

Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit nach der Drehspiegelmethode von Foucault und Michelson

Messung der Bildverschiebung in Abhängigkeit von der Drehzahl des Spiegels

Versuchsziele

- Messung der Verschiebung Δx des Bildes der Lichtquelle bei rotierendem Drehspiegel
- Messung der Drehzahl ν des rotierenden Drehspiegels.
- Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit c aus der Drehzahl ν , der Verschiebung Δx und dem Lichtweg Δs zwischen Drehspiegel und Endspiegel.

Grundlagen

Die Messung der Lichtgeschwindigkeit nach der Drehspiegelmethode greift ein von L. Foucault 1850 vorgeschlagenes Verfahren auf, das von A. A. Michelson 1878 optimiert wurde: Das Licht durchläuft eine bekannte Strecke zwischen zwei Spiegeln hin und zurück und benötigt dafür eine zunächst unbekannte Laufzeit. In dieser Zeit dreht sich der erste Spiegel mit einer bekannten, sehr hohen Drehfrequenz. Der zurücklaufende Lichtstrahl trifft daher unter einem geänderten Winkel auf den Drehspiegel und wird dort ebenfalls reflektiert. Man liest die Lage des Reflexes auf einer Skala ab und berechnet daraus den Drehwinkel des Spiegels und somit die Laufzeit des Lichtes.

Die früher als Lichtquelle benutzte Lampe wird hier durch einen He-Ne-Laser ersetzt (siehe Fig. 1). Die Lichtquelle S steht im Abstand a von einem Drehspiegel (1). Das dort reflektierte Licht fällt auf eine im Abstand ihrer Brennweite f stehende Linse (2). Diese erzeugt ein Bild S' der Lichtquelle auf einem in der Entfernung b stehenden ebenen Endspiegel (3). Durch Spiegelung der Lichtstrahlen am Endspiegel und erneute Reflexion am Drehspiegel entsteht in der Austrittsöffnung des Lasers ein Bild S'' des ersten Bildes S' .

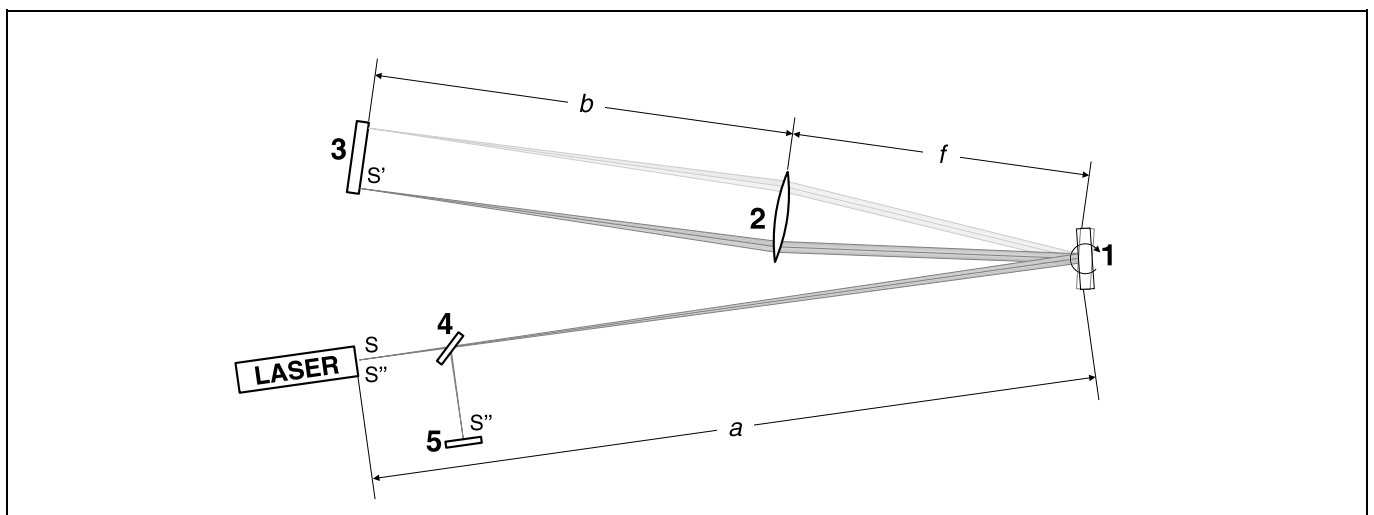
Wenn der Drehspiegel gedreht wird, überquert das Bild S' den Endspiegel. Dabei verläuft der Hauptstrahl zwischen Linse und

Endspiegel parallel zur Linsenachse, da der Drehspiegel im Brennpunkt der Linse steht. Am Endspiegel wird der Hauptstrahl in sich reflektiert und kehrt auf dem gleichen Wege zum Drehspiegel und von dort in die Austrittsöffnung des Lasers zurück. Das Bild S'' liegt unabhängig von der Stellung des Drehspiegels immer an der gleichen Stelle, wenn der Drehspiegel ruht oder sich langsam dreht. Erzeugt werden die Bilder S' und S'' , solange der vom Drehspiegel kommende Primärstrahl im Öffnungswinkel der Linse liegt. Bei drehendem Spiegel ist daher die Helligkeit der Bilder S' und S'' um so größer, je größer die nutzbare Breite der Linse ist.

Ein Strahlteiler (4) spiegelt einen Teil des zurückkommenden Lichts auf einen Glasmaßstab (5). Der optische Weg vom Glasmaßstab zum Drehspiegel beträgt ebenfalls a , also wird das Bild S'' auch auf den Glasmaßstab abgebildet.

Fig. 1: Strahlengang zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit nach der Drehspiegelmethode

- 1 Drehspiegel
- 2 Linse, $f = 5 \text{ m}$
- 3 Endspiegel
- 4 Strahlteiler
- 5 Glasmaßstab



Geräte

1 Drehspiegel zur Lichtgeschwindigkeit . . .	476 40
1 He-Ne-Laser, linear polarisiert	471 840
1 Oberflächenspiegel, Ø 120 mm	463 20
1 Linse, f = 5 m	460 12
1 Strahlteiler	471 88
1 Halter mit Federklappen	460 22
1 Glasmaßstab	311 09
1 Stelltransformator, 0 bis 250 V	521 40
1 Zweikanal-Oszilloskop 303	575 211
1 Halbleiterdetektor	559 92
1 HF-Kabel, 1 m	501 02
1 Geradstück, BNC	501 10
1 Stativstange, 100 cm	300 44
1 Stativstange, 47 cm	300 42
1 Stativstange, 25 cm	300 41
1 Großer Stativfuß, V-förmig	300 01
4 Kleine Stativfüße, V-förmig	300 02
1 Sockel	300 11
2 Leybold-Muffen	301 01
1 Doppelmuffe	301 09
1 Holzmaßstab, 1 m	311 03

Als Endergebnis erhält man daher für die Lichtgeschwindigkeit den Zusammenhang

$$c = 8\pi \cdot (f + 2a) f \cdot \frac{\nu}{\Delta x} \quad (VI).$$

Eine möglichst große Verschiebung Δx erfordert also eine möglichst große Drehzahl ν , eine möglichst große Brennweite f und einen möglichst großen Abstand a : Der Drehspiegel zur Lichtgeschwindigkeit (476 40) erreicht eine Drehzahl von $\nu = 450$ Hz, die Linse (460 12) hat die Brennweite $f = 5$ m. Der Abstand a kann im Prinzip beliebig groß gewählt werden. Allerdings muß man dazu Intensitätsverluste, die durch die Divergenz des Laserstrahls verursacht werden, und einen hohen Justieraufwand in Kauf nehmen. Einen Kompromiß stellt die in Fig. 1 skizzierte Anordnung dar, bei der Laser und Endspiegel nebeneinander stehen, also $a = f + b$ gilt. Durch Einsetzen in Gleichung (V) berechnet man

$$b = \sqrt{2} \cdot f = 7,1 \text{ m und}$$

$$a = (1 + \sqrt{2}) \cdot f = 12,1 \text{ m}$$

Der Abstand a zwischen Laser und Drehspiegel entspricht der gesamten Länge des Aufbaus.

Aufbau

Die Justierung der optischen Komponenten wird wesentlich erleichtert, wenn der Aufbau von zwei Personen durchgeführt wird. Der Strahlengang sollte möglichst genau waagrecht verlaufen:

- bei ebenem Boden Stiele der optischen Komponenten so im Scheitel eines Stativfußes festklemmen (siehe Fig. 2), daß sie etwa 1 cm nach unten aus dem Stativfuß herausragen und den Boden berühren (Strahlhöhe = 15 cm);*
- bei deutlich unebenem Boden Stiele im Mittelsteg eines Stativfußes festklemmen, dabei Spielraum zur Höhenkorrektur lassen;*
- Strahlhöhe mit dem Holzmaßstab kontrollieren.*

Laser, Linse und Endspiegel:

- Position $P_1 = 0$ m für den Drehspiegel, $P_2 = 5$ m für die Linse und $P_3 = 12,1$ m für Endspiegel und Laser (siehe Fig. 1) auf dem Boden markieren.
- Laser auf Stiel befestigen und weißes Papier um Austrittsöffnung des Lasers kleben, um später den zurücklaufenden Lichtstrahl leichter beobachten zu können.
- die Stiele des Lasers, der Linse und des Endspiegels jeweils in einem kleinen Stativfuß festklemmen.
- Stiele mit Hilfe der Stativfuß-Stellschrauben möglichst genau senkrecht ausrichten.
- Laser und Endspiegel bei P_3 nebeneinander mit einem Mittenabstand von 30–40 cm aufstellen (siehe Fig. 1 u. 2).

Drehspiegel:

- Stativstange so im Scheitel des großen Stativfußes festklemmen, daß sie etwa 1 cm nach unten herausragt und den Boden berührt.
- Drehspiegel zur Lichtgeschwindigkeit mit der Spiegelmitte in Strahlhöhe an der Stativstange befestigen (siehe Fig. 3); Strahlhöhe mit dem Holzmaßstab kontrollieren.
- Drehspiegel bei P_1 aufstellen und Drehachse des Spiegels mit Hilfe der Stativfuß-Stellschrauben möglichst genau senkrecht ausrichten; Stellschlüssel noch nicht aufstecken.

Bei großen Drehzahlen ν dreht sich der Drehspiegel in der Zeit Δt , die das Licht für den Weg

$$\Delta s = 2 (f + b) \quad (I)$$

vom Drehspiegel zum Endspiegel und zurück benötigt, um einen meßbaren Winkel

$$\Delta \alpha = 2 \pi \nu \cdot \Delta t \quad (II).$$

Dadurch verschiebt sich das Bild S'' auf dem Glasmaßstab um die Strecke

$$\Delta x = 2 \Delta \alpha \cdot a \quad (III).$$

Es gilt also

$$c = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{8\pi\nu \cdot (f + b) \cdot a}{\Delta x} \quad (IV).$$

Die Abstände a und b können nicht unabhängig voneinander beliebig groß gewählt werden. Da die Lichtquelle auf den Endspiegel scharf abgebildet wird, gilt vielmehr das Abbildungsgesetz

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{a + f} \quad (V).$$

Sicherheitshinweis

Der He-Ne-Laser genügt den „Sicherheitstechnischen Anforderungen für Lehr-, Lern- und Ausbildungsmittel – Laser; DIN 58126 Teil 6“ für Laser der Klasse 2. Bei Beachtung der entsprechenden Hinweise in der Gebrauchsanweisung ist das Experimentieren mit dem He-Ne-Laser ungefährlich.

- Nicht in den direkten oder reflektierten Laserstrahl blicken!
- Überschreiten der Blendungsgrenze vermeiden (d.h. kein Beobachter darf sich geblendet fühlen)!

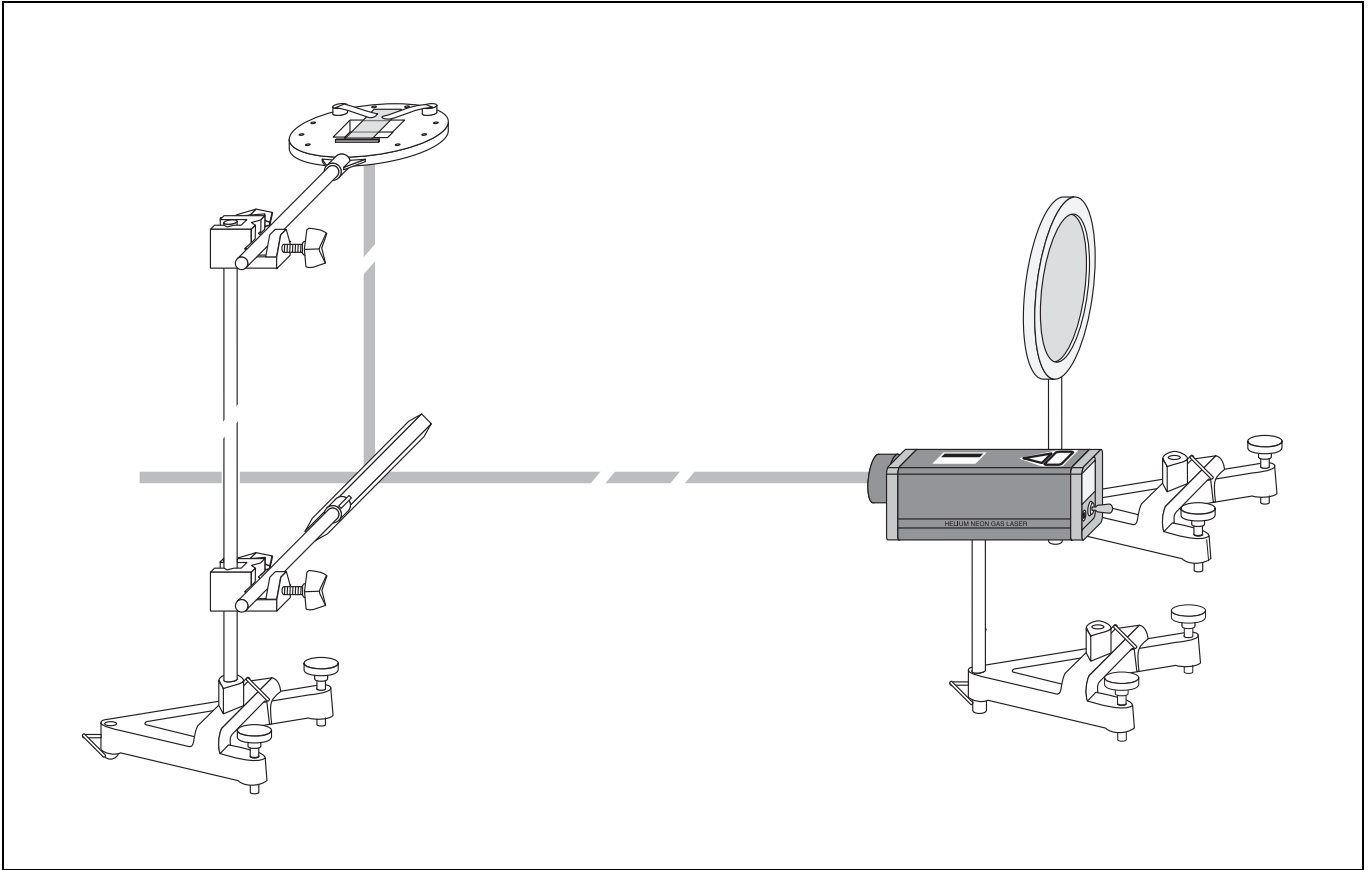
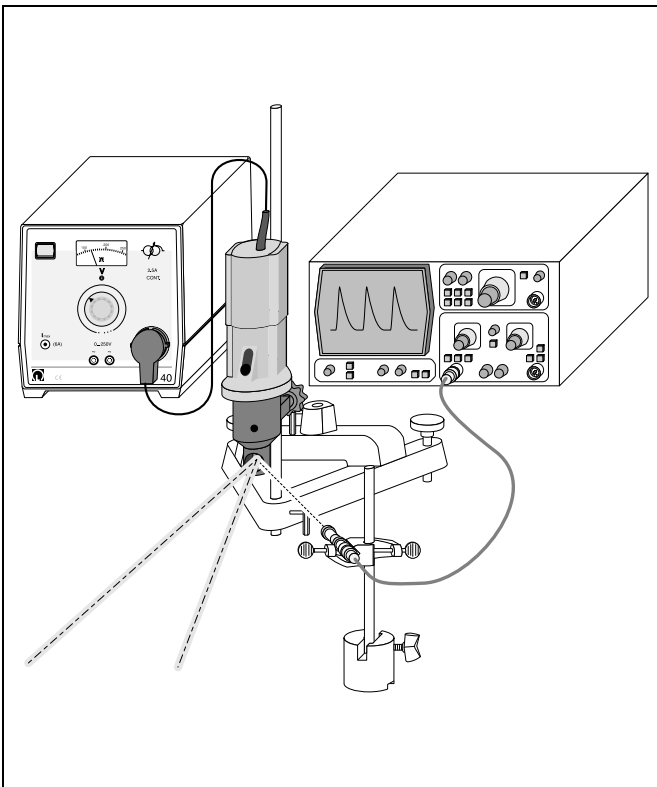


Fig. 2: Teilaufbau 1 mit Laser, Endspiegel, Strahlteiler und Glasmaßstab, die Abstände sind nicht maßstabsgetreu gezeichnet

Fig. 3: Teilaufbau 2 mit Drehspiegel, Stelltrafo und Einrichtung zur Frequenzmessung



- Motor des Drehspiegels an Stelltrafo anschließen und Stellknopf des Stelltrafos auf 0 V drehen.
- Motor und Stelltrafo einschalten.
- Stativfuß beschweren, um ihn gegen Verrutschen zu sichern.
- Ausgangsspannung des Stelltrafos langsam auf 240 V erhöhen und kontrollieren, ob der Stativfuß des Drehspiegels verrutscht.

Justierung:

- Ausgangsspannung des Stelltrafos auf 0 V zurückdrehen und Stelltrafo ausschalten.
- mit dem Stellschlüssel eine Spiegelseite nach vorne drehen.
- Laser einschalten und durch Drehen bzw. Verschieben des Stativfußes und mit Hilfe der Stativfuß-Stellschrauben so ausrichten, daß der Laserstrahl den Drehspiegel symmetrisch ausleuchtet.
- Drehspiegel mit dem Stellschlüssel drehen, bis der Laserstrahl – zunächst ohne Linse – auf den Endspiegel reflektiert wird; mit Hilfe der Stativfuß-Stellschrauben den reflektierten Strahl auf die Mitte des Endspiegels ausrichten; ggf. den Stativfuß vorsichtig drehen und verschieben.
- ggf. Laser nachjustieren.
- Linse bei Position P₂ senkrecht zum Strahl in den Strahlengang zwischen Drehspiegel und Endspiegel stellen (siehe Fig. 1); Linse so ausrichten, daß der Lichtstrahl durch die Mitte der Linse läuft und weiterhin die Mitte des Endspiegels trifft.
- ein Blatt Papier in den Lichtstrahl zwischen Linse und Endspiegel halten und kontrollieren, ob der Strahldurchmesser beim Endspiegel minimal wird, also das Bild S' scharf ist; evtl. Endspiegel hierzu entfernen.

Falls die Abbildung nicht scharf ist (das kreuzförmige Beugungsmuster, in dessen Ursprung die Abbildung liegt, ist auf Beugung an den Kanten des Drehspiegels zurückzuführen und nicht zu vermeiden):

- die Positionen P_2 und P_3 neu vermessen und Aufbau korrigieren.
- den Endspiegel durch vorsichtiges Drehen des Stativfußes und mit Hilfe der Stativfuß-Stellschrauben so ausrichten, daß er den Lichtstrahl durch die Mitte der Linse genau auf den Drehspiegel reflektiert.
- eine Stellschraube des Endspiegel-Stativfußes um Bruchteile einer Umdrehung hin- und herdrehen und überprüfen, ob der zurücklaufende Lichtstrahl in die Laser-Austrittsöffnung trifft und das zusammen mit dem Bild S'' auftretende Beugungsmuster symmetrisch zur Austrittsöffnung liegt.
- ggf. Ausrichtung des Endspiegels korrigieren.

Feinjustierung:

- Drehspiegel mit dem Stellschlüssel langsam verdrehen und überprüfen, ob der reflektierte Strahl waagrecht durch die Linsen- und Endspiegelmitte wandert und ob das Bild S'' dabei stabil steht.
- ggf. Ausrichtung des Drehspiegels mit Hilfe der Stativfuß-Stellschrauben korrigieren.
- anschließend Drehspiegel wieder in die Ausgangsstellung drehen.
- evtl. Linse und Endspiegel nachjustieren.

Strahlteiler und Glasmaßstab:

- Strahlteiler (4) und Halter mit Federklammern (5) montieren und Anordnung in den Strahlengang zwischen Drehspiegel und Laser stellen (siehe Fig. 1 u. 2, Abstand des Strahlteilers zur Laser-Austrittsöffnung = Abstand des Strahlteilers zum Halter).
- Strahlteiler um 45° nach oben gedreht ausrichten, so daß der vom Drehspiegel zurückkommende Strahl senkrecht nach oben gespiegelt wird.
- Glasmaßstab im Halter mit Federklammern so festklemmen, daß der gespiegelte Strahl etwa auf die Mitte trifft; ein Blatt Papier als Justierhilfe verwenden und ggf. die Ausrichtung von Strahlteiler und Halter korrigieren.

Falls der Laserstrahl nach Aufstellen des Strahlteilers den Drehspiegel nicht mehr in der Mitte trifft:

- Ausrichtung des Lasers nachjustieren.

Probelauf und Frequenzmessung:

- Halbleiterdetektor in Strahlhöhe montieren und über HF-Kabel an Oszilloskop schließen (siehe Fig. 3)
- Anordnung möglichst dicht neben den Drehspiegel stellen, so daß der Halbleiterdetektor bei drehendem Spiegel vom Lichtstrahl überstrichen wird, aber der aufgebaute Strahlengang nicht abgeschattet wird.
- Stellschlüssel des Drehspiegels abziehen; Stelltrafo einschalten und Ausgangsspannung langsam auf 40–50 V erhöhen.
- Ausgangssignal des Halbleiterdetektors auf dem Oszilloskop darstellen (Kopplung = AC, Trigger-Selector = LF) und Aufstellung des Halbleiterdetektors so optimieren, daß ein möglichst großes Ausgangssignal erzeugt wird.

Hinweis: Der Abstand zwischen zwei Spitzen des Ausgangssignals entspricht einer halben Umdrehung des Spiegels, da zwei gegenüberliegende Spiegel auf der Drehachse befestigt sind.

- Qualität und Position des Bildes S'' auf dem Glasmaßstab überprüfen (S'' ist bei rotierendem Drehspiegel lichtschwächer).
- evtl. dünnes Papier zwischen Halter und Glasmaßstab klemmen, damit das eigentliche Bild der Lichtquelle möglichst kontrastreich zu sehen ist und die schwächeren Beugungserscheinungen ausgeblendet werden.
- Ausgangsspannung auf 0 V zurückdrehen; Drehspiegel mit dem Stellschlüssel in Ausgangsstellung zurückdrehen und Stellschlüssel des Drehspiegels abziehen.

Durchführung

- Position x_0 des Bildes S'' auf dem Glasmaßstab ablesen und notieren.
- Ausgangsspannung des Stelltrafos langsam erhöhen (bis max. 240 V).
- Position x des Bildes S'' ablesen und notieren.
- Zeit T für eine vollständige Umdrehung des Drehspiegels bestimmen und notieren; zur Kontrolle die Motorfrequenz ν berechnen.
- Ausgangsspannung des Stelltrafos schrittweise reduzieren und Messung für mehrere Spannungen wiederholen (siehe Tab. 1).

Meßbeispiel

Tab. 1: Motorspannung U , Position x des Bildes S'' , Umdrehungszeit T und Frequenz ν des Drehspiegels

$\frac{U}{V}$	$\frac{x}{mm}$	$\frac{T}{ms}$	$\frac{\nu}{Hz}$
0	$10,0 \pm 0,3$		0
220	$15,5 \pm 0,3$	2,4	417
200	$15,0 \pm 0,3$	2,55	392
150	$14,0 \pm 0,3$	3,2	313
115	$13,0 \pm 0,3$	4,05	247
44	$10,5 \pm 0,3$	26	38,5

In Tab. 1 und Fig. 4 ist ein Meßbeispiel aufgeführt. Die im Diagramm eingezeichneten Fehlerbalken entsprechen einem Meßfehler von 0,3 mm für die Bildposition x . Da die Motorfrequenz sehr genau gemessen wurde, kann hierfür auf eine Fehlerangabe verzichtet werden.

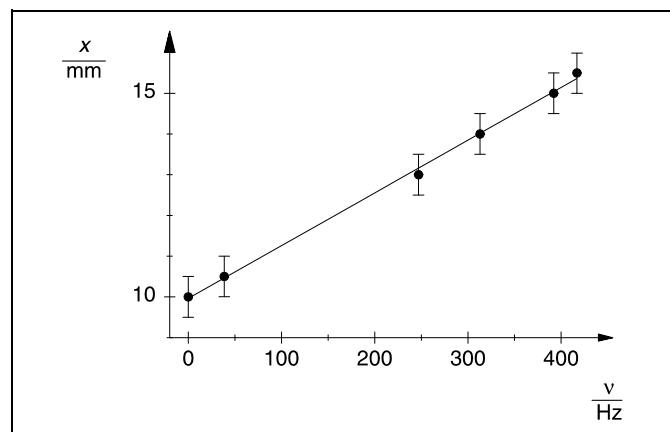


Fig. 4: Position x des Bildes S'' auf dem Glasmaßstab als Funktion der Motorfrequenz ν

Auswertung

Fig. 4 entnimmt man einen linearen Zusammenhang zwischen der Position x des Bildes S'' und der Motorfrequenz ν . Die Steigung beträgt

$$m = 12,9 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{Hz}}.$$

Sie entspricht dem Quotienten

$$\frac{\Delta x}{\nu} = \frac{x(\nu) - x(0)}{\nu}$$

in Gleichung (VI). Für die Lichtgeschwindigkeit errechnet man daraus den Wert

$$c = 2,84 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Ergebnis

Bemerkung: Die im Diagramm eingezeichnete Gerade ist das Ergebnis einer Geradenanpassung. Bei einer Fehlerrechnung zur Geradenanpassung ist zu berücksichtigen, daß die Streuung der Meßwerte um die Gerade deutlich kleiner ist als deren Meßfehler. Man erhält 7 % als relativen Fehler für die Steigung der Geraden. Die Lichtgeschwindigkeit kann mit dem gleichen relativen Fehler angegeben werden, da die übrigen Bestimmungsgrößen aus (VI) genauer gemessen wurden.

Versuchsergebnis:

$$c = (2,8 \pm 0,2) \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Literaturwert:

$$c = 3,00 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

