45. Internationale PhysikOlympiade Astana, Kasachstan 2014

Wettbewerbsleitung
Dr. Stefan Petersen
Tel.: 0431 / 880 - 5120
email: petersen@ipho.info

Sekretariat
Lulu Hoffmeister
Tel.: 0431 / 880 - 5387
email: sekretariat@ipho.info

Anschrift: IPN an der Universität Kiel
Olshausenstraße 62
24098 Kiel

Fax: 0431 / 880 - 3148
Webseite: **www.ipho.info**

Aufgaben der 2. Runde im Auswahlwettbewerb zur 45. IPhO

Hinweise zur Bearbeitung

- Teilnahmeberechtigt sind alle Schülerinnen und Schüler, die die 1. Runde erfolgreich abgeschlossen oder sich über einen anderen Wettbewerb für die 2. Runde qualifiziert haben und **nach dem 30. Juni 1994 geboren** sind.
- Die Aufgaben sind **ohne fremde Hilfe und in Einzelarbeit** zu lösen. Gemeinschaftslösungen sind nicht zulässig. **Beachten Sie hierzu auch die erste Seite des beigefügten Adressbogens und schicken Sie diesen ausgefüllt und unterschrieben mit!**
- Bitte bearbeiten Sie jede Aufgabe auf gesonderten Blättern und schreiben Sie auf jedes Blatt Ihren Namen und Ihren Schülercode.
- Die Lösungen können handschriftlich abgegeben werden. Die Darstellung sollte logisch vollständig und nicht unnötig breit sein. Wenn Sie Formeln oder Zwischenergebnisse, die nicht im Physiklehrbuch der Schule stehen, aus anderen Quellen entnehmen, geben Sie diese bitte an.
- **Das Lösen der Probleme mit dem Computer ist, wenn nicht anders angegeben, nicht zulässig**. Sie dürfen einen Computer unterstützend (zum Beispiel zum Tippen Ihrer Bearbeitung oder zum Zeichnen) verwenden. Die Lösung muss aber ohne Computer nachvollziehbar sein.
- Der **Abgabetermin ist der 30.10.2013** (Poststempel). Bis zu diesem Datum müssen Sie Ihre **Bearbeitung unkorrigiert zu Ihrem Landesbeauftragten schicken**. Die Mitteilung, ob Sie in die nächste Runde kommen, erhalten Sie kurz vor Weihnachten. Eingeladen werden die etwa 50 Bestplatzierten. Der **Termin der 3. Runde ist der 01. bis 07.02.2014**.
- Die eingereichten Arbeiten werden nicht zurückgeschickt. Es wird deshalb empfohlen, für eigene Zwecke eine Kopie anzufertigen. Eine Musterlösung geht Ihnen mit der Benachrichtigung über Ihr Abschneiden in der 2. Runde zu.
- In der Regel haben selbst die Bestplatzierten nicht alle Aufgaben richtig gelöst. **Verlieren Sie also nicht den Mut** und schicken Sie Ihre Bearbeitung auch dann ein, wenn Sie nicht alle Aufgabenteile bearbeiten konnten. Wir wünschen viel Erfolg!
- Weitere Informationen und Aktuelles finden Sie unter **www.ipho.info**.

Aufgabe 1 Wiederbelebung (20 Pkt.)

Defibrillatoren werden dazu benutzt, den Herzrhythmus eines nicht regelmäßig schlagenden Herzens wiederherzustellen. Dazu wird gleichzeitig ein großer Anteil der Herzmuskelzellen durch einen Stromschlag elektrisch stimuliert.

Betrachten Sie einen einfachen Defibrillator bestehend aus einem Kondensator, der sich über zwei mit dem Brustkorb des Patienten verbundene Elektroden in einem Zeitraum von 150 ms auf etwa 5% der Spannung des voll geladenen Kondensators entlädt. Der Widerstand des Brustkorbes zwischen den Elektroden betrage etwa 100 Ω und die für die Defibrillation notwendige Energie betrage 200 J.

a) Schätzen Sie ab, welche Kapazität der Kondensator besitzen muss und auf welche Spannung er für den Betrieb mindestens aufgeladen werden muss. *(5 Pkt.)*

Bei mobilen Defibrillatoren, wie sie an einigen öffentlichen Plätzen zu finden sind, wird der Kondensator über eine Batterie aufgeladen. Da die Spannung U_0 der Batterie geringer ist, als die notwendige Kondensatorspannung, muss sie hochgewandelt werden. Eine Möglichkeit dazu bietet ein so genannter Aufwärtswandler, wie er in der folgenden Abbildung skizziert ist.

Der Schalter S öffnet und schließt sich periodisch, wobei er einen Anteil g der Periodendauer geschlossen und einen Anteil $1 - g$ offen ist. Die Periodendauer soll dabei sehr klein gegenüber der Zeitkonstante des Kondensator-Widerstand-Systems sein. Die Größe g wird als Tastverhältnis bezeichnet.

Der eingezeichnete, sehr hochohmige Widerstand R bildet das ohmsche Verhalten des Kondensators ab. Alle Bauteile dürfen als ideal angenommen werden, d.h. insbesondere, dass die Diode in Sperrrichtung vollständig sperrt und in Durchlassrichtung keinen Spannungsabfall verursacht.

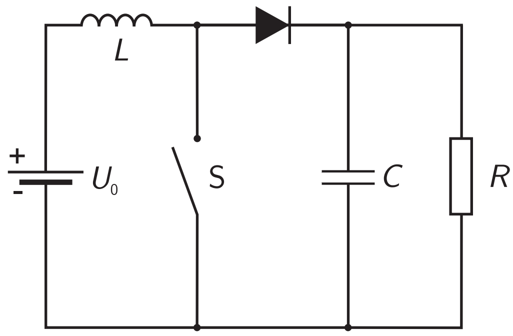

Abb. 1: *Schaltskizze für Aufwärtswandler.*

b) Leiten Sie einen Ausdruck für die sich nach einiger Zeit einstellende maximale Kondensatorspannung in Abhängigkeit von den auftretenden Größen her. *(14 Pkt.)*

c) Bestimmen Sie, wie groß das Tastverhältnis g gewählt werden muss, um einen Kondensator einer Kapazität C von 100 μF mit einem ohmschen Widerstandsanteil von $R = 100\,\mathrm{M\Omega}$ über eine 12,0 V Batterie auf eine Spannung von 500 V aufzuladen, wenn die Induktivität L der Spule 5,0 mH beträgt. *(1 Pkt.)*

Aufgabe 2 Kristallschwingungen und Lichtbeugung (20 Pkt.)

(Idee: Manuel Bärenz)

Kennzeichnend für einen Kristall ist die regelmäßige Anordnung seiner Bausteine, also der Atome oder Moleküle, aus denen er besteht. Diese Regelmäßigkeit erlaubt kollektive Phänomene, die bei den einzelnen Bausteinen nicht zu beobachten sind. In dieser Aufgabe sollen Sie die Schwingungsanregungen von Kristallen untersuchen.

Betrachten Sie dazu der Einfachheit halber einen eindimensionalen Kristall, bei dem eine sehr große Anzahl Atome, wie in der nebenstehenden Abbildung, entlang einer Achse angeordnet sind. Die Atome besitzen jeweils die Masse m und befinden sich an den Positionen x_i mit $i \in \mathbb{Z}$. Die Ruhelage des i-ten Atoms liegt bei $i \cdot a$, wobei a die Gitterkonstante des Kristalls darstellt.

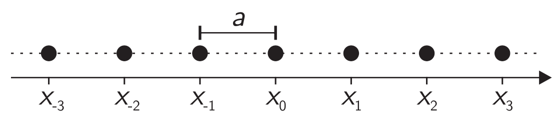

Abb. 2: *Skizze der Atome des eindimensionalen Kristalls an ihren jeweiligen Ruhelagen.*

Die Wechselwirkung der Atome untereinander kann in einer einfachen Näherung als Kraft einer Feder der Federkonstanten D zwischen benachbarten Atomen modelliert werden. Das i-te Atom bewirkt demnach auf das $(i-1)$-te Atom eine Kraft der Größe

$$F_{i \to i-1} = D\,(x_i - x_{i-1} - a)\ .$$

a) Stellen Sie die Bewegungsgleichung für die Position des i-ten Atoms im Kristallgitter auf und zeigen Sie, dass die Bewegungsgleichungen der Atome gelöst werden durch stehende Wellen der Form

$$x_i(t) = \hat{x}\,\sin(i\,a\,k)\,\sin(\omega\,t) + i\,a\,.$$

Geben Sie für die Lösung ω in Abhängigkeit von D, m, a sowie k an und bestimmen Sie den Maximalwert von ω in Abhängigkeit von den Parametern des Kristalls. Skizzieren Sie außerdem den Verlauf von ω als Funktion von k. *(5 Pkt.)*

Die Größe k wird als Wellenzahl bezeichnet und ω ist die Kreis- oder Winkelfrequenz der Welle. Sie hängen mit der Wellenlänge λ und der Frequenz f der Schwingung zusammen über

$$|k| = \frac{2\,\pi}{\lambda}\,, \qquad \text{sowie} \qquad \omega = 2\,\pi\,f\,.$$

Wenn die Gitterkonstante des Kristalls sehr klein gegenüber der Wellenlänge ist, „spürt“ die Welle die Inhomogenität des Kristallgitters kaum. Sie verhält sich dann wie Licht in einem homogenen Medium und ω ist ungefähr proportional zu k. Damit ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit $c = \left|\frac{\partial \omega}{\partial k}\right| \approx \left|\frac{\omega}{k}\right|$ der Wellen etwa konstant und Wellenpakete können sich über größere Strecken in dem Kristall ausbreiten. Dies ist der Grund dafür, dass sich Schall ohne große Verzerrungen durch kristalline Festkörper bewegen kann.

b) Drücken Sie die Schallgeschwindigkeit c in dem Kristall für Wellenlängen, die groß gegenüber dem Atomabstand a sind, durch die Größen D, m und a aus. *(1 Pkt.)*

In vielen Fällen tritt Schall nicht als stehende, sondern als bewegte Welle auf.

c) Zeigen Sie, dass sich die in Aufgabenteil a) betrachtete stehende Welle als $i \cdot a$ plus einer Kombination mehrerer bewegter Wellen der Form

$$x_i' = \hat{x}'\,\sin\left(\omega'\,t - i\,a\,k' - \phi'\right)$$

darstellen lässt. Die Wellenzahlen k' und die Phasen ϕ' können dabei beliebige reelle Werte annehmen, die Kreisfrequenzen ω' dagegen nur positive. *(2 Pkt.)*

Im Folgenden sollen nun als konkretes Beispiel Schallwellen in einem quaderförmigen Diamantkristall betrachtet werden. Der Diamant soll so ausgerichtet sein, dass seine Kanten parallel zu einem kartesischen Koordinatensystem verlaufen. Effekte der dreidimensionalen Struktur des Kristalls sollen dabei vernachlässigt werden, so dass die bisherigen Ergebnisse weiter verwendet werden können. Sie können die folgenden Werte für den Diamantkristall verwenden:

Atomabstand im Diamantkristall:	$a = 1{,}78 \cdot 10^{-10}\,\mathrm{m}$	
Atommasse für Diamant:	$m = 12{,}01\,\mathrm{u}$	(u ist dabei die atomare Masseneinheit)
Schallgeschwindigkeit in Diamant:	$c = 1{,}8 \cdot 10^{4}\,\mathrm{m\,s^{-1}}$	
Brechungsindex von Diamant:	$n = 2{,}42$	

In dem Kristall wird in z-Richtung eine stehende Schallwelle der Frequenz $f = 1{,}0\,\mathrm{GHz}$ erzeugt.

d) Bestimmen Sie die Wellenlänge λ der stehenden Welle und zeigen Sie, dass bei der vorliegenden Frequenz die Proportionalität zwischen der Kreisfrequenz ω und der Wellenzahl k in guter Näherung gilt. *(2 Pkt.)*

Der Kristall wird nun entlang der x-Achse zusätzlich mit einem Laserstrahl der Wellenlänge $\lambda_L = 630\,\mathrm{nm}$ bestrahlt. Beim Durchgang durch den Kristall wird der Laserstrahl an den Stellen, an denen die stehende Schallwelle zusammengestaucht ist, stärker gestreut als an anderen Stellen. Diese Stellen bilden daher ein optisches Gitter für den Laserstrahl.

e) Bestimmen Sie den Winkel zum ungebeugten Strahl, unter dem das erste Hauptmaximum des Beugungsbildes hinter dem Kristall zu sehen ist. *(4 Pkt.)*

Die betrachteten Schallwellen lassen sich auch quantenmechanisch interpretieren. Ähnlich wie ein Laserstrahl aus einzelnen Lichtquanten, den Photonen, besteht, stellt man sich dazu die Schallwelle aus einer Anzahl Schwingungsquanten zusammengesetzt vor. Das Quantum der Schallwellen wird „Phonon" genannt. Nehmen Sie für die vorliegende Situation an, dass ein Phonon die gleichen Eigenschaften wie ein Photon besitzt. Insbesondere soll seine Energie mit der Frequenz über $E = h\,f$ zusammenhängen, wobei h das Plancksche Wirkungsquantum bezeichnet. Die Photonen des Laserstrahls können mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit Phononen absorbieren.

f) Erklären Sie die ober- und unterhalb des ungebeugten Strahls auftretenden Hauptmaxima mit Hilfe des quantenmechanischen Bildes. Bestimmen Sie auch für diese Betrachtungsweise den Winkel zum ungebeugten Strahl, unter dem das erste Hauptmaximum des Beugungsbildes hinter dem Kristall zu sehen ist.

Geben Sie an, welche Bedingung die Wellenlängen λ und λ_L erfüllen müssen, damit der klassisch bestimmte Beugungswinkel mit dem aus der quantenmechanischen Betrachtung gut übereinstimmt. *(6 Pkt.)*

Aufgabe 3 Tropische Wirbelstürme (30 Pkt.)

Sturmsysteme in tropischen Breitengraden können deutlich höhere Windgeschwindigkeiten aufweisen und dadurch deutlich zerstörerischer wirken als die meisten Stürme zum Beispiel in Deutschland. Die großflächig aufgeheizte Meeresoberfläche in der Nähe des Äquators spielt dabei als Energielieferant für die Stürme eine wesentliche Rolle.

Grundlegende Eigenschaften dieser Wirbelstürme lassen sich mit einem vereinfachten thermodynamischen Modell, wie es in Abbildung 3 dargestellt ist, untersuchen.

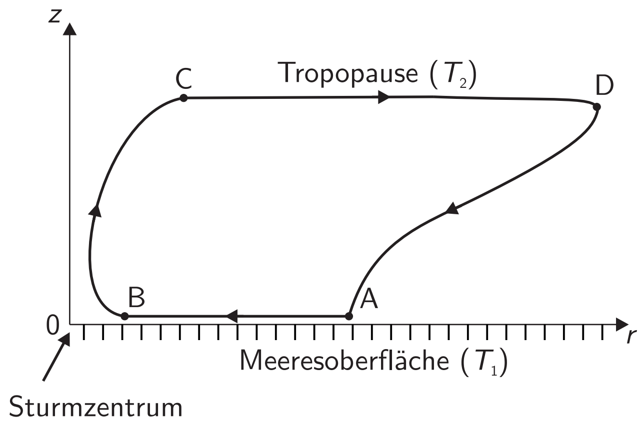

Abb. 3: *Querschnittskizze für die Bewegung eines Luftpaketes in einem tropischen Wirbelsturm. z gibt die Höhe über der Meeresoberfläche und r den Abstand von der Mitte des Sturmzentrums an.*

Betrachte ein kleines Luftpaket der Masse Δm, das sich in Höhe der Meeresoberfläche von dem Hochdruckgebiet bei A zu dem äußeren Rand des Sturmzentrums (B) bewegt. Die Temperatur der Luft bleibt dabei konstant gleich der Meerestemperatur T_1, jedoch verdunstet laufend Meerwasser, so dass die Luftfeuchtigkeit in dem Luftpaket zunimmt.

In der Nähe des Sturmzentrums ist die Luft dann gesättigt und die zusätzlich aufgenommene Luftfeuchtigkeit regnet sich ab. Dadurch steigen die Luftmassen in große Höhen und kühlen dabei auf die Temperatur T_2 der Tropopause ab. Dieser Prozess von B bis zu dem mit C gekennzeichneten Gebiet in der Abbildung läuft in guter Näherung ohne Wärmeaustausch mit der Umgebung ab. Bei etwa gleichbleibender Temperatur wandert die Luft dann entlang der Tropopause wieder vom Zentrum des Sturms nach außen und gibt Wärme in Form von Strahlung ab. Schließlich sinkt die abgekühlte Luft wieder nach unten zum Gebiet A. Auch dieser Vorgang geschieht ohne nennenswerten Wärmeaustausch. Auf diese Weise entsteht ein thermodynamischer Kreisprozess, der in diesem Modell als reversibel angenommen wird.

a) Bestimmen Sie die von dem Luftpaket entlang des Weges von A nach B aufgenommene Wärme Q_1. Der Partialdruck des Wasserdampfes kann dabei zu allen Zeiten als sehr klein gegenüber dem Luftdruck angenommen werden. Drücken Sie das Ergebnis aus durch die Masse Δm, die Masse Δm_{Dampf} des aufgenommenen Wasserdampfes, die Drücke p_A und p_B bei A bzw. B, die Temperatur T_1 sowie auftretende Konstanten. *(10 Pkt.)*

b) Leiten Sie einen Ausdruck für die während des Kreisprozesses insgesamt an dem Luftpaket verrichtete Arbeit W her und drücken Sie diese durch die in Aufgabenteil a) verwendeten Größen sowie T_2 aus. *(6 Pkt.)*

Nehmen Sie an, dass etwa 50% der an dem Luftpaket verrichteten Arbeit direkt zu einer Zunahme der Rotationsenergie des Luftpaketes um das Zentrum des Sturmes auf dem Weg von A nach B führen.

c) Geben Sie die Rotationsgeschwindigkeit des Wirbelsturms v_B am Rand des Zentrums in Abhängigkeit von den in den vorigen Aufgabenteilen verwendeten Größen und der Rotationsgeschwindigkeit v_A am äußeren Rand des Sturmes an. *(3 Pkt.)*

Verwenden Sie für die letzten Aufgabenteile die folgenden numerischen Werte:

Universelle Gaskonstante	$R = 8{,}314\,\mathrm{J\,mol^{-1}\,K^{-1}}$
Temperatur an der Meeresoberfläche	$T_1 = 303\,\mathrm{K}$
Temperatur an der Tropopause	$T_2 = 213\,\mathrm{K}$
Luftdruck bei A (Rand des Wirbelsturmes)	$p_\mathrm{A} = 1000\,\mathrm{mbar}$
Luftdruck bei B (Rand des Sturmzentrums)	$p_\mathrm{B} = 950\,\mathrm{mbar}$
Sättigungsdampfdruck über Wasser bei Druck p_B und Temperatur T_1	$E_\mathrm{W} = 43\,\mathrm{mbar}$
Mittlere molare Masse von Luft	$M_\mathrm{L} = 29 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{kg\,mol^{-1}}$
Molare Masse von Wasser	$M_\mathrm{W} = 18 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{kg\,mol^{-1}}$
Verdampfungswärme von Wasser bei Temperatur T_1	$\lambda_\mathrm{W} = 2{,}41 \cdot 10^{6}\,\mathrm{J\,kg^{-1}}$
Relative Luftfeuchtigkeit der Luft bei A	$\varphi = 75\%$

d) Bestimmen Sie für $v_\mathrm{A} \approx 10\,\mathrm{m\,s^{-1}}$ die Rotationsgschwindigkeit des Wirbelsturms v_B am Rand des Zentrums. *(4 Pkt.)*

Hinweis: Wenn Sie den Wert für die Rotationsgeschwindigkeit nicht bestimmen konnten, können Sie für die folgenden Teilaufgaben den Ersatzwert $v_\mathrm{B} = 250\,\mathrm{km\,h^{-1}}$ verwenden.

Die Rotationsgeschwindigkeit v der Luft in einem Wirbelsturm ist außerhalb des Zentrums des Sturmes etwa proportional zur inversen Wurzel des Abstandes r, d.h. es gilt $v \sim 1/\sqrt{r}$.

e) Berechnen Sie den ungefähren Durchmesser des betrachteten Wirbelsturmes unter der Annahme, dass der Punkt B bei $r \approx 10\,\mathrm{km}$ liegt. *(2 Pkt.)*

f) Schätzen Sie die Rotationsenergie des gesamten Wirbelsturmes ab und vergleichen Sie diesen Wert mit dem Primärenergieverbrauch pro Jahr in Deutschland, der 2011 bei etwa 14 Exajoule lag. Nehmen Sie dazu eine konstante Luftdichte von $1{,}2\,\mathrm{kg\,m^{-3}}$ und eine Höhe des Wirbelsturmes von etwa 12 km an. *(4 Pkt.)*

g) Wenn der Wirbelsturm auf Land trifft, wird seine Energieversorgung unterbunden und er wird schwächer. Nehmen Sie an, dass der betrachtete Wirbelsturm sich an Land innerhalb von etwa 10 Tagen vollständig auflöst und schätzen Sie ab, welche durchschnittliche Leistung der Wirbelsturm dabei abgibt. *(1 Pkt.)*

Aufgabe 4 Experimentelle Aufgabe - Große Sprünge mit kleinen Bällen (30 Pkt.)

Lässt man einen Tischtennisball senkrecht auf eine feste Unterlage fallen, hüpft er in der Regel viele Male, bevor er zur Ruhe kommt. Dabei verringert sich langsam die Hüpfdauer T, also die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Stößen mit der Unterlage. Sie sollen in dieser Aufgabe diese Stöße mit Hilfe einer Audioaufnahmesoftware untersuchen.

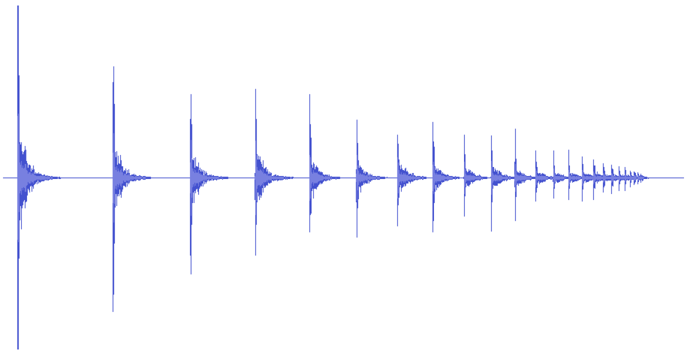

Abb. 4: *Tonaufnahme für das Hüpfen eines Tischtennisballs auf einer festen Unterlage.*

Als Materialien dürfen Sie in diesem Versuch Tischtennisbälle, einen Computer oder anderes Gerät mit einer Audioaufnahmesoftware[1], ein Lineal, verschiedene Unterlagen sowie Papier verwenden.

Für die Masse m und den Durchmesser d eines Tischtennisballs können Sie die für Wettkämpfe vorgeschriebenen Werte von $m = (2{,}70 \pm 0{,}05)\,\mathrm{g}$ sowie $d = (40{,}0 \pm 0{,}5)\,\mathrm{mm}$ verwenden. Sie dürfen die Werte für Ihren Ball aber auch mit einer Waage und einem Messschieber z.B. in der Schule bestimmen.

Theoretische Vorüberlegung

Da der Ball relativ leicht ist, kann der Einfluss der umgebenden Luft nicht unbedingt vernachlässigt werden. Fällt ein Körper mit einer Geschwindigkeit v durch ein gasförmiges Medium der Dichte ρ, so wird er in einem großen Geschwindigkeitsbereich mit einer Reibungskraft

$$F_{\mathrm{R}} = \frac{1}{2}\, c_{\mathrm{W}}\, A\, \rho\, v^2$$

abgebremst. Dabei bezeichnet A die Querschnittsfläche des Körpers senkrecht zur Bewegung und c_{W} den sogenannten Luftwiderstandsbeiwert, der von der Form des Körpers abhängt. Für eine Kugel ist $c_{\mathrm{W}} \approx 0,4$.

Verwenden Sie in den folgenden Aufgaben für die Dichte von Luft den Wert $\rho_{\mathrm{L}} = 1{,}20\,\mathrm{kg\,m^{-3}}$ und für die Schwerebeschleunigung auf der Erde $g = 9{,}81\,\mathrm{m\,s^{-2}}$.

a) Die angegebene Masse des Balles ist die Masse, die eine Waage unter Atmosphärenbedingungen anzeigt. Berechnen Sie, welche Masse die Waage im Vakuum anzeigen würde. *(1 Pkt.)*

b) Schätzen Sie theoretisch ab, bis zu welcher Hüpfdauer T die Bewegung des Tischtennisballs nur schwach durch die Luftreibung abgebremst wird, d.h. für welchen Bereich der Hüpfdauer der Einfluss der Luftreibung auf die Bewegung in guter Näherung vernachlässigt werden kann. *(2 Pkt.)*

Untersuchung ohne Berücksichtigung der Luftreibung

Bei jedem Stoß mit der Unterlage verliert der Tischtennisball einen relativ kleinen Teil seiner kinetischen Energie. Wenn der Ball mit einer kinetischen Energie E_{kin} auf die Unterlage trifft, gilt also für die kinetische Energie E'_{kin} direkt nach dem Stoß

$$E'_{\mathrm{kin}} = \eta\, E_{\mathrm{kin}}\,.$$

Der als konstant angenommene Faktor η ist dabei ein Maß für die Elastizität des Stoßes.

[1] Geeignet ist zum Beispiel die freie open-source Software Audacity, die für verschiedene Plattformen erhältlich ist.

c) Bestimmen Sie experimentell den Elastizitätsfaktor η für den Stoß des Tischtennisballs für zwei unterschiedliche Unterlagen. Lassen Sie dazu den Ball aus einer festen Höhe auf die Unterlage fallen. Führen Sie den Versuch so durch, dass Sie die Luftreibung vernachlässigen können und schätzen Sie den Fehler Ihres Ergebnisses ab. *(11 Pkt.)*

d) Bestimmen Sie jeweils aus Ihren Messungen die Zeitdauer vom ersten Auftreffen auf die Unterlage bis der Ball aufhört zu hüpfen. Führen Sie auch hierzu eine Fehlerabschätzung durch. *(3 Pkt.)*

Hüpfen mit Berücksichtigung der Luftreibung

Die Berücksichtigung der Luftreibung macht die Untersuchung der Bewegung des Balles aufwändiger. Bei einem Fall aus sehr großer Höhe bewegt sich der Ball nach einer längeren Fallstrecke mit einer konstanten Geschwindigkeit, der Grenzgeschwindigkeit v_∞. Genauer gilt für die Fallgeschwindigkeit v des Balles in Abhängigkeit von der Fallzeit t

$$|v(t)| = v_\infty \tanh\left(\frac{g\,t}{v_\infty}\right) .$$

Hierbei wird angenommen, dass der Ball anfänglich in Ruhe ist. Für eine nach oben gerichtete Bewegung, die mit der senkrechten Geschwindigkeit v_0 bei $t = 0$ beginnt, gilt hingegen

$$|v(t)| = v_\infty \tan\left\{\arctan\left(\frac{v_0}{v_\infty}\right) - \frac{g\,t}{v_\infty}\right\}$$

so lange das Argument des Tangens positiv ist. Wenn die Geschwindigkeit des Balles beim Hüpfen klein im Vergleich zur Grenzgeschwindigkeit ist, sind die Steig- und die Falldauer zwischen zwei Stößen mit dem Boden in guter Näherung gleich. Bei der Auswertung können darüber hinaus Näherungen für die vorkommenden Winkelfunktionen hilfreich sein. So gilt für $|x| \ll 1$ zum Beispiel $\tanh(x) = x - \frac{1}{3}x^3 + \frac{2}{15}x^5 + \ldots$.

e) Vergleichen Sie die Hüpfdauern für jeweils zwei aufeinanderfolgende Hüpfer und bestimmen Sie nun unter Berücksichtigung der Luftreibung experimentell erneut den Elastizitätsfaktor η für das Hüpfen auf den beiden Unterlagen. Vergleichen Sie die erhaltenen Werte mit denen, die Sie ohne Berücksichtigung der Luftreibung ermittelt haben. *(9 Pkt.)*

f) Bestimmen Sie aus Ihren Messwerten auch den Luftwiderstandsbeiwert c_W des Tischtennisballes. Eine Fehlerabschätzung ist für diese Teilaufgabe nicht erforderlich. *(4 Pkt.)*

Allgemeiner Hinweis

Beschreiben Sie in allen Aufgabenteilen Ihre theoretischen Überlegungen, gemachte Näherungen, die Versuchsaufbauten, die experimentelle Durchführung und die Auswertung so, dass sie gut nachvollziehbar sind.

Das IPhO-Team wünscht Ihnen viel Spaß und Erfolg bei der 2. Runde!