

Lichtgeschwindigkeit

O 25

1 Aufgabenstellung

Die Lichtgeschwindigkeit ist mit Hilfe einer Drehspiegelmethode bestimmen.

2 Grundlagen

Der französische Mediziner Leon Foucault hat 1862 mit Hilfe der nach ihm benannten Drehspiegelmethode die Größe der Lichtgeschwindigkeit bestimmt. Er erhielt einen Wert von 298 000 km/s. Mit einer abgewandelten Drehspiegelmethode, die einen Lichtweg von 70 km ermöglichte, erhielt Michelson 1927 (299 796 ± 4) km/s. Beide Versuchsanordnungen sind z.B. in [1] beschrieben.

3 Versuchsaufbau

Geräte:

- optische Grundplatte
- Grüner Festkörperlaser (0,2 mW / 1,0 mW mit/ohne Shutter)
- Blende 0,5 / 0,7 / 1,0 / 1,4 mm für Laser
- Planspiegel, justierbar
- teildurchlässiger Spiegel

- transparenter Schirm mit Skale, Lupe
- große Sammellinse, $f = (4,8 \pm 0,2) \text{ m}$
- Motor (ca. 28.000 min^{-1}) mit Drehspiegel
- regelbare Stromversorgung für den Motor
- digitaler Drehzahlmesser
- 2 Bandmaße 25 m und 3

Der Versuchsaufbau ist in Abb.1 dargestellt und ähnelt dem von Foucault. An Stelle des früher üblichen, von einer Kohlebogenlampe beleuchteten Spaltes, wird ein Laser verwendet, der eine nahezu punktförmige Lichtquelle mit sehr kleinem Strahl-Öffnungswinkel darstellt. Statt des von Foucault eingesetzten Hohlspiegels wird eine Kombination aus Sammellinse und Planspiegel verwendet.

Die Lichtquelle, der Laser L, steht im Abstand a vom Drehspiegel S_1 , der sich im Brennpunkt der Linse L_1 befindet. Diese bildet die Lichtquelle in die Ebene des Endspiegels S_2 im Abstand b von L_1 ab. Das reflektierte Bild der Lichtquelle wird umgekehrt durch L_1 und S_1 wieder in die Lichtaustrittsöffnung des Lasers abgebildet. Die Abstände a und b müssen dabei das Abbildungsgesetz

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

erfüllen.

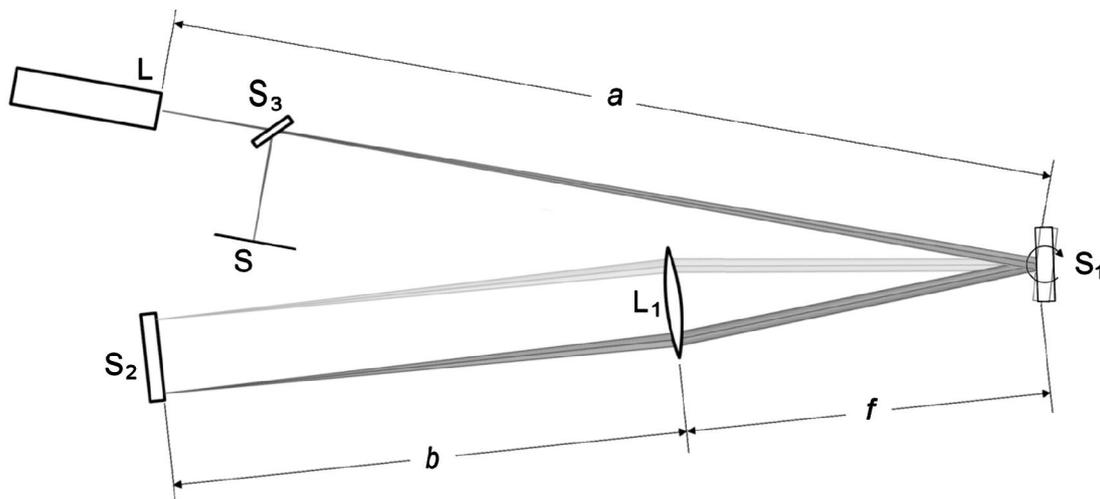


Abb.1: Versuchsanordnung (Erklärung im Text)

Wenn sich der Drehspiegel S_1 dreht, überquert das Bild des Lasers den Spiegel S_2 . Da sich S_1 im Brennpunkt von L_1 befindet, verläuft der Hauptstrahl dabei zwischen L_1 und S_2 parallel und wird unabhängig vom Drehwinkel immer in L zurück reflektiert, solange der Primärstrahl im Öffnungswinkel der Linse L_1 liegt.

Um das zurück reflektierte Bild der Lichtquelle beobachten zu können, befindet sich der teildurchlässige Spiegel S_3 im Strahlengang. Dieser reflektiert das Bild auf den Schirm S . Unter der Voraussetzung, dass die Abstände S_3 - L und S_3 - S gleich sind, entsteht auf dem Schirm ein scharfes Bild der Lichtquelle.

Bei hohen Drehzahlen ν dreht sich der Spiegel S_2 in der Zeit Δt , die das Licht für den Weg

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

vom Drehspiegel S_1 bis zu S_2 und zurück benötigt, um einen messbaren Winkel

$$\Delta \alpha = 2\pi \nu \cdot \Delta t. \quad (3)$$

Dadurch verschiebt sich das Bild der Lichtquelle auf dem Schirm S um die Strecke

$$\Delta x = 2 \Delta \alpha \cdot a. \quad (4)$$

Es gilt also

$$c = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{8\pi \nu (f + b) a}{\Delta x}. \quad (5)$$

Mit (1) ergibt sich daraus

$$c = \frac{8\pi \nu}{\Delta x} (f + 2a) f. \quad (6)$$

Eine genaue Messung erfordert also möglichst hohe Drehzahlen, eine große Brennweite f und einen großen Abstand a . Bei dem Versuchsaufbau nach Abb.1 ist $a \approx b + f$, so dass Laser und Endspiegel auf einem Tisch aufgebaut werden können. Daraus ergibt sich

$$b \approx \sqrt{2} f \approx 6,8 \text{ m} \quad \text{und}$$

$$a \approx (1 + \sqrt{2}) f \approx 11,6 \text{ m}.$$

4 Versuchsdurchführung

Sicherheitshinweise:

Der Laser hat die Klasse 2 (Leistung $\leq 1\text{mW}$, sichtbares Licht). Blicken Sie nie in den direkten oder reflektierten Strahl!

Der Versuch muss von zwei Personen durchgeführt werden.

Der Drehspiegel ist an der Wand befestigt und kann in Höhe und Neigung verstellt werden. Die Sammellinse wird auf einen Tisch gestellt. Alle übrigen optischen Komponenten werden zusammen auf der Grundplatte aufgebaut.

Der Strahlengang soll möglichst genau in der horizontalen Ebene verlaufen. Prüfen Sie zuerst die Höhe von Laser und Drehspiegel über den Fußboden mit dem Bandmaß.

Schalten Sie vor Beginn der Justage den Drehspiegel einmal ein. Prüfen Sie den Motor auf vibrationsfreien Lauf und testen Sie die Drehzahlmessung.

Stellen Sie sicher, dass während des Versuchsaufbaus der Strahlabschwächer am Laser geschlossen ist.

Aufbau und Justage erfolgen zweckmäßig in folgenden Schritten:

- Laser (ohne Blende) exakt auf die Mitte des Drehspiegels richten.
- Neigung des Drehspiegels so einstellen, dass das Licht wieder genau in die Höhe des Lasers reflektiert wird. (Linse ist noch nicht im Strahlengang). Das reflektierte Licht auf die Mitte des Endspiegels richten
- Linse L_1 in den Strahlengang bringen und so ausrichten, dass der Strahl durch die Mitte der Linse geht und die Mitte des Endspiegels trifft.
- Kontrollieren, ob auf dem Spiegel ein scharfer Fokus entsteht. Falls nicht: Fokus suchen (am besten mit einem schwarzen Schirm), alle Abstände neu vermessen, Justierung wiederholen.
- Endspiegel so justieren, dass der Laserstrahl exakt in den Drehspiegel und über diesen in den Laser zurück reflektiert wird.
- Strahlteiler S_3 und Schirm S in den Strahlen-

gang bringen. Der Strahlteiler soll den Primärstrahl gegen die Wand reflektieren und den vom Drehspiegel kommenden Strahl gegen den transparenten Schirm, der von der Rückseite betrachtet wird. Auf diese Weise ist ausgeschlossen, dass der Beobachter direkt in den Laserstrahl blicken kann.

- Blende (1 mm oder 0,7 mm) unmittelbar vor den Laser stellen. Endspiegel nachjustieren und eventuell den Ort des Strahlteilers verändern, um einen möglichst kleinen und hellen Fokus auf dem Schirm zu erhalten.
- Verdrehen Sie den Drehspiegel langsam von Hand, prüfen Sie ob dabei der Strahl dabei durch die Mitte von Linse und Endspiegel wandert und ob das Bild auf dem Schirm stabil bleibt.
- Prüfen Sie das Bild auf dem Schirm auch bei geöffnetem Strahlabschwächer am Laser.

Bei rotierendem Drehspiegel ist das Bild recht lichtschwach, eventuell muss der Strahlabschwächer geöffnet werden. Die Frequenz des Drehspiegels wird mit Hilfe des Stelltrafos in Schritten von etwa 5000 min^{-1} erst erhöht und dann schrittweise wieder bis auf Null verringert. Dabei ist die Position x des Bildes auf dem Schirm in Abhängigkeit von der Drehzahl abzulesen.

Alle Abstände des Versuchsaufbaus sollten am Ende noch einmal exakt nachgemessen werden.

Auswertung

Die Position x des Bildes auf dem Schirm ist in Abhängigkeit von der Drehzahl v grafisch darzustellen, der Anstieg der Geraden $\Delta x/\Delta v$ ist zu bestimmen.

Bei der Berechnung der Lichtgeschwindigkeit aus dem Anstieg müssen alle Abweichungen zwischen dem idealen und dem tatsächlichen Versuchsaufbau berücksichtigt werden. Die Rechnung erfolgt nach Gl. (5), da die Voraussetzung für Gl. (6), die Abbildungsgleichung (1), in der Regel nicht exakt erfüllt ist. Auf diese Weise muss auch die Brennweite f nicht so genau bekannt sein, da lediglich der einfacher messbare Abstand $(f+b)$ eingeht.

Beachten Sie auch, dass unter Umständen die Abstände $S_3\text{-L}$ und $S_3\text{-S}$ in nicht mehr gleich groß sind, wie anfangs gefordert. In (5) muss dann an Stelle des Abstandes a die Länge des Lichtweges $S_1\text{-S}_3\text{-S}$ eingesetzt werden.

Die Auswirkung der verbleibenden Unsicherheiten auf das Ergebnis sind in der Fehlerrechnung zu ermitteln und zu diskutieren.

6. Literatur

- [1] Grimsehl: Lehrbuch der Physik, Bd. 3
- [2] http://www.ld-didactic.de/literatur/hb/d/p5/p5611_d.pdf