

LASERIMPULS

SOWAS-Projektgruppe O

Thorsten Sigmund Bartel, Jan Hendrik Löwer, Benedikt Johannes Paul Pernack, Jason Winkenstern
 Projektleiter: Lukas Westrich

Motivation

Das Ziel dieses Projektes ist es, den Impuls von Photonen mechanisch nachzuweisen. Dazu wurde eine empfindliche, an das Cavendish-Experiment angelehnte, Torsionswaage konstruiert, um den Impulsübertrag des Lasers auf die Waage zu messen. Der Übertrag des Photonenimpulses (Strahlungsdruck) auf mechanische Systeme spielt in konzeptionellen Raumfahrtantrieben wie z.B. Sonnensegeln eine Rolle. Gut zu beobachten ist der Effekt bei der Erzeugung eines zweiten Kometenschweif, der in der Nähe der Sonne auf Grund des Strahlungsdrucks stets von der Sonne weg zeigt.

Physikalische Grundlagen

- Elektromagnetische Wellen sind Transversalwellen, die aus elektrischen und magnetischen Feldern bestehen und im Vakuum mit Lichtgeschwindigkeit c propagieren
- Den Impuls der Welle wird definiert über die Energie der Welle E_{em} : $p = \frac{E_{em}}{c}$ (1)
- In Quantenmechanik: Entdeckung des Teilchencharakters von em-Wellen als Strom von γ -Quanten (Photonen)
- Betrachten Energie E und Impuls p eines Photons, um diese in theoretischen Rechnungen einzusetzen
- Definition beider Größen, wobei f die Frequenz und h Planck'sches Wirkungsquantum ist:

$$E = hf, \quad p = \frac{hf}{c} \quad (2), (3)$$

Mechanische Torsion

- Draht der Länge l mit kreisförmigem Querschnitt A des Radius r ($r \ll l$) mit einem Ende eingespannt
- Wirkt nun Kraft F tangential zu Querschnittsfläche, verdreht sich Draht durch entstehendes Torsionsmoment um Winkel φ
- Im Versuch entsteht Torsion durch Kraft, welche der Strahlungsdruck ausübt und ist der zu erwartende Effekt
- Über den Ausdruck für das Torsionsmoment findet man Formel für Schwingungsdauer T
- Notwendig, um theoretische Berechnung von Torsionsmodul G und der zu erwartenden Auslenkung durchzuführen
- Für Schwingungsdauer gilt nach Umformen mit Torsionsträgheitsmoment I :

$$T = 2\pi \left(\frac{2Il}{\pi G r^4} \right)^{1/2} \quad (4)$$

- Für erfolgreiches Experiment ist einer der wichtigsten Faktoren also Dicke des gewählten Materials, da Radius mit vierter Potenz in die Gleichung eingeht
- Auch materialspezifisches Torsionsmodul spielt bei Wahl des Stoffes maßgebende Rolle

Theoretische Abschätzung

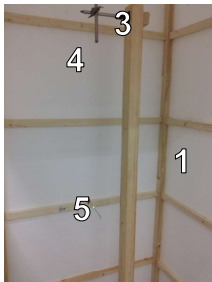
- Das äußere Drehmoment ist durch den Laser mit dem Hebelarm r_{Laser} gegeben. Außerdem kommt es bei vollständiger Reflektion zum doppelten Impulsübertrag:

$$M = \frac{2P_{Laser} r_{Laser}}{c} = \frac{\pi G r^4 \varphi}{2l} \Rightarrow \varphi = \frac{4P_{Laser} r_{Laser} l}{\pi G r^4} \quad (5)$$

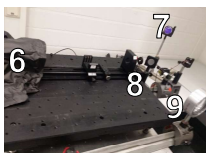
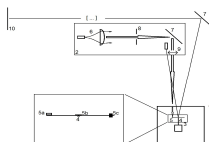
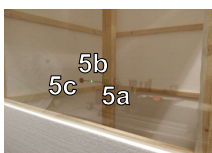
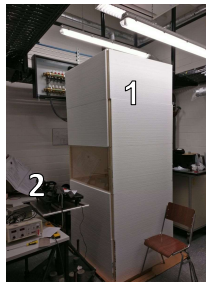
- Mit Werten, die im Versuch verwendet werden: $l = 0,9$ m; $P_{Laser} = 500$ mW; $r_{Laser} = 10$ cm; $G = 0,117$ GPa; $r = 0,1$ mm erhält man für die Auslenkung der Torsionswaage mit einem Polyethylenfaden:

$$\varphi = 0,0163 \text{ rad}$$

Aufbau



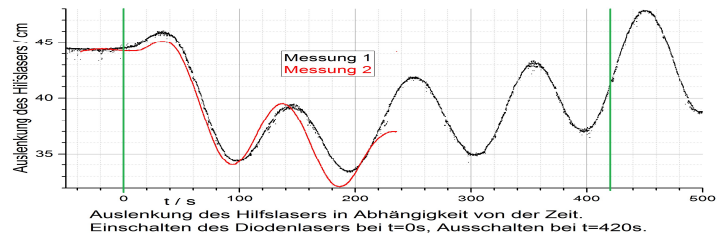
- [1] Abschirmung
- [2] Optische Platte mit Laser
- [3] Befestigung Torsionswaage
- [4] Torsionsfaden
- [5] Hebelarm (Alustange)
 - [5a] Spiegel
 - [5b] Messspiegel
 - [5c] Gegengewicht
- [6] Diodenlaser ($\lambda = 808$ nm) & Kollimator
- [7] Umlenkspiegel
- [8] Blende
- [9] Linse (Achromat, $f = 860$ mm)
- [10] Messskala



Aufbau und Herausforderungen

- Aufbau der Torsionswaage mit ausreichender Länge
- Konstruktion einer leichten, stabilen Abschirmung gg. Umwelteinflüsse (Luftturbulenzen)
- Fernsteuerung von Laser und Kamera mittels Sicherungskasten / Handy zur Vermeidung weiterer Störungen wie Erschütterungen
- Testen ein- und beidseitiger Befestigung des Fadens
- Verwendung verschiedener Materialien als Torsionsfaden (zuletzt Nylongarn)
 - Aber: Wegen Verdrillung kann man nicht mehr von klassischer Torsion ausgehen
 - Verdrillung des Garns erforderte beidseitige Einspannung gegen Abwickeln
- Möglichst lotrechtes Einspannen des Torsionsfadens
 - Leichte Schiefelage bewirkt Ausrichten der Aluminiumstange nach der Schwerkraft \rightarrow Effekt des Impulsübertrags nicht mehr nachweisbar
- Beobachten der Auslenkung mittels Hilfslaser
 - Verlängerung des Strahlengangs mittels Umlenkspiegel, um kleine Auslenkungen auf einer Skala sichtbar zu machen
- Aufnahme der Bewegung des Hilfslasers auf der Skala mittels Kamera und anschließende Auswertung mit der Software Viana

Auswertung



Analyse

- Messung der Schwingungsdauer: $T = (11,5 \pm 0,1) s \rightarrow$ Torsionsmodul berechnen: mit $l = (3,61 \pm 0,03) \cdot 10^{-5} \text{ kgm}^2$ - mit $l_{Hebelarm} = (23,85 \pm 0,05) \text{ cm}$; $m_{Hebel} = (4,75 \pm 0,01) \text{ g}$; $m_{Spiegel} = (954 \pm 5) \text{ mg}$

$$G = \frac{8\pi l}{T^2 r^4} \approx (63 \pm 6) \text{ GPa} \Rightarrow \varphi = (3,02 \cdot 10^{-5}) \text{ rad}$$

- Ruhelage bei ca. 44,5cm
- Nach Einschalten des Lasers (150s) sieht man eine erste Auslenkung, die bis zur Position von 46cm geht
 - Dies ist die erwartete Auslenkungsrichtung und macht den gewünschten Effekt sichtbar (Strahlungsdruck / Photonenimpuls)
- Dass der Messlaser anschließend bei 46cm keine neue Ruhelage einnimmt, sondern weit in die entgegengesetzte Richtung wandert, liegt an thermischen Effekten die kurze Zeit nach dem Einschalten des Lasers eintreten und den Impulsübertrag überwiegen
 - Vermutung: Erhitzung durch Laser vor dem Spiegel sorgt für eine geringere Dichte der Luftmoleküle \rightarrow Auslenkung in entgegengesetzte Richtung

Fazit/Diskussion

- Es war möglich, den Effekt für eine kurze Zeit sichtbar zu machen
 - Thermische Effekte haben enorme Auswirkung und dominieren gegenüber Strahlungsdruck \rightarrow Potenzielle Lösung: Torsionswaage im Vakuum
 - Polyethylen, Nylon nur Oberbegriffe \rightarrow Kein Literaturwert des Torsionsmoduls verfügbar, daher weitere Messungen notwendig \rightarrow menschliches Haar / Seidenfaden als Alternativen für zukünftige Versuche
- Um das Experiment präziser zu machen, sind deutlich aufwändigere Aufbauten nötig. Der thermische Effekt ließ sich auch bei Staubteilchen im Strahlengang eines Hochleistungs-Lasers im Labor von Dr. Luggenhölscher beobachten, die sich dem Strahlungsdruck entgegen bewegen.

Danksagungen

Herzlich danken möchten wir dem Lehrstuhl für Experimentalphysik V und insbesondere Herrn Dr. Luggenhölscher und Herrn Zierow für das Bereitstellen der Laser und vieler weiterer Materialien sowie die stets hilfreiche Unterstützung bei vielen Fragen und Problemen. Ebenso möchten wir dem Team rund um Herr Dr. Meyer für die ständige Hilfe und die zahlreichen Leihgaben danken.

Referenzen

Von Keudell, A., 2015-16: Vorlesungsskripte Physik I, Physik II, Physik III
<https://de.wikipedia.org/wiki/Schubmodul> (Stand 23.06.2017)
https://www.tuchemnitz.de/physik/PGP/files/Anleitungen/Physik_2/M4.pdf (Stand 23.06.2017)
 Demtröder, W., 2012: Experimentalphysik 1 (6. Auflage)
 Demtröder, W., 2008: Experimentalphysik 2 (5. Auflage)
 Demtröder, W., 2009: Experimentalphysik 3 (4. Auflage)