

52. Internationale PhysikOlympiade

Minsk, Weißrussland 2021



Wettbewerbsleitung

Dr. Stefan Petersen Dürken Quaas
Tel.: 0431 / 880 - 5120 Tel.: 0431 / 880 - 5387
email: petersen@ipho.info email: quaas@ipho.info

Anschrift: IPN · Leibniz-Institut für die Pädagogik der
Naturwissenschaften und Mathematik
Olshausenstraße 62
24118 Kiel

web: www.ipho.info

twitter: [@iphogermany](https://twitter.com/iphogermany)

Lösungen und Bewertungsvorschläge zu den Aufgaben der 1. Runde im Auswahlwettbewerb zur 52. IPhO 2021

**Nur für die betreuenden Lehrerinnen und Lehrer.
Nicht vor Oktober 2020 an Schülerinnen und Schüler weitergeben!**

Sehr geehrte Fachlehrerin, sehr geehrter Fachlehrer,

Ihnen gebührt unser besonderer Dank. Ohne Ihr Engagement bei der Betreuung der Teilnehmenden sowie bei der Korrektur der Arbeiten 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 Schülerinnen und Schüler zur Teilnahme an dem Wettbewerb anzuregen und die von Ihren Kandidatinnen bzw. Kandidaten bis zum 14. September 2020 abzugebenden Bearbeitungen anhand dieser Musterlösung zu bewerten. Stichtag für die Online-Übermittlung der Ergebnisse und die Einsendung der bewerteten Bearbeitungen der 1. Runde an Ihre(n) zuständige(n) Landesbeauftragte(n) ist der **28. September 2020**. Ermuntern Sie Ihre Schülerinnen und Schüler gerne auch zur frühzeitigen Abgabe einzelner Aufgabenbearbeitungen, damit sie zum Ende hin nicht alle Aufgaben auf einmal lösen müssen.

Es liegt in der Natur eines Wettbewerbes, dass nicht alle Teilnehmenden bis in die Endrunde gelangen können. Wir denken, dass sich eine Teilnahme aber in jedem Fall lohnt. Neben spannenden Aufgaben und der Möglichkeit, interessante Kontakte zu knüpfen, erhalten auch Teilnehmende, die nicht in die nächste Runde gelangen, eine Teilnahmebestätigung.

Weitere Informationen zum Ablauf der 1. und der weiteren Runden sind unter www.ipho.info zu finden.

Wir freuen uns sehr über Ihre Unterstützung 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 zur 1. Wettbewerbsrunde für betreuende Lehrkräfte

Für den Auswahlwettbewerb zur Internationalen PhysikOlympiade gibt es ein **Online-Anmeldungs- und -Bewertungsverfahren**, das nachfolgend beschrieben ist.

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. Ein erneutes Zufaxen des bei der Anmeldung noch einmal erzeugten Formulars ist in diesem Fall nicht erforderlich, auch wenn das System Sie dazu auffordert.
- Falls Sie noch nicht bei uns registriert sind, registrieren Sie sich bitte so bald wie möglich als betreuende Lehrkraft. Den Link dazu finden Sie unter www.ipho.info. 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.
- Nach erfolgreicher Freischaltung für den Wettbewerb erhalten Sie diese Musterlösung von uns noch einmal in elektronischer Form per E-Mail.
- Geben Sie bitte in beiden Fällen den bei der Registrierung erzeugten Lehrercode an die von Ihnen betreuten Teilnehmenden weiter, damit diese Ihnen zugeordnet werden können.

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 bis zum **14. September 2020** bei Ihnen abgegeben werden, damit Sie die Korrektur durchführen und die Ergebnisse rechtzeitig weitergeben können (s. auch unten). Sie können mit Ihren Schülerinnen und Schülern individuell auch andere Termine verabreden, sofern der Rückmeldetermin an die Landesbeauftragten eingehalten wird.
- Vor der Abgabe der Arbeit müssen sich teilnehmende Schülerinnen und Schüler ebenfalls online registrieren bzw. anmelden und das erzeugte Adressformular ggf. korrigiert der Bearbeitung beilegen.

Bewertung der Arbeiten und Übermittlung der Ergebnisse

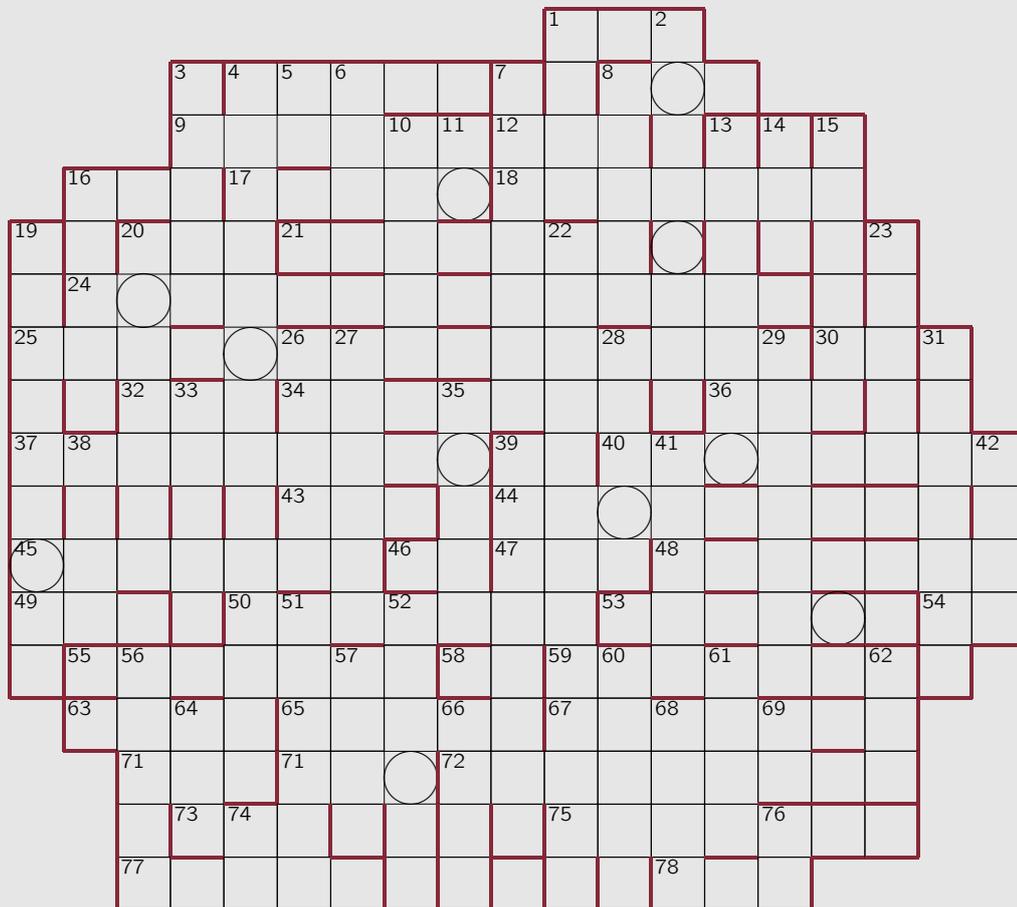
- Bewerten Sie die Ausarbeitungen Ihrer Kandidaten bitte anhand dieser Musterlösung und füllen Sie jeweils einen Bewertungsbogen (s. letzte Seite) aus.
- Gemäß den Gepflogenheiten bei der Internationalen PhysikOlympiade sollte bei der Bewertung der Arbeit die Richtigkeit der Lösung im Mittelpunkt stehen, nicht die Sauberkeit der Ausarbeitung und der sprachliche Ausdruck. Die jeweils angegebenen Punktzahlen beziehen sich auf einen möglichen Lösungsweg. In der Regel gibt es neben dem von uns angegebenen auch andere richtige Lösungswege. Bei anderen Lösungswegen muss die Bewertung sinngemäß abgeändert werden, wobei die Gesamtpunktzahl pro Aufgabe beizubehalten ist.
- Schülerinnen und Schüler, die im Schuljahr 2020/2021 noch nicht die vorletzte Jahrgangsstufe erreicht haben, können durch die Bearbeitung der **Junioraufgabe** einen Bonus von maximal 10 Punkten erreichen.
- Die Punktegrenze für das Erreichen der 2. Runde liegt in diesem Jahr bei **30 Punkten**.
- Teilen Sie uns bitte die Bewertungsergebnisse Ihrer Schülerinnen und Schüler **online** über das Onlineportal mit. Einen Link zu der Seite finden Sie unter www.ipho.info. 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 spätestens **28. September 2020** an Ihre(n) Landesbeauftragte(n). Kontaktinformationen zu den Landesbeauftragten finden Sie unter www.ipho.info.

Bei Fragen oder Problemen helfen die Landesbeauftragten und das IPhO-Team am IPN gerne weiter.

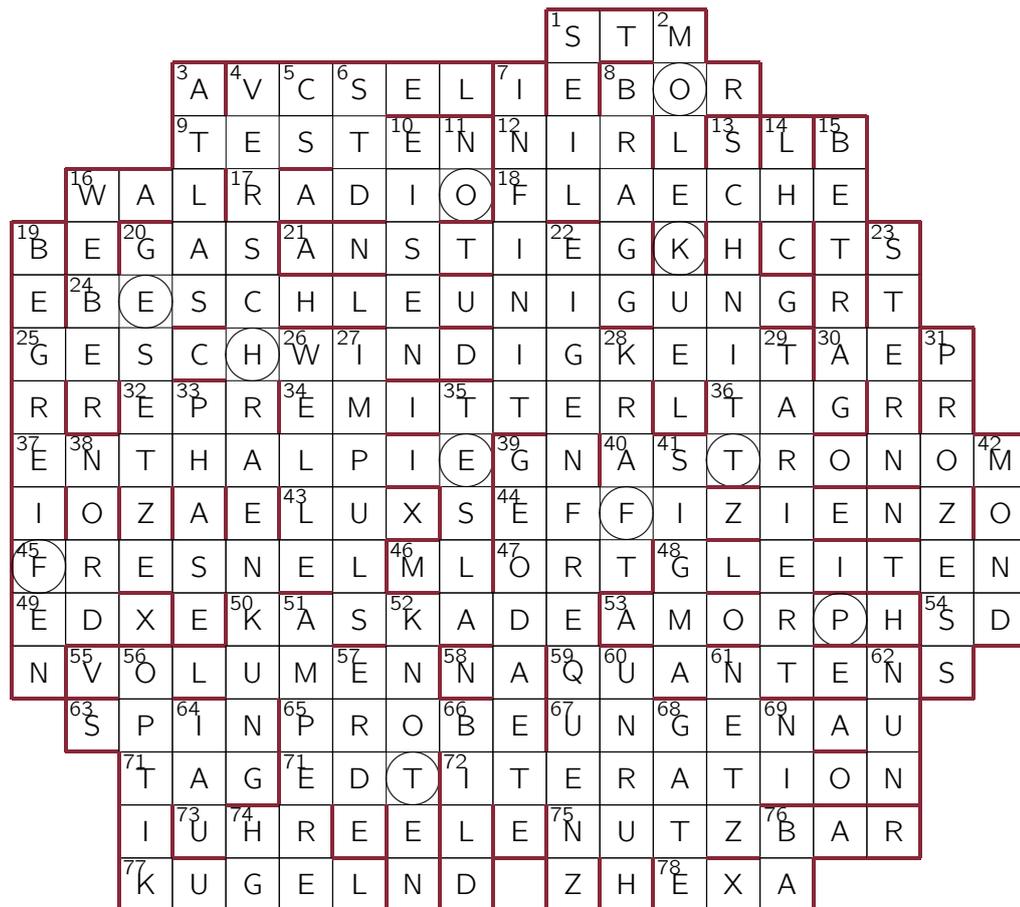
Aufgabe 1 Kreuz und quer
(10 Pkt.)
(Idee: Anne Sauer mann)

In dieser Aufgabe geht es um allerlei meist physikalische Begriffe.

Löse das folgende Kreuzworträtsel und finde das gesuchte Lösungswort.



Waagerecht: **1** engl. Abkürzung für Rastertunnelmikroskopie **4** Abkürzung für senkrecht zur Oberfläche emittierende Laserdiode **8** Chemisches Element, das ähnlich klingt wie ein dänischer Physiker **9** Wird mit Hypothesen gemacht **12** Abkürzung für nahes Infrarot **16** Sehr großes Säugetier **17** Gerät zur Umsetzung von Mittelwellenfrequenzen in Schall **18** Länge x Breite **20** Sammlung von schwach wechselwirkenden Teilchen **21** Graphische Interpretation der Ableitung einer Kurve **24** Änderung von $\rightarrow 25$ **25** Auf einem Tacho abzulesen **30** Bezeichnung für mittleren Abstand der Erde zur Sonne **32** Auf drei Personen zurückgehender Name eines Paradoxons der Quantenmechanik **34** Einer der Anschlüsse eines Transistors **36** etwa 86 400 s **37** Summe der inneren Energie eines Systems sowie dem Produkt aus Druck und Volumen **40** Moderner Sternenkundler **43** Einheit der Beleuchtungsstärke **44** Der Wirkungsgrad ist ein Maß dafür **45** Physiker um 1800, Namensgeber einer Linsenbauform **46** an Bechergläsern zu findende Maßeinheit **47** Punkt im Raum **48** Fortbewegung mit Schlupf **49** Abkürzung für Form der Röntgenspektroskopie **50** Verkettung von Prozessen, die z. B. zur Signalverstärkung genutzt werden kann **53** Bezeichnung für nicht kristallinen Festkörper, die z. B. auf Glas zutrifft **54** Kurz für Speicherkarten, z. B. in Kameras **55** $\rightarrow 18 \times$ Höhe **58** Alkalimetall mit nur einem stabilen Isotop **59** Durch die Schrödingergleichung beschriebene Zustände **63** Eigendrehimpuls von Elementarteilchen **65** Kleine Menge eines zu untersuchenden Materials **67** Nicht sehr präzise **78** Zeitlicher Abstand zwischen zwei relativen Sonnenhöchstständen **71** In der Raumakustik für die Nachhalldauer verwendete Größe **auch** duftendes Wasser **72** Wiederholung **73** Wird zur Messung von $\rightarrow 36$ benutzt **75** $\rightarrow 44$ vergleicht den so gearteten Anteil mit dem Gesamtenergieaufwand **77** Körper mit kleinstem Verhältnis von Oberfläche zu Volumen **78** Zwischen Peta und



Lösungswort

P H O T O E F F E K T

Für die Erklärung des im 19. Jahrhundert beobachteten Photoeffekts, genauer des äußeren photoelektrischen Effekts, wurde Albert Einstein 1921, also genau 100 Jahre vor der 52. PhysikOlympiade 2021, der Nobelpreis für Physik verliehen.

Bewertung - Kreuz und quer		Punkte
1	Ausfüllen des Kreuzworträtsels (-0,5 Pkt. für jeden nicht vorhandenen oder falschen Begriff, Minimum 0 Pkt.)	8
	Angabe des Lösungswortes	2
		10

Aufgabe 2 Space-Taxi
(10 Pkt.)

Die Firma *Space-Taxi* betreibt einen Weltraum-Shuttleservice. Heute soll ein Shuttle Passagiere und Fracht zwischen zwei erdnahen Raumstationen befördern. Die beiden Raumstationen bewegen sich auf kreisförmigen Bahnen mit Radien von $2,0 \cdot 10^4$ km und $4,0 \cdot 10^4$ km in der gleichen Ebene um die Erde.

Das Shuttle startet von der erdnäheren Raumstation und beschleunigt für eine kurze Zeit tangential zur Bahn. Dadurch gelangt es auf einer ellipsenförmigen Bahn, wie in der nebenstehenden Abbildung gezeigt, in die Umlaufbahn der zweiten Raumstation. Dort angekommen vollführt es ein zweites kurzes Beschleunigungsmanöver tangential zur Bahn, um auf die Geschwindigkeit der Raumstation zu kommen. Das will gut geplant sein.

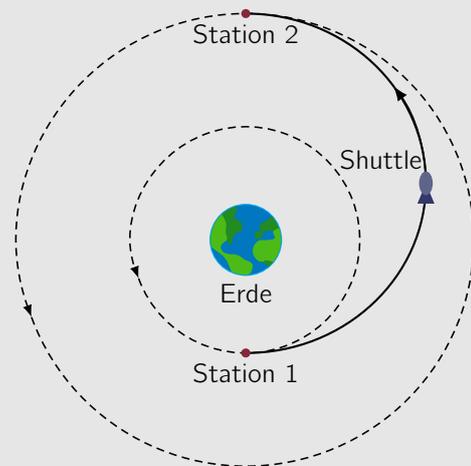


Abbildung 1: Skizze der Bahnen der Raumstationen (gestrichelt) und des Weltraumshuttles.

- a) Bestimme die jeweils notwendigen Änderungen der Geschwindigkeit des Shuttles bei den beiden Beschleunigungsmanövern.

Der beschriebene Transfer kann nur funktionieren, wenn die zweite Raumstation beim Eintreffen des Shuttles an der richtigen Position ist.

- b) Berechne, wie lange die Reise des Shuttles dauert. Bestimme den Winkel, um den die Raumstation 2 auf ihrer Bahn der Raumstation 1 beim Abflug des Shuttles voraus sein muss, damit das Shuttle genau bei der Station 2 ankommt.

Die Masse der Erde beträgt $6,0 \cdot 10^{24}$ kg.

Lösung

- a) Durch die Identifikation der Gravitationskraft der Erde als Zentripetalkraft lassen sich die Geschwindigkeiten w_1 und w_2 der beiden Raumstationen auf ihren kreisförmigen Bahnen und damit die Geschwindigkeiten des Shuttles vor und nach dem Transfer bestimmen zu

$$w_1 = \sqrt{\frac{G M_{\text{Erde}}}{r_1}} \approx 4,5 \cdot 10^3 \text{ m s}^{-1}, \quad w_2 = \sqrt{\frac{G M_{\text{Erde}}}{r_2}} \approx 3,2 \cdot 10^3 \text{ m s}^{-1}. \quad (2.1)$$

Dabei bezeichnet $M_{\text{Erde}} = 6,0 \cdot 10^{24}$ kg die Masse der Erde, und $r_1 = 2,0 \cdot 10^4$ km sowie $r_2 = 4,0 \cdot 10^4$ km $= 2 r_1$ geben die Bahnradien der Raumstationen an.

Nach der ersten Beschleunigung bewegt sich das Shuttle auf einer ellipsenförmigen Bahn um die Erde. In guter Näherung ist die einzige bei dem Flug auf das Shuttle wirkende Kraft die Gravitationskraft der Erde. Daher ist sowohl die Summe aus kinetischer und potentieller Energie des Shuttles als auch der Drehimpuls des Shuttles bezüglich des Erdmittelpunktes bei dem Flug erhalten. Die Geschwindigkeiten v_1 und v_2 des beschleunigten Shuttles an den Berührungspunkten mit den Kreisbahnen der Stationen können daher mit der Energieerhaltung und der Drehimpulserhaltung, bzw. dem Kepler'schen Flächensatz, bestimmt werden. Nach diesen gilt:

$$\frac{1}{2} v_1^2 - \frac{G M_{\text{Erde}}}{r_1} = \frac{1}{2} v_2^2 - \frac{G M_{\text{Erde}}}{r_2}, \quad \text{sowie} \quad v_1 r_1 = v_2 r_2. \quad (2.2)$$

Daraus ergibt sich durch Umformen für die Geschwindigkeiten v_1 und v_2 :

$$v_1^2 = 2 G M_{\text{Erde}} \frac{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}}{1 - \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2} = 2 G M_{\text{Erde}} \frac{r_2}{r_1 (r_1 + r_2)}, \quad \text{sowie} \quad v_2^2 = 2 G M_{\text{Erde}} \frac{r_1}{r_2 (r_1 + r_2)}. \quad (2.3)$$

Die notwendigen Geschwindigkeitsänderungen bei den Beschleunigungsvorgängen sind damit:

$$\begin{aligned} \Delta v_1 &= v_1 - w_1 = \sqrt{2 G M_{\text{Erde}}} \sqrt{\frac{r_2}{r_1 (r_1 + r_2)}} - \sqrt{\frac{G M_{\text{Erde}}}{r_1}} \approx 690 \text{ ms}^{-1} \\ \Delta v_2 &= w_2 - v_2 = \sqrt{\frac{G M_{\text{Erde}}}{r_2}} - \sqrt{2 G M_{\text{Erde}}} \sqrt{\frac{r_1}{r_2 (r_1 + r_2)}} \approx 580 \text{ ms}^{-1} \end{aligned} \quad (2.4)$$

- b) Die Umlaufzeiten $T_{1,2}$ der Raumstationen lassen sich mit den Bahnumfängen $2\pi r_{1,2}$ aus den Bahngeschwindigkeiten in (2.1) berechnen und betragen

$$T_1 = \frac{2\pi r_1}{w_1} \approx 2,8 \cdot 10^4 \text{ s} \approx 7,8 \text{ h}, \quad \text{sowie} \quad T_2 = \frac{2\pi r_2}{w_2} \approx 7,9 \cdot 10^4 \text{ s} \approx 22,1 \text{ h}. \quad (2.5)$$

Nach dem dritten Kepler'schen Gesetz ist das Quadrat der Umlaufzeit proportional zur dritten Potenz der großen Bahnhalbachse. Die große Bahnhalbachse des Shuttles auf seiner Transferbahn ist $3/4$ mal so groß, wie die der äußeren Raumstation. Daher gilt für die Zeit t_{Shuttle} , die das Shuttle auf dem halben Umlauf bis zum Erreichen des Schnittpunktes mit der Bahn der äußeren Station benötigt,

$$t_{\text{Shuttle}} = \left(\frac{3}{4}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{T_2}{2} \approx 2,6 \cdot 10^4 \text{ s} \approx 7,2 \text{ h}. \quad (2.6)$$

Damit das Shuttle die langsamer umlaufende äußere Raumstation trifft, muss diese bei Ankunft des Shuttles einen Winkelvorsprung von 180° zu der Position der erdnäheren Raumstation bei Abflug haben. Der Winkelvorsprung $\Delta\varphi$ der äußeren Raumstation zum Abflugzeitpunkt ergibt sich daher zu

$$\Delta\varphi = 180^\circ - \frac{t_{\text{Shuttle}}}{T_2} \cdot 360^\circ = \left(1 - \left(\frac{3}{4}\right)^{\frac{3}{2}}\right) 180^\circ \approx 63^\circ. \quad (2.7)$$

Hinweis: Das hier beschriebene Manöver wird als Hohmann-Transfer bezeichnet.

Bewertung - Space-Taxi		Punkte
2.a)	Bestimmen eines Ausdruckes oder Wertes der Stationsgeschwindigkeiten (2.1)	2
	Verwenden der Energieerhaltung in (2.2)	1
	Verwenden der Drehimpulserhaltung oder des Flächensatzes in (2.2)	1
	Bestimmen der Geschwindigkeitsdifferenzen (2.4)	2
2.b)	Bestimmen mindestens einer der Umlaufzeiten der Raumstationen	1
	Verwenden des 3. Kepler'schen Gesetzes	1
	Bestimmen der Transferdauer (2.6)	1
	Bestimmen der Winkeldifferenz bei Abflug (2.7)	1
		10

Aufgabe 3 Temperaturabhängiger Widerstand
(10 Pkt.)

Ein Heißeiterwiderstand ist ein temperaturabhängiger elektrischer Widerstand, der bei höheren Temperaturen Strom besser leitet als bei niedrigen.

Der obere der nebenstehenden Graphen stellt den Widerstand R eines bestimmten Heißeiters in Abhängigkeit von seiner Temperatur ϑ dar.

In dem unteren Graphen ist die an die Umgebung abgegebene Wärmeleistung P des Widerstandes bei einer Umgebungstemperatur von 22 °C ebenfalls als Funktion der Temperatur des Widerstandes dargestellt.

Bestimme, welche Spannung maximal an den Heißeiterwiderstand angelegt werden darf, damit dieser sich nicht über 65 °C erwärmt.

Gehe davon aus, dass der Heißeiterwiderstand anfänglich Zimmertemperatur besitzt.

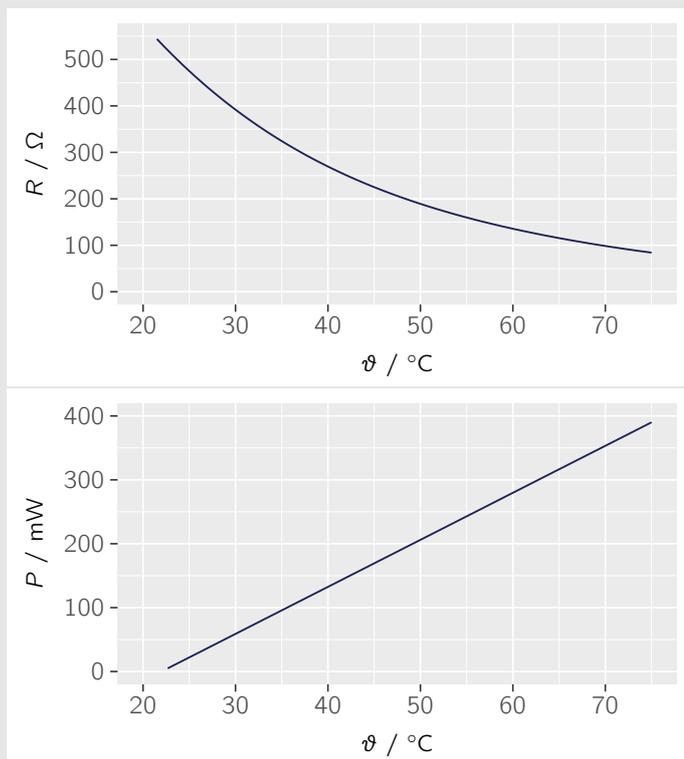


Abbildung 2: Temperaturabhängigkeit des Heißeiterwiderstandes und dessen Wärmeleistungsabgabe. Die Abbildungen sind in besserer Auflösung auf der IPhO-Webseite erhältlich.

Lösung

Damit sich der Heißeiterwiderstand nicht weiter erwärmt, muss die im Widerstand in Wärme umgesetzte elektrische Leistung P_{el} kleiner oder gleich der von dem Leiter abgegebenen Wärmeleistung P sein, d.h. es muss gelten:

$$P_{\text{el}} = UI = \frac{U^2}{R} \leq P \quad \text{bzw.} \quad U^2 \leq P \cdot R. \quad (3.1)$$

Dabei ist entscheidend, dass sowohl R als auch P Funktionen der Temperatur ϑ sind. Wenn $U^2 = P(\vartheta) \cdot R(\vartheta)$ ist, sind die im Widerstand in Wärme umgesetzte elektrische Leistung und die abgegebene Wärmeleistung im Gleichgewicht, so dass die Temperatur des Heißeiterwiderstandes konstant bleibt.

Wird bei gegebener Temperatur eine Spannung U an den Heißeiterwiderstand angelegt, für die U^2 größer als das Produkt $P \cdot R$ ist, ist die umgesetzte elektrische Leistung größer als die abgegebene Wärmeleistung und der Heißeiter erwärmt sich. Dadurch verringert sich der Widerstandswert $R(\vartheta)$ während sich die abgegebene Wärmeleistung $P(\vartheta)$ erhöht. Die Temperaturerhöhung kann daher zu einer neuen Gleichgewichtstemperatur führen, bei der $U^2 = P \cdot R$ gilt.

Um genauer zu untersuchen, wann das der Fall sein kann, ist es sinnvoll, das Produkt $P \cdot R$ als Funktion der Temperatur ϑ darzustellen, wie in Abbildung 3 zu sehen.

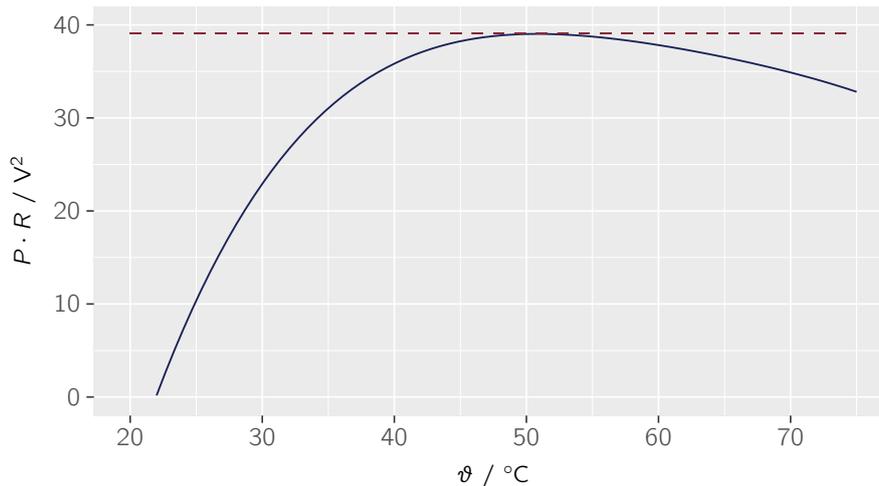


Abbildung 3: $P \cdot R$ für den Heißleiter als Funktion der Temperatur ϑ .

Der Heißleiterwiderstand kann, ausgehend von Zimmertemperatur, mit allen Spannungen U betrieben werden, für die U^2 im Wertebereich von $P \cdot R$ liegt, da dann eine Temperatur existiert, bei der sich ein Leistungsgleichgewicht einstellt. Wenn das Quadrat der Spannung aber größer als der maximale Wert von $P \cdot R$ ist, kann die Ungleichung in (3.1) nicht mehr erfüllt werden und der Heißleiter erwärmt sich immer weiter.

Durch Aufsuchen des Maximums im Graphen von $P \cdot R$ über der Temperatur kann die gesuchte maximale Spannung gefunden werden, ab der sich der Heißleiterwiderstand auch über 65 °C weiter erwärmen würde.

Aus dem Graphen ergibt sich eine maximale Spannung von

$$U_{\max} \approx \sqrt{39,1 \text{ V}^2} \approx 6,3 \text{ V} . \quad (3.2)$$

Bewertung - Temperaturabhängiger Widerstand		Punkte
3	Erkennen der Bedingung für das nicht weitere Erwärmen	2
	Formulieren einer Leistungsbedingung (3.1)	2
	Begründen der Untersuchung von $P \cdot R$ als Funktion von ϑ	2
	Untersuchen der Funktion $P \cdot R$ (z. B. durch Konstruieren des Graphen)	2
	Angeben der maximalen Spannung (3.2) mit $6,0 \text{ V} \leq U_{\max} \leq 6,6 \text{ V}$	2
		10

Aufgabe 4 Schnell wie der Schall
(10 Pkt.)

Schall breitet sich in einem Medium mit einer endlichen Geschwindigkeit, der Schallgeschwindigkeit, aus. Mit einem Smartphone oder Computer und einigen wenigen weiteren Materialien kannst du die Schallgeschwindigkeit in Luft experimentell ziemlich genau bestimmen. Wie das geht?

Finde zunächst heraus, wie du mit dem Smartphone oder einem Computer einen Sinuston mit einstellbarer Frequenz erzeugen und außerdem die Schalldruckamplitude oder die Lautstärke eines akustischen Signals aufzeichnen kannst^a. Besorge dir dann eine mindestens 50 cm lange und einigermaßen stabile Röhre, zum Beispiel aus Pappe. Verschließe ein Ende der Röhre mit einem Stück Karton oder Ähnlichem. Halte nun das Mikrophon an das offene Ende der Röhre, erzeuge einen Sinuston und nimm das vom Mikrophon gemessene akustische Signal auf.

- Untersuche qualitativ, wie sich die am offenen Ende der Röhre gemessene Schalldruckamplitude mit der Frequenz ändert und beschreibe deine Beobachtungen.
- Leite theoretisch eine Beziehung zwischen den beobachteten Charakteristika des Schalldruckamplitudenverlaufs und der Schallgeschwindigkeit in Luft her.
- Bestimme damit experimentell die Schallgeschwindigkeit in Luft bei Zimmertemperatur. Beschreibe dabei, wie du vorgegangen bist, und schätze die Unsicherheit deines Ergebnisses ab. Vergleiche schließlich die von dir bestimmte Schallgeschwindigkeit mit einem Literaturwert.

^aFür beide Zwecke existieren eine Reihe kostenloser Smartphone-Apps oder Programme für den Computer. Für die Tonerzeugung wird ein Programm benötigt, das ein manuelles oder automatisches Variieren der Frequenz mit der Zeit, einen so genannten *Sweep*, erlaubt. Auf der IPhO-Webseite haben wir einige passende Apps zusammengestellt und bieten eine Audiodatei mit einem Sweep zum Download an. Sollte es nicht möglich sein, Tonerzeugung und Aufnahme gleichzeitig auf einem Gerät durchzuführen, verwende ein zweites Gerät parallel.

Lösung

Für das Experiment wurden als Röhre zwei Papprollen von Küchenpapierrollen zusammengeklebt (vgl. Abb. 4). Die Gesamtlänge der Röhre beträgt $\ell = (51,7 \pm 0,5)$ cm und deren Durchmesser $d = (4,0 \pm 0,2)$ cm.

Für die Tonerzeugung wurde auf einem iPhone die in der Grundversion kostenlose Software *f* Generator V4.6.0 verwendet. Diese erlaubt einen Sweep, bei dem ein variabler Frequenzbereich in einer festzulegenden Zeit durchlaufen wird. Aufgezeichnet wurde die Schalldruckamplitude mit der integrierten Sprachmemo-App des Smartphones.

Die Aufnahme erfolgte mit einem Sweep im Frequenzbereich von 20 Hz bis 4000 Hz, der innerhalb von 60,0 s linear durchlaufen wurde. Die Lautstärke des Signals war dabei so angepasst, dass es möglichst zu keiner Sättigung des Mikrophons kam.

- Die folgende Abbildung zeigt qualitativ den zeitlichen Verlauf der von dem Mikrophon aufgezeichneten Schalldruckamplitude. Die Aufzeichnung ist am Anfang und Ende leicht beschnitten.



Abbildung 5: Qualitative Darstellung des Verlaufs der gemessenen Schalldruckamplitude bei zeitlich variierender Frequenz (Sweep). Die Dicke des Bandes ist ein Maß für die Schalldruckamplitude.



Abbildung 4: Foto der zusammengesetzten Papprollen.

In dem Frequenzverlauf der Schalldruckamplitude sind deutlich abwechselnd auftretende Maxima und Minima zu erkennen, die im Folgenden genauer analysiert werden sollen.

Alternativ können die Maxima/Minima auch durch manuelles Variieren der Frequenz beobachtet werden.

- b) Die aufgezeichneten Maxima der Schalldruckamplitude werden durch stehende Schallwellen in der Röhre verursacht. Die in die Röhre eintretenden Schallwellen werden an dem geschlossenen Ende der Röhre reflektiert und überlagern sich beim Zurücklaufen mit den einfallenden Schallwellen. Bei bestimmten Frequenzen entstehen dadurch stehende Wellen, die zu einem Maximum der Schalldruckamplitude führen.

In Abbildung 6 ist die Bedingung für das Entstehen der stehenden Wellen und damit der Amplitudenmaxima dargestellt. Da das hintere Ende der Röhre fest verschlossen ist, ist dort der Schalldruck maximal. Am offenen Rohrende muss der Druck dem Atmosphärendruck entsprechen, so dass die Schalldruckamplitude dort einen Knoten besitzt.

Stehende Welle in der Röhre

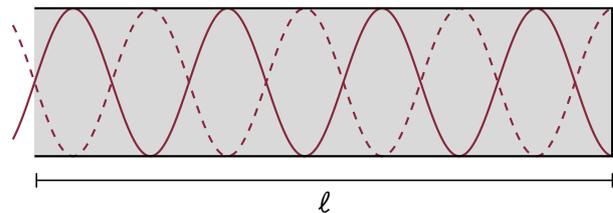


Abbildung 6: Skizze mit stehender Welle, die zu einem Maximum der Schalldruckamplitude führt.

Eine stehende Welle und damit ein Amplitudenmaximum ergibt sich, wenn die Wellenlänge λ der Schallwelle und die Länge ℓ der Röhre der folgenden Bedingung genügt:

$$\ell = \left(n - \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{2}. \quad (4.1)$$

Dabei ist n eine natürliche Zahl größer Null. Die Wellenlänge der Schallwelle hängt mit der Schallgeschwindigkeit c_s und der Frequenz f der Schallwelle über $c_s = \lambda f$ zusammen. Damit lässt sich die Bedingung in (4.1) für die Schalldruckamplitudenmaxima umschreiben zu

$$f = n \frac{c_s}{2\ell} - \frac{c_s}{4\ell}. \quad (4.2)$$

Die Gleichung (4.2) für f als Funktion von n beschreibt eine Gerade mit einer Steigung $b := \frac{c_s}{2\ell}$. Durch Bestimmen der Frequenzen für die Maxima der Schalldruckamplitude als Funktion von n kann aus der Steigung daher nach

$$c_s = 2\ell b \quad (4.3)$$

die Schallgeschwindigkeit in Luft bestimmt werden. Die Steigung b kann als Frequenzdifferenz Δf benachbarter Schalldruckamplitudenmaxima interpretiert werden.

- c) Zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Luft wurden die Daten aus der im ersten Aufgabenteil beschriebenen Messung verwendet. In dem aufgezeichneten und in Abbildung 5 dargestellten Verlauf wurden mit Hilfe der Sprachmemo-App die Zeiten t ermittelt, zu denen ein Amplitudenmaximum vorlag. Diese Zeiten lassen sich mittels

$$f = 20 \text{ Hz} + \frac{4000 \text{ Hz} - 20 \text{ Hz}}{60,0 \text{ s}} (t - t_0) \quad (4.4)$$

auf Frequenzen umrechnen. Dabei bezeichnet t_0 die Aufnahmezeit, zu der das Signal eingesetzt hat. Praktisch lässt sich t_0 nicht einfach ermitteln, da aufgrund von Hintergrundgeräuschen nicht gut zu bestimmen ist, wann das Signal einsetzt. Durch Beschneiden der Aufnahme wurde versucht t_0 auf den Nullpunkt der Zeitskala zu legen. Das ist mit einer größeren Unsicherheit verbunden,

spielt aber als konstanter Offset für die Bestimmung der Steigung keine Rolle. Die folgende Tabelle gibt die ermittelten Messwerte wieder.

Tabelle 1: Messwerte für die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Luft. Angegeben sind für die Schalldruckamplitudenmaxima sowohl die gemessenen Zeiten t als auch die mit Hilfe von (4.4) und $t_0 = 0$ daraus bestimmten Frequenzen f . Zu beachten ist, dass die Position der Maxima für kleine Frequenzen nicht gut zu lokalisieren ist und sich diese auch nicht gut abzählen lassen. Daher können die Werte für n insgesamt verschoben sein.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
-----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----

Maxima

t / s	7,68	12,26	16,86	21,2	25,86	30,43	35,37	40,58	45,77	50,93	55,98
f / Hz	529	833	1138	1426	1735	2039	2366	2712	3056	3398	3733

Die Unsicherheit bei der Bestimmung der Zeiten wird zu unter 0,2s abgeschätzt, so dass die Unsicherheit bei der Frequenzbestimmung bei etwa 10 Hz liegt und damit sehr klein verglichen mit den Frequenzen selbst ist. In Abbildung 7 sind die Messwerte graphisch dargestellt.

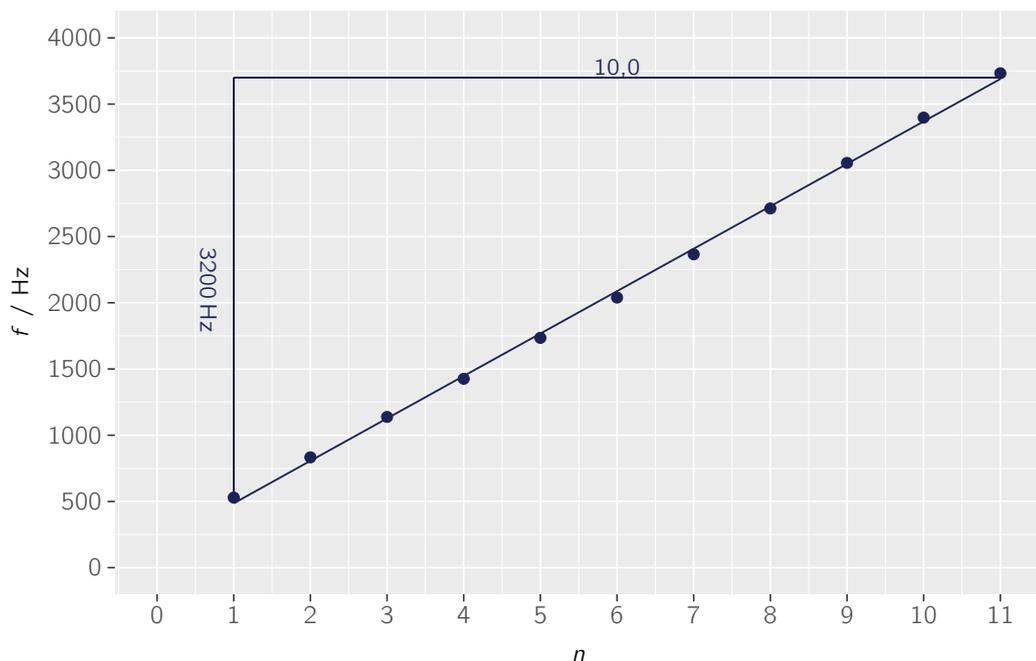


Abbildung 7: Frequenz f der Schalldruckamplitudenmaxima in Abhängigkeit von dem Parameter n mit Ausgleichsgerade.

Aus der Ausgleichsgeraden in dem Graphen lässt sich die Steigung für die Amplitudenmaxima bestimmen zu $b = (320 \pm 10) \text{ s}^{-1}$. Dabei wurde die Unsicherheit durch alternative Ausgleichsgeraden mit anderer Steigung abgeschätzt.

Für die Schallgeschwindigkeit in Luft bei der Zimmertemperatur von etwa $(22 \pm 2)^\circ\text{C}$ ergibt sich aus der Steigung mit $\ell = (51,7 \pm 0,5) \text{ cm}$ der Wert

$$c_s = 2 \ell b = (331 \pm 11) \text{ m s}^{-1}. \quad (4.5)$$

Dieser Wert ist im Rahmen der Unsicherheiten in guter Übereinstimmung mit Werten, wie sie z. B. auf Wikipedia zu finden sind. Dort wird für den Temperaturbereich von 10°C bis 30°C eine Schallgeschwindigkeit in Luft von 338 m s^{-1} bis 349 m s^{-1} angegeben.

Bewertung - Schnell wie der Schall		Punkte
4.a)	Beschreiben der Beobachtung und Erkennen periodischer Minima und Maxima	2
4.b)	Verknüpfen der Maxima mit stehenden Wellen	1
	Nutzen der Beziehung (4.1) für Maxima	1
	Ableiten eines Zusammenhanges zwischen Frequenz f und Parameter n (4.2)	1
4.c)	Formulieren einer Idee und Beschreiben der Ausführung	1
	Aufnehmen und Angeben der Messwerte	1
	Durchführen einer passenden Auswertung (z. B. graphisch)	1
	Bestimmen der Schallgeschwindigkeit mit $320 \text{ m s}^{-1} \leq c_s \leq 360 \text{ m s}^{-1}$ (4.5)	1
	Abschätzen der Unsicherheit des Ergebnisses	1
		10

Hinweis 1: Die Auswertung in Aufgabenteil c) kann auch auf andere Weise, zum Beispiel durch Bestimmen der Frequenzdifferenzen zwischen benachbarten Amplitudenmaxima und Mittelwertbildung, erfolgen. Dies sollte bei korrekter Durchführung auch mit voller Punktzahl bewertet werden.

Hinweis 2: Der Schalldruckknoten der stehenden Wellen am offenen Ende der Röhre befindet sich tatsächlich nicht direkt am Ende der Röhre sondern etwas außerhalb. Daher muss die Länge der Röhre in einer genaueren Betrachtung nach oben korrigiert werden¹. Es wird aus diesem Grund erwartet, dass die Ergebnisse der Teilnehmenden für die Schallgeschwindigkeit eher etwas zu klein sind.

Literatur: Die Idee zu diesem Experiment geht auf folgenden Artikel zurück: Hellesund, S. (2019). Measuring the speed of sound in air using a smartphone and a cardboard tube. *Physics Education*, **54**, 035015. doi: 10.1088/1361-6552/ab0e21

¹Die Korrektur beträgt (vgl. Levine & Schwinger, 1948) etwa 0,61 des Radius der Röhre. Bei dem verwendeten Aufbau also etwa $(1,2 \pm 0,1)$ cm. Dadurch verschiebt sich die ermittelte Schallgeschwindigkeit zu $(339 \pm 11) \text{ m s}^{-1}$.

Aufgabe 5 Junioraufgabe: Rohmilch im Glaskolben
(10 Pkt.)

Der nebenstehend abgebildete Glaskolben enthält Rohmilch. Wenn die Milch einige Zeit in Ruhe gelassen wird, setzt sich der Rahm der Milch ab, während die restliche Magermilch unten verbleibt. Du kannst annehmen, dass das Gesamtvolumen der Flüssigkeit dabei konstant bleibt.

Gib an, ob der Druck am Boden des Kolbens dabei abnimmt, zunimmt oder gleich bleibt. Begründe deine Antwort.

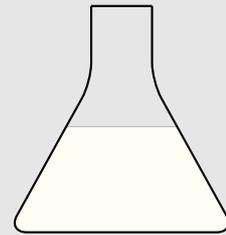


Abbildung 8: Glaskolben mit Rohmilch.

Lösung

Der Druck am Boden nimmt bei dem Prozess ab. Dies kann folgendermaßen gezeigt werden.

Bezeichne mit ρ die Dichte der anfänglich vorliegenden Rohmilch. Nach dem Absetzen des Rahms liegt ein Volumen V_1 an Rahm vor. Bezeichne dessen Dichte mit ρ_1 und die Höhe der Rahmschicht in dem Kolben mit h_1 (vgl. Abb. 9). Die entsprechenden Größen für die Magermilch werden mit 2 indiziert. Da sich das Volumen der Milch nicht ändert, gilt für die Massen vor und nach dem Absetzen des Rahms

$$m_{\text{vor}} = \rho(V_1 + V_2) = \rho_1 V_1 + \rho_2 V_2 = m_{\text{nach}} \quad \text{bzw.} \quad \frac{V_2}{V_1} = \frac{\rho - \rho_1}{\rho_2 - \rho}. \quad (5.1)$$

Aufgrund der nach oben hin zulaufenden Form des Kolbens gilt außerdem

$$\frac{V_2}{V_1} > \frac{h_2}{h_1} \quad \text{bzw. mit (5.1)} \quad \boxed{p_{\text{nach}} = (\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2) g < \rho(h_1 + h_2) g = p_{\text{vor}}}. \quad (5.2)$$

Dabei wurde ausgenutzt, dass $(\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2) g$ der Schweredruck p_{nach} am Boden des Glaskolbens nach dem Absetzen des Rahms ist und $\rho(h_1 + h_2) g$ dem anfänglichen Schweredruck p_{vor} entspricht. Dadurch ist gezeigt, dass der Druck durch die Separation abnimmt.

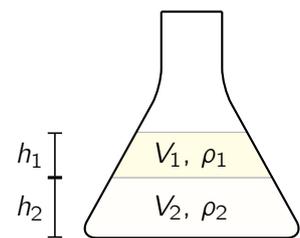


Abbildung 9: Glaskolben mit Rohmilch nach Absetzen des Rahms.

Bewertung - Junioraufgabe: Rohmilch im Glaskolben		Punkte
5	Erkennen, dass die Dichte von Rahm kleiner ist als die von Rohmilch	2
	Verwenden der Massenerhaltung (5.1)	2
	Angaben des Schweredrucks	2
	Verwenden einer geometrischen Abschätzung wie in (5.2)	2
	Kombinieren zu einer Aussage für den Druck und Angeben, dass der Druck abnimmt	2
		10

Hinweis: Für die Lösung der Aufgabe kann auch eine stärker qualitative Argumentation genutzt werden, die ebenfalls mit voller Punktzahl bewertet werden sollte.

Bewertungsbogen für die 1. Runde zur 52. IPhO 2021

(Dieser Bogen ist auch unter www.ipho.info bei den Hinweisen zur 1. Runde erhältlich)

Von der korrigierenden Lehrkraft auszufüllen und bis spätestens zum 28. September 2020 an die/den zuständige(n) Landesbeauftragte(n) zu schicken.

**Bitte tragen Sie die Punktzahlen auch online im Bewertungsportal der IPhO ein.
Nur so können wir sicherstellen, dass die Bearbeitung korrekt erfasst wird.**

Schülername (-code): _____ (_____)

Schule, Ort: _____

Lehrkraft (-code): _____ (_____)

Aufgabe	Maximalpunktzahl	Erreichte Punktzahl
1 Kreuz und quer	10	
2 Space-Taxi	10	
3 Temperaturabhängiger Widerstand	10	
4 Schnell wie der Schall	10	

Bonuspunkte für jüngere Teilnehmende

5 Junioraufgabe: Rohmilch im Glaskolben	10	
	40 (+10)	

Kommentare und Anregungen:

Unterschrift: _____