

Lichtgeschwindigkeit (Apparatur U. Ihlefeldt)

An das Workshop erinnere ich mich noch (lang ist's her): Eine Gruppe von Physiklehrern versucht, mit LötKolben und Seitenschneider ausgestattet, unter der Anleitung ihres Kollegen U. Ihlefeldt¹ die Elektronik für eine Apparatur zusammenzubauen, mit der man die Lichtgeschwindigkeit im Labor messen kann. Ich bin dabei – und am Ende der Veranstaltung glücklich, zwei funktionierende Schaltungen mit nach Hause nehmen zu können.

Die Elektronik bestand aus einem Lichtsender und einem Lichtempfänger, mit denen man unter Zuhilfenahme eines schnellen Oszilloskops die Zeit messen konnte, die das Licht zum Zurücklegen einer gegebenen Strecke benötigt. Zur Messanordnung gehörten außerdem ein (halbdurchlässiger) Spiegel, ein Reflektor und eine Linse. Meine Anordnung habe ich später Schülern und Schülerinnen als Praktikumsversuch vorgesetzt (Aufbau und Versuchsbeschreibung siehe Anhang A). Die Aufgabe bestand im Wesentlichen darin, Optik und Elektronik so zu justieren bzw. einzustellen, dass das Licht den richtigen Weg nahm und am Ende des Weges mit ausreichender Intensität nachgewiesen werden konnte. Unsere Nachwuchswissenschaftler(innen) erhielten auch recht gute Werte, nur waren diese in allen Fällen einen Tick größer als die 300000 km/s, die ihnen aus dem Physikbuch bekannt waren. Meine eigene Messung (Protokoll im Anhang B) machte da keine Ausnahme. Sie ergab $c = (3,23 \pm 0,16) \cdot 10^8$ m/s, also eine Abweichung vom Literaturwert außerhalb des Messfehlers (von etwa 5%).

Eigentlich sollte es eher auf einen möglichst kleinen Messfehler ankommen als auf den genauen Wert. Aber im Fall der Lichtgeschwindigkeit möchte man doch die populäre „3“ gefolgt von einer oder zwei Nullen im Ergebnis sehen. Also habe ich die Apparatur kürzlich nochmals aufgebaut und versucht, der Abweichung vom Literaturwert² $c = 3,00 \cdot 10^8$ m/s auf den Grund zu gehen.

Der neue Aufbau wurde gegenüber dem bisherigen geringfügig verbessert: Zunächst ersetzte ich die einfache Sammellinse, die den Lichtstrahl bündelte, durch ein lichtstarkes (altes) Epidiaskop-Objektiv. Dann beschränkte ich mich auf kürzere Laufwege, damit das reflektierte Licht mit größerer Intensität als vorher auf die Fotodiode des Empfängers traf. Außerdem wurde das Strahlenbündel während der Messung bei jeder Veränderung des Laufwegs wieder parallel gemacht (durch Verschieben des Epidiaskop-Objektivs). Abbildung 1 ist ein Foto der Anordnung von Sender, Empfänger, halbdurchlässigem Spiegel und Epidiaskop-Objektiv.



Abbildung 1 Messung der Lichtgeschwindigkeit nach der Laufzeitmethode. Anordnung von Sender, Empfänger, halbdurchlässigem Spiegel und Epidiaskop-Objektiv (siehe Text). Sender und Empfänger wurden von U. Ihlefeldt¹ entworfen und unter seiner Anleitung zusammengesetzt. Die Laufstrecke schließt sich links an die optische Bank an. Der Reflektor an dessen Ende befindet sich außerhalb des Bildes.

Schließlich wurden Sender und Empfänger, falls nötig, nachjustiert. Das alles führte dazu, dass das reflektierte Licht am Empfänger, unabhängig von der Entfernung des Reflektors, mit nahezu konstanter Intensität eintraf. Infolgedessen waren die Amplituden der Signale auf dem Oszilloskopschirm bei kurzem und langem Laufweg des Lichts (L_1 bzw. L_2 in Abbildung 1 des Anhangs) fast gleich. Deren Phasenverschiebung, abgelesen beispielsweise am Nulldurchgang der beiden Signale, konnte so mit weniger Unsicherheit als früher bestimmt werden.

Nach den genannten Modifikationen an der Apparatur und an der Ausführung der Messung hatte sich der Messwert den $3,0 \cdot 10^8$ Meter pro Sekunde deutlich angenähert. Abbildungen 2 zeigt das Ergebnis einer Messung, bei der die Justierung der Optik offenbar noch nicht perfekt war, die aber den Literaturwert in den Fehlergrenzen einschließt. Abbildung 3 zeigt die Daten einer zweiten

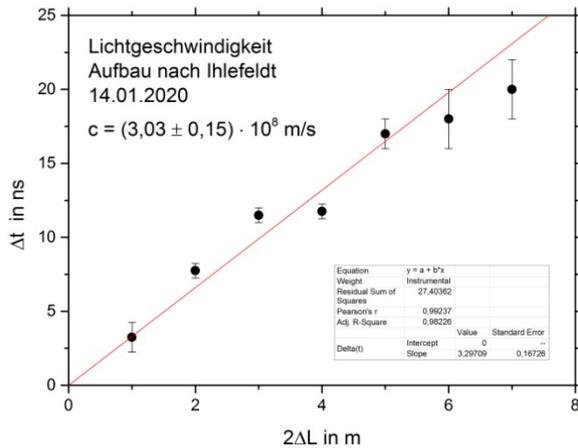


Abbildung 2 Laufzeit Δt des Lichts als Funktion des zurückgelegten Weges $2\Delta L$

Messreihe, aus der man für die Lichtgeschwindigkeit sogar genau $c = (3,00 \pm 0,02) \cdot 10^8$ m/s ableitet. Der glatte Wert ist natürlich purer Zufall. Denn der Messfehler lässt sich auch bei wohlwollender Abschätzung nicht unter etwa 1% drücken: Die zweite Null ist, wie angedeutet, auf ± 2 (oder sogar ± 3) Einheiten unsicher.

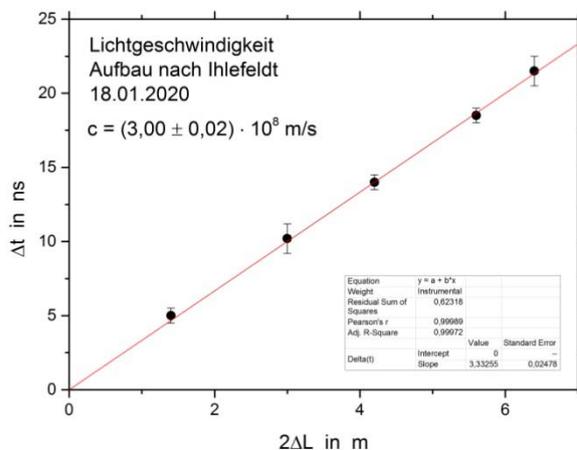


Abbildung 3 dasselbe wie in Abbildung 2: Laufzeit Δt des Lichts als Funktion des zurückgelegten Weges $2\Delta L$ – Wiederholung der Messung

Die Werte für die Lichtgeschwindigkeit, die hier genannt wurden, sind mit großer Sicherheit auf die beschriebenen Verbesserungen an der Apparatur zurückzuführen. Nicht geklärt ist allerdings, warum bei den ursprünglichen Messungen (Praktikumsversuch) die Werte für c systematisch zu groß waren. Obwohl es eigentlich meine Absicht war, das herauszufinden – ich glaube nicht, dass sich das noch lohnt.

Anmerkungen

¹ U. Ihlefeldt: Anleitung zum Bau der Elektronik (Sender und Empfänger) zur Messung der Lichtgeschwindigkeit im Physikunterricht der Schule. Handouts, in einem Workshop verteilt.

² Der genaue Wert der Lichtgeschwindigkeit ist $c = 299792458$ m/s. Im *SI*-System wird dieser Wert als exakt betrachtet, also nicht (infolge Ausgleichsrechnungen) mit einer Unsicherheit versehen.

Anhang A

Versuchsanleitung Versuch „Lichtgeschwindigkeit (O01)“

Anhang B

Messprotokoll zum Versuch „Lichtgeschwindigkeit (O01)“

... auf den nächsten Seiten

Aufgabe : Messung der Lichtgeschwindigkeit nach der Phasenverschiebungsmethode
Zubehör : Lichtsender und -empfänger, 100 MHz-Oszilloskop, zwei Netzgeräte 15 V, Linse ($f = 30$ cm), Reflektor, Glasplatte, Karton, optische Bank mit Reitern, Bandmaß, Messlineal

Grundlagen

Bei der Messung der Lichtgeschwindigkeit nach der Phasenverschiebungsmethode durchläuft das Licht einer helligkeitsmodulierten (punktförmigen) Lichtquelle eine Strecke bekannter Länge und wird danach in einem Fotodetektor registriert, der ein helligkeitsproportionales Ausgangssignal (als Funktion der Zeit) liefert.

Als Lichtquelle dient im vorliegenden Experiment eine schnelle Leuchtdiode (LED). Sie wird von einem Oszillator angesteuert, der ein Rechteck-Signal der Frequenz $f = 3,3$ MHz mit einem Tastverhältnis von etwa 1,5:1 erzeugt. Das mit dieser Schwingung modulierte Licht wird mit Hilfe einer Linse gebündelt und trifft nach einer Strecke von 2 bis 10 Metern auf einen „Katzenaugen“-Reflektor. Dieser wirft es zurück in Richtung Sender. Etwa 15 cm vor diesem befindet sich eine unter 45° zur Achse Sender-Reflektor geneigte Glasplatte, an der es auf den seitlich stehenden Foto-Empfänger umgelenkt wird (Abb. 1).

Der Empfänger verstärkt das Modulationssignal und stößt damit einen auf 3,3 MHz abgestimmten Schwingkreis zu erzwungenen sinusförmigen Schwingungen an. Da das Modulationssignal wegen der Laufzeit des Lichtes phasenverschoben ist, hinkt auch die Schwingung des Schwingkreises dem Sendersignal hinterher. Triggert man daher ein (schnelles) Oszilloskop mit dem Signal des Senders und beobachtet gleichzeitig das Signal des Empfänger-Schwingkreises, dann ist dieses auf dem Bildschirm des Oszilloskops um die Laufzeit t gegenüber der Zeit-Nullmarke verschoben.

Als Schwingkreis dient das Stück Koaxialkabel zwischen Empfängerausgang und Oszilloskop-Eingang. Es ist in der Länge so bemessen, dass seine Kapazität, zusammen mit einer am Ende eingebauten HF-Drossel, einen LC-Schwingkreis mit der genannten Resonanzfrequenz darstellt.

Um die Totzeit der Elektronik zu kompensieren, lässt man das Licht zunächst von einem nahen Reflektor (Entfernung Sender-Empfänger L_1) zurückkehren und verschiebt das Bild des Empfängersignals elektronisch auf dem Oszilloskopschirm so, dass einer der Nulldurchgänge der Sinusschwingung mit der Bildschirm-Mitte (oder einer anderen Markierung) zusammenfällt. Die zeitliche Verschiebung dieses Nulldurchgangs gegenüber dem Sendersignal sei t_1 , sie braucht nicht bekannt zu sein. Danach stellt man durch Verschieben des Reflektors eine größere Entfernung $L_2 = L_1 + \Delta L$ zwischen Sender und Empfänger ein. Dadurch wandert der oben beobachtete Nulldurchgang auf dem Oszilloskopschirm nach rechts zur Zeit $t_2 = t_1 + \Delta t$, wobei Δt bei kalibrierter Eichung der x -Ablenkung direkt abgelesen werden kann. Die gesuchte Lichtgeschwindigkeit ist dann $c = 2(L_2 - L_1)/(t_2 - t_1) = 2\Delta L/\Delta t$ (Der Faktor 2 rührt daher, dass das Licht die Strecken L_2 und L_1 hin- und zurückläuft). Da Δt von der Größenordnung Nanosekunden (10^{-9} s) ist, benötigt man ein schnelles Oszilloskop (Bandbreite ca. 100 Mhz), dessen Zeitablenkung genau geeicht sein muss.

Messanordnung

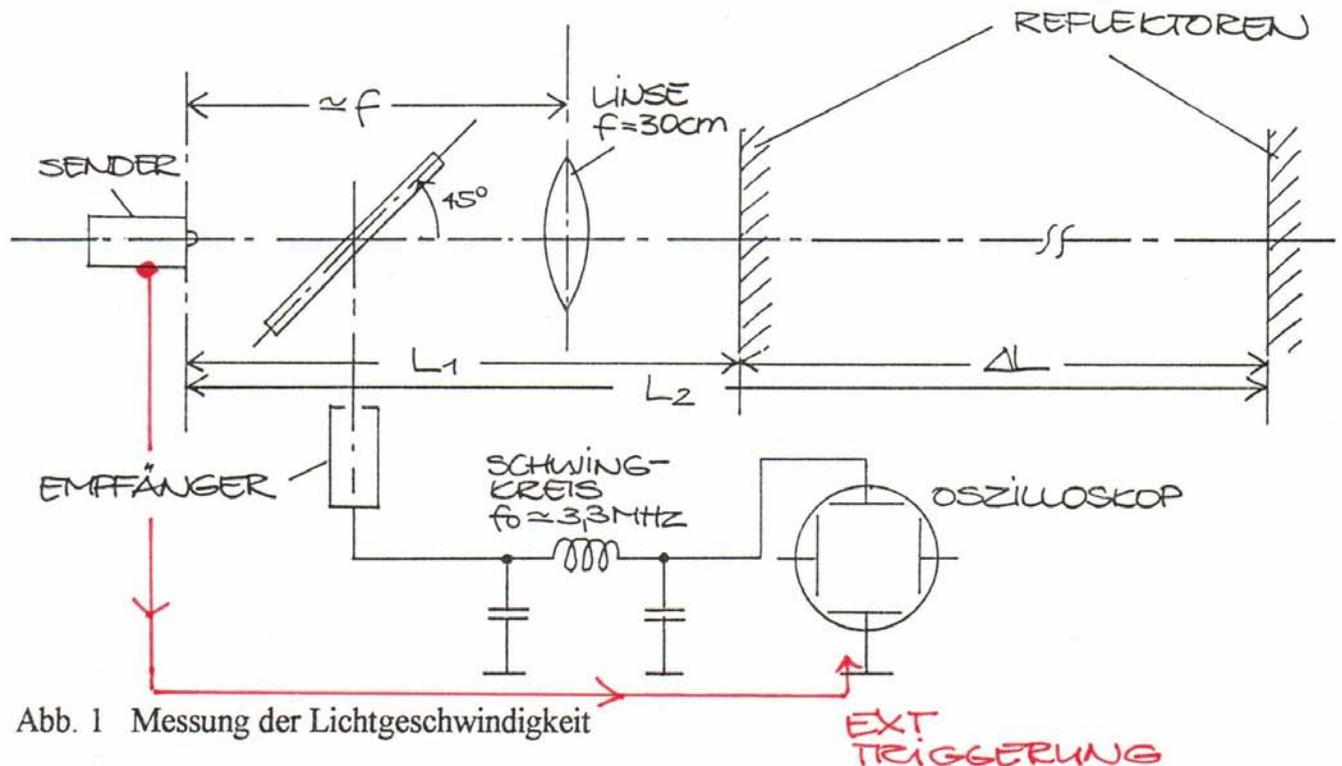


Abb. 1 Messung der Lichtgeschwindigkeit

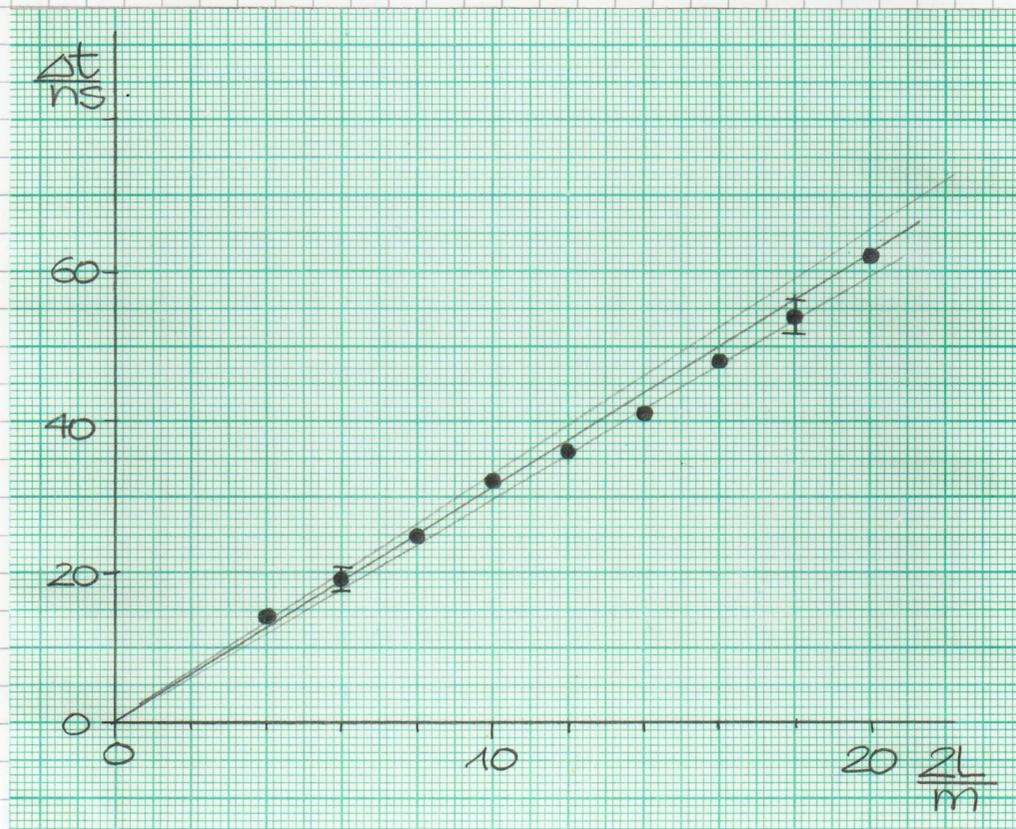
Messung und Auswertung

1. Überprüfe die Spannungen der Netzgeräte (für den Sender werden 8 V, für den Empfänger werden 16 V benötigt) und ob Sender und Empfänger polungsrichtig angeschlossen sind.
2. Stelle am Oszilloskop die Y-Verstärkung auf etwa 500 mV/Teilung und die Zeitablenkung auf 50 ns/Teilung 10fach gedehnt. Achte darauf, dass die Feineinstellung der Zeitablenkung auf „Kalibriert“ steht!
3. Überprüfe die Justierung der Anlage. Der Abstand Linse-Sendediode sollte ca. 30 cm betragen, so dass der Reflektor gut ausgeleuchtet wird. Der Reflektor muss senkrecht zur Strahlachse ausgerichtet werden, damit der Strahl mit ausreichender Intensität auf die unter 45° stehende Glasplatte trifft und von dieser auf den Empfänger umgeleitet wird. Der Strahlfleck sollte am Ort der Empfängerdiode nicht viel größer sein als die wirksame Fläche dieser Diode, also etwa so groß wie die Lochblende im Empfängergehäuse (hinter dieser Blende befindet sich die Photodiode BPW43).
4. Wähle $L_1 \approx 1\text{ m}$ und miss für Werte $\Delta L = 2\text{ m}, 3\text{ m}, \dots 10\text{ m}$ die Zeiten Δt , die das Licht braucht, um die Strecke $2\Delta L$ zu durchlaufen. Schätze für eine Entfernung $\Delta L \approx 5\text{ m}$ den Fehler von Δt ab, indem du den Reflektor geringfügig hin- und herdrehst und die dadurch verursachte Verschiebung des Nulldurchgangs des Schwingkreis-Signals beobachtest. Woher könnte diese Verschiebung herrühren?
5. Trage $2\Delta L$ als Funktion von Δt auf, lege eine Ausgleichsgerade durch die Messpunkte und bestimme die Steigung dieser Geraden einschließlich Fehler. Diese Steigung ist gleich der gesuchten Lichtgeschwindigkeit.

001 LICHTGESCHWINDIGKEIT

Einstellungen Oszilloskop
Y-Verstärkung 500mV =
Zeitablenkung 50ns/100ns/200ns x 10 ↓

$\frac{2L}{m}$	$\frac{\Delta t}{ns}$
4	14 ± 1
6	19 ± 1
8	25 ± 1
10	32 ± 1
12	36 ± 2
14	41 ± 2
16	48 ± 2
18	54 ± 2
20	62 ± 2



$\Delta t = \frac{1}{c} 2L$; Steigung k ist daher
gleich $1/c$

$$k = \frac{(62 \pm 3) \text{ ns}}{20 \text{ m}} = (3,1 \pm 0,15) \frac{\text{ns}}{\text{m}}$$

Damit

$$\underline{\underline{c = (3,23 \pm 0,16) \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}}$$