

IU3

Modul Universalkonstanten

Lichtgeschwindigkeit

Die Vakuumlichtgeschwindigkeit beträgt etwa $c \approx 3.0 \times 10^8$ m/s. Sie ist eine Naturkonstante und soll in diesem Versuch bestimmt werden. Weiterhin wollen wir den Einfluss eines Mediums auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes untersuchen.

Versuch IU3 - Lichtgeschwindigkeit

Die Vakuumlichtgeschwindigkeit beträgt etwa $c \approx 3.0 \times 10^8$ m/s. Sie ist eine Naturkonstante und soll in diesem Versuch bestimmt werden. Weiterhin wollen wir den Einfluss eines Mediums auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes untersuchen.

1.1 Fragen zur Vorbereitung

- Erkläre den Begriff Transversal- und Longitudinalwelle. Ordne Licht-, Schall- und Wasserwellen diesen beiden Begriffen zu.
- Berechne die Zeit, welche ein Lichtstrahl benötigt, um eine Distanz von 2 m zurück zu legen. Erkläre warum ein Oszilloskop mit einer Bandbreite von 20 MHz diesen Zeitunterschied nicht messen kan. Wie kann dieses Problem gelöst werden?
- Was passiert mit Licht am Übergang von zwei Medien unterschiedlicher Dichte (d.h. unterschiedlicher Brechungsindizes).
- Wie ändert sich die Wellenlänge und die Frequenz einer Welle, wenn sie in ein anderes optisches Medium eindringt?
- Licht welcher Farbe wird beim Übergang in ein optisch dichteres Medium stärker gebrochen?

1.2 Theorie

1.2.1 Grundlagen

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts c_n in einem Medium hängt von dessen Brechzahl n ab. Diese materialabhängige Grösse ist ein Mass für die optische Dichte des Mediums und gibt an, um wieviel langsamer sich das Licht im Medium ausbreitet als im Vakuum:

$$c_n = \frac{c_0}{n} \quad (1.1)$$

wobei $c_0 = 2.998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ der Vakuumlichtgeschwindigkeit entspricht. Den unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten des Lichts entsprechen unterschiedliche Laufzeiten für eine Strecke d . Im Medium benötigt das Licht die Laufzeit

$$t_n = \frac{d}{c_n} \quad (1.2)$$

während für die gleiche Strecke im Vakuum die Laufzeit

$$t_0 = \frac{d}{c_0} \quad (1.3)$$

benötigt wird (siehe Abb. 1.1). Mit der Definition der Zeitdifferenz

$$\Delta t = t_n - t_0 \quad (1.4)$$

erhält man aus Gleichung (1.2) und (1.3) für die Lichtgeschwindigkeit im Medium die Bestimmungsgleichung

$$c_n = \frac{c_0}{1 + \frac{\Delta t}{d} c_0} \quad (1.5)$$

Ein Vergleich mit Gleichung (1.1) ergibt

$$n = 1 + \frac{\Delta t}{d} c_0 \quad (1.6)$$

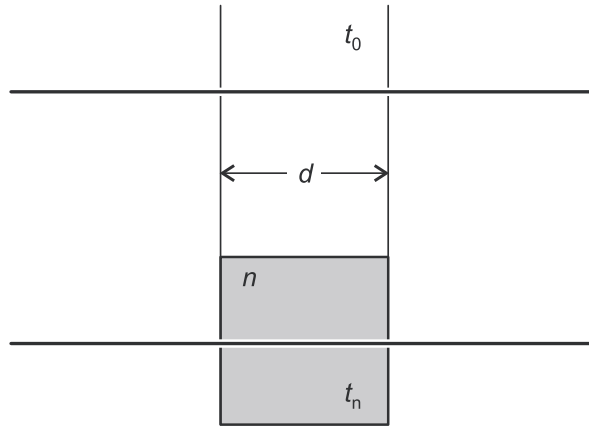


Abbildung 1.1: In einem Medium der Brechzahl n breitet sich Licht langsamer aus als im Vakuum, dadurch ändert sich die Laufzeit des Lichts für eine Strecke d .

1.2.2 Experimentelle Messung

Die Änderung der Lichtgeschwindigkeit im Medium wird im Versuch an einem periodischen Lichtsignal mit Modulationsfrequenz $\nu = 60\text{MHz}$ gemessen. Der Laufzeitunterschied Δt macht sich als Phasenverschiebung

$$\Delta\phi = 2\pi\nu\Delta t = 2\pi\frac{\Delta t}{T} \quad (1.7)$$

des Signals bemerkbar, wobei T die Periodendauer des Signals ist. Zur Messung der Phasenverschiebung wandelt ein Empfänger das Lichtsignal in eine Wechselspannung

$$U = a \cdot \cos(2\pi\nu t - \Delta\phi) \quad (1.8)$$

um. Ein Referenzsignal, das synchron mit der Intensität des Lichtsenders schwingt, wird durch eine elektronische Phasenverschiebung mit dem Empfängersignal zur Deckung gebracht, während Lichtsender und Empfänger in Luft (Brechzahl $n = 1.003$ bei Normalbedingungen) in einer Entfernung s zueinander stehen. Wird nun ein Medium mit genügender optischer Dichte auf einer Teilstrecke d in den Strahlengang gebracht, so wird eine Laufzeitänderung Δt des Lichtsignals verursacht, die als Phasenverschiebung $\Delta\phi$ zwischen Referenz- und Empfängersignal gemessen werden kann.

Da zur Bestimmung der Phasenverschiebung ein einfaches Oszilloskop verwendet werden soll, werden beide Signale elektronisch mit einem Signal der Frequenz $\nu' = 59.9\text{MHz}$ gemischt (multipliziert) und der hochfrequente Anteil des gemischten Signals unterdrückt. Das Empfängersignal hat danach die Form:

$$U_1 = \frac{1}{2}a \cdot \cos(2\pi\nu_1 t - \Delta\phi) \quad (1.9)$$

wobei $\nu_1 = \nu - \nu'$. Das Signal kann mit einem einfachen Oszilloskop dargestellt werden, da die Frequenz ν_1 nur 100kHz beträgt. Die Phasenverschiebung $\Delta\phi$ ändert sich durch die Mischung nicht, sie entspricht jetzt jedoch einer *scheinbaren Laufzeitänderung* Δt_1 . Auf dem Oszilloskop liest man zusätzlich die Periodendauer T_1 des gemischten Signals ab und berechnet

$$\Delta\phi = 2\pi\frac{\Delta t_1}{T_1} \quad (1.10)$$

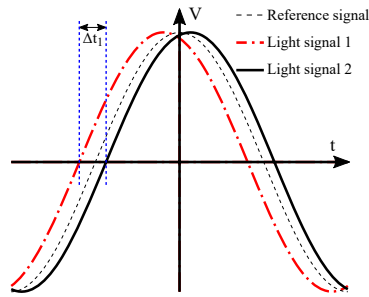


Abbildung 1.2: Prinzip der Phasenverschiebungsmessung: ein Referenz Signal (gepunktete Linie) dient als Basis für die modulierte Licht Intensität. Das gemessene Licht Signal entspricht den beiden Signalen 1 (gestrichelte Linie) (resp. 2 durchgezogene Linie) gemessen ohne (resp. mit) einem Medium im Lichtstrahl. Die sichtbare Zeitverzögerung Δt_1 , hervorgerufen durch das Medium, entspricht der Zeitverzögerung der Nulldurchgänge, der beiden Signale.

bzw.

$$\Delta t = \Delta t_1 \frac{T}{T_1} = \frac{\Delta t_1}{T_1 v} \quad (1.11)$$

Setzt man nun diese Gleichung in Gleichung (1.5) und (1.6) ein, ergibt sich für die Lichtgeschwindigkeit im Medium

$$c_n = \frac{c_0}{1 + \frac{c_0}{dv} \frac{\Delta t_1}{T_1}} \quad (1.12)$$

und für die Brechzahl

$$n = 1 + \frac{c_0}{dv} \frac{\Delta t_1}{T_1} \quad (1.13)$$

1.3 Experiment

1.3.1 Versuchszubehör

Komponente	Anzahl
Lichtsender und -empfänger	1
Linse $f=150\text{mm}$	1
Koaxialkabel	2
Sockel	3
Zweikanal-Oszilloskop	1
Massstab 1m	1
1 Plexiglasbecken	1
Kunstglaskörper	1
Prismentisch	1

1.3.2 Versuchsaufbau und Justage

Der Versuchsaufbau ist in Abb. 1.3 und 1.4 dargestellt.

- Lichtsender in ca. 1.5m Abstand zum Empfänger aufstellen, über Koaxialkabel an den Ausgang (a) des Empfängers anschliessen und den Empfänger einschalten.
- Roten Lichtfleck des Lichtsenders auf der Frontplatte des Empfängers abbilden und Einsatz (e) relativ zum Kondensator (d) so verschieben, dass der rote Lichtfleck möglichst gleichmässig ausgeleuchtet wird.

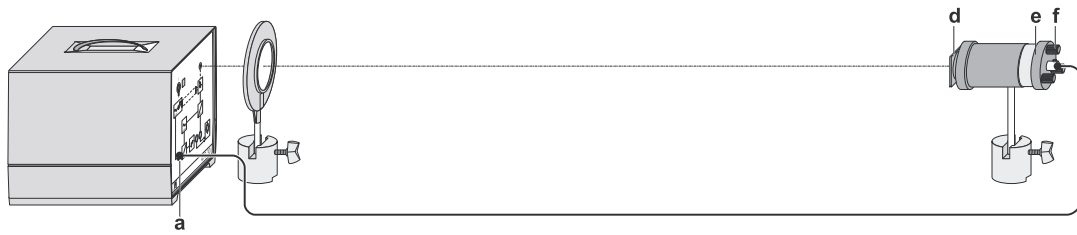


Abbildung 1.3: Optischer Aufbau zur Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts in Luft.

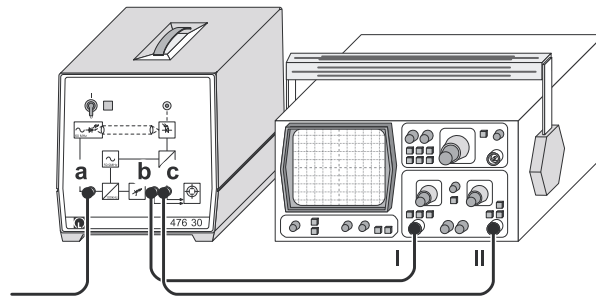


Abbildung 1.4: Anschluss des Oszilloskops für die Messung der Phasenverschiebung des periodischen Lichtsignals.

- Linse in den Strahlengang bringen
- Lichtsender und Linse ausrichten, so dass der rote Lichtfleck die Eintrittsöffnung des Empfängers trifft, gegebenenfalls mit den Rändelschrauben (f) die Ausrichtung des Lichtsenders optimieren.
- Ausgang (c) des Empfängers an Kanal *II* des Oszilloskops anschliessen (Kopplung Kanal *II*: AC, Trigger: Kanal *II*)
- Empfängersignal auf dem Oszilloskop beobachten und Ausrichtung von Lichtsender und Linse weiter optimieren.

Lichtgeschwindigkeit in Luft

- Aufbau gemäss Abbildung 1.3.

Lichtgeschwindigkeit in Kunstglas



Abbildung 1.5: Optischer Aufbau zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit in Glas.

- Prismentisch auf Sockel montieren und Kunstglaskörper auf dem Prismentisch mit dem Metallhalter festklemmen (Abb. 1.5).

Lichtgeschwindigkeit in Wasser

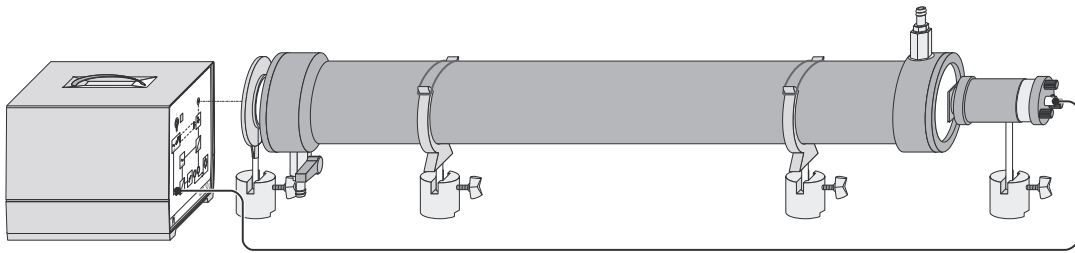


Abbildung 1.6: Optischer Aufbau zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit in Wasser.

- Plexiglasbecken mit Wasser füllen und vorsichtig zwischen Sender und Linse platzieren (Abb. 1.6).

1.3.3 Messungen

Eine zufriedenstellende Genauigkeit des Ergebnisses ist nur bei thermischer Stabilität von Lichtsender und Empfänger erreichbar. Daher erst mit der Durchführung beginnen, wenn Lichtsender und Empfänger mindestens 15 Minuten eingeschaltet sind.

Phasenabgleich zwischen Referenz- und Empfängersignal

- Ausgang (*b*) des Empfängers an Kanal *I* des Oszilloskops anschliessen und Kanal *I* (Referenzsignal) und *II* (Empfängersignal) gleichzeitig betrachten. (Einstellungen des Oszilloskops: Kopplung Kanal *I* und *II*: AC, Trigger: Kanal *I*)
- Vertikale Positionen der Kanäle *I* und *II* so einstellen, dass beide Signale möglichst genau symmetrisch zur mittleren Horizontallinie des Schirms sind.
- Zur Überprüfung die vertikalen Ablenkungen so einstellen (Feineinstellung benutzen), dass die Maxima beider Signale möglichst genau auf der gleichen Horizontallinie liegen.
- Mit dem Phasenschieber ϕ des Empfängers beide Signale möglichst genau zur Deckung bringen.
- Geeignete horizontale Position der Signale wählen und Periodendauer T_1 bestimmen.

Lichtgeschwindigkeit in Luft

- Beobachte durch Verringern des Abstandes zwischen Sender und Empfänger eine Verschiebung der Empfängercurve am Oszilloskop. Die Empfängercurve sollte sich nur in eine Richtung bewegen, ist dies nicht der Fall, so kontrolliere noch einmal den Aufbau und justiere neu. Kontrolliere speziell ob die Linse richtigerum im Lichtstrahl steht.
- Beginne deine Messung mit einem möglichst grossen Abstand zwischen Sender und Empfänger. Nähere dich dann in 5 cm Schritten dem Empfänger an. So solltest du auf ca. 15 Messwerte kommen.

Lichtgeschwindigkeit in Kunstglas

- Bringe den Sender auf eine beliebige Distanz zum Empfänger. Bringe nun auf dem Oszilloskop beide Nulldurchgänge zur Deckung, stelle eine geeignete Zeitbasis ein.
- Kunstglas unmittelbar vor den Lichtsender in den Strahlengang bringen.
- Abstand der Nulldurchgänge ablesen und *scheinbare Laufzeitänderung* Δt_1 bestimmen (Achtung: Die Zeitabstände sind sehr klein!).
- Messung für ca. 10 verschiedene beliebige Distanzen wiederholen und Mittelwert der jeweils gemessenen Werte Δt_1 bestimmen. Überlege dir warum die Werte alle relativ gleich sind, also warum der absolute Abstand keine Rolle spielt.

Lichtgeschwindigkeit in Wasser

- Stelle das Wasserrohr in den Strahlengang und den Sender direkt dahinter. Bringe nun auf dem Oszilloskop beide Nulldurchgänge zur Deckung, stelle eine geeignete Zeitbasis ein.
- Fülle das Wasserrohr mit Wasser.
- Abstand der Nulldurchgänge ablesen und *scheinbare Laufzeitänderung* Δt_1 bestimmen.
- Messung fünfmal wiederholen und Mittelwert der jeweils gemessenen Werte Δt_1 bestimmen.

1.3.4 Aufgaben zur Auswertung

- Rechne alle gemessenen scheinbaren Laufzeitunterschiede in die echten Laufzeitunterschiede um. Berechne dazu zuerst den Umrechnungsfaktor aus Periode und Modulationsfrequenz (1.11).

Luft

- Erstelle eine Grafik in der die Abstände gegen die berechneten echten Laufzeitunterschiede aufgetragen werden. Fitte nun eine Gerade durch die Datenpunkte. Überlege dir, was die Steigung der Geraden darstellt.
- Überlege Dir, warum die Lichtgeschwindigkeit in der Luft in etwa der des Vakuums entspricht, aber warum es dennoch zu einer kleinen Abweichung kommen kann. (Fehlerrechnung nicht vergessen).
- Bestimme den Brechungsindex von Luft.
- Berechne die systematischen Fehler wie in der Einführung gelernt. Die statistischen Fehler bekommst du von deinem Fitprogramm.

Glas und Wasser

- Berechne aus den Mittelwerten für die Laufzeitunterschiede die Lichtgeschwindigkeit und den Brechungsindex. Benutze den Literaturwert für die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum

- Führe die Rechnungen noch einmal durch, diesmal benutze den vorher bestimmten Wert für die Lichtgeschwindigkeit in der Luft. Fällt dir etwas an den Ergebnissen auf?
- Führe eine vollständige Fehlerrechnung durch.

1.4 Literatur

- D. Meschede, *"Gerthsen Physik"*, Springer Verlag