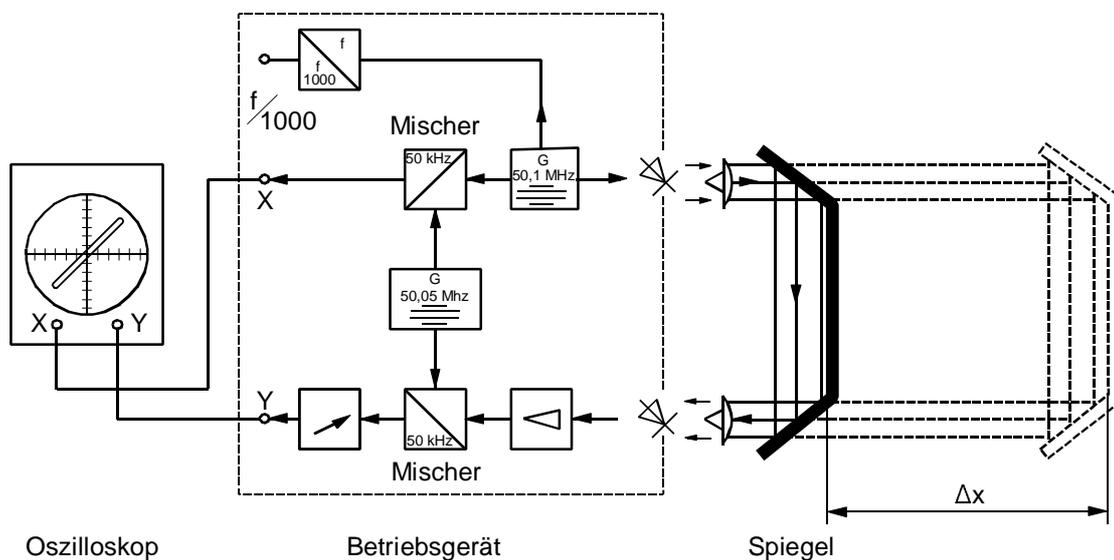


Abb. 1 : Schema des Versuchsaufbaus, Messung der Lichtgeschwindigkeit in Luft

4. Versuchsdurchführung

Der Umlenkspiegel und die Linsen werden so justiert, dass hin- und rücklaufender Lichtstrahl parallel zur Grundplatte verlaufen und das Signal der Empfangsdiode maximal wird.

Zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit in Luft wird der Umlenkspiegel zuerst möglichst dicht an das Betriebsgerät gestellt. Mit Hilfe des Drehknopfes "Phase" wird die LISSAJOUS-Figur am Oszillographen zu einer Linie verformt. Nun wird der Spiegel um Δx verschoben, bis sich die Phase um π geändert hat. Wiederholen Sie diese Messung zehnmal.

Zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit in einem vorgegebenen Medium, wird das Medium so in den Strahlengang gebracht, dass die Endflächen senkrecht zur optischen Achse stehen. Mit Hilfe des Drehknopfes "Phase" wird die LISSAJOUS-Figur am Oszillographen zu einer Linie verformt. Das Medium wird aus dem Strahlengang entfernt und der Spiegel um Δx verschoben, bis die LISSAJOUS-Figur wieder die gleiche Phase zeigt wie im Medium.

Die Frequenz, d.h. $f/1000$, kann mit Hilfe eines Digitalmultimeters kontrolliert werden.

4.1 Zur Messung der Lichtgeschwindigkeit in Luft wird der Lichtweg um $\Delta \ell = 2\Delta x$ (Abb. 1) vergrößert, so dass eine Phasenänderung um π eintritt. Das Licht benötigt für diesen Weg $\Delta t = \frac{1}{2f}$. f ist hier die Modulationsfrequenz des roten Lichtes, 50,1 MHz. Damit ergibt sich für die Lichtgeschwindigkeit c in Luft:

$$c_L = \frac{\Delta \ell}{\Delta t} = 4 \Delta x f \quad .$$

4.2 Die Messung der Lichtgeschwindigkeit in einem transparenten Medium wird auf Vergleichsmessungen zurückgeführt.

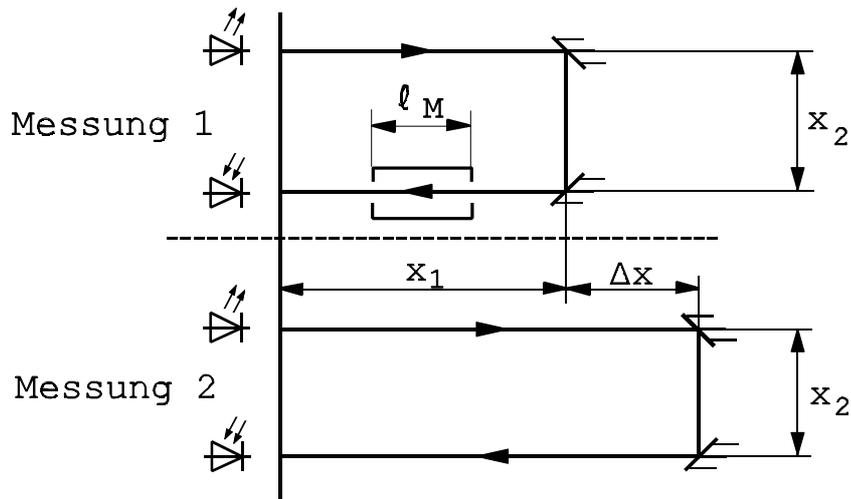


Abb. 2 : Messung der Lichtgeschwindigkeit in anderen Medien

Bei der ersten Messung (mit Medium) legt das Licht in der Zeit t_1 eine Gesamtstrecke $l_1 = 2x_1 + x_2$ zurück, wobei die Strecke $(l_1 - l_M)$ mit der Geschwindigkeit c_L und die Strecke l_M mit c_M durchlaufen wird. Damit ergibt sich für t_1

$$t_1 = \frac{1}{c_L} (l_1 - l_M) + \frac{1}{c_M} l_M .$$

Bei der zweiten Messung (ohne Medium) legt das Licht die Strecke $l_2 = l_1 + 2\Delta x$ in der Zeit

$$t_2 = \frac{1}{c_L} (l_1 + 2\Delta x)$$

zurück. Da die Phasenbeziehung zwischen Sender und Empfänger in beiden Fällen gleich ist, gilt also:

$$t_1 = t_2 + \frac{k}{f} \quad , \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Da in sehr guter Näherung $c_L = c_0$ gilt, folgt für die Brechzahl n :

$$n = \frac{c_0}{c_M} = 1 + \frac{2 \Delta x}{\ell_M} + \frac{k c_L}{f \ell_M} \quad .$$

Beachten Sie, welchen Wert k in Ihrer Messung hat.

5. Kontrollfragen

- 5.1 Beschreiben Sie den Welle-Teilchen-Dualismus des Lichtes und charakterisieren Sie das Licht anhand seiner Eigenschaften.
- 5.2 Beschreiben Sie kurz mindestens eine weitere Methode zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit.
- 5.3 Wie entstehen LISSAJOUS-Figuren? Welche Informationen können daraus gewonnen werden?