

Torsionspendel, Blitz im Gaszylinder und andere Kuriositäten

Ein Bericht über die Aufgaben der 30. Internationalen Physik-Olympiade 1999 in Padua/Italien

Helmuth Mayr

Das alterwürdige Verdi-Theater in Padua war am Nachmittag des 26. Juli 1999 zum Bersten voll. Im Parkett saßen fast 300 Schüler und wenige Schülerinnen aus 60 Staaten und deren italienische Guides sowie hochrangige Wissenschaftler und prominente Politiker als Ehrengäste, während die Logen mit uns 120 Betreuern der Teilnehmer und Teilnehmerinnen, Beobachtern und "Visitors" aus mehr als zwei Dutzend Nationen dicht gedrängt besetzt waren. Sowohl lokale als auch einige ausländische TV-Teams trugen ihren Beitrag zur Steigerung der allgemeinen Nervosität bei. Die hochsommerlich heiße Luft schwappte bis in den allerletzten Winkel des Gebäudes und der Getränkeverkäufer im Foyer machte den Umsatz seines Lebens.

Mit Spannung wurde die Eröffnung der Feierlichkeiten erwartet, ging es doch um die Preisverleihung der 30. Internationalen Physikolympiade, zu der 60 Staaten je 5 Schüler oder Schülerinnen entsenden durften. Alle hatten am 20. Juli und am 22. Juli, jeweils innerhalb von 5 Stunden, umfangreiche experimentelle Untersuchungen bzw. drei theoretische Aufgaben zu bearbeiten. Ein ausgeklügeltes Punktesystem und ein aufwendiges Korrekturverfahren, in das auch wir nationale Betreuer eingebunden wurden, sorgte für faire Verhältnisse und eine Reihung der Schüler/innen nach ihren Leistungen. Die besten dreißig wurden mit einer Goldmedaille belohnt, die nächstfolgenden einundsiebzig durften sich über eine Silbermedaille freuen, und die nachfolgenden vierundfünfzig konnten stolz eine Bronzemedaille mit nach Hause nehmen.

Das Überkopf-Torsionspendel

Die experimentelle Aufgabe bestand in der Untersuchung des Systemverhaltens eines ÜberkopfpPENDELS, dessen Fußpunkt an einem gespannten Stahldraht fixiert wurde und zu unterschiedlichsten Torsionsschwingungen angeregt werden konnte. (siehe Abb. 1). Der Pendelkörper selbst bestand aus zwei Teilen, die zwar verschieden tief ineinander geschraubt, aber nicht voneinander getrennt werden konnten, sodass auch die Pendellänge (und dadurch natürlich auch die Lage des Schwerpunktes) verändert werden konnten.

Von den Kandidaten wurde zunächst verlangt, die Einzelmassen der beiden Pendelkörperteile experimentell zu bestimmen. Danach mußten sie ein Verfahren entwickeln, mit dem man das Trägheitsmoment des gesamten Pendelkörpers als Funktion der relevanten Systemparameter bestimmen konnte. Bei der anschließenden Untersuchung des Bewegungsverhaltens des Pendelsystems musste die Bewegungsgleichung des Pendels für eine horizontale Drehachse aufgestellt werden. Auf Grund der dadurch gewonnenen Erkenntnisse sollten die

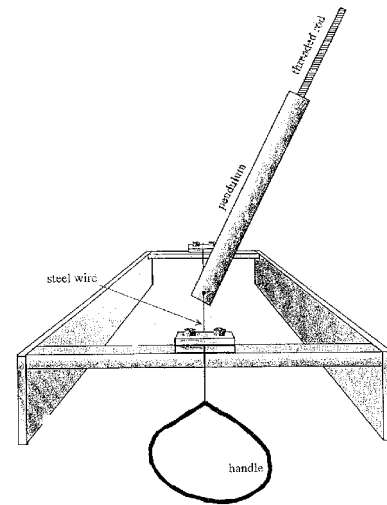


Abb. 1: Skizze des Überkopf-Torsionspendels

Schüler/innen anschließend diverse Systemparameter experimentell bestimmen. Anschließend war das Pendel so aufzustellen, dass seine Achse vertikal stand. Wiederum mussten diverse Parameter für diese Anordnung experimentell bestimmt werden. In einer Zusammenschau der bisherigen Erkenntnisse war abschließend das Pendelverhalten aus einer etwas allgemeineren Sicht zu analysieren.

Ein Blitz im Gaszylinder

Eigentlich trug diese Aufgabe den Titel "Strahlungsabsorption eines Gases". (Da ich hier nicht alle vier Aufgaben in voller Länge beschreiben kann, beschränke ich mich im Folgenden auf eine genauere Darstellung der Angabe und Lösung dieser Aufgabe und beschreibe die anderen nur kurz).

Untenstehend finden Sie die Originalangabe. Darüber hinaus erhielten die Kandidaten eine Tabelle sämtlicher Konstanten.

Angabe

Strahlungsabsorption eines Gases

Ein zylindrischer Behälter mit vertikaler Achse ist mit molekularem Gas gefüllt. Das Gas ist im thermodynamischen Gleichgewicht. Oben ist der Behälter mit einer beweglichen Glasplatte geschlossen. Wir nehmen an, daß das Gas nicht aus dem Behälter entweichen kann. Wir nehmen weiterhin an, daß die Reibung zwischen den inneren Wänden des Zylinders und der Glasplatte die Zylinderschwingungen dämpft, aber keinen bedeutenden Energieverlust verursacht (im Vergleich zu den anderen Energien, die in dieser Aufgabe vorkommen). Am Anfang ist die Gastemperatur gleich der Zimmertemperatur und der Luftdruck hat den Standardwert, der in der Konstantentabelle angegeben ist. Das Gas kann als ideal betrachtet werden. Wir nehmen an, daß die Wände des Zylinders (einschließlich der Basis) eine sehr kleine Wärmeleitfähigkeit und

Prof. Mag. Helmuth Mayr, BRG 15 Schmelz, Wien und Universität Wien

Wärmekapazität haben, so daß der Wärmeaustausch zwischen Gas und Umgebung sehr langsam erfolgt und für die Lösung des Problems außer Acht gelassen werden kann.

Durch die Glasplatte wird Licht konstanter Leistung eines kontinuierlichen ("continuous wave") Lasers in den Behälter eingestrahlt. Diese Strahlung durchdringt die Luft und das Glas absorptionsfrei, wird aber von dem Gas in Innern des Behälters vollständig absorbiert. Durch die Absorption dieser Strahlung gelangen die Moleküle in einen angeregten Zustand, aus dem sie durch Emission von Infrarotstrahlung schnell schrittweise in den Grundzustand zurückkehren. Die Infrarotstrahlung wird durch andere Gasmoleküle absorbiert und durch die Wände des Behälters (einschließlich der Glasplatte) reflektiert. Die absorbierte Strahlungsenergie des Lasers wird deshalb in sehr kurzer Zeit in thermische Bewegungsenergie umgewandelt (molekulares Chaos) und bleibt danach genügend lange Zeit im Gas.

Wir beobachten, daß sich die Glasplatte nach oben bewegt. Nach einer bestimmten Einstrahlungszeit schalten wir den Laser aus und messen die Verschiebung der Glasplatte.

- Berechnen Sie mittels der angegebenen Daten und - falls nötig - der Daten auf dem Blatt mit den physikalischen Konstanten den Druck und die Temperatur des Gases nach der Einstrahlung [2 Punkte]
- Berechnen Sie die mechanische Arbeit, die durch das Gas (aufgrund der Strahlungsabsorption) verrichtet wurde. [1 Punkt]
- Berechnen Sie die während der Einstrahlung absorbierte Strahlungsenergie. [2 Punkte]
- Berechnen Sie die durch den Laser eingestrahlte Leistung, die vom Gas absorbiert wurde und die zugehörige Photonenanzahl pro Zeiteinheit (und damit die Zahl der elementaren Absorptionsprozesse pro Zeiteinheit). [1.5 Punkte]
- Berechnen Sie den Wirkungsgrad des Umwandlungsprozesses von optischer Energie in die an der Glasplatte verrichtete mechanische Arbeit. [1 Punkt]

Nach der Einstrahlung wird der Behälter langsam um 90° gedreht und damit in eine horizontale Lage gebracht. Der Wärmeaustausch zwischen Gas und Behälter kann weiterhin vernachlässigt werden.

- Erklären Sie, ob sich der Druck und / oder die Temperatur des Gases aufgrund dieser Rotation verändern und berechnen Sie gegebenenfalls die neue Temperatur und / oder den neuen Druck. [2.5 Punkte]

Daten

Zimmertemperatur: $T_0 = 20.0^\circ \text{C}$

Innendurchmesser des Zylinders: $2r = 100 \text{ mm}$

Masse der Glasplatte: $m = 800 \text{ g}$

Gasmenge innerhalb des Behälters: $n = 0.100 \text{ mol}$

molare Wärmekapazität des Gases bei

konstantem Volumen: $c_v = 20.8 \text{ J/(mol K)}$

Wellenlänge der Laserstrahlung: $\lambda = 514 \text{ nm}$

Einstrahlungszeit: $\Delta t = 10.0 \text{ s}$

Verschiebung der beweglichen Glasplatte nach der Einstrahlung $\Delta s = 30.0 \text{ mm}$

Lösungen

1. Der gesuchte Druck ergibt sich aus dem der Summe des Außendruckes p_0 und den durch das Deckelgewicht verursachten zusätzlichen Druck, was

$$p = p_0 + \frac{m \cdot g}{p \cdot r^2}$$

ergibt und den Zahlenwert 102,3 kPa liefert.

Gemäß Gasgleichung gilt für das anfängliche Gasvolumen V_1 :

$$V_1 = \frac{nRT_0}{p}$$

Durch Umformen und Einsetzen der Beziehung für den Druck folgt daraus für die Höhe h_1 :

$$h_1 = \frac{V_1}{p \cdot r^2} = \frac{n \cdot R \cdot T_0}{p_0 \cdot p \cdot r^2 + m \cdot g}$$

Da sich nach der Einstrahlung die Höhe

$$h_2 = h_1 + \Delta s$$

einstellt, folgt für die gesuchte Temperatur

$$T_2 = T_0 \cdot \left(1 + \frac{\Delta s}{h_1}\right) = T_0 + \frac{\Delta s \cdot (p_0 p r^2 + m \cdot g)}{n \cdot R}$$

was den Zahlenwert 322 K = 49°C liefert.

2. Die vom Gas verrichtete Gesamtarbeit setzt sich aus den durch die Verschiebung des Deckels und der gegen den Außendruck verrichteten Arbeitsanteilen zusammen. Daher gilt:

$$W = (m \cdot g + p_0 \cdot p \cdot r^2) \cdot \Delta s = 24,1 \text{ J}$$

3. Für die innere Energie gilt:

$$\Delta U = n \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1)$$

Für die vom System aufgenommene Energie gilt:

$$\begin{aligned} Q &= \Delta U + W = n \cdot c_v \cdot \frac{T_0 \cdot \Delta s}{h_1} + (mg + p_0 p r^2) \cdot \Delta s \\ &= \Delta s \cdot (p_0 p r^2 + mg) \cdot \left(\frac{c_v}{R} + 1\right) \end{aligned}$$

Dies ergibt: $Q = 84 \text{ J}$

4. Für die optische Laserleistung gilt:

$$P = \frac{Q}{\Delta t} = \left(\frac{c_v}{R} + 1\right) \cdot \frac{\Delta s}{\Delta t} \cdot (p_0 \cdot p \cdot r^2 + m \cdot g) = 8,4 \text{ W}$$

Da die Energie jedes Photons der Beziehung

$$E_1 = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

genügt, folgt für die Anzahl der Photonen:

$$N = \frac{P \cdot \lambda}{h \cdot c} = 2,2 \cdot 10^{19} \frac{\text{Photonen}}{\text{sec}}$$

5. Der gesuchte Wirkungsgrad ergibt sich durch die Änderung der potentiellen Energie der beweglichen Deckplatte. Daher muss gelten:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{m \cdot g \cdot \Delta s}{Q} = \frac{1}{\left(1 + \frac{p_0 p r^2}{mg}\right) \cdot \left(1 + \frac{c_v}{R}\right)} \\ &= 2,8 \cdot 10^{-3} \approx 0,3 \% \end{aligned}$$

6. Durch das "Hinlegen" des Gaszylinders ergibt sich eine adiabatische Druckänderung von p auf p_0 . Dadurch stellt sich auch eine neue Temperatur T_3 ein. Aus der Adiabatengleichung $p \cdot V^\gamma = \text{konstant}$ folgt durch Umformen:

$$T_3 = T_2 \cdot \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

Wobei für γ gilt:

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} = \frac{c_v + R}{c_v} = 1 + \frac{R}{c_v} = 1,399$$

Damit ergibt sich: $T_3 = 321 \text{ K} = 48^\circ\text{C}$

Magnetfeld eines V-förmigen Drahtes

Dieser Aufgabe liegt der historische Disput zwischen Ampere und Biot-Savart über das Wesen des Magnetismus zugrunde. Um die Auffassungsunterschiede experimentell zu untersuchen betrachteten sie das Magnetfeld eines V-förmig gebogenen Drahtes, der von einem elektrischen Strom konstanter Stromstärke durchflossen wird. (siehe Abb. 2).

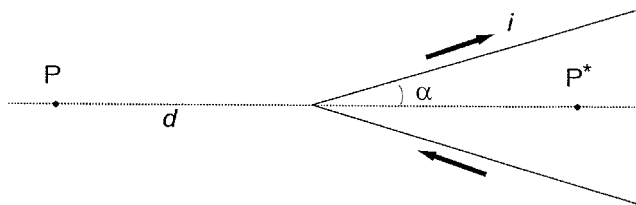


Abb.2

Die Kandidaten wurden mit derselben Anordnung konfrontiert. Zunächst wurde nach der Richtung des B-Feldes im Punkt P gefragt. Anschließend war der Proportionalitätsfaktor k in folgender Beziehung zu bestimmen:

$$|B(P)| = k \cdot \tan \frac{\alpha}{2}$$

In der dritten Teilaufgabe war die Feldstärke $B(P^*)$ in einem Punkt, der P gegenüber liegt zu bestimmen. In der vierten Teilaufgabe wurde angenommen, dass sich im Punkt P eine (idealisierte) kleine Magnetnadel befindet, die um einen festen Punkt schwingen könne. In diesem Fall wurde nach einer Beziehung zwischen der Periodendauer (für sehr kleine Auslenkungen) und den relevanten Systemparametern gefragt. Da Biot-Savart und Ampere ein derartiges Schwingungsverhalten als Kriterium für ihre verschiedenen Auffassungen verwendet hatten, war die Frage der Messbarkeit von besonderer Brisanz. Daher wurden die Kandidaten aufgefordert, eine bestimmten Messbarkeitskriterien entsprechende Dimensionierung dieses Experimentes zu berechnen.

Eine Raumsonde zum Jupiter

Die dritte theoretische Aufgabe behandelte die Geschwindigkeitsänderungen einer Raumsonde, die knapp am Riesenplaneten Jupiter vorbeirast. Zunächst war aus gegebenen Daten sowohl die Geschwindigkeit als auch der Abstand von Jupiter relativ zur Sonne zu berechnen. Dann musste die Bewegung der Raumsonde relativ zum Jupiter in allen Raumrichtungen analysiert und die Gesamtenergie der Sonde im Jupitersystem

berechnet werden. In weiterer Folge wurde der örtliche Bahnverlauf des Jupiters um die Sonne als Hyperbelast angenähert. Mit dieser Näherung musste die Bahn der Raumsonde bzw. deren Geschwindigkeitsänderung berechnet werden. Anschließend waren auf Grund gegebener Annäherungsverhältnisse diverse Systemparameter auszurechnen. Danach waren die Geschwindigkeitsänderungen der Sonde sowohl vom Jupiter aus als auch von der Sonne aus gesehen zu berechnen.

Erfreuliches

Mit Freude können wir feststellen, dass der Schüler Michael Schiestl aus Innsbruck sich so "wacker geschlagen" hatte, dass er sich eine Bronzemedaille verdiente. Herzliche Gratulation!

Physik-Olympiade-Kurse

Wie an dieser Stelle schon öfters erwähnt, beginnen bei uns alle olympischen Aktivitäten mit Physikolympiadekursen, die als spezielle unverbindliche Übung für Oberstufenschüler prinzipiell an allen AHS (und auch BHS) abgehalten werden können und normalerweise während einer Doppelstunde am Nachmittag stattfinden. In diesen Kursen sollen sich interessierte Schüler möglichst selbständig mit dem Knacken "physikalischer Nüsse" beschäftigen. Über Wettbewerbsstufen, die an der Schule, im betreffenden Bundesland und österreichweit abgehalten werden, können sich die besten bis zur Internationalen Physikolympiade qualifizieren. Jenen, die nicht so weit kommen, winken auf den verschiedenen Wettbewerbsebenen Buchpreise, Diplome (eventuell auch Sachpreise) und ab dem Landeswettbewerb auch Medaillen.

Falls Sie, geschätzte Leserin, lieber Leser, in der Oberstufe Physik unterrichten, kann ich Ihnen die Abhaltung eines solchen Olympiadekurses nur wärmstens ans Herz legen. Nicht nur die Schüler profitieren davon, auch Sie. Man bekommt so viele Anregungen, dass der "Normalunterricht" durch Neues immer wieder noch spannender und ergiebiger gestaltet werden kann.

Die nächste Internationale Physikolympiade findet vom 8. bis 16. Juli 2000 in Leicester/Großbritannien statt.



Peter Pippan (BRG Leoben), Klaus Schiessl (BG Berndorf), Michael Schiestl (BRG Innsbruck), Josef Stöckl (BRG Wörgl), Patrick Strasser (Bisch. Gymn. Graz) wurden von Mag. H. Mayr und Mag. G. Lechner betreut.