

# 44. Internationale PhysikOlympiade

## Kopenhagen, Dänemark 2013



**Wettbewerbsleitung**     **Sekretariat**  
*Dr. Stefan Petersen*     *Lulu Hoffmeister*  
Tel: 0431 / 880-5120     Tel: 0431 / 880-5387  
petersen@ipho.info     sekretariat@ipho.info

**Anschrift:** IPN an der Universität Kiel  
Olshausenstraße 62  
24098 Kiel  
Fax: 0431 / 880-3148  
Webseite: [www.ipho.info](http://www.ipho.info)

### Lösungen und Bewertungsvorschläge zu den Aufgaben der 1. Runde des Auswahlwettbewerbs für die 44. IPhO 2013

**Nur für die betreuenden Lehrerinnen und Lehrer.**  
**Nicht vor Mitte September 2012 an Schülerinnen und Schüler weitergeben!**

Sehr geehrte Fachlehrerin, sehr geehrter Fachlehrer,

Ihnen gebührt unser besonderer Dank. Ohne Ihr Engagement bei der Vorbereitung der Teilnehmerinnen und Teilnehmer sowie bei der Korrektur der Ausarbeitungen wäre es uns nicht möglich, den Auswahlwettbewerb für die Internationale PhysikOlympiade in dieser Form durchzuführen. Wir bitten Sie daher auch in diesem Jahr herzlich, Ihre Schüler und vor allem Ihre Schülerinnen zur Teilnahme an dem Wettbewerb anzuregen und die von Ihren Kandidaten eingereichten Bearbeitungen anhand des angehängten Bewertungsschemas zu bewerten. Der Stichtag für die Einsendung der Ergebnisse der 1. Runde liegt im Sommer 2012 und variiert von Bundesland zu Bundesland. Weitere Informationen zur 1. Runde sind unter [www.ipho.info](http://www.ipho.info) zu finden.

Wir freuen uns sehr über Ihre Mitarbeit und wünschen Ihnen sowie Ihren Schülerinnen und Schülern viel Erfolg.

Ihr IPhO-Team am IPN in Kiel

**Bitte beachten Sie unbedingt auch die Hinweise auf der Folgeseite!**

### Hinweise zum Ablauf der 1. Wettbewerbsrunde für betreuende Lehrkräfte

Für den Auswahlwettbewerb zur Internationalen PhysikOlympiade gibt es ein **Online-Anmeldungs- und -Bewertungsverfahren**, das nachfolgend kurz beschrieben ist. Weitere Informationen hierzu finden Sie auf der Wettbewerbsseite.

#### Registrierung bzw. Anmeldung als betreuende Lehrkraft

- Wenn Sie bereits für die IPhO oder eine andere der vom IPN organisierten ScienceOlympiaden elektronisch registriert sind, melden Sie sich mit Ihren Nutzerdaten bitte für den aktuellen Wettbewerb als Betreuerin bzw. Betreuer an.
- Falls Sie noch nicht bei uns registriert sind, registrieren Sie sich bitte so bald wie möglich unter [www.ipho.info](http://www.ipho.info) als betreuende Lehrkraft. Drucken Sie zum Abschluss der Registrierung das erzeugte Formular aus und faxen Sie es zur Freischaltung Ihrer Daten mit einem Schulstempel versehen an das Wettbewerbssekretariat.
- Geben Sie in beiden Fällen den bei der Registrierung erzeugten Lehrercode an die von Ihnen betreuten Kandidatinnen und Kandidaten weiter, damit eine Zuordnung zwischen Teilnehmenden und Lehrkräften erfolgen kann.

#### Bearbeitung der Aufgaben durch Schülerinnen und Schüler

- Schülerinnen und Schüler bearbeiten die Aufgaben der 1. Runde in Hausarbeit. Dabei sind nur Einzelarbeiten zugelassen. Die Ausarbeitungen sollten so rechtzeitig abgegeben werden, dass Sie bis zum Rückmeldestichtag in Ihrem Bundesland die Korrektur durchführen und die Ergebnisse weitergeben können (s. auch unten).
- Vor der Abgabe der Arbeit müssen sich teilnehmende Schülerinnen und Schüler ebenfalls online für den Wettbewerb registrieren bzw. anmelden und das am Ende erzeugte Adressformular ggf. korrigiert ihrer Bearbeitung beilegen.

#### Bewertung der Arbeiten und Übermittlung der Ergebnisse

- Bewerten Sie die Ausarbeitungen Ihrer Kandidaten bitte anhand dieser Musterlösung und füllen Sie jeweils einen Bewertungsbogen aus. Weitere Hinweise zur Korrektur finden Sie am Ende der Musterlösung. Der für Ihr Bundesland zuständige Landesbeauftragte steht Ihnen für Rückfragen bei der Korrektur gerne zur Verfügung.
- Teilen Sie uns bitte die Bewertungsergebnisse Ihrer Schülerinnen und Schüler online unter [www.ipho.info](http://www.ipho.info) mit. Nach Eingabe der Bewertungsergebnisse wird zur Kontrolle eine Zusammenfassung der eingegebenen Ergebnisse erzeugt.
- Schicken Sie die bewerteten Arbeiten zusammen mit den Adressformularen, den Bewertungsbögen und der Zusammenfassung der Bewertung bis zu dem in Ihrem Bundesland gültigen Stichtag an Ihren Landesbeauftragten.
- Kontaktinformationen zu den Landesbeauftragten und den für Ihr Bundesland gültigen Stichtag für die Eingabe der Ergebnisse sowie das Einsenden der Arbeiten der 1. Runde finden Sie unter [www.ipho.info](http://www.ipho.info).

Bei Fragen oder Problemen hilft Ihnen das IPhO-Team am IPN gerne weiter.

### Lösung Aufgabe 1: Pendelspiel

Da die Winkelauslenkungen der Fadenpendel klein sind, können die Schwingungen als harmonisch angenommen werden. Ein einzelnes Fadenpendel der Länge  $\ell = 30 \text{ cm}$  besitzt dabei unabhängig von der anfänglichen Auslenkung eine Periodendauer von

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}} \approx 1,1 \text{ s.} \quad (1)$$

Da die Stöße zwischen den Pendelkörpern elastisch erfolgen, bleiben der Gesamtimpuls und die kinetische Energie dabei erhalten. Es gilt also für die Geschwindigkeiten  $u_1$  und  $u_2$  bzw.  $v_1$  und  $v_2$  der Kugeln unmittelbar vor bzw. nach dem Stoß

$$u_1 + u_2 = v_1 + v_2 \quad \text{bzw.} \quad u_1^2 + u_2^2 = v_1^2 + v_2^2. \quad (2)$$

Daraus folgt für den Stoß

$$v_1 = u_2 \quad \text{und} \quad v_2 = u_1. \quad (3)$$

Bei einem Stoß tauschen die beiden Stoßpartner also einfach ihre Geschwindigkeiten bzw. Impulse.

Betrachte nun das Pendelsystem zu unterschiedlichen Zeitpunkten:

$t = T/4$  - Die linke Kugel trifft auf die mittlere, so dass sie stehen bleibt und die mittlere Kugel weiterschwingt. Außerdem wird das rechte Pendel losgelassen.

$T/4 < t < T/2$  - Die mittlere Kugel trifft in diesem Zeitraum auf die rechte Kugel und übernimmt deren Impuls. Die rechte Kugel bewegt sich so weiter, wie es die linke ganz ohne Stoß getan hätte.

$t = T/2$  - Die mittlere Kugel trifft auf die linke, die in der Mitte ruht. Diese bewegt sich nach dem Stoß, wie es die zur Zeit  $t = T/4$  losgelassene rechte Kugel ohne Stoß tun würde. Die rechte Kugel erreicht einen maximalen Auslenkungswinkel  $\alpha$ .

$t = 3T/4 \approx 0,82 \text{ s}$  - Nun erreicht die linke Kugel ihren maximalen Auslenkungswinkel  $\beta$  und befindet sich in einer Höhe

$$h = \ell(1 - \cos \beta) \quad (4)$$

über der Starthöhe der mittleren Kugel. Die rechte Kugel trifft erneut auf die ruhende mittlere Kugel und übergibt ihren Impuls an diese.

$3T/4 < t < T$  - Die mittlere und die linke Kugel treffen aufeinander und tauschen ihren Impuls aus.

$t = T$  - Die linke Kugel erreicht ihre Ausgangslage und die mittlere Kugel trifft auf die in der Mitte ruhende rechte Kugel. Nach diesem Stoß ist die mittlere Kugel wieder in Ruhe.

$t = 5T/4$  - Die linke Kugel trifft erneut auf die mittlere und die rechte Kugel erreicht ihren maximalen Auslenkungswinkel  $\beta$ . Die Konfiguration ist also identisch zu der Situation zur Zeit  $t = T/4$ . Somit ist die Periodendauer des Gesamtsystems gerade  $T \approx 1,1 \text{ s}$ .

### Lösung Aufgabe 2: Kathodenstrahlröhre

Die Geschwindigkeit der aus dem als punktförmig annehmbaren Heizdraht austretenden Elektronen ist unterschiedlich gerichtet. In Richtung der Röhrenachse werden die Elektronen aufgrund der hohen Spannung auf eine Geschwindigkeit

$$v_{\parallel} = \sqrt{\frac{2eU}{m_e}} \quad (5)$$

beschleunigt. Die anfängliche Geschwindigkeit in diese Richtung ist vernachlässigbar.

Der damit verglichen kleine Geschwindigkeitsanteil  $v_{\perp}$  in dazu senkrechter Richtung führt aufgrund der wirkenden Lorentzkraft zu einer Kreisbewegung der Elektronen. Die Lorentzkraft wirkt dabei als Zentripetalkraft, so dass sich der Radius der Kreisbahn bestimmen lässt aus

$$\frac{m_e v_{\perp}^2}{r} = e v_{\perp} B. \quad (6)$$

Daraus ergibt sich die Umlaufzeit dieser Kreisbewegung zu

$$T = \frac{2\pi r}{v_{\perp}} = \frac{2\pi m_e}{eB}. \quad (7)$$

Die Umlaufzeit ist unabhängig von dem Radius der Bahn, so dass alle Elektronen nach der gleichen Zeit einen Umlauf auf der dabei entstehenden Schraubenbahn vollführt haben und sich die Bahnen unterschiedlicher Elektronen erneut kreuzen.

Wenn die Länge  $L$  der Röhre gerade einem Vielfachen der Strecke entspricht, die die Elektronen während einer Umdrehung entlang der Röhrenachse zurücklegen, so treffen sie alle etwa an der gleichen Stelle auf dem Schirm auf und es entsteht ein scharfer Fleck.

Es muss in diesem Fall also gelten:

$$\frac{L}{v_{\parallel}} = nT = n \frac{2\pi m_e}{eB}, \quad \text{mit } n = 1, 2, 3, \dots \quad (8)$$

Das Magnetfeld besitzt in diesem Fall eine Stärke von

$$B = n \frac{2\pi}{L} \sqrt{\frac{2m_e U}{e}}. \quad (9)$$

Stellt man die magnetische Flussdichte z.B. so ein, dass  $n=1$  gilt, so lässt sich das gesuchte Verhältnis der Elektronenladung zur Elektronenmasse aus den messbaren Parametern des Experimentes bestimmen.

### Lösung Aufgabe 3: Seifenblasen

- a) Der durch die Seifenhaut ausgeübte Druck lässt sich durch Betrachtung der zur Vergrößerung der Seifenblase notwendigen Arbeit berechnen. Bezeichne mit  $r$  den Radius der Seifenblase und mit  $\Delta r$  eine kleine Änderung des Radius.

Bei der Vergrößerung muss eine Arbeit gegen den durch die Seifenhaut verursachten Druck  $p$  verrichtet werden. Diese Arbeit ist gegeben durch

$$W = p \Delta V = p \Delta \left( \frac{4}{3} \pi r^3 \right) \approx 4 \pi p r^2 \Delta r. \quad (10)$$

Die obige Arbeit muss gleich der zur Vergrößerung der Oberfläche gegen die Oberflächenspannung aufzubringenden Arbeit sein. Für diese gilt:

$$W = \sigma \Delta A = 2 \sigma \Delta (4 \pi r^2) \approx 16 \pi \sigma r \Delta r. \quad (11)$$

Der Faktor 2 bei der Fläche ergibt sich, da es sowohl an der Innen- als auch an der Außenseite der Seifenhaut eine Grenzfläche zur Luft gibt. Durch Gleichsetzen ergibt sich für den Druck durch die Seifenhaut das gesuchte Ergebnis

$$p = \frac{4 \sigma}{r}. \quad (12)$$

- b) Beim Verbinden zweier Seifenblasen ist der Druck in der kleineren Blase größer, so dass die Luft aus dieser in die größere Blase gedrückt wird. In diesem Fall wird sich also die Seifenblase mit Radius  $R_1$  zusammenziehen. Da die Stoffmenge erhalten bleibt und die Seifenblasen auf Raumtemperatur sind, gilt für die Radien nach dem idealen Gasgesetz

$$\left( p_{\text{Luft}} + \frac{4 \sigma}{R_1} \right) R_1^3 + \left( p_{\text{Luft}} + \frac{4 \sigma}{R_2} \right) R_2^3 = \left( p_{\text{Luft}} + \frac{4 \sigma}{R_3} \right) R_3^3, \quad (13)$$

und damit bei einem Luftdruck  $p_{\text{Luft}}$ , der sehr viel größer als der Druck durch die Seifenblasenhaut ist

$$R_3 \approx \sqrt[3]{R_1^3 + R_2^3}. \quad (14)$$

- c) Aus Gleichung (13) folgt aber auch für die Oberflächenspannung

$$\sigma = \frac{p_{\text{Luft}}}{4} \frac{R_3^3 - R_1^3 - R_2^3}{R_1^2 + R_2^2 - R_3^2}. \quad (15)$$

Damit lässt sich die Oberflächenspannung aus den Tabellenwerten berechnen. Allerdings schwanken die bestimmten Ergebnisse je nach verwendetem Wertepaar enorm und liegen zwischen etwa  $-50$  und  $200 \text{ J m}^{-2}$  mit einem Mittelwert von  $50 \text{ J m}^{-2}$ .

Der Fehler des Ergebnisses lässt sich durch Verwendung der aus den Fehlern in den Radien resultierenden minimalen und maximalen Werte abschätzen und es ergibt sich aus den experimentellen Werten

$$-800 \text{ J m}^{-2} \leq \sigma \leq 8000 \text{ J m}^{-2}. \quad (16)$$

Diese Werte sind unrealistisch (tatsächlich liegt die Oberflächenspannung in diesem Fall bei etwa  $0,060 \text{ J m}^{-2}$ ) und die Fehler betragen ein Vielfaches des eigentlichen Messwertes. Diese Methode ist daher zur Bestimmung der Oberflächenspannung unbrauchbar.

Das Problem dieser Methode ist, dass zur Bestimmung der Oberflächenspannung eine Differenz von nur geringfügig verschiedenen Größen verwendet wird. Daher führen bereits kleinere Fehler in den Eingangsgrößen zu großen Fehlern in dem Ergebnis.

### Lösung Aufgabe 4: Reflektoren

Der Brechungsindex des Kugelmaterials soll so gewählt sein, dass von einer weit entfernten Lichtquelle einfallendes Licht zu einem großen Teil wieder in die Einfallrichtung zurück geworfen wird. Betrachte ein achsennah auf den Reflektor einfallendes, paralleles Lichtbündel.

Damit ein Lichtstrahl reflektiert wird, muss der wieder aus der Kugel auslaufende Strahl, wie in der nebenstehenden Skizze gezeigt, antiparallel zu dem einfallenden verlaufen.

Der einfallende Lichtstrahl bildet zusammen mit den beiden Verbindungslinien vom Mittelpunkt der Kugel bis zum Eintrittspunkt des Strahles bzw. bis zu dem Punkt an der Kugelrückseite, an dem der Strahl reflektiert wird, ein gleichschenkeliges Dreieck. Daher gilt für die Winkel  $\alpha$  und  $\beta$ :

$$2\beta = \alpha. \quad (17)$$

Da die Winkel klein sind, können die Näherungen

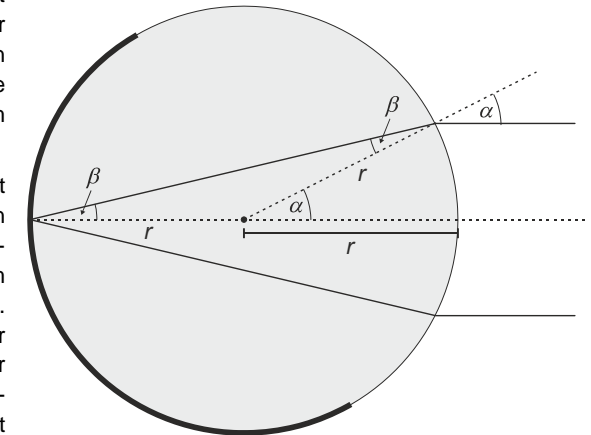
$$\sin \alpha \approx \alpha \quad \text{und} \quad \sin \beta \approx \beta \quad (18)$$

verwendet werden. Damit folgt aus dem Brechungsgesetz  $n \sin \beta = \sin \alpha$

$$n \beta \approx \alpha = 2 \beta. \quad (19)$$

Daraus ergibt sich schließlich für den Brechungsindex des Kugelmaterials

$$n \approx 2. \quad (20)$$



**Bemerkung:**

Aufgrund der sphärischen Aberration für weiter von der optischen Achse entfernt einfallende Lichtstrahlen wird auch bei vielen Materialien mit geringeren Brechungsindizes ein größerer Teil des Lichtes wieder zur Lichtquelle reflektiert.

**Alternativer Lösungsweg:**

Alternativ lässt sich der Brechungsindex auch aus der Abbildungsgleichung für die Brechung an einer sphärischen Oberfläche eines Materials mit Brechungsindex  $n$  bestimmen. Für eine sehr weit entfernte Lichtquelle (bzw. ein weit entferntes Objekt) gilt dabei

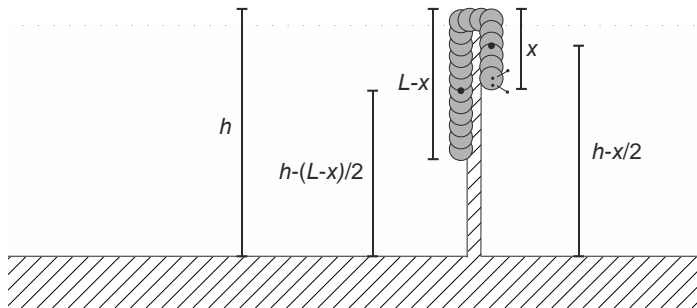
$$\frac{n}{b} = \frac{n-1}{r}. \quad (21)$$

Dabei ist  $r$  der Radius der Kugel (vgl. z.B. Tipler, P. A., *Physik*, Spektrum Akademischer Verlag, 1995). Die Bildweite  $b$  muss in diesem Fall gerade  $2r$  betragen, was zu dem gleichen Ergebnis wie in (20) führt.

**Lösung Junioraufgabe: Kletternde Raupen**

Die gegen das Gravitationsfeld der Erde verrichtete Arbeit wird für die Erhöhung des Schwerpunktes der Raupen aufgewendet. Da beide Raupen die gleiche Masse haben, muss die Raupe mehr Arbeit aufwenden, die ihren Schwerpunkt am meisten erhöht.

Solange die Raupe noch an der einen Seite der Kante hochklettert, erhöht sie stetig ihren Schwerpunkt. Betrachte daher die in der Abbildung dargestellte Situation, in der eine Länge  $x$  der Raupe schon über die Kante gekrochen ist.



Dann gilt für die gegen das Gravitationsfeld verrichtete Arbeit bzw. die Änderung der potentiellen Energie der Raupe

$$\Delta E_{\text{pot}} = mg \frac{x}{L} \left( h - \frac{x}{2} \right) + mg \frac{L-x}{L} \left( h - \frac{L-x}{2} \right) = \frac{mg}{L} \left( hL - \frac{L^2}{4} - \left[ \frac{L}{2} - x \right]^2 \right), \quad (22)$$

wobei  $m$  die Gesamtmasse der Raupe bezeichnet,  $L$  ihre Länge angibt und  $h = 10$  cm die Höhe der Kante darstellt. Außerdem wurde verwendet, dass die Kante dünn ist.

Der Ausdruck ist maximal, wenn  $x$  gerade gleich  $L/2$  ist, wenn also die Raupe zur Hälfte über die Kante geklettert ist. Dann ist

$$\Delta E_{\text{pot}} = mg \left( h - \frac{L}{4} \right). \quad (23)$$

Damit muss die dickere, kürzere Raupe mehr Arbeit gegen das Gravitationsfeld verrichten und es gilt für das gesuchte Verhältnis:

$$\Delta E_{\text{pot, dick}} / \Delta E_{\text{pot, dünn}} = 3/2. \quad (24)$$

**Bemerkung:**

Man kann auch einfacher einsehen, dass die maximale Arbeit verrichtet wurde, wenn die Raupe zur Hälfte über die Kante geklettert ist. Wenn sie aus dieser symmetrischen Situation weiter- oder zurückklettert, sinkt der Schwerpunkt auf der einen Seite in gleichem Maße wie er auf der anderen Seite steigt. Da aber die Masse des dann längeren Stückes größer ist, sinkt insgesamt der Schwerpunkt der Raupe. Damit ergibt sich Gl. (23) direkt.

### Bewertungsvorschläge

Gemäß den Gepflogenheiten bei der Internationalen PhysikOlympiade sollte bei der Bewertung der Arbeit die Richtigkeit der Lösung im Mittelpunkt stehen, nicht die Sauberkeit der Ausarbeitung und der sprachliche Ausdruck.

Die angegebenen Punktzahlen beziehen sich auf den von uns ausgearbeiteten Lösungsweg. Bei anderen Lösungswegen muss die Bewertung sinngemäß abgeändert werden, wobei die Gesamtpunktzahl pro Aufgabe beizubehalten ist.

Schülerinnen und Schüler, die im Schuljahr 2012/2013 noch nicht die vorletzte Jahrgangsstufe erreicht haben, können durch Bearbeitung der **Junioraufgabe** einen Bonus von maximal 10 Punkten erreichen. Diese Regelung ersetzt die ehemalige automatische Vergabe von Bonuspunkten für jüngere Teilnehmende.

Auch Teilnehmerinnen und Teilnehmer, die nicht in die nächste Runde kommen, erhalten eine Teilnahmebestätigung für die 1. Runde. Bitte melden Sie daher auch diese unbedingt weiter. Die Punktegrenze für das Erreichen der zweiten Runde liegt in diesem Jahr bei **35 Punkten**.

**Herzlichen Dank für Ihre Mitarbeit!**

Aufgabe 1: Pendelspiel	Punkte
Erkennen der Betrachtung als harmonischer Oszillator	1
Angeben der Pendeldauer eines Fadenpendels	1
Herleiten oder Angabe des Impulsaustausches bei Stoß	3
Betrachten der einzelnen Stoßvorgänge	4
Bestimmen der Zeit, bis linke Kugel maximale Höhe erreicht	1
Bestimmen der Höhe wie in (4)	1
Bestimmen der Periodendauer	1
	<b>12</b>

Aufgabe 2: Kathodenstrahlröhre	Punkte
Bestimmen der Geschwindigkeit entlang der Röhre wie in (5)	1
Beschreiben der Bewegung der Elektronen (Erkennen der Kreisbewegung/Schraubenbahn)	2
Bestimmen der Umlaufzeit wie in (7)	2
Erkennen, welche Bedingung für scharfes Fokussieren gelten muss	3
Angeben der magnetischen Flussdichte in (9)	3
Beschreiben der Bestimmung des Masse-Ladungsverhältnisses	2
	<b>13</b>

Aufgabe 3: Seifenblasen	Punkte
a) Herleiten des Proportionalitätsfaktors wie in (12)	3
b) Verwenden der Gasgleichung und Ergebnis wie in (13)	2
Angeben des Radius in (14) für angegebene Näherung	2
c) Formel (15) für Oberflächenspannung	2
Bestimmen der Oberflächenspannung aus gegebenen Werten	2
Fehlerabschätzung für Oberflächenspannung	2
Begründen, warum Methode ungeeignet ist	1
	<b>14</b>

Aufgabe 4: Reflektoren	Punkte
Beschreiben der Bedingung für das Reflektieren	3
Annehmen geeigneter Näherungen (achsennahe, parallele Strahlen)	2
Geometrische Betrachtung und Zusammenhang wie z.B. in (19)	5
Bestimmen des Brechungsindex (20)	1
	<b>11</b>

<b>Summe</b>	<b>50</b>
--------------	-----------

Bonuspunkte, die jüngere Teilnehmende durch Bearbeitung der Junioraufgabe erhalten können:

Junioraufgabe: Kletternde Raupen	Punkte
Erkennen, dass die Schwerpunkterhöhung entscheidend ist	2
Ausdruck für verrichtete Arbeit wie in (22)	3
Angabe, wann Arbeit maximal wird und welche Raupe mehr Arbeit verrichten muss	3
Bestimmen des Verhältnisses wie in (24)	2
	<b>10</b>

Alternativ sollten die Punkte auch für eine weniger rechnerische Argumentation vergeben werden, wie sie in der Bemerkung angegeben ist.

## Bewertungsbogen für die 1. Runde zur 44. IPhO 2013

(dieser Bogen ist auch unter [www.ipho.info](http://www.ipho.info) bei den Hinweisen zur 1. Runde erhältlich)

Von der korrigierenden Lehrkraft auszufüllen.

Schülername (-code): \_\_\_\_\_ ( \_\_\_\_\_ )

Schule, Ort: \_\_\_\_\_

Lehrkraft: \_\_\_\_\_

Aufgabe	Maximal- punktzahl	Erreichte Punktzahl	
1	Pendelspiel	12	
2	Kathodenstrahlröhre	13	
3	Seifenblasen	14	
4	Reflektoren	11	

Bonuspunkte für jüngere Teilnehmende

Junioraufgabe	Kletternde Raupen	10	
<b>Summe</b>		<b>50 (+10)</b>	

Kommentare und Anregungen:

Unterschrift: \_\_\_\_\_