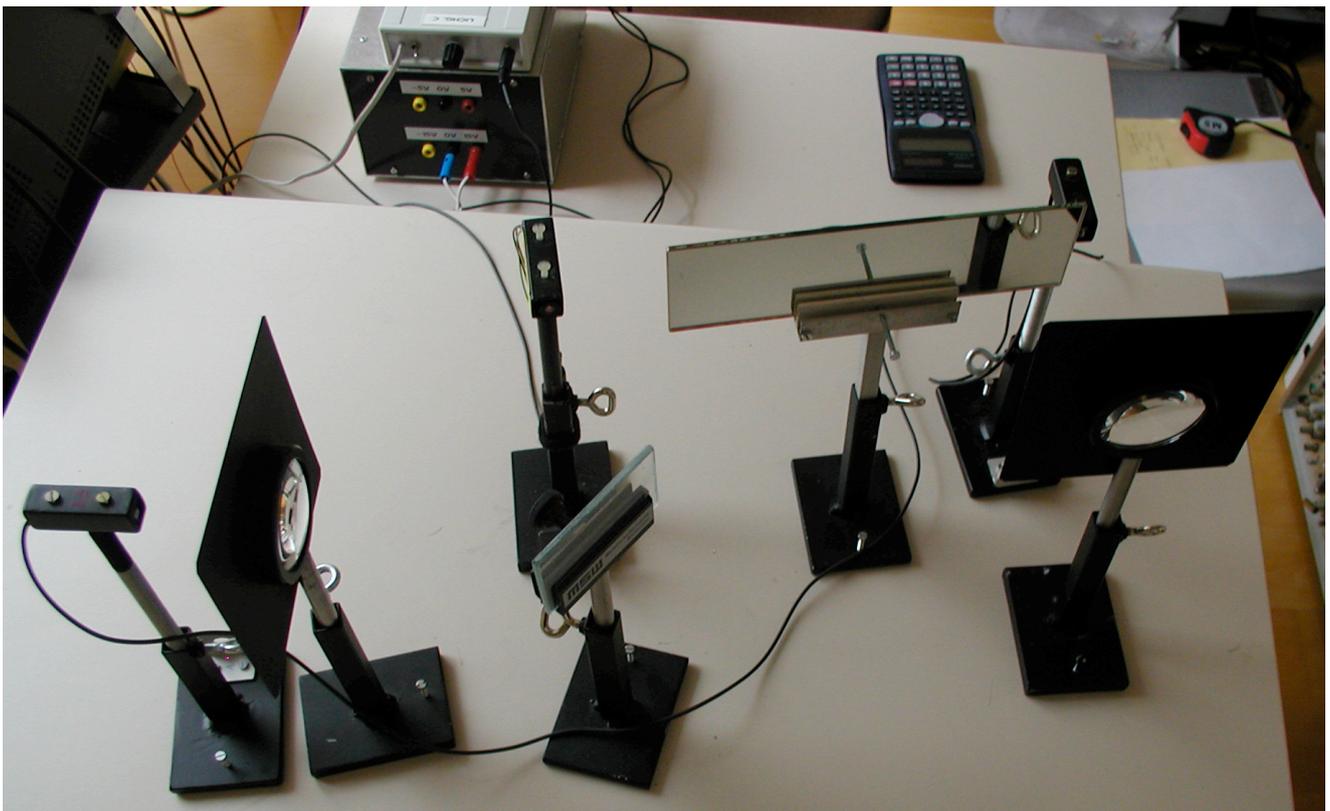


Die Messung der Lichtgeschwindigkeit c

Dr. Franz Raemy

8.8.2005



1 Einführung

Die Messung der Lichtgeschwindigkeit hat eine lange Geschichte. Es gibt verschiedene Methoden, die zur Messung der Lichtgeschwindigkeit herangezogen werden können. Ole Römer (1675) bestimmte die Lichtgeschwindigkeit aus der Differenz der Zeit, die Licht von einem Jupitermond zur Erde braucht, wenn sich die Erde näher oder entfernter vom Jupitermond befindet. Armand Fizeau (1819-1896) verwendet die Zahnradmethode (1845) und einen langen Lichtweg zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit. Jean Bernard Leon Foucault (1819-1868) misst die Lichtgeschwindigkeit mit der Drehspiegelmethode. Diese Versuche sind in der Literatur umfassend beschrieben.

Hier soll eine einfache, nicht unbedingt sehr genaue aber für den Studenten verständliche und moderne Methode aufgebaut werden. Ziel dieser Variante des Versuchs ist es, das Experiment in sehr kurzer Zeit aufbauen und eine Messung durchführen zu können.

Die Methode der Messung ist denkbar einfach. Der Lichtdetektor BPW34 Nr. 1 wird nach dem Strahlteiler in den Hauptstrahl gestellt. Der Lichtdetektor BPW34 Nr. 2 wird im gleichen Abstand zum Strahlteiler in den reflektierten Strahl gestellt. Die Signale werden mittels dem $100\text{ k}\Omega$ Potentiometer des ersten Verstärkers, gemäss Figur 4, zeitlich in Übereinstimmung gebracht. Anschliessend wird der Detektor in den Hauptstrahl hinter die Linse gestellt, wo er das Lichtsignal nach dem Durchlauf der mehrfachen Strecke zwischen den Spiegeln erfasst. Wir messen den Zeitunterschied, den modulierte Laserlicht braucht, um die totale Wegstrecke zu durchlaufen. Das Oszilloskop wird vom Referenzsignal des Detektors BPW34 Nr. 2 getriggert. Aus den beiden Positionen der Maxima der Lichtsensordesignale, kann die Zeit bestimmt werden, die das Laserlicht für die totale Wegstrecke braucht. Daraus berechnet sich dann die Lichtgeschwindigkeit.

2 Komponenten zum Versuchsaufbau

Zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit werden die folgenden Komponenten eingesetzt:

- 1 Durch Impuls am Steuereingang modulierbares Lasermodul LAS67/01-L (670 nm) oder LAS63/01-L (630 nm)
- 2 Spannungsgerät 15 V
- 3 Impulsgenerator und Signalverstärker
- 4 Oszillograph: Hameg 60 MHz Oscilloscope HM605
- 5 Zwei Spiegel (15 cm x 5 cm)
- 6 Zwei Sammellinsen
- 7 Strahlteiler (Fensterglas)
- 8 Zwei Lichtsensoren BPW34

3 Versuchsaufbau

Die folgende Abbildung 1 zeigt das Messprinzip im Überblick.

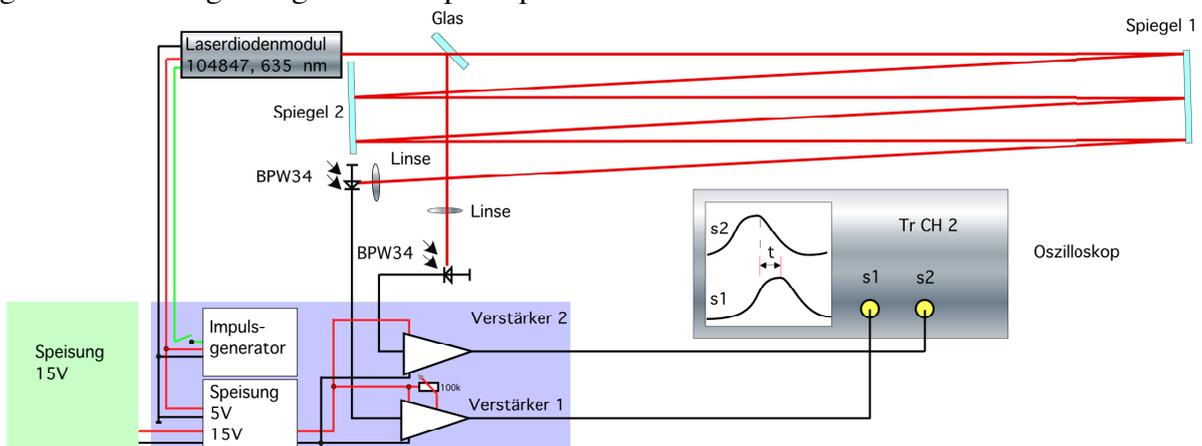


Abbildung 1 Messprinzip

4 Der Impulsgenerator für die Modulation des Laserlichtes

Der Impulsgenerator der Abbildung 2 besteht im Wesentlichen aus einem CD4066, einem Vierfach Ein-Aus-Schalter. Der Ausgang wird am Transistor BC 550 invertiert. Das in Abbildung 3 gezeigte Signal moduliert das Laserlicht mit einer Frequenz von ca. 80 kHz.

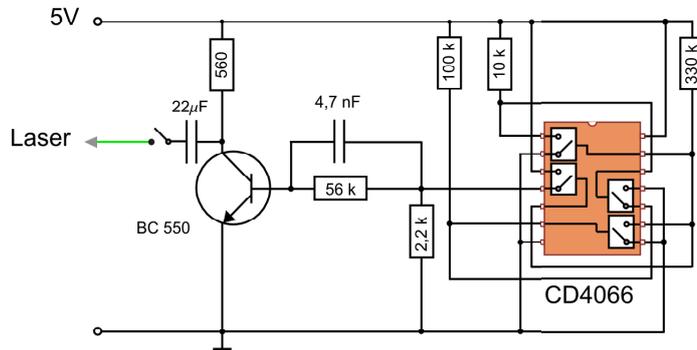


Abbildung 2 Der Impulsgenerator mit CD 4066

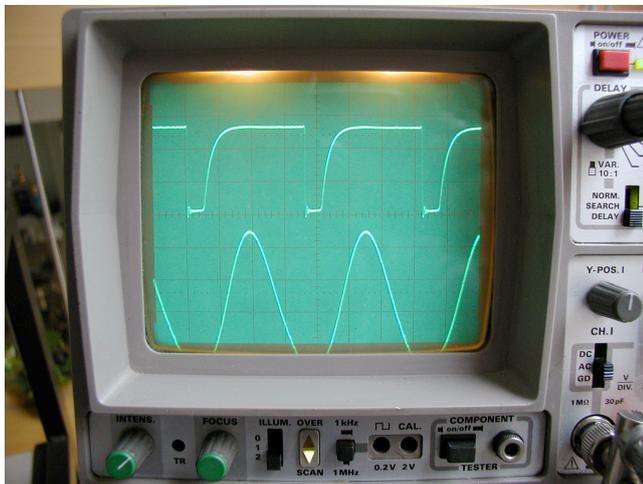


Abbildung 3 Kanal 1 (oben) Signalverlauf des Impulsgenerators ($2V / Div$; $2 \mu s / Div$)
Kanal 2 (unten) das Signal der BPW34 Nr.2

5 Signalverstärker für die Lichtsensoren BPW34

Die Elektronik für die Verstärkung der Signale aus den Lichtdetektoren BPW34 sind der Abbildung 4 zu entnehmen. Das Lichtsignal wird mit einer Transistorverstärkerstufe verstärkt. Um beide Signale nach 0 m in Übereinstimmung zu bringen, kann mit dem $100 \text{ k}\Omega$ Potentiometer des ersten Verstärkers eine Phasenkorrektur durchgeführt werden.

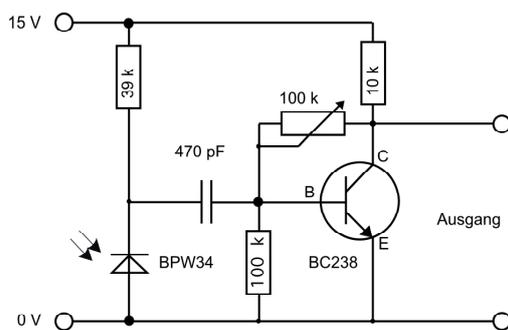
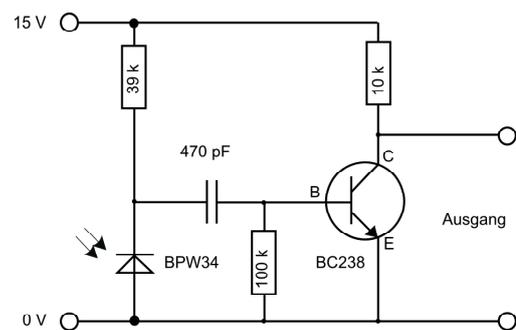


Abbildung 4 Verstärker 1
(erlaubt die Phaseneinstellung)



Verstärker 2

Die Ausgänge der beiden Signalverstärker werden mit den Kanälen 1 und 2 des Oszillographen verbunden. Die Empfindlichkeiten werden auf maximale Grösse eingestellt, so dass die Maxima der Signale der beiden Kanäle (bei eingeschaltetem Impulsgenerator!) auf dem Schirm gut darstellbar sind. Die Grundeinstellungen des Oszillographen sind etwa die folgenden:

Time:	$\leq 0,2 \mu s / Div$	Trigger:	DC PEAK des zweiten Kanals
Kanal 1:	AC: $10 mV / Div - 50 mV / Div$	Kanal 2:	AC: $10 mV / Div - 50 mV / Div$
Delay:	$1 \mu s$		

6 Beobachtung

Die Positionierung der BPW34 Lichtdiode muss im Brennpunkt der Linse erfolgen, so dass kein Streulicht sichtbar ist.

7 Durchführung des Versuchs

Weil die Lichtintensität durch die Modulation des Laserlichtes durch den Frequenzgenerator abnimmt, wird die Strahljustierung ohne Modulation durchgeführt. Das Lasermodul und die beiden parallel aufgestellten Spiegel werden so aufgestellt, dass das Laserlicht nach mehrmaliger Reflexion gebündelt durch die Sammellinse auf die Lichtdiode BPW 34 Nr. 1 fällt. Der Strahlteiler, eine Glasscheibe und eine gelochte Glimmerscheibe, teilt den Strahl auf, so dass im rechten Winkel zum Hauptstrahl nach Bündelung des Laserlichtes durch eine Sammellinse ein zweiter Sensor BPW 34 Nr. 2 angeordnet werden kann, der unter der Bedingung, dass der Signalgenerator eingeschaltet ist, ein Referenzsignal zum Zeitpunkt $t=0$ abgibt, mit dem auch der Oszillograph getriggert wird.

Die Lichtdiode BPW34 (Nr. 1) wird zuerst direkt in den Hauptstrahl des Lasers nach dem Strahlteiler gestellt, während die Lichtdiode Nr. 2 stets im reflektierten Strahl steht. Die Signalmaxima werden mit dem Potentiometer des ersten Verstärkers zeitlich phasengleich eingestellt.

Anschliessend wird der Lichtsensor BPW34 Nr. 1 in den mehrfach reflektierten und durch die Linse gebündelten Strahl positioniert. Das ergibt ein ähnliches Signal wie das Referenzsignal, aber es ist zeitlich auf dem Bildschirm des Oszillographen nach rechts verschoben. Aus der Zeitdifferenz Δt und dem bekannten totalen Weg wird die Lichtgeschwindigkeit c berechnet.

8 Die Messung der Lichtgeschwindigkeit c

Die Abbildung 5 zeigt links das Signal des Lichtsensors BPW 34 Nr. 2 und rechts das Signal der Sonde BPW 34 Nr. 1 nach dem Durchlauf der Maximaldistanz. Die Zeit pro Einheit ist $0,05 \mu s$. Das Maximum der unteren Kurve s_1 nach 51,0 m ist bezüglich des Signals s_2 nach 0 m um $0,17 \mu s$ nach rechts verschoben.

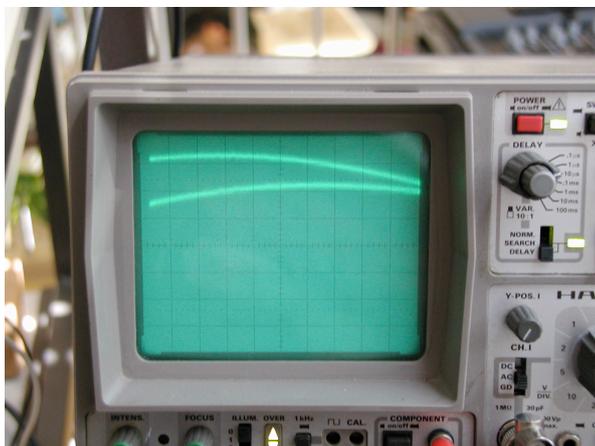


Abbildung 5 Die Sensorsignale nach 0 m und $6 \times 8,5 \text{ m}$ ($0,05 \mu s / Div$)

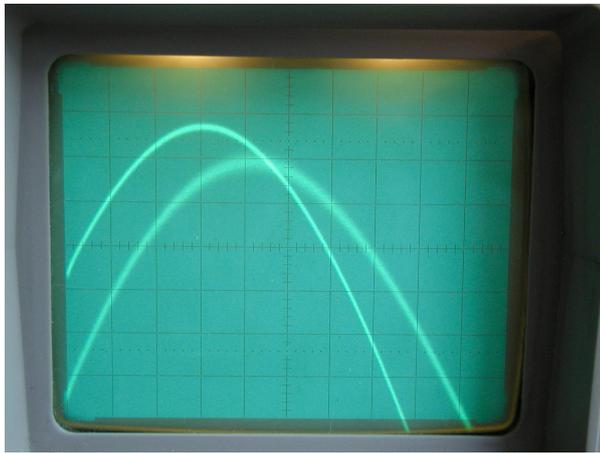


Abbildung 6 Die Sensorsignale nach 0m und 8 x 9,0 m ($0,2 \mu\text{s} / \text{Div}$)

9 Die Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit

Das Maximum des Sensors 1 verschiebt sich bei der Einstellung des Oszilloskops auf $0,05 \frac{\mu\text{s}}{\text{Div}}$ (Abbildung 5) um $t \pm \Delta t = (3,4 \cdot \pm 0,2) 0,05 \mu\text{s}$. Das ist die Zeit, welche der Laserstrahl braucht, um die Distanz von $d \pm \Delta d = 6 \cdot (8,50 \pm 0,01) \text{ m} = (51,00 \pm 0,06) \text{ m}$ zurückzulegen. Die Lichtgeschwindigkeit ergibt sich daraus wie folgt:

$$c \pm \Delta c = \frac{d \pm \Delta d}{t \pm \Delta t} = \frac{51,00 \text{ m} \pm 0,06 \text{ m}}{0,17 \cdot 10^{-6} \text{ s} \pm 0,01 \cdot 10^{-6} \text{ s}} = (3,0 \pm 0,2) \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Der relative Fehler der Lichtgeschwindigkeit beträgt: $\frac{\Delta c}{c} = \pm 6\%$. Der relative Fehler der Wegmessung beträgt $\frac{\Delta d}{d} = \pm \frac{0,06}{51,00} = \pm 0,11\%$, während der relative Fehler der Zeitmessung $\frac{\Delta t}{t} = \pm 5,9\%$ beträgt.

Aus der Abbildung 6 folgt bei einer Zeitskala von $0,2 \frac{\mu\text{s}}{\text{Div}}$, dass sich das Maximum um $t \pm \Delta t = (1,2 \cdot \pm 0,1) \cdot 0,2 \mu\text{s}$ verschiebt. Der Weg war $d \pm \Delta d = 8 \cdot (9,0 \pm 0,01) \text{ m} = (72,00 \pm 0,08) \text{ m}$. Daraus ergibt sich die Lichtgeschwindigkeit:

$$c \pm \Delta c = \frac{d \pm \Delta d}{t \pm \Delta t} = \frac{72,00 \text{ m} \pm 0,08 \text{ m}}{0,24 \cdot 10^{-6} \text{ s} \pm 0,01 \cdot 10^{-6} \text{ s}} = (3,0 \pm 0,1) \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

10 Schlussbemerkung

Das Ziel des einfachen Aufbaus des Experimentes ist erreicht worden. Einzig die Sensorelektronik und der Impulsgenerator mussten neu entwickelt werden. Es ergeben sich relativ einfache Schaltungen, die zu einem kleinen Preis aufgebaut werden können.

Die notwendigen Dimensionen für den experimentellen Aufbau beschränken sich auf 9 m Laborlänge. Die Präzision insbesondere der Zeitmessung ist eher gering. Dennoch kann die richtige Grössenordnung der Lichtgeschwindigkeit bestimmt werden, was für den Ausbildungszweck der Studenten genügt und dennoch zu einem vertieften Verständnis der physikalischen Grösse c beiträgt.

Die Geschichte der Lichtgeschwindigkeit endet 1983 mit der Festlegung durch die 17. Generalversammlung für Masse und Gewichte zu $c = 299'792'458 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ (im Vakuum). Gleichzeitig wurde der Meter neu definiert und zwar über die Lichtgeschwindigkeit, als die Strecke, die Licht im Vakuum in $1 / 299792458 \text{ s}$ durchläuft. Grundlage waren die neuen Messungen um 1973 bei denen mit Laser und Atomuhren gearbeitet wurde.