

53. Internationale PhysikOlympiade

Tokyo, Japan 2023



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

Lösungen und Bewertungsvorschläge zu den Aufgaben der 1. Runde im Auswahlwettbewerb zur 53. IPhO 2023

**Nur für die betreuenden Lehrerinnen und Lehrer.
Nicht vor Oktober 2022 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 Ihnen Kandidatinnen bzw. Kandidaten bis zum 15. September 2022 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 **29. September 2022**. 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 Team der PhysikOlympiade.

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

- In diesem Jahr führen wir ein neues Online-Portal ein. Eine Registrierung in dem System und die Anmeldung zum Wettbewerb sind vermutlich ab Mai möglich. Bis dahin bitten wir noch um Geduld. Bitte registrieren Sie sich dann so bald wie möglich als Betreuer:in in dem Online-Portal. Den Link dazu finden Sie unter www.ipho.info.
- Nach der Registrierung im Portal können Sie sich für die PhysikOlympiade anmelden. Um Sie als Betreuer:in für den Wettbewerb freizuschalten, ist das Hochladen eines ausgefüllten und mit einem Schulstempel versehenen Verifikationsformulars notwendig, das Sie im Anmeldeprozess herunterladen können.
- Nach erfolgreicher Freischaltung für den Wettbewerb erhalten Sie über das Online-Portal Zugriff auf relevante Dokumente für den Wettbewerb, wie diese Musterlösung.
- Geben Sie bitte den nach der Freischaltung in Ihrem Nutzerbereich im Portal angezeigten Personencode an die von Ihnen betreuten Schüler:innen weiter, die diesen bei der Anmeldung benötigen.

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 **15. September 2022** 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 Schüler:innen ebenfalls im Online-Portal registrieren und zu dem Wettbewerb anmelden. Nach der Anmeldung zur PhysikOlympiade erhalten Sie eine Benachrichtigung über die Betreuungsanfrage, die Sie bestätigen müssen.

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 2022/2023 noch nicht die vorletzte Jahrgangsstufe erreicht haben, können durch die Bearbeitung der **Junioraufgabe** einen Bonus von maximal 10 Punkten erreichen. Bei allen anderen wird die Junioraufgabe nicht gewertet.
- 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 über das Online-Portal mit. Einen Link zu der Seite finden Sie unter www.ipho.info. Die Bewertungseingabe müssen Sie am Ende abschließen.
- Schicken Sie die bewerteten Arbeiten zusammen mit den Bewertungsbögen bis spätestens **29. September 2022** 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 Irgendwie verschoben
(10 Pkt.)
(Idee: Aufgabengruppe der PhysikOlympiade)

Eine dünne Sammellinse bildet einen 140,0 cm entfernten Gegenstand scharf auf einem Schirm ab, der in einer Entfernung von 16,8 cm hinter der Linse positioniert ist.

1.a) Bestimme die Brennweite der Linse.

Zwischen Linse und Schirm wird nun, wie in der Abbildung skizziert, eine 3,0 cm dicke, planparallele Glasplatte mit Brechungsindex $n = 1,50$ gebracht. Um wieder ein scharfes Bild auf dem Schirm zu erzeugen, wird dieser um eine Strecke Δb verschoben.

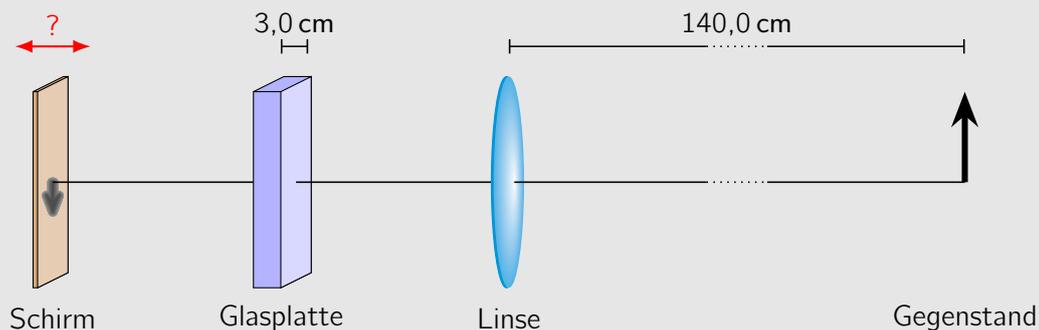


Abb. 1. Nicht maßstabsgerechte Skizze des Aufbaus.

1.b) Erkläre, welche Wirkung die Glasplatte auf einen nicht senkrecht einfallenden Lichtstrahl hat. Begründe damit, ob der Schirm zum Erzeugen eines scharfen Bildes näher an die Linse gerückt oder weiter von ihr entfernt werden muss.

1.c) Bestimme den Betrag Δb der notwendigen Verschiebung des Schirms.

Du kannst vereinfachend davon ausgehen, dass nur achsennahe Strahlen an dem Abbildungsprozess beteiligt sind.

Lösung

1.a) Für dünne Linsen lässt sich die Linsengleichung

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b} \quad (1.1)$$

verwenden. Dabei bezeichnen f die Brennweite, g die Gegenstands- und b die Bildweite bei der Abbildung. Im vorliegenden Fall ist $g = 140,0$ cm und $b = 16,8$ cm. Durch Umstellen von (1.1) ergibt sich die Brennweite damit zu

$$f = \frac{g b}{g + b} = 15,0 \text{ cm} . \quad (1.2)$$

- 1.b) Fällt ein Lichtstrahl unter einem Lotwinkel $\alpha \neq 0$ auf die Glasplatte, so wird er an der vorderen Grenzfläche gebrochen. Der Lotwinkel β in der Glasplatte ergibt sich mit dem Brechungsindex n der Glasplatte aus dem Snellius'schen Brechungsgesetz

$$\sin \alpha = n \sin \beta. \quad (1.3)$$

Der Brechungsindex von Luft wurde dabei zu 1,00 angenommen. Nach Durchgang durch die Glasplatte wird der Lichtstrahl an dem Übergang Glas-Luft erneut gebrochen. Der Lotwinkel des einfallenden Strahls beträgt nun β . Da der Übergang von Glas in Luft erfolgt, ergibt sich aus (1.3) für den Lotwinkel nach Austritt aus der Glasplatte erneut α . Der Lichtstrahl ist aber gegenüber dem einfallenden Lichtstrahl verschoben. In Abbildung 2 ist der Verlauf je eines Lichtstrahls mit $\alpha \neq 0$ und $\alpha = 0$ bei Durchquerung der Glasplatte dargestellt.

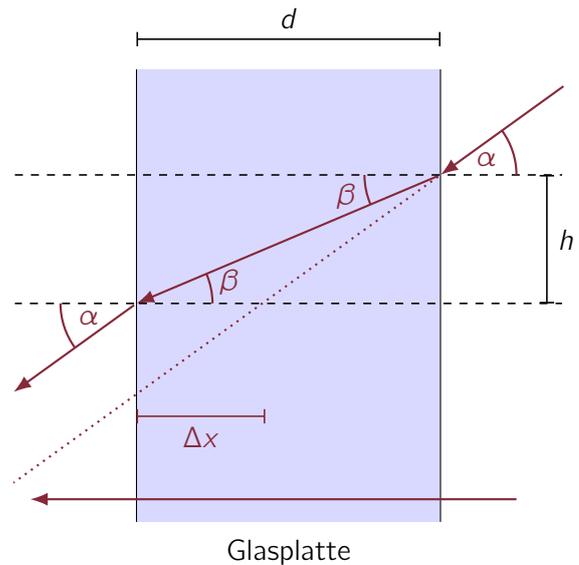


Abb. 2. Skizze zur Verschiebung eines Lichtstrahls durch Glasplatte. Der Einfallswinkel ist für eine bessere Darstellung größer gewählt als bei einem achsennahen Strahl.

Betrachte für die Konstruktion des Bildes hinter der Linse zwei Strahlen, die von dem gleichen Punkt des Objektes ausgehen. Zum einen den Strahl, der vor der Linse durch den Brennpunkt geht und zum anderen den Strahl, der vor der Linse parallel zur optischen Achse verläuft. Der erste Strahl verläuft hinter der Linse parallel zur optischen Achse. Damit trifft er unter dem Winkel $\alpha = 0$ auf die Glasplatte und wird dort nicht gebrochen. Der zweite Strahl trifft hinter der Linse unter einem Winkel $\alpha \neq 0$ auf die Glasplatte und wird, wie in Abbildung 2 skizziert, um eine Strecke Δx entlang der optischen Achse verschoben. Damit ist auch der Schnittpunkt der beiden Strahlen um die Strecke Δx weiter von der Linse entfernt als ohne Glasplatte, und der Schirm muss entlang der optischen Achse von der Linse weg verschoben werden, um ein scharfes Bild aufzufangen.

- 1.c) Die Verschiebung Δx des Lichtstrahls entlang der optischen Achse in Abbildung 2 lässt sich folgendermaßen bestimmen: Für den Tangens des Winkels β gilt mit den Bezeichnungen in der Abbildung

$$\tan \beta = \frac{h}{d} \quad \text{und damit} \quad h = d \tan \beta. \quad (1.4)$$

Die gepunktet eingezeichnete Verlängerung des einfallenden Lichtstrahls schließt mit den beiden gestrichelten Lotlinien jeweils einen Winkel α ein. Für den Tangens dieses Winkels ist daher

$$\tan \alpha = \frac{h}{d - \Delta x} \quad \text{und mit (1.4) folgt daraus} \quad d - \Delta x = d \frac{\tan \beta}{\tan \alpha}. \quad (1.5)$$

Für achsennahe Strahlen sind die Winkel sehr klein und im Bereich weniger Grad. Daher ist in dieser Kleinwinkelnäherung der Tangens der Winkel ungefähr gleich dem Sinus der Winkel. Für die Verschiebung entlang der optischen Achse ergibt sich damit

$$\Delta x = d \left(1 - \frac{\tan \beta}{\tan \alpha} \right) \approx d \left(1 - \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} \right) = d \left(1 - \frac{1}{n} \right). \quad (1.6)$$

Dabei wurde im letzten Schritt erneut das Brechungsgesetz (1.3) verwendet. Die Verschiebung ist also für achsennahe Strahlen unabhängig vom Einfallswinkel α . Damit werden durch die Glasplatte

alle Lichtstrahlen um eine Strecke Δx entlang der optischen Achse verschoben und die gesuchte Verschiebung Δb des Bildes ist

$$\Delta b = \Delta x \approx d \left(1 - \frac{1}{n} \right) \approx 1,0 \text{ cm} . \quad (1.7)$$

Bewertung - Irgendwie verschoben		Punkte
1.a)	Verwenden der Linsengleichung für dünne Linsen	1.0
	Bestimmen der Brennweite (1.2)	1.0
1.b)	Erläutern des Strahlenverlaufs in der Glasplatte (Skizze oder in Worten)	1.0
	Nutzen des Brechungsgesetzes	1.0
	Erkennen, dass Strahlen durch Platte parallelverschoben werden	1.0
	Angaben und Begründen, dass Schirm weiter weg gerückt werden muss	1.0
1.c)	Anwenden trigonometrischer Beziehungen zur Bestimmung von Δx	1.0
	Verwenden der Näherung achsennaher Strahlen	1.0
	Erkennen, dass Verschiebung nur von Dicke und dem Brechungsindex abhängt	1.0
	Berechnen des Ergebnisses für Δb (1.7)	1.0
		10.0

Aufgabe 2 Das Tōhoku-Erdbeben

(10 Pkt.)

Japan liegt in einem geologisch sehr aktiven Gebiet der Erde, so dass Erdbeben dort häufig auftreten. Am 11. März 2011 gegen 14:46 Uhr Ortszeit ereignete sich das stärkste einer ganzen Reihe schwerer Erdbeben vor der japanischen Küste. Das Hypozentrum dieses Bebens lag etwa 24 km unterhalb des Meeresspiegels.

In der nebenstehenden Karte sind vier Erdbebenwarten in Japan eingezeichnet. Die Tabelle unten enthält die Positionen der Messstationen und die Zeiten, zu denen sie die ersten Signale von dem Erdbeben registriert haben.

Dabei sind zwei verschiedene Zeiten angegeben, die zu zwei verschiedenen Arten von Wellen gehören, die durch ein Erdbeben verursacht werden und sich im Erdinneren ausbreiten. Die so genannten P- oder Primärwellen sind Longitudinalwellen. Die S- oder Sekundärwellen hingegen sind Transversalwellen.

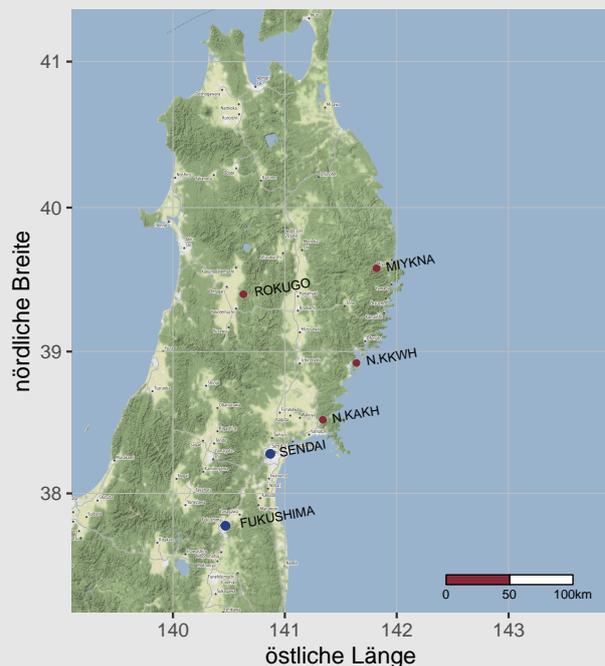


Abb. 3. Karte Japans in der Region um Sendai mit Messstationen (erstellt mit ggmap und OSM-Kartenmaterial).

Die P- und S-Wellen breiten sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten im Erdinneren aus. Vereinfachend kann angenommen werden, dass diese Geschwindigkeiten konstant sind und für die P-Wellen $v_p = 5,5 \text{ km s}^{-1}$ sowie für die S-Wellen $v_s = 3,3 \text{ km s}^{-1}$ betragen.

Abkürzung	Station Name	Position		Zeit Signalregistrierung	
		Länge (N)	Breite (E)	P-Welle	S-Welle
MIYKNA	Miyakonagasawa	39° 34,60'	141° 49,18'	14:46:46,71	14:47:9,56
ROKUGO	Akitarokugo	39° 23,95'	140° 37,82'	14:46:54,18	14:47:23,53
N.KKWH	Karakuwa	38° 55,24'	141° 38,26'	14:46:40,13	14:46:57,33
N.KAKH	Kahoku	38° 30,95'	141° 20,53'	14:46:40,57	14:46:57,87

- 2.a) Bestimme mit Hilfe der Karte, die unter www.ipho.info auch als Datei heruntergeladen werden kann, und der gegebenen Daten näherungsweise die Position des Epizentrums des Bebens. Gib außerdem an, wann sich das Beben ereignet hat.

Die Stärke des Erdbebens wurde später mit 9,0 auf der so genannten Momenten-Magnituden-Skala angegeben. Ein solch starkes Erdbeben ist sehr selten und kommt nur alle paar Jahre vor. Statistisch tritt jährlich weltweit ein Erdbeben der Stärke 8 oder höher auf, wohingegen durchschnittlich jährlich etwa zehn Erdbeben der Stärke 7 oder höher und 100 mit einer Stärke von mindestens 6 registriert werden.

Die einheitenlose Momenten-Magnituden-Skala erlaubt, sofern die Erdbeben unter gleichen Bedingungen erfolgen, einen Vergleich der durch zwei Erdbeben der Magnituden bzw. Stärken M_1 und

M_2 freigesetzten Energien E_1 und E_2 . Es gilt

$$\frac{E_1}{E_2} \approx 10^{\frac{3}{2}(M_1 - M_2)}.$$

Das Tōhoku-Erdbeben hat mehr Energie freigesetzt als alle Erdbeben mit Stärken von 6 bis 8 zusammen, die sich durchschnittlich weltweit in einem Jahr ereignen.

2.b) Bestimme näherungsweise das Verhältnis dieser beiden Energien. Nimm dazu vereinfachend an, dass nur Erdbeben mit ganzzahliger Magnitude auftreten.

Lösung

a) Bezeichne mit d den Abstand einer Erdbebenwarte von dem Ursprung des Erdbebens und mit Δt_P bzw. Δt_S die Laufzeiten, die die P- und S-Wellen benötigen um von dort zur Erdbebenwarte zu gelangen. Dann gilt

$$d = v_P \cdot \Delta t_P = v_S \cdot \Delta t_S \quad \text{und durch Umstellen} \quad \Delta t_S - \Delta t_P = d \left(\frac{1}{v_S} - \frac{1}{v_P} \right). \quad (2.1)$$

Die Differenz $\Delta t_S - \Delta t_P$ ist aber auch gleich der Differenz der Zeitpunkte t_S und t_P der Signalregistrierung an den Stationen. Daher folgt aus (2.1) für den Abstand

$$d = (t_S - t_P) \left(\frac{1}{v_S} - \frac{1}{v_P} \right)^{-1} = (t_S - t_P) \frac{v_P v_S}{v_P - v_S}. \quad (2.2)$$

Damit können wir aus den gegebenen Daten die Abstände des Erdbebenursprungs zu den Erdbebenwarten bestimmen. Um das Epizentrum aufzufinden, muss noch berücksichtigt werden, dass der Abstand d die Länge der direkten Verbindungslinie durch das Erdinnere angibt. Das Epizentrum liegt aber über dem Ursprung des Erdbebens, dem so genannten Erdbebenherd oder Hypozentrum. Für die Abstände in der Aufgabe nehmen wir an, dass die Erdoberfläche als flach angenähert werden kann. Dann gilt für den Abstand d_{Epi} zwischen Erdbebenwarte und Epizentrum nach Pythagoras

$$d_{\text{Epi}} = \sqrt{d^2 - h^2} = \sqrt{(t_S - t_P)^2 \frac{v_P^2 v_S^2}{(v_P - v_S)^2} - h^2}. \quad (2.3)$$

Dabei ist $h \approx 24 \cdot 10^3 \text{ m}$ die Tiefe des Hypozentrums unter der Erdoberfläche.

Die gegebene Tabelle lässt sich damit um die Entfernung d_{Epi} ergänzen.

Abkürzung	Station Name	Position		Zeit Signalregistrierung		Abstand d_{Epi} / km
		Länge (N)	Breite (E)	P-Welle	S-Welle	
MIYKNA	Miyakonagasawa	39° 34,60'	141° 49,18'	14:46:46,71	14:47:9,56	187
ROKUGO	Akitarokugo	39° 23,95'	140° 37,82'	14:46:54,18	14:47:23,53	241
N.KKWH	Karakuwa	38° 55,24'	141° 38,26'	14:46:40,13	14:46:57,33	140
N.KAKH	Kahoku	38° 30,95'	141° 20,53'	14:46:40,57	14:46:57,87	141

Zeichnet man in die gegebene Karte um die Messstationen Kreise mit dem Epizentrumsabstand als Radius ein, so ergibt sich die Position des Epizentrums als Schnittpunkt der Kreise, wie nebenstehend zu sehen. Die Koordinaten des Epizentrums lassen sich aus der Karte ablesen zu

$$\boxed{38^\circ 6' N \ 142^\circ 52' E} . \quad (2.4)$$

Die Uhrzeit t , zu der sich das Erdbeben ereignet hat, ergibt sich mit (2.1) aus der Entfernung d gemäß (2.2), der Zeit t_p oder t_s der Registrierung und der Geschwindigkeit v_p bzw. v_s der Erdbebenwelle aus

$$\boxed{t = t_{p/s} - \frac{d}{v_{p/s}} \approx 14:46:13} , \quad (2.5)$$

wobei der Wert für die Zeit je nach Messstation um etwa $\pm 3s$ variiert.

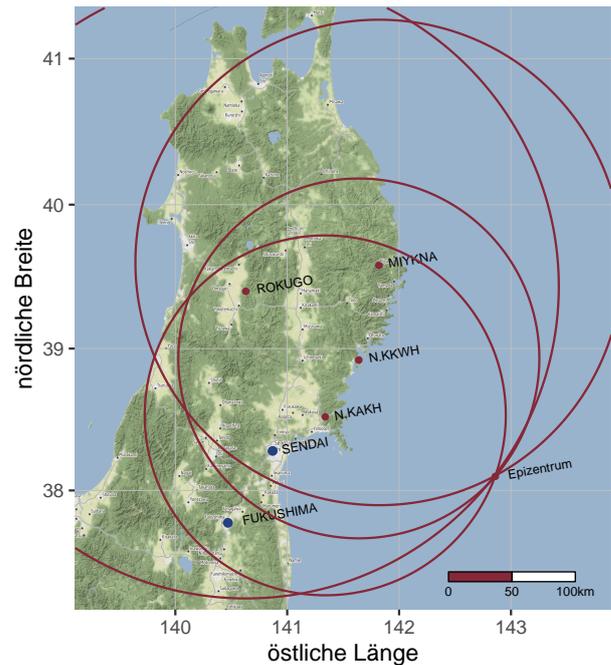


Abb. 4. Karte Japans in der Region um Sendai mit Messstationen und Epizentrum (erstellt mit gmap und OSM-Kartenmaterial).

- b) Jährlich ereignen sich etwa ein Erdbeben mit einer Stärke von 8 oder höher, zehn mit einer Stärke von 7 oder höher und 100 mit einer Stärke von 6 oder höher. Für die Abschätzung nehmen wir an, dass diese Anzahlen in genau den jeweiligen Magnituden aufgetreten sind. Verglichen mit der Energie E_{M9} , die durch das Tōhoku-Erdbeben freigesetzt wurde, betragen die Energien E_{M8} , E_{M7} und E_{M6} von Erdbeben der Stärke 8, 7 oder 6 mit der gegebenen Formel

$$\frac{E_{M8}}{E_{M9}} = 10^{-\frac{3}{2}} \approx 32 \cdot 10^{-3} \quad \frac{E_{M7}}{E_{M9}} = 10^{-2 \cdot \frac{3}{2}} \approx 1,0 \cdot 10^{-3} \quad \frac{E_{M6}}{E_{M9}} = 10^{-3 \cdot \frac{3}{2}} \approx 0,032 \cdot 10^{-3} . \quad (2.6)$$

Damit ergibt sich für das gesuchte Verhältnis der Energien

$$\boxed{\frac{E_{M9}}{E_{M8} + 10 \cdot E_{M7} + 100 E_{M6}} = \frac{1}{0,032 + 0,010 + 0,003} \approx 22} . \quad (2.7)$$

Durch das Tōhoku-Erdbeben wurde also grob so viel Energie freigesetzt, wie durch alle Erdbeben der Stärken 6 bis 8 in 22 Jahren freigesetzt würden.

Hinweis: Die Daten zu dieser Aufgabe stammen größtenteils von der Webseite der Japan Metereological Agency JMA, die z. B. eine große Sammlung an Daten zu Erdbeben zur Verfügung stellt. Die Zeiten für die Signalregistrierung der S-Wellen wurden geringfügig modifiziert, um auch mit nur vier Stationen das Epizentrum gut lokalisieren zu können. Die Position des Epizentrums deckt sich mit der von der Japan Metereological Agency ermittelten Position. Andere Quellen geben mitunter etwas andere Positionen an, da andere Daten und Methoden zur Bestimmung herangezogen werden.

Bewertung - Das Tōhoku-Erdbeben		Punkte
2.a)	Ableiten einer Formel für den Abstand zum Hypozentrum (2.2)	2.0
	Berücksichtigen, dass Epizentrum an Erdoberfläche ist (2.3)	1.0
	Bestimmen der Abstände der Messstationen zum Epizentrum	1.0
	Angeben einer Idee zum Bestimmen der Position des Epizentrums	1.0
	Bestimmen der Position des Epizentrums auf $\pm 3'$ (2.4)	1.0
	Bestimmen der Zeit, zu der sich das Erdbeben ereignet hat (2.5)	1.0
2.b)	Idee zum Bilden der Verhältnisse für einzelne Magnituden	1.0
	Bestimmen der Verhältnisse der Energien für einzelne Magnituden (2.6)	1.0
	Bestimmen des Ergebnisses (2.7)	1.0
		10.0

Aufgabe 3 Fliegender Schläger
(10 Pkt.)

Nach einem verlorenen Match wirft ein Spieler seinen Badmintonschläger in hohem Bogen von sich.

Der Graph zeigt die dabei zu beobachtende Bewegung der in der nebenstehenden Abbildung eingezeichneten Punkte P und Q. Die in dem Graphen markierten Datenpunkte sind Schnappschüsse mit einem zeitlichen Abstand von jeweils 50 ms beginnend beim Abwurf bei $x = 0$. Du kannst davon ausgehen, dass die Bewegung des Schlägers vollständig in der x - y -Ebene des Graphen erfolgt.

- 3.a) Rekonstruiere die Bahn des Schwerpunktes S des Schlägers und zeichne diese ebenfalls in den Graphen ein. Bestimme die Abstände der Punkte P und Q vom Schwerpunkt.
- 3.b) Bestimme die Abwurfgeschwindigkeit des Schlägers sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung sowie die Frequenz, mit der der Schläger im Flug rotiert.

Zur Auswertung kannst du dir die Datenpunkte auch als Tabelle unter www.ipho.info herunterladen und damit arbeiten. Für die Schwerebeschleunigung kannst du den Wert $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$ verwenden und außerdem Reibungseffekte vernachlässigen.



Abb. 5. Badmintonschläger mit Punktmarkierungen. Die Position des Schwerpunktes S auf \overline{PQ} ist unbekannt.

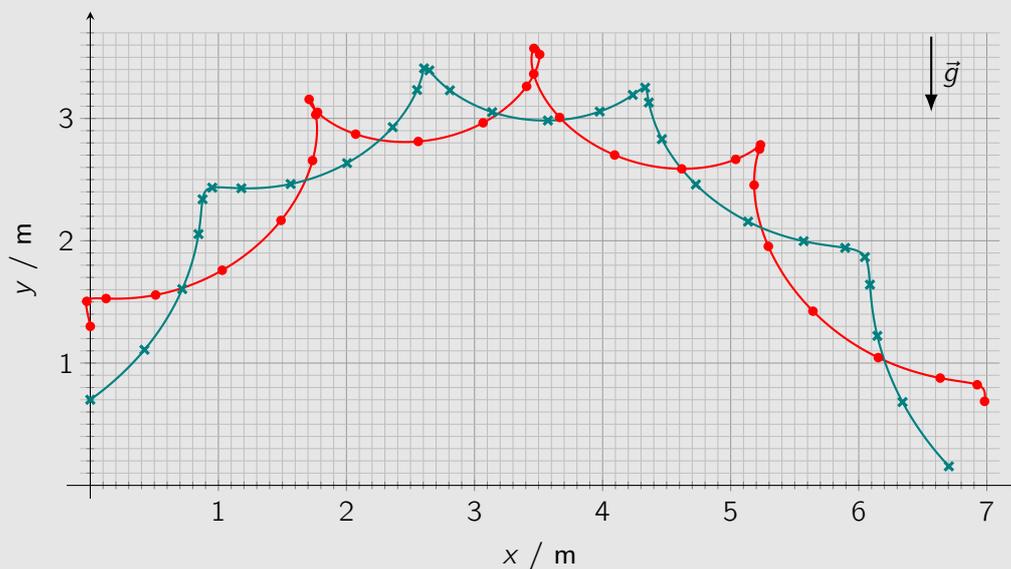


Abb. 6. Graph für die Bahnkurven der Punkte P (•) und Q (×) während des Fluges.

Lösung

- 3.a) Die Bewegung eines Punktes auf der Linie \overline{PQ} im Flug setzt sich zusammen aus der Schwerpunkt-bewegung und einer Rotation um den Schwerpunkt. Die Bahn des Schwerpunktes selbst entspricht der Bahn eines schiefen Wurfes, also einer Parabel. Um herauszufinden, wo sich der Schwerpunkt des Schlägers befindet, untersuchen wir daher die Bahnkurven verschiedener Punkte auf der Verbindungslinie zwischen P und Q und prüfen, für welchen Punkt die Bahn am besten

einer Parabel entspricht.

Definiere durch

$$\vec{R}(t) = \vec{P}(t) + k \left(\vec{Q}(t) - \vec{P}(t) \right) \quad \text{mit } k \in (0, 1) \quad (3.1)$$

den Ortsvektor eines solchen Punktes auf der Verbindungslinie. Die Vektoren $\vec{P}(t)$ und $\vec{Q}(t)$ bezeichnen dabei die Positionen der Punkte P und Q in dem Koordinatensystem des Graphen in Abhängigkeit von der Zeit. Der Parameter $k \in (0, 1)$ gibt die Position des Punktes entlang der Verbindungslinie an. Mit Hilfe der gegebenen Positionsdaten für die Punkte P und Q lassen sich die Positionsdaten des Punktes R während des Wurfs für verschiedene Werte von k berechnen. In Abbildung 7 sind die Ergebnisse dieser Berechnungen für eine Reihe von Werten von k dargestellt.

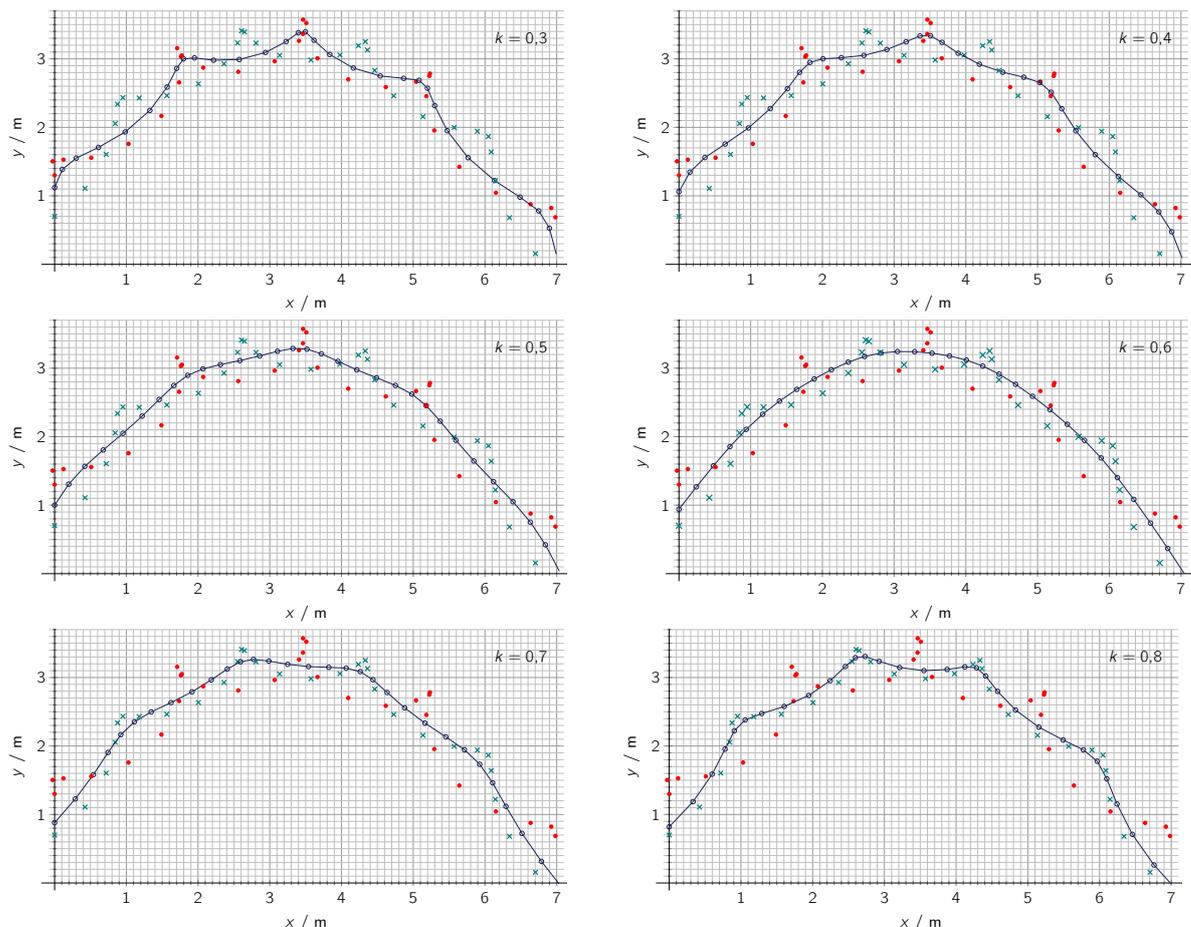


Abb. 7. Graph der Position des Punktes R während des Fluges für verschiedene Parameter k mit punktwiser Verbindung der Datenpunkte. Für die Position von P und Q wurden nur die Datenpunkte eingetragen.

An den Graphen ist deutlich zu erkennen, dass die Bahnkurve des Punktes R für $k = 0,6$ in sehr guter Näherung eine Parabelform besitzt und R damit relativ genau dem Schwerpunkt entspricht. Mit ein wenig Feintuning kann man den Wert noch etwas besser zu etwa 0,58 bestimmen. Das ist aber nicht zwingend gefordert.

Der vollständige Graph mit der Bahnkurve des Schwerpunktes S hat dann folgende Form

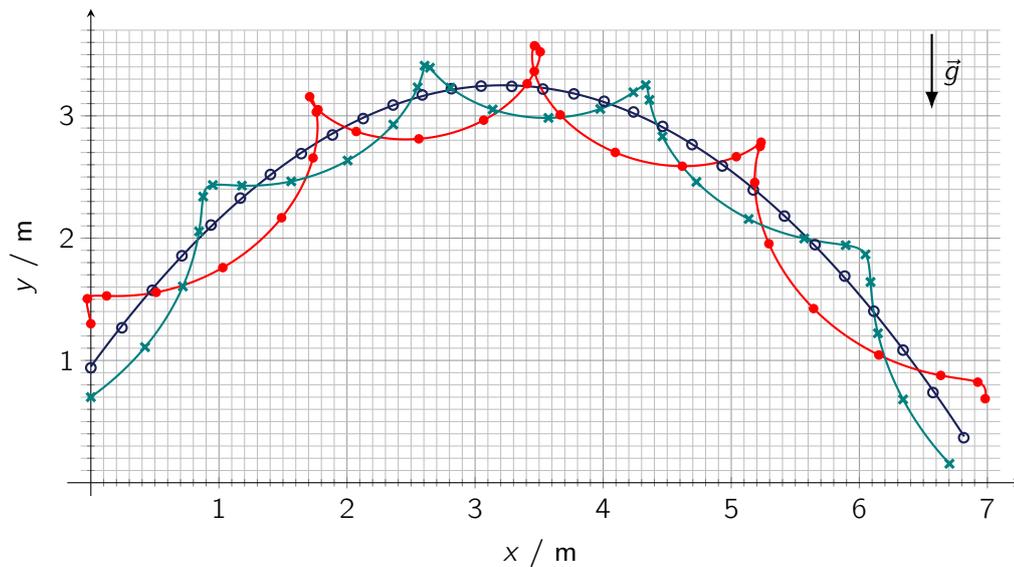


Abb. 8. Graph für die Bahnkurven der Punkte P (•), Q (×) und S (◦) während des Fluges.

Mit dem bestimmten Wert des Parameters k lassen sich die Abstände $|\overline{PS}|$ und $|\overline{QS}|$ der Punkte P und Q vom Schwerpunkt S bestimmen. Der Abstand der Punkte P und Q kann z. B. aus den Daten für den Abwurf ermittelt werden und beträgt $|\overline{PQ}| = 0,60 \text{ m}$. Mit $k = 0,6$ ergeben sich dann aus (3.1)

$$\boxed{|\overline{PS}| = 0,6 \cdot |\overline{PQ}| \approx 0,36 \text{ m}} \quad \text{und} \quad \boxed{|\overline{QS}| = 0,4 \cdot |\overline{PQ}| \approx 0,24 \text{ m}}. \quad (3.2)$$

- 3.b) Die Abwurfgeschwindigkeiten des Schlägers in horizontaler (v_x) und vertikaler Richtung (v_y) lassen sich mit Hilfe der Parabelbahn für den Schwerpunkt aus dem Graphen (oder den Daten) bestimmen.

In der Zeit $\Delta t = 29 \cdot 50 \text{ ms}$ legt der Schwerpunkt des Schlägers in horizontale Richtung eine Strecke $\Delta x \approx 6,82 \text{ m}$ zurück. Da keine Kräfte in horizontale Richtung auf den Schläger wirken, ist dessen horizontale Geschwindigkeit konstant. Daher ergibt sich für die Abwurfgeschwindigkeit in x-Richtung

$$\boxed{v_x = \frac{\Delta x}{\Delta t} \approx \frac{6,82 \text{ m}}{1,45 \text{ s}} \approx 4,70 \text{ m s}^{-1}}. \quad (3.3)$$

Für die Bestimmung der vertikalen Anfangsgeschwindigkeit kann man nutzen, dass der Schwerpunkt des Schlägers nach etwa $\Delta t' = 14 \cdot 50 \text{ ms}$ seinen höchsten Punkt erreicht hat. Zu dieser Zeit hat also die Beschleunigung durch die Anziehungskraft der Erde den Schläger vollständig in seiner vertikalen Bewegung abgebremst. Daher ist $v_y = g \cdot \Delta t' \approx 9,81 \text{ m s}^{-2} \cdot 0,70 \text{ s} \approx 6,87 \text{ m s}^{-1}$. Da der Zeitpunkt, an dem der höchste Punkt erreicht wird, aufgrund der dort flachen Parabelform nicht sehr genau bestimmt werden kann, bietet sich eine andere Methode zur Bestimmung an. Beim Aufsteigen legt der Schwerpunkt eine Höhendifferenz von etwa $\Delta h = 3,25 \text{ m} - 0,95 \text{ m} \approx 2,30 \text{ m}$ zurück. Dabei muss Arbeit gegen das Schwerfeld der Erde verrichtet werden, die durch die anfängliche kinetische Energie der vertikalen Geschwindigkeitskomponente aufgebracht wird. Am höchsten Punkt ist die anfängliche kinetische Energie der vertikalen Geschwindigkeitskomponente vollständig in Lageenergie umgesetzt. Durch Gleichsetzen der Energien lässt sich die anfängliche Geschwindigkeit v_y bestimmen. Es gilt mit der Masse m des Schlägers $\frac{1}{2} m v_y^2 = m g \Delta h$ und

damit

$$v_y = \sqrt{2 g \Delta h} \approx \sqrt{2 \cdot 9,81 \text{ m s}^{-2} \cdot 2,30 \text{ m}} \approx 6,72 \text{ m s}^{-1}. \quad (3.4)$$

Aus den Datenpunkten im Graphen lässt sich ablesen, dass die Verbindungslinie zwischen den Punkten P und Q während des Fluges drei vollständige Drehungen und eine Teildrehung um einen Winkel von 300° ausführt. Die Rotationsfrequenz f des Schlägers lässt sich daraus bestimmen zu

$$f = \frac{3 + \frac{300}{360}}{\Delta t} \approx 2,64 \text{ Hz} \quad \text{bzw.} \quad \omega = 2 \pi f \approx 16,6 \text{ s}^{-1}. \quad (3.5)$$

Hinweis: Die Idee zu der Aufgabe stammt in Teilen aus dem Artikel: Dias, M. A., Carvalho, P. S. & Rodrigues, M. (2016). How to determine the centre of mass of bodies from image modelling. *Physics Education*, **51**, doi:10.1088/0031-9120/51/2/025001. Ein Video des Fluges eines Schlägers ist z. B. auf YouTube zu sehen.

Bewertung - Fliegender Schläger		Punkte
3.a)	Erkennen der Superposition einer Translation mit einer Rotationsbewegung	1.0
	Erkennen, dass sich Schwerpunkt auf einer Parabel bewegt	0.5
	Formulieren einer Idee zur Bestimmung des Schwerpunktes	1.0
	Ausführen der Idee	1.0
	Einzeichnen der Bahnkurve des Schwerpunktes	1.0
	Bestimmen der Abstände mit $ \overline{PS} = (0,35 \pm 0,02) \text{ m}$ und $ \overline{QS} = (0,25 \pm 0,02) \text{ m}$	1.0
3.b)	Formulieren von Ideen zur Bestimmung der Größen (je 0.5 P.)	1.5
	Bestimmen der horizontalen Anfangsgeschwindigkeit mit $v_x = (4,7 \pm 0,3) \text{ m s}^{-1}$	1.0
	Bestimmen der vertikalen Anfangsgeschwindigkeit mit $v_y = (6,7 \pm 0,5) \text{ m s}^{-1}$	1.0
	Bestimmen der Rotationsfrequenz mit $f = (2,7 \pm 0,2) \text{ Hz}$	1.0
		10.0

Hinweise: Die in der Bewertung angegebenen Werte für die Größen sind die für die Erstellung der Graphen verwendeten. Wenn die von den Teilnehmenden ermittelten Werte etwas außerhalb des angegebenen Bereichs liegen, können noch Teilpunkte vergeben werden.

Die Aufgabe lässt sich auf sehr unterschiedlichen Wegen lösen. So ist zum Beispiel auch eine Untersuchung einzelner Positionen möglich, um Aussagen über die gesuchten Parameter zu treffen. Ebenso kann der Wurf in einem frei fallenden System betrachtet werden, in dem sich der Schwerpunkt dann auf einer Geraden bewegt. Die Verwendung eines alternativen Lösungsweges sollte bei korrekter Durchführung und passenden Ergebnissen ebenfalls eine volle Punktzahl ermöglichen.

Aufgabe 4 Eine Frage der Temperatur
(10 Pkt.)

Tee ist fester Teil der japanischen Kultur. Eine wichtige Rolle für die Zubereitung von Tee spielt die Temperatur des verwendeten Wassers.

In dieser Aufgabe sollst du die Abkühlung von Wasser experimentell untersuchen, um abzuschätzen, wie lange man kochendes Wasser abkühlen lassen sollte, bevor man einen grünen Tee zubereitet.

Für das Experiment benötigst du eine Teekanne oder alternativ einen großen Becher, heißes Wasser, ein Thermometer sowie eine Uhr zur Zeitmessung. Das Thermometer sollte Temperaturen bis etwa 50 °C messen und ins Wasser eingetaucht werden können.



Abb. 9. *Japanische Teekanne.*

- 4.a) Fülle etwa 50 °C heißes Wasser in die Teekanne oder den Becher. Nimm die Temperatur des Wassers in dem Gefäß in Abhängigkeit von der Zeit auf. Dabei kannst du dich auf einen Temperaturbereich von 45 °C bis etwa 5 °C oberhalb der Raumtemperatur beschränken. Vergiss nicht, das Wasser während des Experimentes regelmäßig umzurühren.

Wenn die Temperatur eines Körpers nicht zu stark von der Umgebungstemperatur abweicht, gilt in guter Näherung das Newtonsche Abkühlungsgesetz. Nach diesem ist die Leistung, mit der Wärme an die Umgebung abgegeben wird, näherungsweise proportional zur Temperaturdifferenz zwischen dem Körper und der Umgebung. Was genau „nicht zu stark . . . abweicht“ bedeutet, hängt im konkreten Fall unter anderem davon ab, wie genau die Näherung sein soll.

Aus dem Abkühlungsgesetz lässt sich bei konstanten Umgebungsbedingungen für den Verlauf der Temperatur ϑ des Körpers der Zusammenhang

$$\vartheta(t) = \vartheta_u + (\vartheta_0 - \vartheta_u) \cdot e^{-t/\tau}$$

ableiten*. Dabei bezeichnen t die Zeit, τ die Zeitkonstante der Abkühlung, ϑ_u die als konstant angenommene Umgebungstemperatur und ϑ_0 die Temperatur des Körpers zur Zeit $t = 0$.

- 4.b) Zeige, dass deine Messwerte näherungsweise dem obigen Zusammenhang genügen und bestimme die Zeitkonstante τ der Abkühlung in deinem Experiment
- 4.c) Schätze mit Hilfe der Zeitkonstante ab, wie lange es ungefähr dauert, bis kochendes Wasser für die Zubereitung von grünem Tee auf eine Temperatur von 70 °C in deiner Kanne oder deinem Becher abgekühlt ist. Begründe, warum zu erwarten ist, dass dein Ergebnis nicht sehr genau ist und das Wasser tatsächlich schneller abkühlt.

*Die Herleitung ist hier nicht gefordert - probiere es aber gerne einmal aus.

Lösung

- 4.a) Für das Experiment wird die oben gezeigte Teekanne mit heißem Wasser gefüllt und ohne Deckel zum Abkühlen stehen gelassen. In regelmäßigen Abständen wird die Temperatur des Wassers mit einem Stabthermometer gemessen. Um eine möglichst gleichmäßige Temperatur im Wasser zu erreichen, wird das Wasser während des Abkühlens häufiger umgerührt. Die Zimmertemperatur bei dem Versuch beträgt $\vartheta_u = (22,0 \pm 0,2)^\circ\text{C}$ und variiert während der Durchführung nur um ein bis zwei Zehntelgrad.

Die folgende Tabelle stellt die gemessenen Werte für die Temperatur ϑ des Wassers für verschiedene Zeiten t dar. Ebenfalls eingetragen sind die Differenz $\Delta\vartheta = \vartheta - \vartheta_U$ zwischen der Wasser- und der Umgebungstemperatur sowie der Logarithmus dieser Differenz (für die spätere Auswertung). Die Ablesegenauigkeit bei der Messung der Temperatur beträgt etwa $0,2^\circ\text{C}$.

Zeit t/min	Temperatur $\vartheta/^\circ\text{C}$	Temperatur- differenz $\Delta\vartheta/^\circ\text{C}$	$\ln(\Delta\vartheta/^\circ\text{C})$	Zeit t/min	Temperatur $\vartheta/^\circ\text{C}$	Temperatur- differenz $\Delta\vartheta/^\circ\text{C}$	$\ln(\Delta\vartheta/^\circ\text{C})$
0,0	45,8	23,8	3,17	50,0	34,1	12,1	2,49
5,0	44,0	22,0	3,09	55,0	33,3	11,3	2,42
10,0	42,2	20,2	3,01	60,0	32,9	10,9	2,39
15,0	41,0	19,0	2,94	70,0	31,6	9,6	2,26
20,0	39,9	17,9	2,88	80,0	30,5	8,5	2,14
25,0	38,8	16,8	2,82	90,0	29,7	7,7	2,04
30,0	37,6	15,6	2,75	100,0	28,8	6,8	1,92
35,0	36,6	14,6	2,68	110,0	28,0	6,0	1,79
40,0	35,8	13,8	2,62	120,0	27,2	5,2	1,65
45,0	35,0	13,0	2,56	130,0	26,8	4,8	1,57

- 4.b) Um zu erkennen, ob die Messwerte gut zu dem gegebenen theoretischen Zusammenhang passen, bietet sich eine Linearisierung des Zusammenhangs an. Durch Logarithmieren auf beiden Seiten ergibt sich

$$\ln\left(\frac{\vartheta(t) - \vartheta_U}{^\circ\text{C}}\right) = \ln\left(\frac{\vartheta_0 - \vartheta_U}{^\circ\text{C}}\right) - \frac{1}{\tau} t. \quad (4.1)$$

Wenn der Zusammenhang erfüllt ist, müssen die Messwerte gemäß (4.1) auf einer Geraden liegen. Die Steigung der Geraden entspricht dann der inversen Zeitkonstante der Abkühlung.

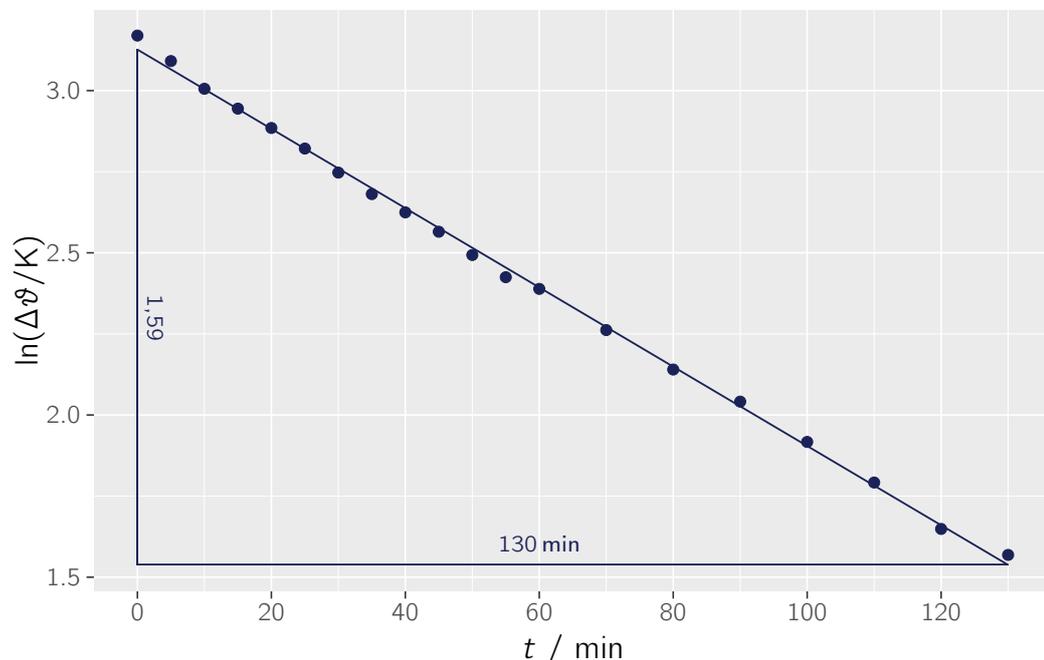


Abb. 10. Graph des Logarithmus der Temperaturdifferenz zur Umgebungstemperatur über der Zeit. Die Unsicherheiten sind sehr gering und wurden daher nicht mit eingezeichnet.

In Abbildung 10 ist der Logarithmus der aus den Messungen bestimmten Temperaturdifferenz zur Umgebungstemperatur über der Zeit aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass die Messwerte sehr gut zu einem linearen Verlauf des Graphen passen.

Die Zeitkonstante der Abkühlung ergibt sich aus dem Steigungsdreieck der eingezeichneten Ausgleichsgeraden zu

$$\tau = \frac{130 \text{ min}}{1,59} \approx 81,8 \text{ min} \approx 4,91 \cdot 10^3 \text{ s} . \quad (4.2)$$

Hinweis: Die Zeitkonstante ist abhängig von der Geometrie der Anordnung, von dem Material, aus dem das Gefäß besteht, und den Umgebungsbedingungen. Daher ist zu erwarten, dass die Werte der Teilnehmenden sehr unterschiedlich sind.

- 4.c) Mit Hilfe von (4.1) und dem Wert der Zeitkonstanten lässt sich die Zeit t abschätzen, die das Wasser benötigt, um von $\vartheta_0 = 100^\circ\text{C}$ auf $\vartheta = 70^\circ\text{C}$ abzukühlen. Es ergibt sich:

$$t = \tau \cdot (\ln(\vartheta_0 - \vartheta_U) - \ln(\vartheta(t) - \vartheta_U)) = \tau \cdot \ln \frac{\vartheta_0 - \vartheta_U}{\vartheta(t) - \vartheta_U} \approx 39,7 \text{ min} . \quad (4.3)$$

Tatsächlich ist zu erwarten, dass das Wasser bei diesen Temperaturen schneller abkühlt. Das Newtonsche Abkühlungsgesetz stellt nur eine Näherung dar. Bei höheren Temperaturdifferenzen muss dieses unter anderem um Abstrahlungseffekte modifiziert werden, die zu einer Erhöhung der abgegebenen Leistung führen. Zum anderen verdampft ein Teil des Wasser und entzieht dem Wasser so Energie.

Bewertung - Eine Frage der Temperatur		Punkte
4.a)	Beschreiben des verwendeten Versuchsaufbaus	1.0
	Angeben der Zimmertemperatur	0.5
	Aufnahmen von Messwerten für Wassertemperatur als Funktion der Zeit	2.0
	Messwerte zu mindestens 7 Zeiten (noch 1.0 P. bei 5-6 Messwerten)	0.5
	mind. ein Messwert für Temperatur $\geq 40^\circ\text{C}$	0.5
	mind. ein Messwert für Temperatur $\leq 30^\circ\text{C}$	0.5
4.b)	Formulieren einer Idee zur Prüfung der Passung zwischen Theorie und Experiment (z. B. Linearisieren und Prüfen auf Linearität)	1.5
	Zeigen, dass Messwerte zu Zusammenhang passen (z. B. graphisch)	1.0
	Bestimmen der Zeitkonstanten τ für Abkühlung	1.0
4.c)	Abschätzen der Abkühlzeit (4.3) mit Hilfe der Zeitkonstanten	1.0
	Angeben mind. einer Begründung für ein real schnelleres Abkühlen	1.0
		10.0

Hinweise: In Aufgabenteil 4.b) können neben der Linearisierung auch andere Wege zur Lösung gewählt werden. Dies sollte bei korrekter Durchführung und plausiblen Ergebnissen ebenfalls eine volle Punktzahl ermöglichen.

Aufgabe 5 Junioraufgabe: Alles im Gleichgewicht
(10 Pkt.)

Für ein Mobile werden fünf Windglöckchen, wie in der Abbildung dargestellt, aufgehängt. Die Gesamtmasse aller Glöckchen zusammen beträgt 1,00 kg. Die Massen der Stangen und Fäden des Mobiles können vernachlässigt werden.

Bestimme, welche Massen m_1 bis m_5 die einzelnen Glöckchen besitzen müssen, damit das Mobile im Gleichgewicht ist.

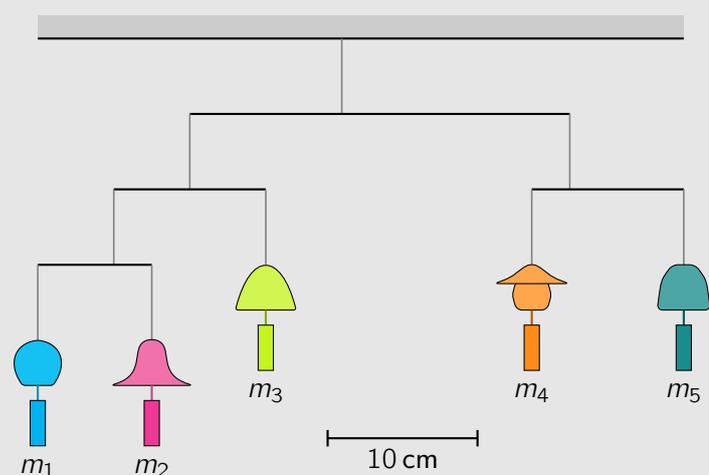


Abb. 11. Maßstabsgetreue Skizze des Mobile.

Lösung

Damit das Mobile im Gleichgewicht ist, muss für jede der Stangen das Drehmoment bezüglich des jeweiligen Aufhängepunktes gleich Null sein. Da die Stangen alle waagrecht orientiert sind und die Gewichtskräfte senkrecht nach unten wirken, lässt sich dies auch so formulieren, dass das Produkt aus Gewichtskraft bzw. Masse und Abstand vom Aufhängepunkt für jede Stange auf beiden Seiten der Aufhängung gleich sein muss.

Der Aufhängepunkt der oberen Stange befindet sich, von links gemessen, bei etwa $2/5$ ihrer Länge. Daher muss für die Massen auf den beiden Seiten der oberen Aufhängung gelten:

$$\frac{2}{5} (m_1 + m_2 + m_3) = \frac{3}{5} (m_4 + m_5) . \quad (5.1)$$

Da die Summe der fünf Massen $M := 1,00 \text{ kg}$ sein soll, ist $m_4 + m_5 = M - (m_1 + m_2 + m_3)$ und damit folgt aus (5.1) für die Summe der Massen auf den beiden Seiten:

$$m_1 + m_2 + m_3 = \frac{3}{5} M = 600 \text{ g} \quad \text{sowie} \quad m_4 + m_5 = \frac{2}{5} M = 400 \text{ g} . \quad (5.2)$$

Die auf der linken Seite direkt darunter hängende Stange wird durch ihre Aufhängung in der Mitte geteilt, so dass sich die in (5.2) bestimmte Masse gleichmäßig auf die beiden Seiten verteilt. Damit ist

$$m_3 = \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{5} M = \frac{3}{10} M = 300 \text{ g} . \quad (5.3)$$

Die links darunter hängende Stange wird durch ihre Aufhängung im Verhältnis 2 zu 1 geteilt. Die Massen verteilen sich genau invers dazu, so dass sich

$$m_1 = \frac{1}{3} \cdot \frac{3}{10} M = 100 \text{ g} \quad \text{und} \quad m_2 = \frac{2}{3} \cdot \frac{3}{10} M = 200 \text{ g} \quad (5.4)$$

für die Massen ergeben.

Die Summe der Massen m_4 und m_5 beträgt mit (5.2) etwa 400 g. Die Stange, an der die Massen m_4 und m_5 hängen, ist, ebenfalls von links gemessen, bei etwa $1/4$ ihrer Länge aufgehängt, so dass m_4 drei Mal so groß wie die Masse m_5 sein muss. Damit ergeben sich für die Massen

$$m_4 = \frac{3}{4} \cdot \frac{2}{5} M = 300 \text{ g} \quad \text{und} \quad m_5 = \frac{1}{4} \cdot \frac{2}{5} M = 100 \text{ g} . \quad (5.5)$$

Bewertung - Junioraufgabe: Alles im Gleichgewicht		Punkte
5	Idee für Nutzen des Drehmomentgleichgewichtes bzw. Hebelgesetzes	2.0
	Bestimmen der Längenverhältnisse für Stangenabschnitte oder der absoluten Längen auf beiden Seiten der Aufhängepunkte aus Abbildung	2.0
	Bestimmen der Summe der Massen m_1 , m_2 und m_3 bzw. m_4 und m_5	1.0
	Bestimmen der Summe der Massen m_1 und m_2	1.0
	Bestimmen der Massen m_1 bis m_5	4.0
		10.0

Bewertungsbogen für die 1. Runde zur 53. IPhO 2023

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

Von der korrigierenden Lehrkraft auszufüllen und bis spätestens zum 29. September 2022 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 Irgendwie verschoben	10	
2 Das Tōhoku-Erdbeben	10	
3 Fliegender Schläger	10	
4 Eine Frage der Temperatur	10	

Bonuspunkte für jüngere Teilnehmende

5 Junioraufgabe: Alles im Gleichgewicht	10	
	40 (+10)	

Kommentare und Anregungen:

Unterschrift: _____