42. Internationale PhysikOlympiade
Bangkok, Thailand 2011

Adresse der Wettbewerbsleitung
Dr. Stefan Petersen
IPN an der Universität Kiel
Olshausenstraße 62
24098 Kiel
Telefon: 0431 / 880 - 5120
email: sekretariat@ipho.info

Aufgaben der 2. Runde

- 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 1991 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 diese auf jeden Fall vollständig ausgefüllt und unterschrieben mit!**
- Bitte bearbeiten Sie jede Aufgabe auf gesonderten Blättern und schreiben Sie auf jedes Blatt Ihren Namen und Ihre Adresse.
- 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 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 29.10.2010** (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 29.01. bis 04.02.2011**.
- 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 zweiten Runde zu.
- In der Regel haben selbst die Bestplatzierten nicht alle Aufgaben vollständig richtig gelöst. **Verlieren Sie also nicht den Mut** und schicken Sie Ihre Aufgaben auch dann ein, wenn Sie nicht alle Aufgabenteile bearbeiten konnten. Wir wünschen viel Erfolg!
- Unter **www.ipho.info** finden Sie weitere Informationen und die Adressen der Landesbeauftragten.

Aufgabe 1 Luftballon (15 Punkte)

Betrachten Sie für diese Aufgabe einen kleinen, luftgefüllten Ballon, der eine sehr dünne, elastische Hülle besitzt. Der Luftballon kann dabei stets als kugelförmig angenommen werden und der durch die Ballonhülle auf das Innere des Ballons ausgeübte Druck ist invers proportional zum Radius des Ballons.

Verwenden Sie zum Bearbeiten der Aufgaben außerdem folgende Werte:

Äußerer Luftdruck	$p_{\text{Luft}} = 1,0 \cdot 10^5\,\mathrm{N\,m^{-2}}$
Umgebungstemperatur	$T_0 = 300\,\mathrm{K}$
Erdbeschleunigung	$g = 9,81\,\mathrm{m\,s^{-2}}$
Dichte von Wasser	$\rho_{\text{Wasser}} = 1000\,\mathrm{kg\,m^{-3}}$

Sollten Sie weitere Werte bzw. Konstanten benötigen, entnehmen Sie diese bitte einem Physikbuch.

a) Bei einem Ballonradius r_0 betrage der Druck im Inneren des Ballons $1,2 \cdot 10^5\,\mathrm{Pa}$. Bestimmen Sie den Druck, der im Inneren des Ballons herrscht, nachdem der Ballon auf einen Radius von $\frac{3}{2}\,r_0$ aufgeblasen wurde. Die Lufttemperatur in dem Ballon soll dabei auch nach dem Aufblasen der Umgebungstemperatur entsprechen. *(2 Punkte)*

b) Der so aufgeblasene Ballon wird nun langsam in Wasser untergetaucht. Bestimmen Sie, auf welche Tiefe unterhalb der Wasseroberfläche der Ballon gebracht werden muss, damit dessen Radius erneut r_0 beträgt.

   Nehmen Sie dazu an, dass die Ballonhülle sehr gut wärmeleitend ist und die Wassertemperatur konstant $10\,^\circ\mathrm{C}$ beträgt. *(3 Punkte)*

c) Bestimmen Sie, analog zum vorherigen Aufgabenteil, ebenfalls die Tiefe, auf die der Ballon gebracht werden muss, für den Fall, dass die Ballonhülle ideal wärmesiolierend ist und berechnen Sie außerdem die Temperatur der Luft in dem Ballon bei dieser Tiefe. *(4,5 Punkte)*

d) Berechnen Sie jeweils die Arbeit, die verrichtet werden muss, um den Ballon, wie in den Aufgabenteilen b) und c), im Wasser langsam auf die entsprechenden Tiefen unterzutauchen, wenn der Ballonradius vor dem Aufblasen $r_0 = 10\,\mathrm{cm}$ beträgt. *(5,5 Punkte)*

Aufgabe 2 Kugel und Münze im Trichter (21+9 Punkte)

Eine bei Spendensammlungen gelegentlich zu bestaunende Sammelvorrichtung besteht aus einem großen Trichter, in den vom oberen Rand Münzen hineingerollt werden können. Die Münzen rollen dann nach unten und werden in einem unter dem Trichter platzierten Behälter gesammelt.

In dieser Aufgabe sollen Sie anhand vereinfachter Modelle Eigenschaften solcher Trichter untersuchen, um anschließend kurz eine rollende Münze in einem Trichter zu betrachten. Der Radius des rotationssymmetrischen Trichters werde dabei durch eine Funktion $R(z)$ beschrieben, die den Radius, wie in der Skizze zu sehen, als Funktion des vertikalen Abstandes zum unteren Rand beschreibt. Der Trichter sei sowohl oben als auch unten offen.

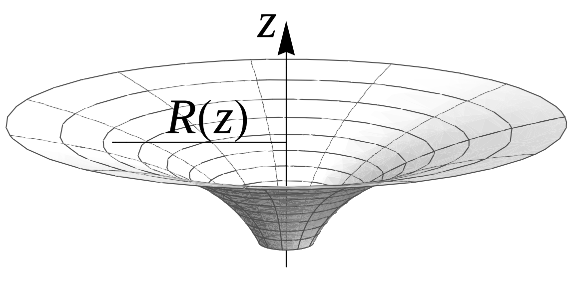

Abbildung 1: Skizze eines Münzsammeltrichters

Nehmen Sie an, dass sich die Körper immer entlang der Wand des Trichters bewegen. Die Gravitationsbeschleunigung der Erde beträgt $g = 9,81\,\mathrm{m\,s^{-2}}$ und wirkt in Richtung der negativen z-Achse.

2.1 Punktförmige Masse im Trichter

Betrachten Sie in den folgenden Aufgaben eine Punktmasse der Masse m, die sich reibungsfrei in unterschiedlichen Trichtern bewegt.

a) Die Punktmasse wird mit einer horizontal und tangential zur Trichterfläche gerichteten Geschwindigkeit v bei einer Höhe z in einen Trichter gesetzt. Überraschenderweise bleibt die Masse, unabhängig von der gewählten z-Koordinate, bei der Bewegung stets auf der gleichen Höhe, ihre z-Koordinate ist also konstant.

Bestimmen Sie, welche Form der Trichter dafür haben muss, d.h. geben Sie die Funktion $R(z)$ in Abhängigkeit von den auftretenden Parametern an. Bestimmen Sie außerdem, wie hoch der Trichter demnach sein muss, wenn sich die Masse mit einer Geschwindigkeit von $v = 1,0\,\mathrm{m\,s^{-1}}$ bewegt und der obere bzw. untere Radius des Trichters 50 cm bzw. 5,0 cm betragen. *(4 Punkte)*

b) Die Masse wird nun mit einer horizontal und tangential zur Trichterfläche gerichteten Geschwindigkeit v an dem oberen Rand eines anderen Trichters platziert. Der Radius des Trichters wird durch die Funktion $R(z) = R_{\mathrm{oben}}/\sqrt{\frac{2g}{v^2}(h-z)+1}$ beschrieben, wobei R_{oben} den Trichterradius am oberen Rand bezeichnet und h die Höhe des Trichters angibt.

Zeigen Sie, dass die Masse für jeden Wert von v stets an dem oberen Rand des Trichters bleibt, also ihre z-Koordinate nicht ändert.

Zusätzlich zu der Geschwindigkeit v besitze die Masse nun anfänglich eine Geschwindigkeitskomponente u senkrecht zur horizontalen Geschwindigkeit und entlang der Trichterfläche.

Geben Sie qualitativ an, wie die Bewegung der Masse verläuft und schätzen Sie für die Werte $R_{\mathrm{oben}} = h = 50\,\mathrm{cm}$ sowie $v = 40\,\mathrm{cm\,s^{-1}}$ und $u = 10\,\mathrm{cm\,s^{-1}}$ die Zeit ab, bis die Masse den Trichter verlässt. *(7 Punkte)*

c) Gegeben sei nun ein dritter Trichter, dessen Radius durch die Funktion $R(z) = R_{\mathrm{unten}} + c\,z$ mit einer positiven Konstanten c beschrieben wird. Die Punktmasse wird erneut nur mit einer horizontalen Geschwindigkeit v in den Trichter gebracht.

Zeigen Sie, dass für jeden hinreichend großen Wert von v eine Höhe z existiert, für die die Masse stets auf dieser Höhe bleibt, also ihre z-Koordinate nicht ändert. Geben Sie diese Höhe an. Geben Sie außerdem an, wie groß die Geschwindigkeit mindestens sein muss, damit eine solche Höhe existiert. *(3 Punkte)*

d) Betrachten Sie einen Trichter wie in dem Aufgabenteil c) für eine Trichterhöhe von 30 cm sowie einem oberen bzw. unteren Radius des Trichters von 50 cm bzw. 45 cm. Die Masse werde mit der horizontalen Geschwindigkeit an dem oberen Rand platziert, die notwendig ist, damit sie auf dieser Höhe bleibt. Nun erhält die Masse erneut eine zusätzliche Geschwindigkeit u senkrecht zu der horizontalen Geschwindigkeit und entlang der Trichterfläche.

Beschreiben Sie qualitativ die Bewegung, die die Punktmasse nun ausführt, und bestimmen Sie den Bereich der zusätzlichen Geschwindigkeit u, in dem die Punktmasse das Gefäß nicht am unteren Rand verlässt. *(7 Punkte)*

2.2 Münze im Trichter

Betrachten Sie nun den Fall einer Münze in einem Trichter. Die Münze besitze eine homogen verteilte Masse m und einen Radius r, der stets als sehr klein gegenüber dem Trichterradius angenommen werden kann. Die Dicke der Münze sei sehr klein und die Münze soll in dem Trichter, ohne zu rutschen, rollen. Die Rollreibung ist dabei vernachlässigbar.

e) Wie in Aufgabenteil a) bewegt sich die Münze bei einer rein horizontalen Geschwindigkeit v für eine bestimmte Trichterform stets auf der gleichen Höhe.

Bestimmen Sie auch für diesen Fall, welche Form der Trichter dafür haben muss, d.h. geben Sie die Funktion $R(z)$ in Abhängigkeit von den auftretenden Parametern an. Beachten Sie dabei, dass $r/R \ll 1$ gelten soll. *(6 Punkte)*

f) Beschreiben Sie qualitativ, was passiert, wenn man bei dem in e) betrachteten Trichter die Münze durch eine Kugel gleichen Radius und gleicher, homogen verteilter Masse ersetzt. *(3 Punkte)*

Aufgabe 3 Teilchenphysik am Large Hadron Collider (LHC) (11+7+7 Punkte)

Diese Aufgabe ist eine Einführung in die experimentelle Teilchenphysik und soll ansatzweise erklären, warum der LHC so gebaut wurde, wie er ist.

Sie werden einige Eigenschaften der betrachteten Teilchen nachschlagen müssen. Bitte geben Sie dazu Ihre Quelle(n) an. Für die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum können Sie $c = 300.000\,\mathrm{km\,s^{-1}}$ verwenden.

3.1 Beschleunigerphysik

Betrachten Sie ein geladenes Teilchen mit Ruhemasse m_0 und Ladung q, das sich in einem homogenen Magnetfeld der Flussdichte B mit sehr großer Geschwindigkeit v bewegt. Die Flussdichte ist dabei senkrecht zur Geschwindigkeit.

a) Das Teilchen wird durch das Magnetfeld auf eine Kreisbahn gezwungen. Bestimmen Sie den Radius der Kreisbahn in Abhängigkeit von den gegebenen Größen.

Betrachten Sie ein Elektron und ein Proton, die auf eine Energie von jeweils 45 GeV beschleunigt und in dem Speicherring des LHC mit einem Umfang von 27 km gespeichert werden. Berechnen Sie, welches Magnetfeld in den beiden Fällen notwendig ist, um die Teilchen auf die Kreisbahn zu zwingen. *(3,5 Punkte)*

b) Beschleunigte, elektrisch geladene Teilchen strahlen Energie durch die sogenannte Bremsstrahlung ab. Bestimmen Sie mit Hilfe einer Dimensionsanalyse einen Ausdruck für die abgestrahlte Leistung P eines Teilchens in Abhängigkeit von dessen Ladung q, der Lichtgeschwindigkeit c, dessen momentaner Beschleunigung a und der elektrischen Feldkonstante ε_0.

Eine vollständige relativistische Betrachtung würde im Fall der Kreisbewegung zu einem weiteren Faktor γ^4 in dem Ergebnis führen, wobei $\gamma = 1/\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$. Fügen Sie diesen Faktor bei den folgenden Betrachtungen hinzu. *(3,5 Punkte)*

c) Am CERN lief zwischen 1989 und 2000 der *Large Electron Positron Collider* (LEP), ein Ringbeschleuniger, bei dem ein Elektronenstrahl und ein entgegengesetzter Positronenstrahl mit einer Energie von jeweils 45 GeV zur Kollision gebracht wurden. In demselben Ring (mit geänderter Apparatur) befindet sich heute der LHC.

Berechnen Sie, wie viel kleiner der Energieverlust durch Bremsstrahlung für Protonen verglichen mit Elektronen derselben Energie ist, geben Sie also das Verhältnis der abgestrahlten Leistungen an.

Der nächste große geplante Beschleuniger soll wieder ein Elektron-Positron-Beschleuniger, allerdings mit einer Schwerpunktsenergie von 1 TeV, werden. Begründen Sie, warum es sinnvoll ist, diesen als Linearbeschleuniger und nicht als Kreisbeschleuniger zu konstruieren. Führen Sie für Ihre Begründung auch eine passende Beispielrechnung durch. *(4 Punkte)*

3.2 Stationäres target vs. head-on-collider

Ein alternativer Entwurf zu den obigen Beschleunigern, in denen Teilchenstrahlen mit gleichen Energien aufeinander prallen (sogenannte *head-on-collider*), ist der folgende: Man beschleunigt nur einen Teilchenstrahl und lässt diesen auf ein stationäres Ziel (engl. *target*) treffen. Zum Beispiel kann man einen Protonenstrahl auf einen Wasserstoffbehälter schießen. Von diesem ursprünglichen *fixed target design* hat man sich im Laufe des 20. Jahrhunderts nahezu vollständig abgewendet und bevorzugt heute *head-on-collider*, obwohl diese mit höheren technischen Herausforderungen verbunden sind.

Um dies zu verstehen, vergleichen Sie im Folgenden die beiden Beschleunigerauslegungen, indem Sie die bei der Kollision im Schwerpunktsystem zur Erzeugung neuer Teilchen zur Verfügung stehende Energie betrachten.

d) Berechnen Sie die im Schwerpunktsystem zur Verfügung stehende Energie, wenn zwei Protonenstrahlen mit einer Energie pro Proton von jeweils E_0 aufeinandertreffen. Die Energie E_0 soll dabei sehr viel größer als die Ruheenergie eines Protons sein. *(2 Punkte)*

e) Wiederholen Sie diese Berechnung für den Fall, dass ein Protonenstrahl mit einer Energie von $E_{\text{Proton}} = 2\,E_0$ auf ein stationäres Wasserstoffziel trifft. Das Wasserstoffziel kann dabei als Sammlung praktisch freier Protonen mit vernachlässigbarer kinetischer Energie angesehen werden. *(5 Punkte)*

3.3 Strahlenergievariationen am LEP

Bei dem LEP-collider hat man einen überraschenden Effekt beobachtet: Während des Tages hat man kleine aber messbare Variationen in der Strahlenergie feststellen können, die auf vorbeifahrende Züge zurückzuführen waren. Die Züge in der Nähe des LEP-colliders werden mit Gleichstrom und einer Spannung von 1500 V betrieben, wobei sie mit einer Stromleitung versorgt werden und der Stromkreis hauptsächlich durch die Schienen aber auch durch die Erde und damit ebenfalls durch den 80 Meter unter der Erde liegenden LEP-Tunnel geschlossen wird.

Genauer gesagt wird der Stromkreis durch die im Wesentlichen aus Aluminium bestehende, geerdete Vakuumkammer geschlossen, die, wie in Abbildung 2 dargestellt, eine asymmetrische Form hat. Der elliptische Hohlraum beinhaltet die Elektron- und Positronstrahlen, der rechte Raum die Vakuumpumpe und der linke Raum ist ein Kanal für die Kühlflüssigkeit. Der Leckstrom ändert das Magnetfeld in dem Speicherring und die Strahlenergie muss entsprechend verändert werden, um den Teilchenstrahl bei gleicher Magnetkonfiguration im Speicherring zu halten.

Für eine näherungsweise Erklärung dieses Effektes können folgende Annahmen getroffen werden:
Der Zug fährt an zwei, sich auf dem Beschleunigerring gegenüberliegenden, Stellen des Beschleunigertunnels in einem Abstand von etwa 1 km nah an diesem vorbei. Ansonsten verläuft die Strecke weit von dem Beschleunigertunnel entfernt. Der Spannungsabfall entlang der Schienen zwischen diesen beiden Stellen beträgt etwa 10 V. Die Leckströme durch die Vakuumkammer können durch einen stromdurchflossenen Draht modelliert werden, der entlang der Mitte der Kammer für die Vakuumpumpe verläuft. Außerdem können für die spezifischen Widerstände von Erde und Aluminium Werte von $100\,\Omega\,\text{m}$ bzw. $2{,}7 \cdot 10^{-8}\,\Omega\,\text{m}$ angenommen werden.

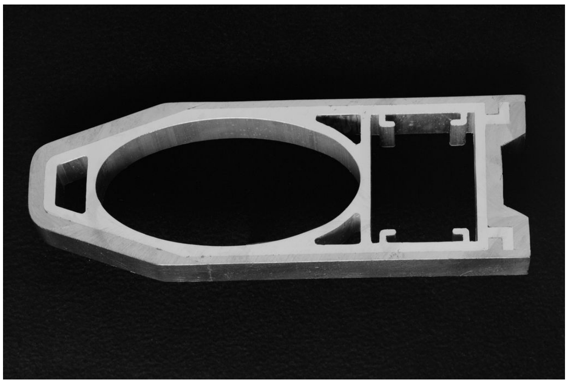

Abbildung 2: Querschnitt der LEP-Vakuumkammer (CERN-PHOTO-83051701). Die Kammer ist etwa 25 cm breit und 10 cm hoch.

f) Schätzen Sie mit Hilfe der obigen Angaben den Effekt der Zugleckströme auf die Strahlenergie bei dem LEP-collider unter Annahme geeigneter Werte ab. Es geht in diesem Aufgabenteil um die Abschätzung der richtigen Größenordnung und nicht um ein genaues Ergebnis. *(7 Punkte)*

Aufgabe 4 Experimentelle Aufgabe - Brechungsindex einer Salzlösung (30 Punkte)

In dieser Aufgabe sollen Sie untersuchen, wie sich der Brechungsindex von Wasser durch die Zugabe von Salz verändert.

Verwenden Sie für die Versuche nur die folgenden Materialien:

- Speisesalz
- Leitungswasser
- einen Löffel
- eine Schüssel
- einen Laserpointer
- einen kleinen Spiegel
- eine Fläche zum Auffangen des Laserlichtes
- Befestigungsmaterialien zur Fixierung des Laserpointers und des Spiegels
- eine Küchenwaage
- einen Messbecher
- einen Zollstock (oder genauer einen Gliedermaßstab)

a) Untersuchen Sie mit einem geeigneten Versuchsaufbau möglichst genau experimentell die Abhängigkeit des Brechungsindexes einer Leitungswasser-Salz-Lösung von der Salzkonzentration und stellen Sie diese Abhängigkeit graphisch dar. *(20 Punkte)*

b) Drücken Sie diese Abhängigkeit mit Hilfe der Ergebnisse durch einen möglichst einfachen mathematischen Ausdruck aus und bestimmen Sie daraus den Brechungsindex von Leitungswasser. Geben Sie jeweils die Fehler in Ihren Ergebnissen an. *(10 Punkte)*

Beschreiben Sie Ihre theoretischen Überlegungen, die Versuchsaufbauten, die experimentelle Durchführung und die Auswertung so, dass sie gut nachvollziehbar sind.

Schauen Sie nicht direkt in den Laserstrahl
und richten Sie diesen auch nicht auf andere Lebewesen!