

Experimente zur Bestimmung der Licht- und Schallgeschwindigkeit

Eine Arbeit von Andreas Fried, Thomas Horn, Sascha Motazedı und Tom Trop

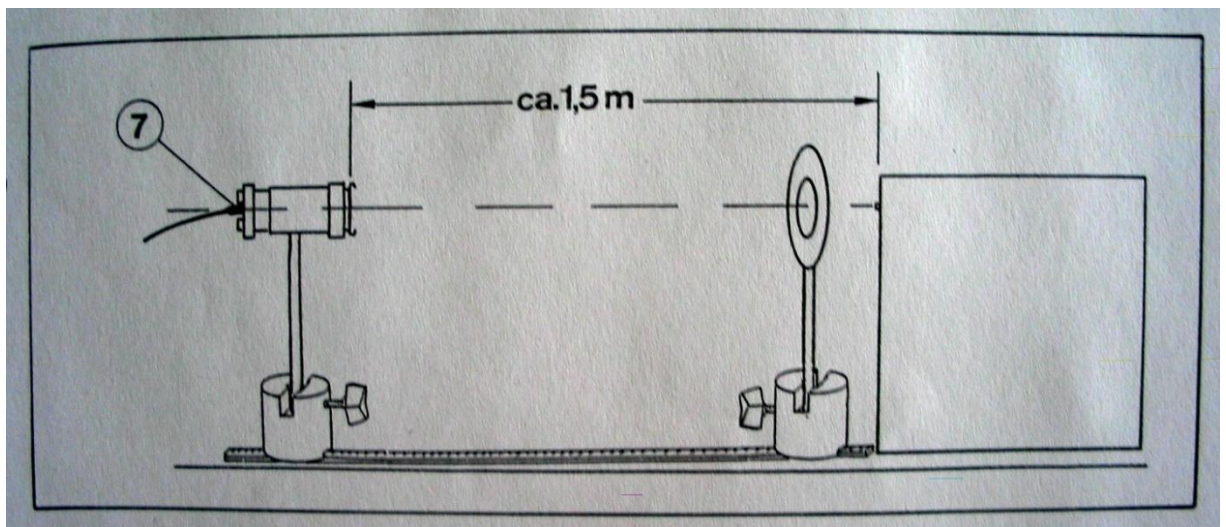
Messung der Lichtgeschwindigkeit bei kurzen Messstrecken	2
Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit in Luft	2
Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit in Wasser	5
Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit in Plexiglas	6
Experiment zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit	7
Messung der Lichtgeschwindigkeit mit der Drehspiegelmethode nach Foucault und Michelson	8

Messung der Lichtgeschwindigkeit bei kurzen Messstrecken

Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit in Luft

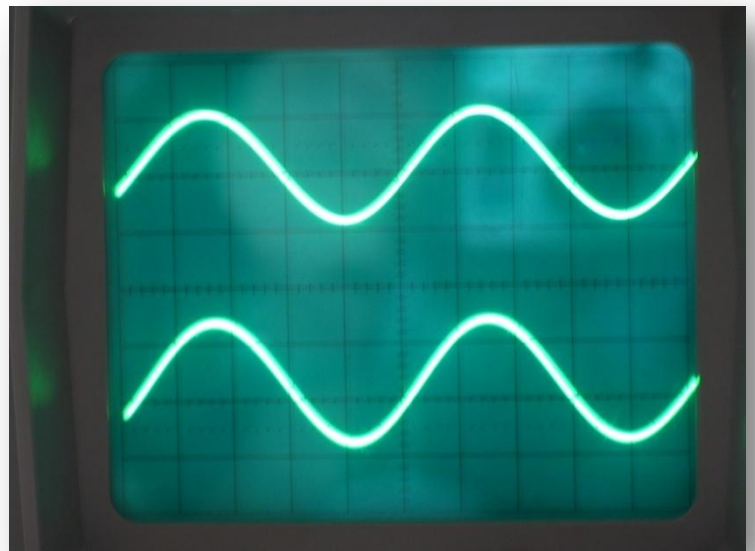
Geräte: Lichtsender mit Kondensator, Empfänger, 3 abgeschirmte Kabel, Oszilloskop, Linse

Aufbau: Der Lichtsender wird an den Empfänger angeschlossen, auf die Fotozelle des Empfängers justiert und durch eine Linse fokussiert. Das Sendesignal und Empfangssignal werden mithilfe des Oszilloskops dargestellt.

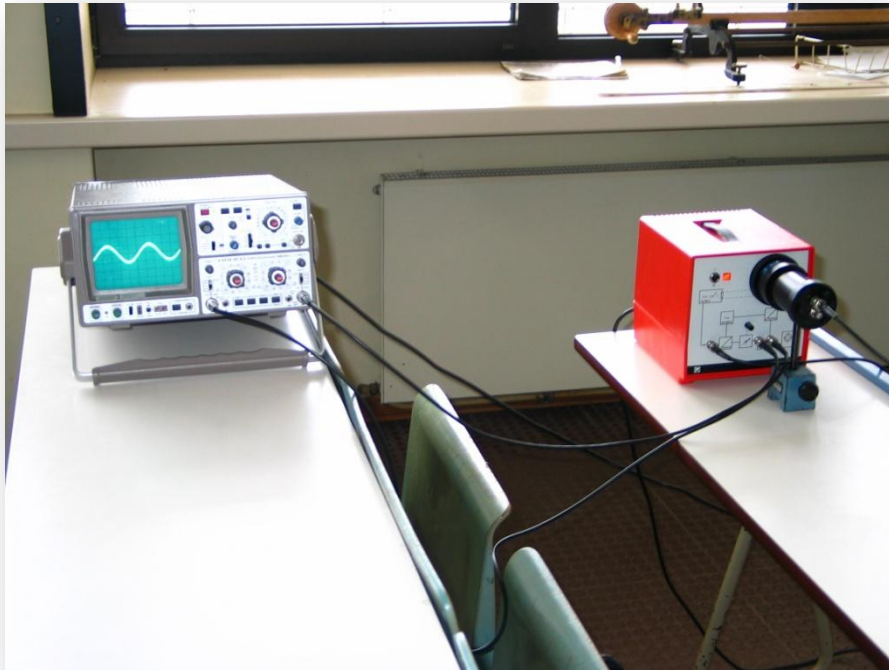


Durchführung:

Zunächst wird eine Nulljustierung vorgenommen indem der Lichtsender in sehr geringen Abstand vom Empfänger aufgestellt wird. Nun wird die Phase entweder am Oszilloskop oder am Empfänger direkt so verschoben, dass Sender und Empfängersignal in Phase sind.

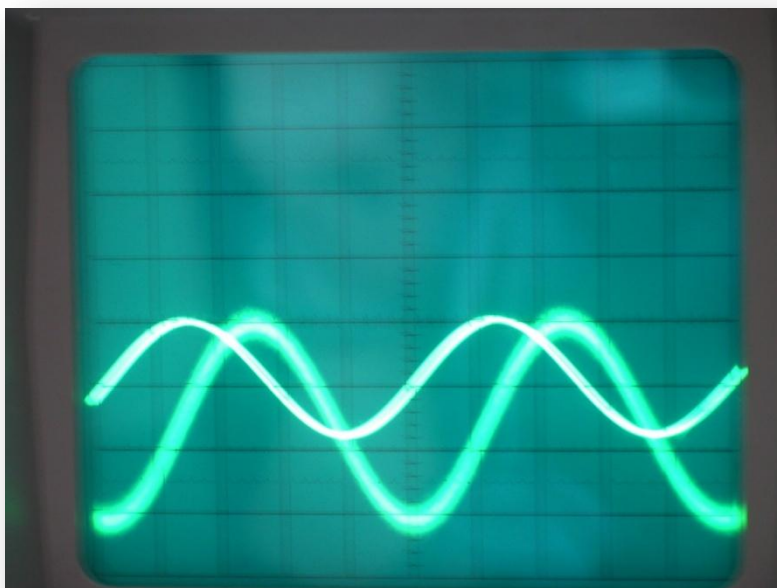


Sender und Empfänger sind in Phase



Aufbau zur Nulljustierung

Wird nun der Lichtsender vom Empfänger entfernt, so ist eine Phasenverschiebung zwischen Sender und Empfänger festzustellen:



Phasenverschiebung zwischen Sender und Empfänger

Ergebnis:

Absstand Sender – Empfänger = 1,06m

$\lambda_{\text{Oszi}} = 4,8\text{cm}$

Verschiebung am Osz. : $\varphi_{\text{Oszi}} = 1,05\text{cm}$

Frequenz : $f = 60\text{MHz}$

$$\Delta\varphi = \frac{\varphi_{\text{Oszi}}}{\lambda_{\text{Oszi}}} \cdot 2\pi$$

$$\lambda = 1 \cdot \frac{2\pi}{\Delta\varphi}$$

$$c = \lambda \cdot f \Rightarrow c = \frac{1 \cdot f}{\frac{\varphi_{\text{Oszi}}}{\lambda_{\text{Oszi}}}}$$

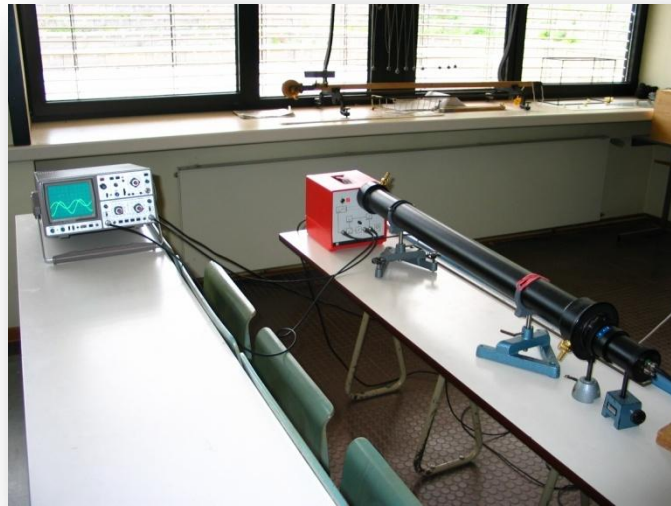
$$\underline{\underline{c_{\text{Luft}} = 2,907 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}}$$

Die gemessene Lichtgeschwindigkeit beträgt $2,907 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ und ist somit bei einem Fehler $\sim 3\%$ gegenüber dem Literaturwert von 299792458 m/s ein sehr gutes Ergebnis.

Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit in Wasser

Durchführung/Aufbau:

Zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit wird zwischen Sender und Empfänger ein ungefähr 1m langes mit Wasser gefülltes Rohr gestellt und anschließend die Phasenverschiebung am Oszilloskop abgelesen.



Aufbau zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit in Wasser

Ergebnis:

$$l = 1,06\text{m}$$

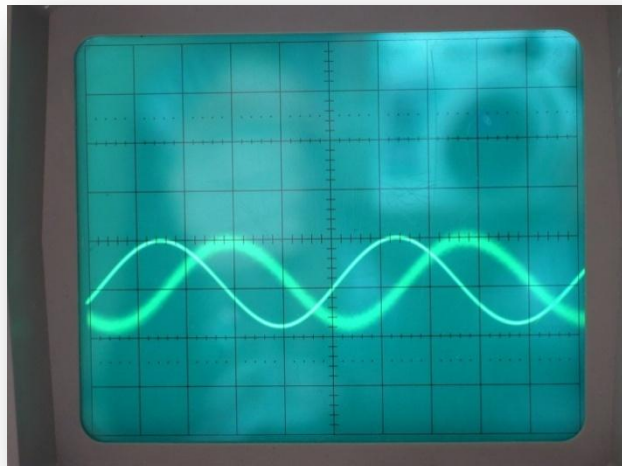
$$\lambda_{\text{Osz}} = 4,8\text{cm}$$

$$\varphi_{\text{OszH}_2\text{O}} = 1,3\text{cm}$$

$$f = 60\text{MHz}$$

$$\Delta\varphi_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{7}{16} \pi$$

$$\underline{\underline{c_{\text{H}_2\text{O}} = 2,304 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}}$$

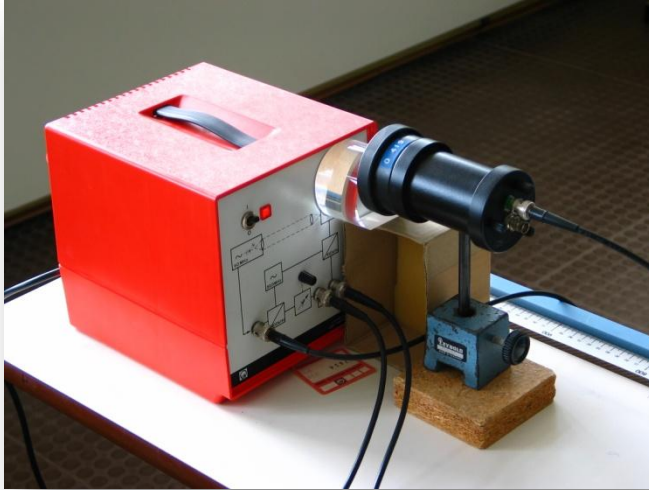


Phasenverschiebung

Am Oszilloskop lässt sich eine Phasenverschiebung von 1,3 cm (gegenüber 1,05cm in Luft) feststellen. Nach obiger Rechnung folgt hieraus eine Lichtgeschwindigkeit von 230400000 m/s.

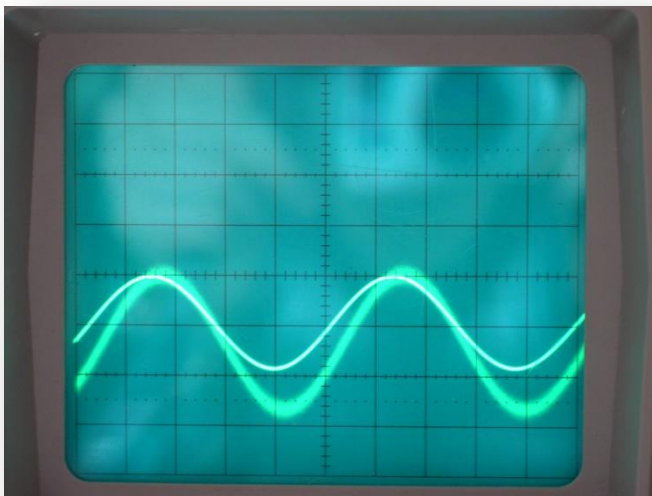
Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit in Plexiglas

Durchführung/Aufbau:



Statt ein mit Wasser gefülltes Rohr zwischen Sender und Empfänger zu stellen wird dieses Mal ein Stück Plexiglas eingebaut.

Ergebnis:



Am Oszilloskop ist eine Phasenverschiebung von 0,25cm ablesen.

$$l = 0,045\text{m}$$

$$\lambda_{\text{Oszi}} = 4,8\text{cm}$$

$$\varphi_{\text{OsziPlexi}} = 0,25\text{cm}$$

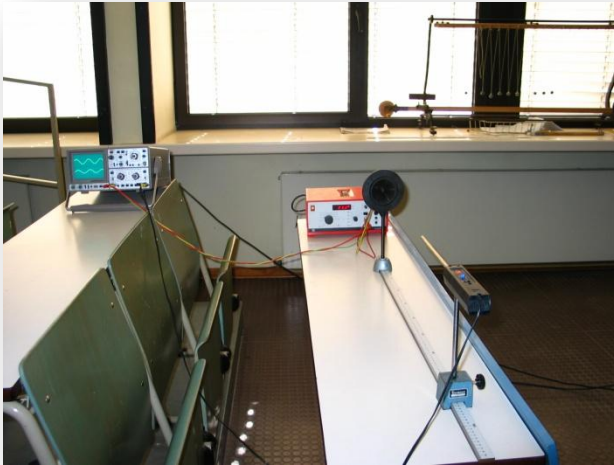
$$f = 60\text{MHz}$$

$$\Delta\varphi_{\text{Plexi}} = \frac{5}{48}\pi$$

$$\underline{\underline{c_{\text{Plexi}} = 5,184 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}}}$$

Experiment zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit

Analog zu Messung der Lichtgeschwindigkeit soll an dieser Stelle die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit durchgeführt werden, da sich sowohl Aufbau als auch das Messverfahren stark ähneln.



Aufbau zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit

Geräte:

Schallgenerator, Hochtöner,
Mikrofon, Oszilloskop, Messband

Aufbau:

Der Hochtöner wird mit dem Schallgenerator verbunden. An dem Oszilloskop wird auf einem Kanal das Mikrofon und auf dem anderen Kanal der Schall-Generator angeschlossen.

Durchführung:

Der Abstand des Mikrofons zum Hochtöner wird so festgelegt, dass Sendesignal und Empfangssignal in Phase sind. Die Position des Mikrofons wird festgehalten und anschließend das Mikrofon so weit bewegt, dass das Sendesignal und Empfangssignal wieder in Phase sind. Sinnvoll ist es das Signal um mehrere Wellenlängen zu verschieben und die Anzahl der Wellenlängen zu zählen und zu notieren. Mithilfe des Messbandes wird nun die Differenz des Abstandes vom Mikrofon zum Hochtöner in den zwei Positionen bestimmt.

Ergebnis:

$$f = 23,3\text{kHz}$$

$$\text{PosMicro1} = 297\text{mm} \Rightarrow l = 0\text{cm}$$

$$\text{PosMicro2} = 447\text{mm} \Rightarrow l = 15\text{cm}$$

15cm entsprechen 10λ also :

$$\frac{15\text{cm}}{10\lambda} \Rightarrow \lambda = 1,5\text{cm}$$

$$c_{\text{Schall}} = \lambda * f \Rightarrow c = 349,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$c_{\text{Literatur}} = 343 \frac{\text{m}}{\text{s}} \Rightarrow \text{Fehler} : 1,018\%$$

Auch bei der Bestimmung der Schallgeschwindigkeit bietet dieses Messverfahren mit einem Fehler von nur 1% ein sehr gutes Ergebnis.

Messung der Lichtgeschwindigkeit mit der Drehspiegelmethode nach Foucault und Michelson

Materialien:

Laser, Drehspiegel, Linse mit großer Brennweite (ca. 5 m), Spiegel, Strahlteiler, Irisblende, Glasschirm mit Millimeterskala, Linse mit kleiner Brennweite (ca. 10 cm), Stativmaterial

Für den Versuch werden mindestens zwei Experimentiertische und 10 m Platz für den Lichtweg gebraucht. Ist dieser nicht vorhanden, kann der Lichtweg mit Umlenkspiegeln verkürzt werden.

Versuchsaufbau:

(siehe Skizze am Ende)

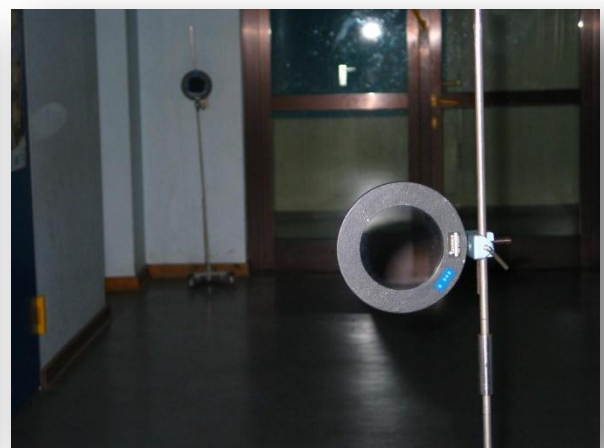
Das Prinzip des Versuchs besteht darin, dass der Drehspiegel sich in der Zeit, in der das Licht zum Umlenkspiegel und zurück läuft, weiterdreht und sich somit eine Abweichung des Strahls zwischen drehendem und nicht drehendem Spiegel ergibt.

Die Linse im Strahlengang ist auch bei nicht streuendem Laserlicht nötig, damit während der ganzen Zeit, die der Laser benötigt um die Linse zu überstreichen, ein Bild erzeugt wird, und nicht nur während der kürzeren Zeit, in der er den Umlenkspiegel genau senkrecht trifft.

Bilder des Versuchsaufbaus:



Drehspiegel



Umlenkspiegel (hinten) und Linse



Beobachtungsapparatur (von links): Strahlteiler, Skala, Lupe, Irisblende. Die Blende ist beim Versuch mit Laserlicht nicht unbedingt notwendig. Hinten links die Linse.

Justierung der Optik:

Zuerst werden Laser und Drehspiegel aufgebaut. Dabei muss der Abstand zwischen ihnen so groß sein wie die Brennweite der Linse (also ca. 5 m). Der Laser wird auf den Drehspiegel ausgerichtet und dieser manuell so gedreht, dass der reflektierte Strahl dem späteren Lichtweg folgt.

In diesen Strahl wird nun die Linse im Abstand ihrer Brennweite vom Drehspiegel entfernt aufgestellt. Zuletzt wird der Spiegel in der Entfernung von der Linse aufgestellt, in der diese den Laserstrahl bündelt (doppelte Brennweite der Linse). Hierzu sollte der Drehspiegel eingeschaltet werden und der Punkt gesucht werden, an dem die Linie, die beim Überstreichen des Lasers entsteht, möglichst genau fokussiert ist.

Der Spiegel muss nun so ausgerichtet werden, dass der von ihm reflektierte Strahl wieder den Drehspiegel trifft. Zur Überprüfung: Dicht neben dem Laser (oder im Idealfall direkt auf ihm) sollte nun ein Punkt zu sehen sein, der das Bild des Lasers darstellt. Die Anordnung kann noch so feinjustiert werden, dass der Punkt genau die Öffnung des Lasers trifft.

Schließlich wird die Beobachtungsapparatur vor dem Laser angebracht, sodass der Schirm und der Laser den gleichen Abstand vom Strahlteiler haben. Das Abbild des Lasers sollte nun auch auf dem Schirm zu sehen sein. **Vorsicht:** Bei stehendem Spiegel sollte das Bild von der Seite und auf keinen Fall durch die Lupe betrachtet werden!

Herleitung der Lichtgeschwindigkeit aus der Ablenkung:

Die Lichtgeschwindigkeit c ergibt sich aus dem vom Licht zurückgelegten Weg l und der dafür benötigten Zeit t :

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

l ist hier die Strecke vom Drehspiegel zum festen Spiegel und zurück. Die Zeit t lässt sich aus dem Winkel α berechnen, um den sich der Drehspiegel in t gedreht hat (ω ist die Winkelgeschwindigkeit des Spiegels):

$$t = \frac{\alpha}{\omega}$$

α wiederum wird aus der Ablenkung Δs auf dem Schirm und dem Abstand r zwischen Drehspiegel und Schirm berechnet. Wegen des Reflexionsgesetzes wird der Strahl zum Schirm aber um 2α abgelenkt. Es gilt die Definition des Tangens, wobei $\tan(\alpha)$ angenähert werden kann:

$$\tan(2\alpha) = \frac{\Delta s}{r} \approx 2\alpha \Leftrightarrow \alpha \approx \frac{\Delta s}{2r}$$

Setzt man alle Formeln ein, erhält man:

$$c = \frac{2 \cdot \omega \cdot r \cdot l}{\Delta s}$$

Mit dem oben beschriebenen Justierverfahren gilt außerdem Folgendes (f ist die Brennweite der Linse):

$$r = f,$$

$$l = 6f \cdot (\text{siehe anhängende Skizze})$$

Die Formel für c wird damit vereinfacht zu

$$c = \frac{2 \cdot \omega \cdot 6 \cdot f^2}{\Delta s}$$

Messung:

Zuerst wird der Drehspiegel so eingestellt, dass der Laserstrahl die Anordnung durchläuft und es wird die Position des reflektierten Bildes auf dem Schirm bestimmt (Beobachtung von der Seite!).

Nun wird der Drehspiegel eingeschaltet und es wird wieder die Position des Bildes bestimmt (hierfür die Lupe benutzen). Diese Positionen sollten jeweils von mehreren Personen geschätzt werden, da die Abweichung nur wenige Millimeter beträgt.

Messergebnis:

$$f = 5 \text{ m}$$

$$\Delta s = 2,75 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot 500 \text{ Hz}$$

$$\Rightarrow c = \frac{2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 500 \text{ Hz}) \cdot 6 \cdot (5 \text{ m})^2}{2,75 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 3,43 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{Literaturwert : } c_{\text{Lit}} = 3,00 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{rel. Fehler : } \frac{c}{c_{\text{Lit}}} - 1 = 0,14 = 14\%$$

Der erreichte Fehler von 14% ist als recht guter Wert anzusehen, da die Winkelgeschwindigkeit des Drehspiegels nicht gemessen werden konnte (die Angabe 500 Hz beruht auf dessen Datenblatt) und vor allem die Abweichung Δs nur sehr ungenau zu bestimmen ist. Auch die Brennweite der Linse muss nicht exakt 5 m betragen.

Bezieht man alle möglichen Abweichungen in die Überlegung ein, liegt der Literaturwert durchaus im Rahmen dieser Abweichungen.