

## Versuch D 9: Lichtgeschwindigkeit in Luft, Flüssigkeiten und Glas

**1. Literatur:** Bergmann-Schaefer, Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd. III: Optik  
Gerthsen-Kneser-Vogel, Physik  
Pohl, Bd. 3: Optik u. Atomphysik

**Stichworte:** Elektromagn. Welle: Wellenlänge  $\lambda$ , Frequenz  $\nu$ , Phasengeschwindigkeit  $c$ , Brechungsindex  $n(\epsilon, \mu)$ , Dielektrizitäts- und Permeabilitätskonstante  $\epsilon$ ,  $\mu$ , Dispersion  $n(\lambda)$ , Methoden der  $c$ -Messung, Frequenzmischung durch Modulation, Leuchtdiode, Fotodiode, Oszilloskop

### 2. Grundlagen

Sichtbares Licht breitet sich im Vakuum wie andere Wellen des elektromagnetischen Spektrums (z.B. Radiowellen, Mikrowellen, Infrarot- bzw UV-Licht, Röntgen- oder  $\gamma$ -Strahlen) für alle Frequenzen bzw. Wellenlängen mit der gleichen sog. *Vakuumlichtgeschwindigkeit*

$$c_0 = 299792456,2 \text{ m/s} \approx 2,998 \times 10^8 \text{ m/s}$$

im leeren Raume aus. Die Vakuumlichtgeschwindigkeit  $c_0$  ist die am genauesten bekannte Naturkonstante. Die Theorie verknüpft auf Grundlage der *Maxwellschen Gleichungen* die Vakuumlichtgeschwindigkeit  $c_0$  (Phasengeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen) mit der elektrischen Influenz- oder Feldkonstanten  $\epsilon_0$  und der magnetischen Induktions- bzw. Feldkonstanten  $\mu_0$ :

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (1)$$

In Materie ist die Lichtgeschwindigkeit darüber hinaus von der Brechzahl  $n$  bzw. der Dielektrizitätskonstanten  $\epsilon$  und Permeabilitätskonstanten  $\mu$  des Mediums abhängig.

$$c_n = \frac{c_0}{n} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \epsilon_0 \mu \mu_0}} = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon \mu}} \quad (2)$$

Die Lichtgeschwindigkeit  $c_n$  ist wie die Brechzahl  $n$  bzw. Dielektrizitätskonstante  $\epsilon$  und Permeabilitätskonstante  $\mu$  des Mediums von der Frequenz  $\nu$  bzw. Wellenlänge  $\lambda$  des Lichts abhängig (*Dispersion des Lichts*).

Ist die Vakuumlichtgeschwindigkeit  $c_0$  bekannt, lässt sich dazu *relativ* die Lichtgeschwindigkeit  $c_n$  in (optisch transparenter) Materie z.B. über die Bestimmung von  $n$  durch Brechungsversuche (vergl. z.B. Versuch D16: *Mikrowellen*) aus der Brechzahl von Glas ( $n \approx 1,5$ ) oder über Interferenzversuche (vergl. Versuch D14: *Laserinterferometer*) aus der nur wenig von 1 verschiedenen Brechzahl von Gasen (Luft:  $n \approx 1,0003$ ) ermitteln.

*Absolut* kann die Lichtgeschwindigkeit entweder indirekt mittels Gl. (1) über Messungen der elektrischen und magnetischen Feldkonstanten ermittelt werden (*Weber und Kohlrausch*, 1856) oder direkt durch Laufzeitmessungen des Lichts über bekannte Weglängen. Historisch hat als erster *O. Römer* (1676) durch astronomische Beobachtungen der Zeitabhängigkeit des sichtbaren Verschwindens des Jupitermondes Io hinter dem Planeten in Abhängigkeit von der über das Jahr veränderten (berechenbaren) Entfernung Jupiter-Erde einen (endlichen) Wert der Lichtgeschwindigkeit  $c = 2,3 \times 10^8 \text{ m/s}$  ermittelt. Spätere genauere Messungen von *Fizeau* (1849) nutzten zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit die periodische Unterbrechung eines Lichtstrahls durch ein schnell rotierendes Zahnrad vor und nach Durchlaufen einer bekannten Weglänge im Labor aus. *Foucault* (1869) benutzte einen schnell rotierenden Spiegel, um die Lichtgeschwindigkeit aus dem seitlichen Versatz eines reflektierten Lichtstrahls nach Durchlaufen einer bekannten Wegstrecke zu bestimmen.

Weitere (noch genauere) Messverfahren der Lichtgeschwindigkeit beruhen u.a. auf Frequenz- und Wellenlängenmessungen, d.h. Messungen der Phasengeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen (als stehende Wellen bzw. Wellen in Hohlraumresonatoren, vergl. Versuch D16). Als Frequenznormale werden die Eigenfrequenzen der Schwingungen von Atomen bzw. Molekülen benutzt.

Im vorliegenden Versuch wird die Lichtgeschwindigkeit durch die Bestimmung der Phasen- bzw. Zeitdifferenz zweier hochfrequenter elektr. Spannungssignale ermittelt, von denen eines durch die Laufzeit über eine bekannte kurze Wegstrecke relativ zum anderen, dem sog. Referenzsignal, verzögert wird.

Zur Erläuterung des Verfahrens sei ein Sender S betrachtet, der mittels einer hochfrequenten Spannung

$$U_S = U_0 \sin(2\pi \nu t) \quad (3)$$

ein mit der Frequenz  $\nu$  entsprechend moduliertes Lichtsignal der Intensität  $I$

emittiert:

$$I = I_0 + I_1 \sin(2\pi vt) \quad (4)$$

Das Lichtsignal I wird von einem Empfänger E, der sich von S im Abstand s befindet, in ein Wechselspannungssignal  $U_E$  umgewandelt.

$$U_E = U_1 \sin(2\pi vt - \varphi) \quad (5)$$

Die Spannungen  $U_S$  und  $U_E$  unterscheiden sich - abgesehen von ihren Amplituden - in ihren Phasen. Die Phasendifferenz  $\varphi$  von  $U_E$  und  $U_S$  lässt sich (bis auf eine gerätebedingte und einstellbare Konstante  $\varphi_0$ ) durch die Laufzeit  $t_s$  bzw. den zurückgelegten Lichtweg s und die Geschwindigkeit  $c_n$  des Lichtsignals darstellen:

$$\varphi - \varphi_0 = 2\pi vt_s = 2\pi v \frac{s}{c_n} \quad (6)$$

Um die Konstante  $\varphi_0$  in Gl. (6) zu eliminieren, wird nicht die Phase  $\varphi$  selbst sondern ihre Änderung  $\Delta\varphi$  bzw. die Änderung  $\Delta t_s$  der Laufzeit in Abhängigkeit von der Änderung des Lichtweges  $\Delta s$  bestimmt, also:

$$\Delta\varphi = 2\pi v \Delta t_s = 2\pi v \frac{\Delta s}{c_n} \quad (7)$$

Aus Gl. (7) ist ersichtlich, dass die Änderung der Phase  $\Delta\varphi$  proportional zur Modulationsfrequenz  $v$  ist. Bei entsprechend hoher Frequenz  $v$  kann selbst bei kurzer Streckenänderung  $\Delta s$  die Änderung der Phase beträchtlich sein: So ist z.B. für  $\Delta s = 5$  m und die im Versuch benutzte Frequenz  $v = 60$  MHz die Phasendifferenz  $\Delta\varphi = 2\pi$ , entspricht also einer vollen Periode der Schwingung.

Nachteilig ist jedoch die relativ schwierige bzw. ungenaue Darstellung der Phasendifferenz solch hochfrequenter Signale mit einem einfachen Oszilloskop (mit einer oberen Grenzfrequenz von ca. 30 MHz). Es wird deshalb im vorliegenden Versuch nicht die Phasendifferenz der Spannungen  $U_S$  und  $U_E$  direkt bestimmt. Vielmehr werden die Signale  $U_S$  und  $U_E$  mit einem weiteren Signal  $U'$  mit der nahe bei  $v = 60$  MHz liegenden Frequenz  $v' = 59,9$  MHz überlagert (d.h. multipliziert). Die dabei entstehenden Spannungen  $U_S'$  und  $U_E'$  haben die Form

$$U_S' = U_0 \sin(2\pi vt) \sin(2\pi v't) = \frac{U_0}{2} \left( \sin(2\pi(v-v')t) + \sin(2\pi(v+v')t) \right)$$

$$U_E' = U_1 \sin(2\pi vt - \varphi) \sin(2\pi v't) = \quad (8)$$

$$\frac{U_1}{2} \left( \sin(2\pi(v-v')t - \varphi) + \sin(2\pi(v+v')t - \varphi) \right)$$

Mittels Frequenzfiltern (sog. Tiefpässen) werden die hochfrequenten Signalanteile mit den Frequenzen  $v + v'$  herausgefiltert. Die verbleibenden niederfrequenten Spannungen  $U_S''$  sowie  $U_E''$  mit der Frequenz  $v_1 = v - v' = 100$  kHz:

$$U_S'' = \frac{U_0}{2} \sin(2\pi v_1 t) \quad (9)$$

$$U_E'' = \frac{U_1}{2} \sin(2\pi v_1 t - \varphi) = \frac{U_1}{2} \sin(2\pi v_1 (t - t_\varphi))$$

können leicht mit einem einfachen Oszilloskop dargestellt und hinsichtlich ihrer Phasendifferenzänderung  $\Delta\varphi$  bzw. ihres Zeitversatzes\*  $\Delta t_\varphi = \Delta\varphi / 2\pi v_1$  in Abhängigkeit von der Änderung  $\Delta s$  des Lichtweges untersucht werden. Ersetzen von  $\Delta\varphi$  in Gl. (7) durch  $\Delta t_\varphi$  liefert mit  $v = 6 \times 10^7$  Hz und  $v_1 = 10^5$  Hz für die Lichtgeschwindigkeit:

$$c_n = \frac{v}{v_1} \frac{\Delta s}{\Delta t_\varphi} = 600 \frac{\Delta s}{\Delta t_\varphi} \quad (10)$$

Mit Gln. (8) u. (9) bleibt festzuhalten, dass durch die Amplitudenmodulation zweier hochfrequenter ( $v$ ), phasendifferenzter ( $\varphi$ ) Spannungen mit einer nahezu frequenzgleichen Spannung ( $v'$ ) mit vergleichbarer Amplitude und nachfolgender Tiefpassfilterung zwei entsprechend niederfrequente Spannungen mit der

---

\*) Es sei hier erwähnt, dass der Zeitversatz  $\Delta t_\varphi$  nicht der Zeit  $\Delta t$  des Lichtstrahls zum Durchlaufen der Weglängendifferenz  $\Delta s$  entspricht. Diese ist mit Gln. (7) u. (10):  $\Delta t = \Delta t_\varphi v_1 / v$ , also viel kürzer als  $\Delta t_\varphi$ .

Differenzfrequenz ( $\nu_1 = \nu - \nu'$ ) entstehen, deren Phasendifferenz ( $\varphi$ ) jedoch die gleiche wie die der ursprünglichen hochfrequenten Spannungen ist.

Dieses Verhalten wird im vorliegenden Versuch benutzt, um die Lichtgeschwindigkeit in Luft, Flüssigkeiten und Glas im Labor, d.h. auf geringen Lichtwegdistanzen zu bestimmen.

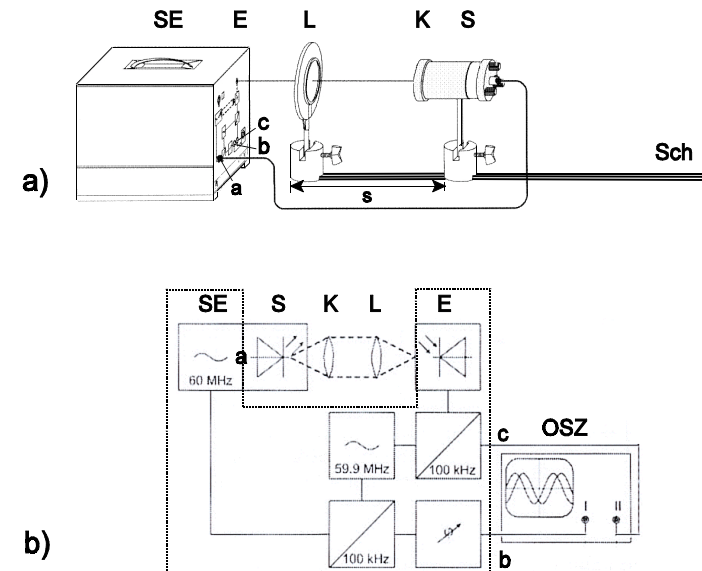
### 3. Aufgabenstellung

- 1. Aufgabe:** Bestimmen Sie die Lichtgeschwindigkeit in Luft aus der Änderung der Phasendifferenz  $\Delta\varphi$  bzw. Zeitdifferenz  $\Delta t_\varphi$  zwischen den hochfrequent modulierten und frequenzreduzierten Signalspannungen eines Lichtempfängers E und eines um den Abstand  $\Delta s$  von E verschobenen Lichtsenders S.
- 2. Aufgabe:** Bestimmen Sie aus der Zeitdifferenz  $\Delta t_\varphi$  infolge eines in den Lichtweg gestellten Wasserzylinders die Lichtgeschwindigkeit in bzw. den Brechungsindex von Wasser.
- 3. Aufgabe:** Bestimmen Sie den Brechungsindex von Plexiglas und Glycerin, indem Sie analog zur 2. Aufgabe in den Lichtweg einen Plexiglaskörper sowie einen mit Glycerin gefüllten Glasbehälter stellen.

### 4. Versuchsaufbau

Den Versuchsaufbau zeigt schematisch Abb. 1a. Ein Sende-Empfangsgerät SE betreibt den Lichtsender S, eine im Lampengehäuse achsial zentrierte (rote) Leuchtdiode, mit einer mit 60 MHz modulierten Wechselspannung. Das emittierte Licht wird mit der Kondensorlinse K in etwa zu einem parallelen Lichtbündel gesammelt und von der Sammellinse L auf den im Sende-Empfangsgerät montierten Empfänger E, eine Fotodiode, fokussiert. Die Abstandsänderung  $\Delta s$  von Sender S und Empfänger E kann durch Verschieben des Senders auf einer mit Millimeterteilung versehenen Weglängenskala s einer Schiene Sch variiert werden. Die der Lichtwegänderung  $\Delta s$  entsprechende Änderung der Phasendifferenz  $\Delta\varphi$  bzw. des Zeitversatzes  $\Delta t_\varphi$  von Referenz- und Empfängerspannung wird mittels eines an den (auf 100 kHz frequenzreduzierten) Ausgängen b und c angeschlossenen Oszilloskops OSZ bestimmt. Abb.1b zeigt das entsprechende Blockschaltbild.

Geht man davon aus, dass die Weglängenänderung  $\Delta s$  leicht hinreichend genau



**Abb. 1:**

a) Versuchsaufbau des Lichtwegs zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit: SE Licht-Sende-Empfangsgerät mit Signalausgängen a, b, c; E Lichtempfänger, L Sammellinse, K Kondensorlinse, S Lichtsender; Sch Schiene mit Millimeterskala zur Wegmessung s; b) Blockschaltbild der Sende-Empfangseinheit mit HF-Generatoren (60 u. 59,9MHz), Empfänger E, Mischeinheiten (100 kHz), Phasenschieber ( $\varphi$  variabel) und Signalausgängen b und c zur Bestimmung der Phasendifferenz zwischen Referenz- und Empfangssignal mit einem Oszilloskop OSZ (Kanal I bzw. II).

(d.h. auf einen relativen Fehler von ca.  $10^{-3}$ ) bestimmt werden kann, ist der Fehler in der Messung des Zeitversatzes  $\Delta t_\varphi$  mit dem Oszilloskop (neben möglichen Fehlern in den Frequenzen  $\nu$  und  $\nu_1$ ) der entscheidende Fehler in der Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit. Um diesen Fehler zu minimieren, ist folgendes im experimentellen Aufbau zu beachten:

- a) Die Sende-Empfangseinheiten müssen so gut wie möglich thermisch stabil gehalten werden. Die Geräte sind deshalb ca. eine halbe Stunde vor Beginn der Messungen einzuschalten.

b) Bei der Variation des Lichtweges  $s$  zwischen Sender und Empfänger ist eine möglichst konstante Amplitude der Empfängerspannung zu erhalten. Daher sollten die Leuchtdiode S, die Kondensorlinse K, die Sammellinse L und der Empfänger E - unabhängig von  $s$  - auf derselben optischen Achse liegen.

Die Leuchtdiode S wird durch drei Schrauben an der Rückseite des Lampengehäuses optimal zur Kondensorlinse zentriert. Der Abstand S - K kann durch Verschieben des Lampeneinsatzes im Gehäuse (mit Kondensator) variiert werden, so dass - zunächst ohne die Sammellinse - der Lichtfleck an der Empfängerfront (nach gleicher Höheneinstellung von S und E) unabhängig vom Abstand S - E (zwischen 30 u.120 cm) etwa gleich groß auf der Oberfläche des Empfängers erscheint. Danach wird die Sammellinse so auf die Schiene gesetzt, dass ihr Stativfuß mit der linken Kante an der dem Sende-Empfangsgerät zugewandten Ende der Schiene liegt.

Das Sende-Empfangsgerät ist so auszurichten, dass der Strahlfleck konzentrisch auf der Empfängeröffnung liegt. Es wird empfohlen, einen Abstand von ca. 14 cm zwischen der Hauptebene der Sammellinse ( $f = 15$  cm) und der Front des Sende-Empfangsgerätes zu wählen. Gegebenenfalls ist jedoch dieser Abstand zu verändern, um eine Übersteuerung der Empfangsdiode (d.h. nichtlineares Signal- sowie fehlerhaftes Phasenverhalten) zu vermeiden (s.u.)

c) Um den Fehler bei der Messung des Zeitversatzes  $\Delta t_\phi$  mit dem Oszilloskop in Abhängigkeit von der Weglängenänderung  $\Delta s$  möglichst gering zu halten, ist das Oszilloskop für die Messungen *optimal* einzustellen. Es werden im folgenden deshalb kurz die wichtigsten Einstellungen des im Versuch benutzten Oszilloskops beschrieben. Es wird empfohlen, dass Sie vor Beginn der eigentlichen Messungen diese Einstellungen gezielt verändern, um sich einerseits mit der Handhabung des Oszilloskops vertraut zu machen und um andererseits die Auswirkung der Einstellungen auf die Bildschirmanzeige und die damit verbundenen möglichen Fehler bei der Ablesung des Zeitversatzes  $\Delta t_\phi$  abzuschätzen zu können.

Abb. 2 zeigt die Frontansicht des im Versuch benutzten Oszilloskops. Links in der Bildschirmanzeige wird der zeitliche Verlauf  $U(t)$  von zwei Wechselspannungen  $U_I$  bzw.  $U_{II}$  dargestellt, welche an den im rechten Teil der Front unten links bzw. mittig sichtbaren Eingangsbuchsen (INPUT CH I und INPUT CH II) - über Koaxialkabel mit den Ausgängen b und c des Sende-Empfangsgeräts verbunden - anliegen. Die am Ausgang b des Sende-Empfangsgeräts liegende und mit Kanal I verbundene Referenzspannung  $U_I$  bestimmt als sog. *Triggerspannung* die (einstellbare) Phasenlage des Signals  $U_I$  am linken Bildrand (z.B. den im Bild gezeigten Nulldurchgang der Sinuskurve), die am Ausgang c von SE mit Kanal II verbundene *Signalspannung*  $U_{II}$  ist auf dem Bildschirm in ihrem Nulldurchgang

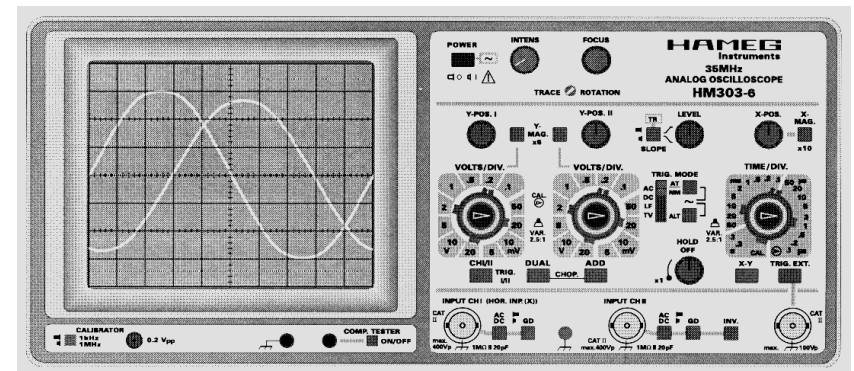


Abb. 2:

Frontansicht des benutzten Zweikanal-Elektronenstrahl-Oszilloskops mit links: Anzeigebildschirm, rechts: wesentlichen Einstellelementen: obere Reihe: Netzspannungsschalter, Helligkeits- und Strahlfokusregler; mittlere Reihe: Stufenschalter für Eingangsspannungen Kanal I/II und Zeitablenkung, darüber Regler/Taster für y- bzw. x-Position/Ablenkung des Elektronenstrahls sowie für Einsatzzpunkt am linken Bildrand (Trigger) und darunter liegende Wahl-tasten für Triggermode; unter Kanal I/II Stufenschaltern Wahl-tasten für die Bild-darstellung; untere Reihe: Koaxial-Eingangsbuchsen für Kanal I/II/Trigger mit Tasten der Eingangsbeschaltung

entsprechend um die Zeit  $t_\phi$  (hier z.B. drei Kästchen) versetzt dargestellt.

Der Bildschirm ist in  $10 \times 8$  Bildquadrate (je  $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ ) eingeteilt, den sog. *Divisions* (Teilungen). Die der vertikalen Teilung entsprechenden Momentanspannungen von  $U_I$  und  $U_{II}$  sind für jeden Kanal getrennt an den im rechten Teil in mittlerer Höhe links bzw. mittig liegenden Drehknöpfen (VOLTS/DIV) in kalibrierten Werten einstellbar (die für variable Einstellungen vorgesehenen zentrisch liegenden roten Knöpfe sind hierbei jeweils auf den rechten Anschlag zu drehen). Am rechts außen liegenden Drehknopf (TIME/DIV) ist das der horizontalen Teilung entsprechende Zeitintervall für beide Kanäle gemeinsam in kalibrierten Werten einstellbar (auch hierbei ist die variable Einstellung des zentralen roten Drehknopfes auf den rechten Anschlag zu drehen).

Die über den jeweiligen Stufenschaltern der Kanäle I und II und der Zeitablenkung liegenden Regler (y-Position, x-Position) ermöglichen u.a. die vor allem bezüglich der t-Achse ( $y = 0$ ) wichtige symmetrische Einstellung der *Signalspannung*  $U_{II}$ . Ihre Nullposition auf dem Bildschirm bestimmt die wichtige

Messgröße  $t_\varphi$ . Sie ist durch Unterbrechung des Lichtweges (Papier oder Hand) leicht zu kontrollieren und entsprechend einzustellen. Wird dies nicht gemacht, verursacht eine mögliche Intensitätsänderung des Lichtsignals bzw. Amplitudenänderung von  $U_{II}$  eine scheinbare Phasenänderung, da der Durchgang durch die t-Achse dann möglicherweise nicht bei  $U_{II} = 0$  registriert wird.

Neben diesen Reglereinstellungen sind noch drei weitere Regler wichtig: Rechts neben dem Netz-Ein/Austaster zwei Regler für Helligkeit und Fokus des Elektronenstrahlbildes, darunter in der Reihe der y- bzw. x-Positionsregler der Trigger-Regler. Mit ihm kann der Trigger-Level, d.h. die Phasenlage des Strahlbeginns von  $U_I$  am linken Bildrand - und damit gleichzeitig die von  $U_{II}$  - verändert werden. Für die Bestimmung der Phasen- bzw. Zeitverschiebung der Spannung  $U_{II}$ , z.B. infolge Verschiebens des Senders, ist es zum leichteren Ablesen zweckmäßig, einen bestimmten Referenzpunkt einzustellen. Die neben den x- bzw. y-Positionsreglern liegenden Verstärkertasten (Bildvergrößerung) bleiben auf den Faktor 1 getastet.

Der Trigger-Mode wird (unter dem Trigger-Regler) auf *AT* (automatische Triggerung) und *AC* eingestellt. Von den Wahltasten unter den Spannungsschaltern  $U_{I,II}$  wird nur die mittlere Taste *Dual* gedrückt. Die Wahltasten an den Eingangsbuchsen  $U_{I,II}$  sind auf *AC* zu stellen.

## 5. Versuchsdurchführung

### 5.1 Lichtgeschwindigkeit in Luft

Bauen Sie den Versuch wie in Abb. 1 gezeigt und zuvor beschrieben auf. Schalten Sie die Geräte zur thermischen Stabilisierung ein.

Stellen Sie zunächst zur Überprüfung der Signalspannungen die Spannungsschalter CH I und CH II auf 2 V/DIV, die Zeitablenkung TIME auf 0,5  $\mu$ s/DIV. Stellen Sie sicher, dass durch Verändern des Abstandes S - E die Amplitude der Spannung  $U_{II}$  immer unterhalb 6 V (3 cm auf dem Schirm) bleibt. Andernfalls ist das Signal übersteuert (etwas oberhalb 6V *abgeflacht* auf dem Schirm sichtbar). Des weiteren ist dann auch die Phasenlage des Nulldurchgangs von  $U_{II}$  deutlich verschoben. Dies wird bei einer Einstellung CH II: 0,1 V/DIV u. TIME: 0,1  $\mu$ s/DIV sichtbar.  $U_{II}$  erscheint als Doppelstrahl (wahrscheinlich infolge einer geringen Modulation niedrigerer Frequenz). Beziehen Sie sich bei entsprechenden Messungen auf einen Teilstrahl. Durch Abschatten des Lichtstrahls mit einem Papier wird beim übersteuerten Signal die Phase zunächst auf dem Schirm nach links verschoben, bevor die Amplitude (Steigung des Kurvensegments) deutlich abnimmt. Verändern Sie in diesem Fall des Abstand zwischen Linse und

Empfänger, bis der Phasenversatz praktisch verschwindet. Die Vermeidung einer Übersteuerung ist vor allem bei der Durchführung der 2. und 3. Aufgabe wichtig, um grobe Fehlmessungen zu verhindern.

Für die Messung der Lichtgeschwindigkeit in Luft sind die Einstellungen CH I: 0,5 V/DIV; CH II: 0,1 V/DIV; TIME: 0,2  $\mu$ s/DIV zu wählen.

Verschieben Sie das Lampengehäuse des Senders mit seinem Fuß so auf der Schiene, dass er mit der linken Kante beim Skalenwert des Weges  $s = 0,1$  m also dicht bei der Sammellinse liegt. Verschieben Sie danach durch Verändern des Phasenschiebers am Empfänger oder des Trigger-Levels den Nulldurchgang der Spannung  $U_{II}$  auf den linken Rand des Bildschirms und überprüfen Sie nochmals durch Strahlunterbrechung die korrekte Nulllage von  $U_{II}$  auf der Zeitachse. Notieren Sie den Zeitpunkt  $t_\varphi$  des Nulldurchgangs (auf geschätzte 1/10 - Divisions genau).

Verschieben Sie nun den Sender in Schritten von 0,1 m bis auf die Wegmarke  $s = 1,0$  m und bestimmen Sie jeweils den Zeitpunkt  $t_\varphi$  des Nulldurchgangs wie zuvor. Wiederholen Sie diese Messreihe einmal.

Tragen Sie in der Auswertung  $s(t_\varphi)$  auf Millimeterpapier auf und bestimmen Sie eine Ausgleichsgerade durch die Messpunkte. Bestimmen Sie aus der Geradensteigung  $\Delta s/\Delta t_\varphi$  mit Gl. (10) die Lichtgeschwindigkeit  $c_L$  in Luft. Schätzen Sie durch Verändern der Geradensteigung (in vernünftigen Grenzen!) den Fehler bei der Bestimmung von  $c_L$  ab. Bei Verwendung eines PCs für einen linearen Fit der Messdaten ist der beim Fit-Ergebnis angegebene Fehler der Steigung zu verwenden. Diskutieren Sie das Ergebnis im Vergleich mit dem Literaturwert von  $c_L$ . Ein eventueller Fehler im Verhältnis der Frequenzen  $\nu / \nu_1$  kann hierbei vernachlässigt werden.

### 5.2 Lichtgeschwindigkeit in Wasser

Schieben Sie den Lichtsender ganz an das rechte Ende der Schiene, so dass zwischen Sender und Sammellinse der mit Wasser gefüllte Metallzylinder (Wasserweg  $s = 1$  m) gestellt werden kann. Stellen Sie zunächst den Nulldurchgang der Spannung  $U_{II}$  ohne den Wasserzylinder ein. Die Einstellung des Oszilloskops ist hier:

CH I: 0,5 V/DIV; CH II: 0,1 V/DIV; TIME: 0,1  $\mu$ s/DIV.

Kontrollieren Sie auch hier durch Unterbrechung des Lichtstrahls, ob die Zeitachse dem Nullwert von  $U_{II}$  entspricht. Legen Sie den Nulldurchgang von  $U_{II}$  (rechter Teilstrahl) auf  $t_{\varphi 1} = - 4,0$  DIV.

Stellen Sie nun vorsichtig den Wasserzylinder auf die Schiene in den Lichtweg, ohne dass er den Lichtsender oder die Linse berührt. Bestimmen Sie  $t_{\varphi 2}$  sowie  $\Delta t_{\varphi} = t_{\varphi 2} - t_{\varphi 1}$ .

Wiederholen Sie den Versuch mit der Einstellung CH II: 50mV/DIV (Nullage kontrollieren!)

Bestimmen Sie in der Auswertung aus dem Mittelwert der Zeitdifferenzen  $\Delta t_{\varphi}$  (einschließlich Fehlerabschätzung) die Brechzahl  $n$  von Wasser für rotes Licht.

Anmerkung: Mit Gln. (2), (7) u. (10) folgt für die Differenz  $\Delta t$  der Laufzeiten des Lichts durch  $s = 1$  m Wasser bzw. Luft:

$$\Delta t = \frac{v_1}{v} \Delta t_{\varphi} = \frac{s}{c_L} (n - 1) \quad (11)$$

Vergleichen Sie die ermittelte Brechzahl mit Literaturdaten.

### 5.3 Brechzahl von Plexiglas und Glycerin

Es wird analog zum vorherigen Versuchsteil die Laufzeitdifferenz des Lichts ermittelt, welche durch einen  $s = 5$  cm langen in den Lichtstrahl gestellten Plexiglaszylinder bzw. einen mit Glycerin gefüllten Spiegelglasbehälter (Innenkantenlänge ebenfalls 5 cm) entsteht. Dazu ist der Lichtsender etwa auf die Marke 0,3 m zu stellen, zwischen Sender und Linse ein zunächst leerer Prismatisch. Benutzen Sie die Oszilloskop-Einstellungen:

CH I: 0,5 V/DIV; CH II: 0,1 V/DIV; TIME: 0,1  $\mu$ s/DIV. (Nullagenkontrolle!).

Messung mit Glaskörper:

Stellen Sie den Nulldurchgang von  $U_{II}$  auf  $t_{\varphi 1} = 0$  DIV. Bestimmen Sie  $t_{\varphi 2}$ , nachdem Sie den Plexiglaszylinder (mit den Endflächen senkrecht zum Lichtstrahl) auf den Prismatisch gestellt haben.

Wiederholen Sie den Versuch zweimal und notieren Sie geschätzte Ablesefehler von  $t_{\varphi}$ .

Berechnen Sie in der Auswertung aus dem Mittelwert  $\Delta t_{\varphi} = t_{\varphi 2} - t_{\varphi 1}$  (einschl. geschätztem Fehler) mit Gl. (11) die Brechzahl  $n$  des Glaskörpers. Vergleichen Sie das Ergebnis mit einem Literaturwert  $n$  für Plexiglas.

Messung mit Glycerinbehälter:

Stellen Sie zunächst ohne den Behälter wie zuvor den Nulldurchgang von  $U_{II}$  auf  $t_{\varphi 1} = 0$  DIV. Stellen Sie dann den leeren Behälter (mit seinen Flächen senkrecht zum Lichtstrahl) in den Lichtweg und prüfen Sie, ob der Nulldurchgang von  $U_{II}$  merklich verschoben ist. Dies sollte nicht der Fall sein. Schütten Sie danach langsam und vorsichtig das Glycerin in den Behälter, bis dieser etwas weniger als 1 cm unterhalb der Oberkante gefüllt ist. Bestimmen Sie  $t_{\varphi 2}$ .

Verfahren Sie in der Auswertung, wie bei der Messung mit dem Glaskörper und bestimmen Sie die Brechzahl von Glycerin. Schätzen Sie den Fehler für  $n$  aus dem Ablesefehler des Oszilloskops ab und vergleichen Sie das Messergebnis mit dem Literaturwert.

Literaturwerte (Kohlrausch; Praktische Physik Bd. 3):

$$\begin{aligned} n(\text{Wasser, H}_2\text{O}) &= 1,333 & (\lambda = 589 \text{ nm, } t = 20^\circ\text{C}) \\ n(\text{Plexiglas M222}) &= 1,491 & (\lambda = 589 \text{ nm, } t = 20^\circ\text{C}) \\ n(\text{Glycerin, C}_3\text{H}_8\text{O}_3) &= 1,455 & (\lambda = 589 \text{ nm, } t = 20^\circ\text{C}) \end{aligned}$$

### 6. Fragen zur Selbstkontrolle

- 1) Durch welche Größen sind *elektromagnetische Wellen* charakterisiert?
- 2) Welche Wellen gehören zum Spektrum der elektromagn. Wellen? In welcher Größenordnung liegen ihre jeweiligen Wellenlängen bzw. Frequenzen?
- 3) Was ist die *Phasengeschwindigkeit* einer Welle? Wie groß ist sie für sichtbares Licht im Vakuum, wie groß in optisch transparenter Materie?
- 4) Wie unterscheidet sich die Lichtgeschwindigkeit in Luft von der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum?
- 5) Wie ist der *Brechungsindex* eines Stoffes definiert? Von welchen Materialeigenschaften hängt er ab?
- 6) Welche Messmethoden sind geeignet, die Lichtgeschwindigkeit absolut zu bestimmen, welche erlauben eine Relativbestimmung von  $c$  in verschiedenen Medien? Nennen Sie Beispiele!
- 7) Was bedeutet Dispersion des Lichts?
- 8) Beschreiben Sie das im Versuch benutzte Modulationsverfahren zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit.